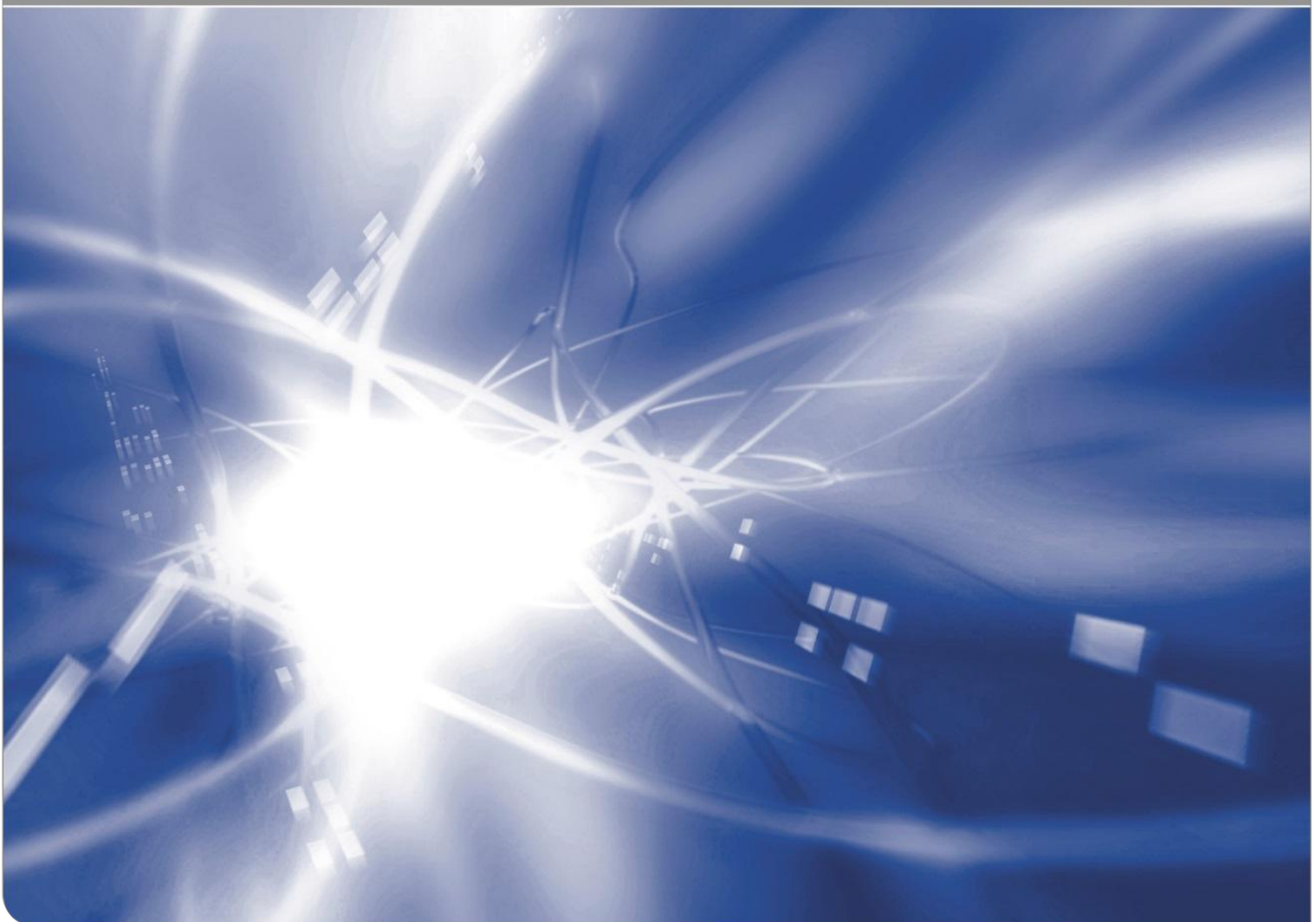


Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch intelligente Demontage und Nachverfolgung

Abschlussbericht ZirkulEA 02J21E139

von Tobias Lachnit, Julia Dvorak, Sven Birkenfeld, Linda Sagnier
Eckert, Florian Richter, Lars Schaupeter, Ann-Sophie Finner,
Oliver Wisser, Hansjörg Tutsch, Daniel Heinz, Martin Benfer,
Matthias Vette-Steinkamp, Gisela Lanza

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 273



Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2026

ISSN: 2194-1629



ZirkulEA

F&E Abschlussbericht des Forschungsprojekts

Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch
intelligente Demontage und Nachverfolgung
(ZirkulEA)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Betreut vom:



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Förderkennzeichen und Projektpartner

- 02J21E130 Karlsruher Institut für Technologie – KIT - KSRI – Karlsruhe Digital Service Research & Innovation Hub & wbk Institut für Produktionstechnik
- 02J21E131 Hochschule Trier - Umwelt-Campus Birkenfeld
- 02J21E132 ZF Friedrichshafen AG
- 02J21E133 Ford-Werke GmbH
- 02J21E134 Vogtmann-Herold+Co.GmbH
- 02J21E135 Optimum datamanagement solutions GmbH
- 02J21E136 flexis AG / flexis GmbH
- 02J21E137 DEPRAG SCHULZ GmbH u. Co. KG
- 02J21E138 GreenIng GmbH & Co. KG
- 02J21E139 Technische Universität Clausthal - Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC)

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen 02J21E139) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2022 - 31.12.2025

Datum der Veröffentlichung

28.05.2026

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Einleitung	9
Motivation.....	10
Motivation für wirtschaftliche und kreisläufige Wertschöpfungskette.....	11
Motivation für umfassenden unternehmensübergreifenden Informationsaustausch	11
Motivation für die Entwicklung von Demonstratoren	12
Methoden	13
Anforderungen und demontagegerechte Gestaltung der Komponenten in einem Anforderungskatalog.....	13
Systemgestaltung: Anforderungen an Assistenzsysteme und Mensch-Technik-Interaktion.....	15
Anforderungsanalyse	17
Steuerung von Wertschöpfungsketten	19
Simulation zirkulärer Wertschöpfungsketten.....	24
Informationsbereitstellung	25
Ergebnisse und Anwendung	30
Demonstratoren	30
Arbeitsplätze (automatisiert und manuell).....	30
Werkzeug und technische Entwicklung	41
Aufbau WEAS zur Informationsbereitstellung + humanzentriert	45
Kreislauffähiges Partnerökosystem	56
Die Ökosystemperspektive als Grundlage für Datenökosysteme in der Kreislaufwirtschaft	57
Zentrale Elemente zirkulärer Ökosysteme und Anforderungen an das Partnerökosystem	57
Rolle von Daten und Informationsaustausch in der Kreislaufwirtschaft	59
Restriktionen und Barrieren für den Informationsaustausch	59
Experteninterviews mit ZirkulEA-Partnern.....	60
Konsolidierung zum Anforderungskatalog	61
Traceability-Systeme als Enabler zirkulärer Strategien.....	65
Digitale industrielle Plattformen und Data Spaces als Infrastruktur für Traceability	65

Steckbrief zur technischen Umsetzbarkeit einer Traceability-Lösung.....	67
Austausch mit bestehenden Initiativen und Workshopteilnahme	68
Leitlinien für die Gestaltung zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke	88
Zusammenfassung und Ausblick.....	96
Literaturverzeichnis	98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur und Betrachtungsebenen des Forschungsprojekts ZirkulEA.....	9
Abbildung 2: Übersicht der Relevanzbewertung der Herausforderungen (Dvorak et al., 2024a).....	10
Abbildung 3: Konzeptioneller Ansatz für das demontagegerechte Design von EV-Komponenten	14
Abbildung 4: Demontagegraph für die Demontage der E-Antriebsachse (Use Case 3)..	15
Abbildung 5: Diagramm mit zugrundeliegender Prozessstruktur.....	19
Abbildung 6: Vorgehensweise zur Methodenentwicklung (Dvorak et al., 2024b).....	20
Abbildung 7: Entscheidungsbäume und deren Hierarchie (Dvorak et al., 2024b)	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Simulationsszenarien mit variierten Eingangsgrößen und Strategieparametern	23
Abbildung 9: Übersicht der drei Anwendungsfälle (Use Case1-3) im Projekt ZirkulEA ...	30
Abbildung 10: Aufbau der Batteriedemontage	31
Abbildung 11: Prozessmodul für Entschrauben ausgewählter Verbindungselemente des Ford Mach E-Akkus.....	32
Abbildung 12: Aufbau des Schraubmoduls.....	33
Abbildung 13: Aufnahmen der Entschraubmodule	33
Abbildung 14: Aufbau des Demonstrators mit Kinematikeinheit (oben: Demonstrator-Arbeitsplatz, unten: Akku-Modell mit allen unterschiedlichen Verbindungselementen)	34
Abbildung 15: Abbild der zu entschraubenden Verbindungen	35
Abbildung 16: Visualisierung der verschiedenen Schraubstellen (von rechts nach links: Deckelschrauben, Schrauben Leistungselektronik, Busbarschrauben, Schrauben der Modulhalteklammern, Modulschrauben)	35
Abbildung 17: Aufbau der automatisierten und manuellen Demontage der E-Achse....	37
Abbildung 18: Ausschnitt der Demontageabfolge für das hybride Demontagekonzept zur Parallelisierung der Prozesse in werker- und roboterseitige Arbeitsplätze. Bauteilverknüpfungen wurden aus dem Demontagevorranggraph erhalten.....	39
Abbildung 19: A: Demontagezelle mit drei Stationen für das Hauptgehäuse und das Getriebe (1), die Leistungselektronik (2) sowie eine spezielle Demontagestation für die Entnahme von Rotor und Stator (3). B: E- Antriebsaggregate und die drei Hauptbaugruppen.	40
Abbildung 20: Schematischer Aufbau der Demontagezelle mit ihren zentralen Systemen „Prozessleitsystem“ und „Datenbank“ sowie den peripheren Teilsystemen.	41
Abbildung 21: Sicherungsring auf der Rotorwelle (links) und einzeln dargestellt (Mitte links). Mitte rechts: Werkzeug zum Lösen und Entfernen des Sicherungsringes, welcher in die Nut (roter Pfeil), eingepresst und abgeführt wird. Rechts: Hilfswerkzeug zum Drehen des Rotors, um die Position der Öffnung des Sicherungsringes in eine vorher definierte Lage zu realisieren.....	42

<i>Abbildung 22: Magnetgreifer (links) zur Entnahme von Anlaufscheibe und Lagerschale (rechts).....</i>	43
<i>Abbildung 23: A (links) Illustration der Kameraausrichtung zum Basis-koordinatensystem, welches durch drei Punkte definiert ist. B (rechts) Illustration der Transformation vom CAD- zum Roboterkoordinatensystem sowie der beiden Rotationsbewegungen des Aggregats auf dem Positionierer</i>	44
Abbildung 24: Teil der graphischen Oberfläche bei einer Demontageprüfung durch den schlauen Klaus: Links die Bilder zu den Prüfschritten und rechts ein Ausschnitt des Prüfplans mit zwei Prüfungen.	46
Abbildung 25: imk/wbk: Darstellung der Ergebnisse aus AP2.4 (ema Work Designer Software, 2026)	46
Abbildung 26: Vorgehensmodell zur Datenbedarfserhebung.....	48
Abbildung 27: Schritt A-1 Ökosystemlandkarte des ZirkulEA Projekts	49
Abbildung 28: Schritt A-2 KPIs zur Messung der Zirkularität und Wirtschaftlichkeit	49
Abbildung 29: Schritt A-3 Lebenszyklusanalyse	50
Abbildung 30: Szenarienentwicklung – Ökosystementwicklung entlang der Kreislaufwirtschaftsstrategien.....	51
<i>Abbildung 31: Zentralisiertes Data Sharing Modell</i>	52
Abbildung 32: Föderiertes Data Sharing Modell.....	52
Abbildung 33: OEM-zentriertes Data Sharing Modell	52
Abbildung 34: 35RCAI Ansatz in Anlehnung an Sheehan	56
Abbildung 36: Ausschnitt der Informationsmatrix	56
Abbildung 37: Aufbau eines Data Space.....	67
Abbildung 38: Aktuelle Data Space Initiativen	67
Abbildung 39: Auszug Steckbrief technische Umsetzbarkeit einer Traceability Lösung. 68	
Abbildung 40: Sechs zentrale Anforderungsbereiche für digitale Plattformen in der Kreislaufwirtschaft in Anlehnung an (Heinz et al., 2024).	70
Abbildung 41: Ausschnitt des DataSpace Interfaces	75
Abbildung 42: Kunden.....	78
Abbildung 43: Produkte bzw. Cores.....	79
<i>Abbildung 44: Task-Typen</i>	79
Abbildung 45: Standorte	80
<i>Abbildung 46: Ressourcen bzw. Maschinen</i>	80
<i>Abbildung 47: Fähigkeiten der Ressourcen</i>	81
<i>Abbildung 48: Rüstzeiten in Abhängigkeit von Task-Übergängen.....</i>	81
Abbildung 49: Übergangszeiten	81
Abbildung 50: Aufträge.....	82
Abbildung 51: Solver-Start mit Datenimport	83
Abbildung 52: Gantt als Ergebnis für die Maschinenbelegung	84
Abbildung 53: Mouseover im Gantt	85
Abbildung 54: Export des Schedules als Tabelle.....	85

Abbildung 55: Gemeinsame Datennutzung von Ereignisdiskreter Simulation und Planung	86
Abbildung 56: Modellierung des Demontageprozesses mit ema Work Designer (Dvorak et al., 2025)	86
Abbildung 57: Graphenbasierte Darstellung des Demontage-Prozessmodells mit hierarchischer Verbindungsstruktur (Dvorak et al., 2025).....	87
Abbildung 58: Systematisierung von Anreiz- und Geschäftsmodellmechanismen für Datenaustausch entlang der Business-Model-Dimensionen	93
Abbildung 59: Handlungsempfehlungen zur Integration von Datenaustausch in kreislauforientierte Geschäftsmodelle.....	94
Abbildung 60: Drei-Ebenen-Framework zur Gestaltung von Datenaustausch in kreislauforientierten Wertschöpfungsnetzwerken.....	95
Abbildung 61: <i>Toolbox zur Operationalisierung von Datenaustausch auf Makro-, Meso- und Mikro-Ebene</i>	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der identifizierten Anforderungscluster und Anforderungen	18
Tabelle 2: Ergebnisse der Validierung	36
Tabelle 3: Triangulierte Datenbedarfe	53
Tabelle 4: Datenprodukte	54
Tabelle 5: Anforderungskatalog mit 46 Einzelanforderungen (Heinz et al., 2024)	64

Einleitung

Das Forschungsprojekt ZirkulEA adressierte die Frage, wie die Kreislauffähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs durch intelligente Demontage, geeignete Planungs- und Steuerungsansätze sowie eine verbesserte Nachverfolgung von Produkten und Komponenten erhöht werden kann. Ausgangspunkt des Vorhabens war die Beobachtung, dass die Transformation zur Elektromobilität nicht nur neue Produkte und Wertschöpfungsstrukturen hervorbringt, sondern zugleich neue Anforderungen an den Umgang mit Ressourcen, Rückläufern und Informationen stellt. Insbesondere Batterie und E-Achse weisen aufgrund ihres hohen Materialwerts, ihrer technischen Komplexität und ihrer Bedeutung für die zukünftige Mobilität ein hohes Potenzial für zirkuläre Wertschöpfung auf. Gleichzeitig bestehen erhebliche Herausforderungen hinsichtlich Produktheterogenität, Demontierbarkeit, Prozesssicherheit, wirtschaftlicher Planung und organisationsübergreifender Zusammenarbeit. Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt einen ganzheitlichen Ansatz, der Produkt, Prozess und Ökosystem gemeinsam betrachtet. Im Rahmen des Vorhabens wurden Anforderungen an kreislaufgerechte Komponenten und Demontageprozesse untersucht, Assistenz- und Automatisierungslösungen für die praktische Umsetzung entwickelt sowie Methoden zur Planung, Steuerung und zum Informationsaustausch in zirkulären Wertschöpfungsnetzwerken erarbeitet. Ergänzt wurde dies durch die prototypische Umsetzung und Validierung an konkreten Anwendungsfällen des elektrischen Antriebsstrangs. Ziel war es, übertragbare Gestaltungsgrundlagen zu schaffen, die Unternehmen dabei unterstützen, zirkuläre Wertschöpfungs-systeme technisch, organisatorisch und wirtschaftlich fundiert aufzubauen.

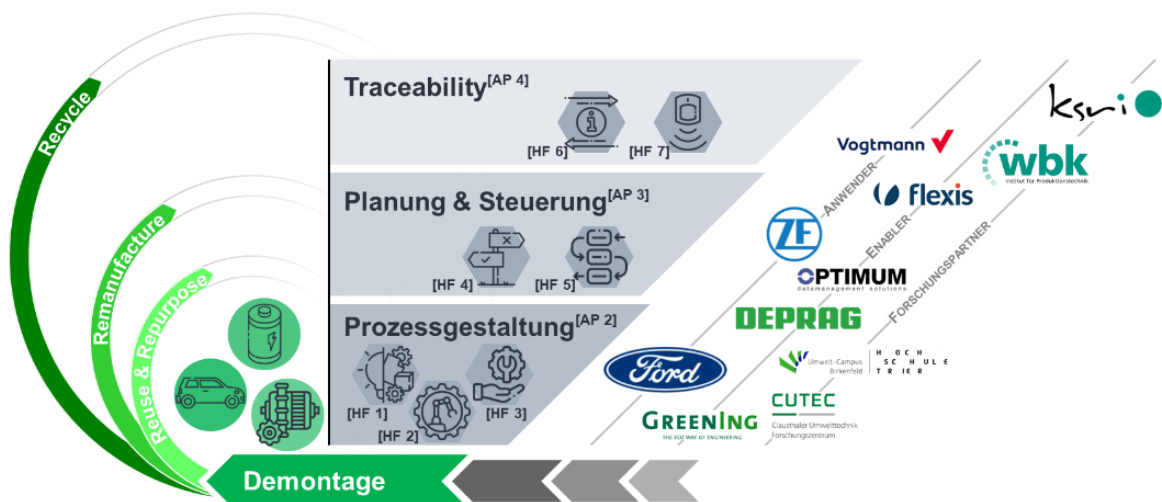


Abbildung 1: Struktur und Betrachtungsebenen des Forschungsprojekts ZirkulEA

Motivation

Die zunehmende Bedeutung der Kreislaufwirtschaft erfordert ein Umdenken in der industriellen Wertschöpfung. Ziel ist es, Produkte, Komponenten und Materialien nicht nur effizient herzustellen und zu nutzen, sondern sie auch nach dem Ende der ersten Nutzungsphase möglichst hochwertig zurückzuführen. Gerade für den elektrischen Antriebsstrang ergeben sich daraus große Potenziale, aber auch neue Anforderungen an Produktgestaltung, Demontage, Informationsbereitstellung sowie die Planung und Steuerung von Prozessen und Netzwerken. Vor diesem Hintergrund untersucht das Vorhaben, wie zirkuläre Wertschöpfungssysteme technisch, organisatorisch und wirtschaftlich gestaltet werden können, um eine industrielle Umsetzung zu ermöglichen.



Abbildung 2: Übersicht der Relevanzbewertung der Herausforderungen (Dvorak et al., 2024a)

Die relevanten Anforderungen und Herausforderungen bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Umfeld der Planung und Steuerung wurden durch qualitative Experteninterviews, eine Expertenumfrage sowie eine Expertendiskussion systematisch bewertet. Diese Herausforderung sowie die von den Experten abgeleiteten Lösungsansätze wurden entsprechend der Betrachtungsebene eines unternehmensübergreifenden Produktionsnetzwerks und der beteiligten Akteure hinsichtlich ihrer Relevanz eingeordnet. Als zentrale Herausforderungen identifizierten die Experten insbesondere das fehlende Design-for-Remanufacturing, die mangelnde Prozessautomatisierung, schwankende Profitabilität und die Unsicherheit über die Qualität der Rückläufer sowie deren Menge und den Zeitpunkt, an dem sie zum Remanufacturing zur Verfügung stehen. Allgemein bewerteten die Akteure ihre eigenen Herausforderungen im Durchschnitt um 7% geringer als die des Gesamtnetzwerks. Dies könnte darauf hindeuten, dass Akteure externe Herausforderungen überschätzen und die eigene Lösungsfähigkeit unterschätzen, oder dass nicht betrachtete Akteure stärker betroffen sein könnten.

Auf Basis dieser Analyse ließen sich 62 strategische, taktische und operative Lösungsansätze ableiten, um die relevantesten Herausforderungen zu überwinden. Strategisch sollten lokale Wertschöpfungsketten und Reverse-Logistik-Netzwerke gestärkt sowie Design-for-Remanufacturing konsequent in der Produktentwicklung eingesetzt werden. Taktisch müssen Automatisierung und IT-Systeme ausgebaut werden und Kooperation zwischen Akteuren gestärkt werden. Operativ sind Traceability und Szenarioplanung erforderlich und politisch müssen Standards harmonisiert werden und regulatorische Barrieren abgebaut werden. Insgesamt besitzen 61% der Herausforderungen mindestens einen sehr sinnvollen Lösungsansatz, und für sämtliche Herausforderungen wurde mindestens ein Lösungsansatz mit einer Relevanz von „eher relevant“ oder höher identifiziert.

Motivation für wirtschaftliche und kreisläufige Wertschöpfungskette

Im Rahmen des Vorhabens wird die Transformation von linearen zu zirkulären Wertschöpfungssystemen als zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige und zugleich wirtschaftlich tragfähige industrielle Produktion adressiert. Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, dass steigende Rohstoffknappheit, zunehmende regulatorische Anforderungen sowie geopolitische Unsicherheiten eine Neubewertung bestehender Wertschöpfungsstrukturen erfordern. Zirkuläre Wertschöpfungssysteme bieten das Potenzial, Materialkreisläufe zu schließen, die Abhängigkeit von Primärrohstoffen zu reduzieren und gleichzeitig neue wirtschaftliche Potenziale zu erschließen. Dabei kommt insbesondere der Verlängerung der Produktlebensdauer sowie der Rückführung von Komponenten und Materialien eine zentrale Bedeutung zu (Kirchherr et al., 2023). Gleichzeitig bestehen erhebliche Herausforderungen in der praktischen Umsetzung. Insbesondere Unsicherheiten hinsichtlich Menge, Zeitpunkt und Qualität von Rückläufen erschweren eine wirtschaftliche Planung und Steuerung zirkulärer Prozesse erheblich (Kurilova-Palisaitiene et al., 2018). Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt einen integrierten Ansatz, der die Entwicklung datenbasierter Methoden zur Entscheidungsunterstützung, Planung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungssysteme umfasst. Ziel ist es, sowohl ökologische als auch ökonomische Zielgrößen systematisch zu berücksichtigen und damit eine fundierte Grundlage für die industrielle Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu schaffen.

Motivation für umfassenden unternehmensübergreifenden

Informationsaustausch

Ein wirtschaftlich tragfähiges Remanufacturing und die Umsetzung zirkulärer Strategien setzen voraus, dass Akteure entlang des Lebenszyklus entscheidungsrelevante Informationen zeitgerecht, standardisiert und sicher austauschen. Ohne einen reibungslosen und vertrauensvollen Daten- und Informationsaustausch lassen sich Transparenz und geschlossene Materialkreisläufe praktisch nicht realisieren; zudem drohen Inzellösungen und erhöhte Komplexität. Der Handlungsdruck wird durch

regulatorische Anforderungen weiter verstärkt. Insbesondere die verpflichtende Einführung des Batteriepasses ab 2027 setzt neue Standards für die Nachverfolgbarkeit und erfordert Investitionen in digitale Infrastrukturen und interoperable Informationsbereitstellung.

Das KSRI adressiert diese Herausforderung mit einem ganzheitlichen Konzept für einen souveränen, standardisierten und sicheren Datenaustausch. Grundlage ist die Strukturierung der für Kreislaufentscheidungen notwendigen Informationen in Datenbedarfe und Datenprodukte sowie die eindeutige Zuordnung von Rollen und Verantwortlichkeiten im Netzwerk. Dieses Verständnis wird mit geeigneten Infrastrukturansätzen (insbesondere Data Spaces) verknüpft, da Data Spaces Datensouveränität, dezentrale Datenhaltung, semantische Interoperabilität sowie granulare Rechte- und Zugriffskontrolle technisch und organisatorisch unterstützen.

Neben der technischen Machbarkeit ist die Teilnahmefähigkeit des Partnernetzwerks entscheidend. Datenökosysteme in zirkulären Wertschöpfungsnetzen erfordern Bereitschaft zur Teilnahme und zum Datenaustausch, Mechanismen für gemeinsame Planung und Entscheidungsfindung, Vertrauen sowie eine faire Verteilung des gemeinsam geschaffenen Wertes; häufig wird zudem eine koordinierende Rolle als förderlicher Rahmen beschrieben. Deshalb sind klare Nutzungsregeln, abgestufte Informationsfreigaben und Governance-Mechanismen zentrale Voraussetzungen, um Schutzinteressen und Wettbewerbsaspekte angemessen zu berücksichtigen.

Motivation für die Entwicklung von Demonstratoren

Der Aufbau von Demonstratoren war im Vorhaben erforderlich, um die entwickelten Konzepte nicht nur theoretisch abzuleiten, sondern unter realitätsnahen Bedingungen an konkreten Anwendungsfällen zu überprüfen. Mit der Batterie und der E-Achse wurden zwei relevante Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs ausgewählt, die sowohl hohe Wertpotenziale als auch erhebliche technische Herausforderungen für Demontage, Informationsbereitstellung und Rückführung aufweisen. Über die Demontage der Komponenten hinaus kann auch die Entnahme dieser aus dem Fahrzeug als UC betrachtet werden.

Die Demonstratoren dienen damit als exemplarische Use Cases, an denen sich Gestaltungsregeln für zukünftige industrielle Anwendungen systematisch ableiten lassen. Zugleich ermöglichen die Demonstratoren die Untersuchung skalierbarer Automatisierungslösungen und der geeigneten Aufgabenteilung zwischen manuellen und automatisierten Prozessschritten. Dadurch wird sichtbar, welche Prozessmodule robust automatisierbar sind, an welchen Stellen Werkerassistenz einen hohen Mehrwert bietet und welche Anforderungen an Sicherheit, Prozessführung und Informationssysteme gestellt werden müssen. Die Ergebnisse aus den Demonstratoren schaffen somit eine belastbare Grundlage für die Übertragbarkeit auf weitere Produkte, Varianten und

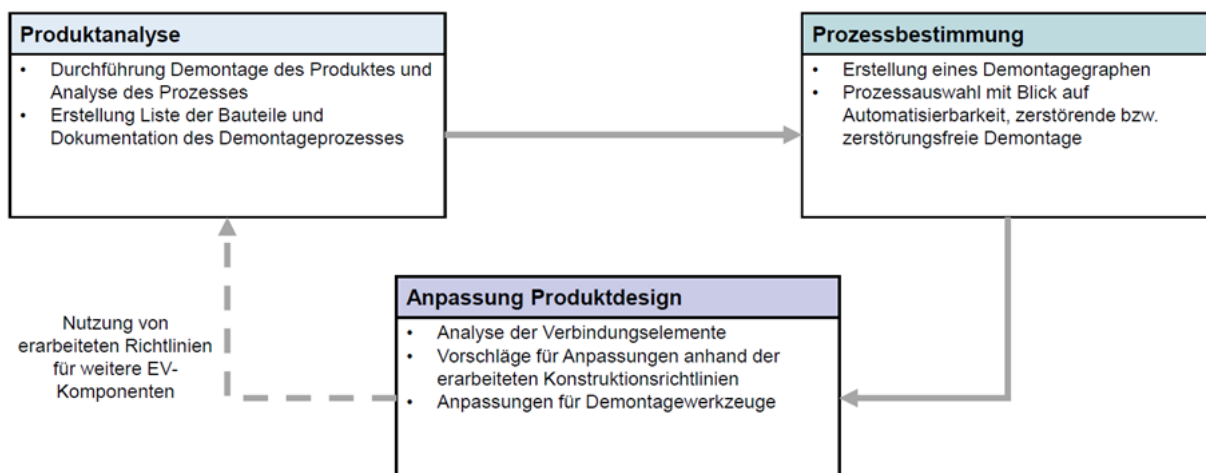
Unternehmenskontexte und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Industrialisierung zirkulärer Wertschöpfung.

Methoden

Die beschriebenen Methoden sind als konzeptionelle Ansätze zu verstehen, welche auf die späteren konkreten Ergebnisse hinführen. Ein zentraler Beitrag des Vorhabens liegt in der Entwicklung methodischer Ansätze zur systematischen Auswahl und Bewertung von Kreislaufstrategien. Dabei werden sowohl strategische als auch operative Entscheidungsprozesse adressiert, um für unterschiedliche Produkte und deren Zustände geeignete Maßnahmen wie Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing oder Recycling abzuleiten. Hierzu wurden umfassende Einflussfaktoren identifiziert und strukturiert, die die Auswahl geeigneter Kreislaufstrategien bestimmen. Diese umfassen technische, ökonomische, ökologische sowie regulatorische Aspekte und werden in Entscheidungslogiken integriert, die eine transparente und nachvollziehbare Bewertung ermöglichen. Ergänzend werden simulative Ansätze entwickelt, mit denen unterschiedliche Szenarien zirkulärer Wertschöpfung analysiert werden können. Dies umfasst insbesondere die Bewertung von Rücklaufunsicherheiten, Informationsverfügbarkeit sowie unterschiedlichen Systemauslegungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Kosten, Durchlaufzeiten und Ressourceneinsatz.

Anforderungen und demontagegerechte Gestaltung der Komponenten in einem Anforderungskatalog

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ZirkulEA wurde ein konzeptioneller Ansatz erarbeitet, welcher die Anforderungen an das demontagegerechte Design von EV-Komponenten berücksichtigt. Dieser besteht aus den drei Prozesshauptbausteinen Produktanalyse, Prozessbestimmung und Produktdesignanpassung und wurde in ZirkulEA für alle drei Use Cases exemplarisch angewendet. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.



Produktanalyse

Im ersten Schritt der Produktanalyse fand die Demontage des Produkts sowie die Prozessanalyse statt. Zunächst erfolgte die Demontage der EV-Komponenten aus dem Gesamtfahrzeug (Use Case 1). Dies beinhaltete weitestgehend Tätigkeiten am Fahrzeugunterboden sowie im Fahrzeuginnenbereich. Dabei wurden die einzelnen Demontageschritte entsprechend der Demontagerihenfolge dokumentiert sowie die Dauer der einzelnen Arbeitsschritte erfasst. Anschließend wurden die EV-Komponenten HV-Batterie (Use Case 2) und E-Antriebsachse (Use Case 3) weiter demontiert. Der Batteriedemontage vorgelagert fand eine Eingangsprüfung zur Zell- sowie Modulzustandsbeurteilung statt, welche eine wichtige Grundlage für die Auswahl der geeignetsten CE-Strategie darstellt. Diese wirkt sich stark auf die Entscheidung aus, ob die Batterie anschließend zerstörend mit dem Vorteil der zeitlichen Effizienz oder nicht-zerstörend mit dem Vorteil einer hohen Bauteilwiederverwendungsquote demontiert wird. Die anschließende Demontage der HV-Batterie fand bis auf Modulebene statt. Eine der wesentlichen Herausforderungen dieses Use Cases stellte das Handling der schweren Batteriemodule dar. Die E-Antriebsachse wurde bei der Demontage bis auf Komponentenebene zerlegt. Die größte Herausforderung dabei war ebenfalls die Demontage großer und schwerer Bauteile, wie zum Beispiel des Elektromotors.

Die Demontageversuche ermöglichten eine ausführliche Auflistung der demontierten Bauteile. Diese Auflistung beinhaltet die Verbindungsstellen zwischen den Bauteilen sowie die Werthaltigkeit der miteinander verbundenen Bauteile. Anhand der Verbindungselemente soll nun untersucht werden, welche Prozesse sich für die Demontage eignen.

Prozessbestimmung

Den zweiten Schritt des konzeptionellen Ansatzes für das demontagegerechte Design von EV-Komponenten stellt die Prozessbestimmung dar. Dabei wurden für die jeweiligen Use Cases Demontagegraphen erarbeitet, welche einerseits Aufschluss über die Demontagerihenfolge der einzelnen Komponenten als auch eine erste Einschätzung zur Automatisierbarkeit der einzelnen Demontageschritte gaben. Ein Demontageschritt repräsentiert somit das Lösen eines Verbindungselementes.

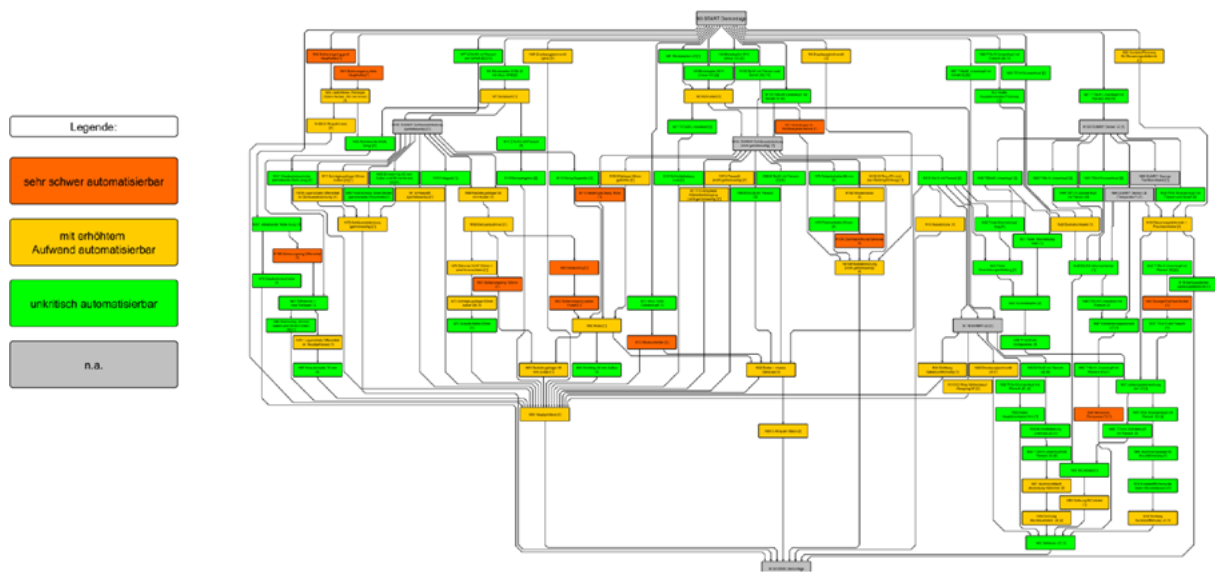


Abbildung 4: Demontagegraph für die Demontage der E-Antriebsachse (Use Case 3)

Produktdesignanpassung

Im Rahmen der Produktdesignanpassung fand im ersten Schritt die Analyse der bestehenden Verbindungselemente statt, welche dokumentiert wurden und somit die Auflistung der demontierten Bauteile erweiterte. Hierunter fielen einerseits die Dokumentation der Verbindungselemente, aber auch die verwendeten Betriebsmittel zur Demontage sowie wichtige Erkenntnisse aus der Demontage. Diese bildeten die Grundlage für Anforderungen an zukünftige Produktgenerationen, welche im nächsten Schritt in Form von Richtlinien formuliert wurden. Die Anforderungen wurden unterschieden in Konstruktionsrichtlinien, welche sich direkt auf die Produktgestaltung beziehen, in Prozessrichtlinien, welche den Demontageprozess adressieren sowie in Richtlinien für das Demontagewerkzeug, welche Anforderungen an das Demontagewerkzeug beinhalten. Diese Anforderungen, welche auf Grundlage der durchgeführten Demontageversuche der ZirkulEA-Use Cases erarbeitet wurden, bilden somit ein zentrales Grundgerüst für ein demontagerechtes Design zukünftiger EV-Komponenten.

Systemgestaltung: Anforderungen an Assistenzsysteme und Mensch-Technik-Interaktion

Ziel des Arbeitspakets AP2.4 war die systematische Erhebung und Strukturierung von Anforderungen relevanter Nutzer- und Akteursgruppen an die Interaktion mit dem im Projekt entwickelten Informationssystem (WEAS-Kontext). Hierfür wurde ein nutzerorientiertes Vorgehen nach Methoden des Design Thinkings eingesetzt, um Informationsbedarfe, Entscheidungspunkte und Interaktionsanforderungen im Demontagekontext belastbar abzuleiten.

Datengrundlage und Erhebungsmethoden. Als erste Datengrundlage wurden bestehende Demontagevideos der E-Achse sowie der Batterie ausgewertet. Ziel war die

Identifikation typischer Arbeitsabläufe, wiederkehrender Entscheidungspunkte und daraus resultierender Informationsbedarfe. Auf Basis dieser Voranalyse entwickelte das KSRI einen strukturierten Interviewleitfaden, der durch eine gezielte Literaturrecherche zu nutzerzentrierten Informationssystemen und Demontageprozessen ergänzt wurde. Zur Kontextvalidierung und zur Erfassung der realen Arbeitsumgebung erfolgte zusätzlich eine Vor-Ort-Begehung der Demontage der E-Achse bei ZF (Job-Shadowing), um menschnische Interaktionen und Rahmenbedingungen (z. B. Abläufe, Medienbrüche, situative Informationsnutzung) vertieft zu verstehen.

User-Interviews und Auswertung. Aufbauend auf den Vorarbeiten führte das KSRI fünf User-Interviews durch. Befragt wurden Werker von ZF und Ford sowie Vertreter der UCB, die aufgrund ihrer Erfahrung mit der Demontage der Mach-E-Batterie als besonders relevante Nutzende identifiziert wurden. Die Interviews wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet, um konsistente Muster, Bedarfe und Verbesserungspotenziale herauszuarbeiten und in eine strukturierte Anforderungssicht zu überführen.

Konsolidierung und Validierung. Die abgeleiteten Anforderungen wurden differenziert nach Batterie und E-Achse strukturiert und in ein erstes Anforderungstableau überführt. Diese Ergebnisse wurden im Austausch mit dem wbk validiert und präzisiert; für die Batterie wurden die Anforderungen zusätzlich in den Demontageprozess der Batterie eingebettet. Ergänzend wurden zwei Workshops mit den Forschungspartnern durchgeführt, in denen die Anforderungen hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit und Priorität diskutiert und konsolidiert wurden.

Ergebnisartefakt (Output). Ergebnis des Vorgehens ist ein finalisiertes Workflow-Modell zur Prozessgestaltung, das die ermittelten Anwenderanforderungen systematisch abbildet und als Grundlage für die weitere Konzeption der notwendigen Informationssysteme (WEAS-Kontext) dient. Das KSRI war dabei insbesondere verantwortlich für Planung und Durchführung der nutzerorientierten Untersuchungen, die qualitative Auswertung der erhobenen Daten sowie die Ableitung und Strukturierung der Anwenderanforderungen.

Zu Beginn wurde die Interaktion zwischen Mensch und Assistenzsystem in der Demontage analysiert und Anforderungen für humanzentrierte Assistenz mit Orientierung an Industrie 4.0 abgeleitet (Ngoc, 2021). Der Fokus lag auf Unterstützung statt Ersetzung, da trotz Automatisierung ein hoher manueller Anteil bestehen bleibt und komplexere Aufgaben bei Menschen liegen. Dafür muss in der Analyse der Interaktion die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine klar definiert werden und die Schnittstelle zwischen Mensch und System muss intuitiv gestaltet sein, um zielgerechte Informationsbereitstellung sicherzustellen und Überlastungen zu vermeiden. Werkzeugzugang und Arbeitsplatzgestaltung müssen ergonomisch und effizient sein und Lean-Methoden zur Prozessoptimierung einbezogen werden.

Die Einflüsse von unterschiedlichen Assistenzsystemen (AS) auf Verschwendungsarten in der Produktion wurden auf Basis bestehender Literatur analysiert. Beim Transport können digitale AS und adaptive Mensch-Roboter-Kollaboration den Such- und Wegeaufwand reduzieren (Pokorni et al., 2022; Rupp et al., 2020). Durch eine präzisere Arbeitsausführung mithilfe von AS wird erwartet, dass die Varianz der Prozesszeiten reduziert werden kann (König und Winkler, 2025), die Lernkurve durch eine schnellere Einarbeitung gesteigert wird, wodurch geringere personelle und zeitliche Sicherheitsreserven erforderlich sind (Neacșu et al., 2024). Physische AS (wie Exoskelette) reduzieren unnötige Bewegungen und belastende Körperhaltungen (Zheng et al., 2020). Adaptive Assistenzsysteme reduzieren Wartezeiten mittels dynamischer Aufgabenverteilung (Sayfeld et al., 2023). Höhere Prozesssicherheit durch AS (Keller et al., 2019) führt zu reduziertem Ausschuss und verringerter unnötiger Vorproduktion. Zudem verhindert eine klare Schritt-für-Schritt-Assistenz überflüssige Tätigkeiten und Doppelausführungen (Schuh et al., 2017).

Anforderungsanalyse

Die Grundlagen für ein humanzentriertes Werkerassistenzsystem (WEAS) wurden mit Anforderungen aus Literatur und Praxis erarbeitet und ein Stufenmodell zur Bewertung des Unterstützungsgrads entwickelt. Dabei übernimmt das WEAS die Rolle einer Schnittstelle zwischen Mitarbeitenden, Prozess, Produkt und Information. Die Anforderungen an das Mensch-Maschine Interface wurden erhoben, und beinhalten insbesondere die dynamische Bereitstellung von Information, Visualisierungen, Sicherheit und Ergonomie für Mitarbeitende und die Definition und Sicherstellung der Interaktion zwischen Mensch und System.

Ein Vorgehen für humanzentriertes Design (vgl. DIN EN ISO 9241-210) wurde definiert, in dem Assistenzsysteme so gestaltet und bewertet werden, dass die Bedürfnisse der Nutzer und die Anforderungen des Arbeitsumfelds in Betracht gezogen werden. Durch die Kombination aus technischer Funktionsanalyse und menschenzentrierter Anforderungsanalyse wurden Prinzipien der DIN EN ISO 9241 und 6385 einbezogen, wie etwa Purpose, Knowledge, Decision Making, oder Variety. Dadurch wird die Effektivität des Assistenzsystems gewährleistet und dabei Akzeptanz und Usability gefördert.

Zunächst wird das System hinsichtlich Art, Ziel und Grad in seine Hauptfunktionen gegliedert und mittels Stufenmodell nach Anforderungskriterien bewertet. Das Stufenmodell bewertet Assistenzsysteme anhand spezifischer Kriterien in drei Stufen nach ihrem Entwicklungsstand und Funktionsumfang. Parallel erfolgt eine Analyse des Arbeitsumfelds, um die Mitarbeiter- und Prozessbezogene Anforderungen zu verstehen. Beide Perspektiven werden dann abgeglichen und die Funktionen bei Abweichungen angepasst. Abschließend wird die Lösung in einer Nutzerstudie zu Akzeptanz und Usability überprüft. Durch den iterativen Prozess entsteht ein Assistenzsystem, das die technischen Anforderungen erfüllt, die Mitarbeiter sinnvoll unterstützt und von den Nutzern akzeptiert wird. Ein End-to-End-Prozessablauf in einem Demontagesystem eines

End-of-life (EoL) Produktes wurde sowohl in den vorbereitenden Schritten (Pre-Process) als auch in der tatsächlichen Durchführung (In-Process) modelliert und entsprechende Anforderungen in jedem Teil abgeleitet und in Themenfelder geclustert. Daraus wurde eine Systemarchitektur und ein Informationsflussdiagramm erstellt, in dem die Anforderungen der jeweiligen Schritte klar zu erkennen sind.

Der übergeordnete Ablauf des Prozesses lässt sich in mehrere voneinander klar abgetrennte Phasen einteilen. Zuerst trifft das EoL-Produkt ein und wird dann automatisch oder manuell identifiziert. Danach erfolgt die Zustandserfassung und die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit. Basierend darauf wird der passende Demontageplan generiert bzw. abgerufen und die Demontage wird mit Unterstützung des Systems durchgeführt. Parallel erfolgt die Ergebnis- und Prozessdokumentation in dem z. B. Zeitstempel und Arbeitsfortschritte dokumentiert werden. Zum Schluss werden die Komponenten ausgesondert oder weiterverarbeitet und das Ergebnis fließt in die Datenbank ein.

Auf Basis der im Diagramm dargestellten Prozessstruktur (vgl. Abbildung 5) wurden die identifizierten Anforderungen entsprechend ihrer Cluster in der folgenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammenfassung der identifizierten Anforderungscluster und Anforderungen

Anforderungscluster	Anforderungen
Automatisierte Produkterkennung	Identifikation relevanter Anleitung
	Erstellung relevanter Anleitung
	Identifikation Zustand
Technische Umsetzung	Prüfung des Bauteils
	Dokumentation von Schäden
Prozesskontrolle	Arbeitsschritte
	Werkzeugnutzung
	Echtzeiterfassung
Unterstützende Angaben zur Prozessdurchführung	Hilfsmittel
	Vorgabe von Prozessparametern
Interaktion Mensch – Prozess	Art der Steuerung
	Passende Visualisierung: Arbeitsablauf, Gefahren, Sicherheit
	Belastung des Menschen: Erreichbarkeit, Gewicht der Komponenten
	Weitere Aspekte (Erfahrungswissen Optimum)
Weitere Aspekte	Dashboards / Design
	Flexibilität

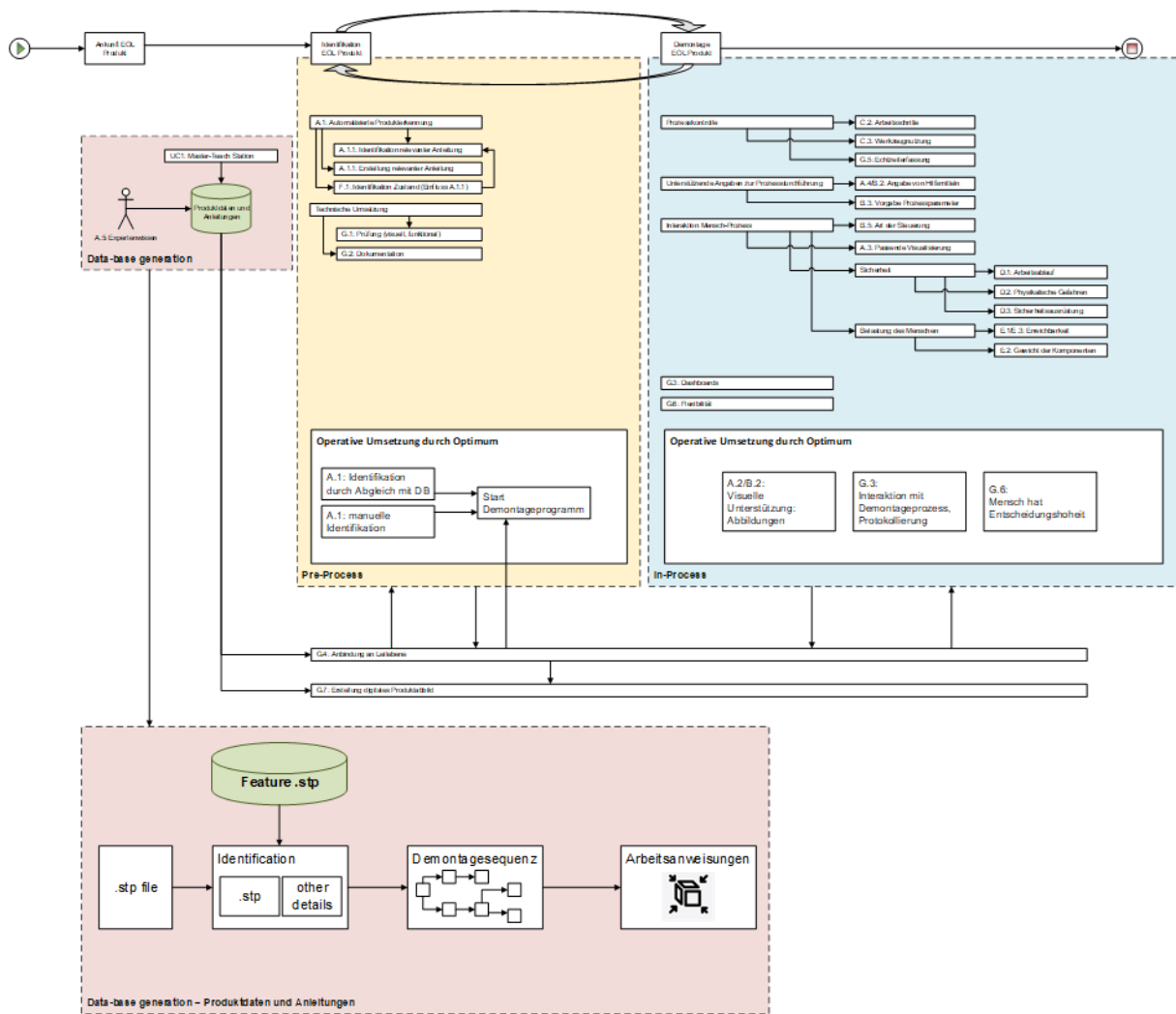


Abbildung 5: Diagramm mit zugrundeliegender Prozessstruktur

Steuerung von Wertschöpfungsketten

Die Gestaltung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungsketten erfordert ein methodisches Vorgehen, um unterschiedliche Anforderungen entlang des Produktlebenszyklus systematisch zusammenzuführen. Dabei müssen technische, wirtschaftliche und zirkularitätsbezogene Aspekte frühzeitig berücksichtigt werden. Die folgende Abbildung 6 veranschaulicht die übergeordnete Vorgehensweise, die im Projekt als Grundlage für die strukturierte Entwicklung und Bewertung herangezogen wurde. Auf dieser Basis werden im Anschluss die einzelnen Inhalte und Ergebnisse des Kapitels erläutert.

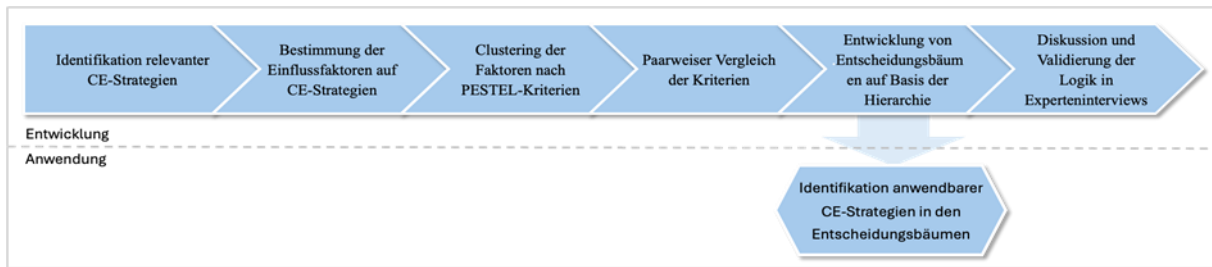


Abbildung 6: Vorgehensweise zur Methodenentwicklung (Dvorak et al., 2024b)

Zunächst wurden die relevanten Einflussfaktoren bei der Auswahl der am besten geeigneten CE-Strategien systematisch identifiziert, um in eine universelle Entscheidungslogik integriert werden zu können. Dabei wurden 114 relevante Einflussfaktoren aus Publikationen und Experteninterviews identifiziert, um eine produkt- und branchenunabhängige Übersicht zu erschaffen.

Diese Einflussfaktoren wurden in acht Kategorien unterteilt, mit folgender Anzahl an Faktoren: 6 rechtlich-politische Faktoren, 3 politische Faktoren, 11 ökologische Faktoren, 9 soziale Faktoren, 54 technische Faktoren (unterteilt in 40 produktbezogene, 11 prozessbezogen, und 3 unterstützend), 11 ökonomische Faktoren, 11 businessbezogene Faktoren und 9 marktbezogene Faktoren. Durch Berücksichtigung aller Kategorien konnte eine einheitliche Entscheidungsbasis geschaffen werden, die in eine Entscheidungslogik integriert wurde. Die kontextanpassbare Entscheidungslogik wurde als ein zweistufiger Ansatz konzipiert, in dem modulare Entscheidungsbäume mit einer Nutzwertanalyse kombiniert wurden, die technische Machbarkeit und ökonomische Bewertung integriert. Dabei dienen die 8 Entscheidungsbäume (Einstieg, Reuse x 3, Repair, Remanufacture, Recycle, Recover) mit 19 Modulen (Materialtrennung, Nachfrageanalyse, Produktaufbau, usw.) zur Identifikation der durchführbaren CE-Strategien. Die Nutzwertanalyse wurde für ein Ranking der umsetzbaren Strategien genutzt und nach einer Kostenbetrachtung in einer Nutzwert-Kosten-Matrix für eine Gesamtbewertung eingesetzt. Diese Entscheidungslogik berücksichtigt alle relevanten Einflusskategorien und priorisiert CE-Strategien mit höherer Zirkularität, um die am besten geeigneten Strategien für gebrauchte Produkte auszuwählen. Die Entscheidungsbäume bzw. deren Hierarchie sind in der folgenden Abbildung 7 dargestellt.

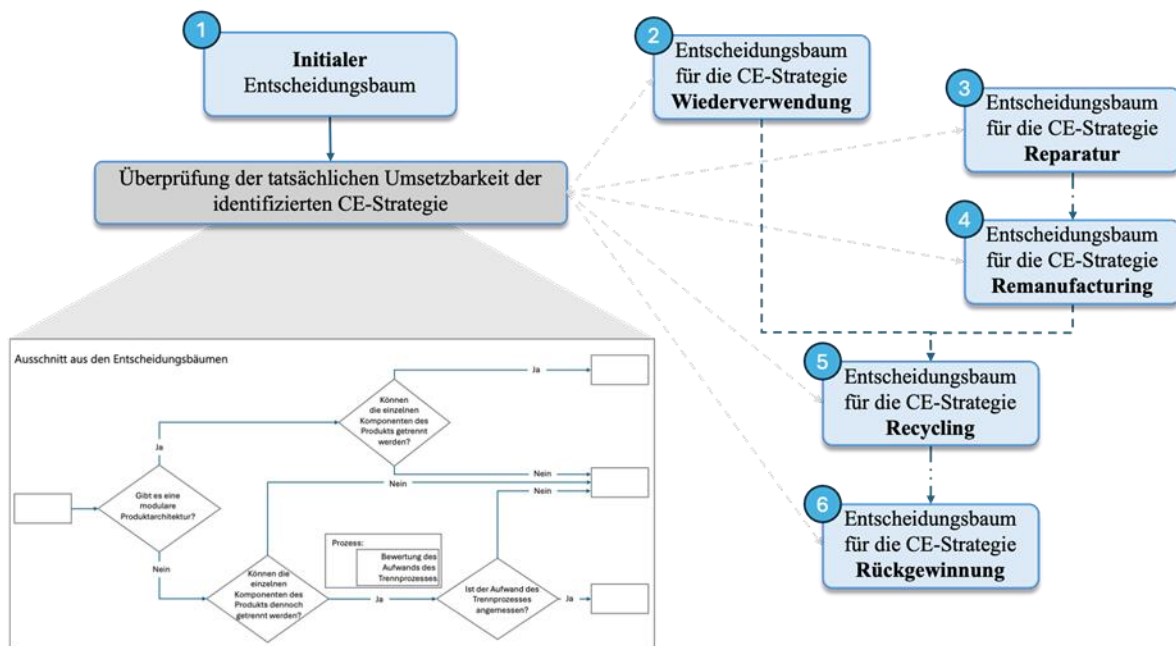


Abbildung 7: Entscheidungsbaume und deren Hierarchie (Dvorak et al., 2024b)

Als Validierungsobjekt wurde eine demontierbare Li-Ion-Batterie ohne Unfallschäden mit einem Expertenteam betrachtet und die Entscheidungsbaume durchlaufen. Die Validierung zeigte, dass Repair, Remanufacture und Recycle durchführbar waren (Remanufacture nur unter Annahmen) aber Recover ausgeschlossen wurde, da Recycling attraktiver war. Die Validierung zeigte, dass die Entscheidungsbaume dem Betrachtungskontext angepasst werden sollten, um Diskussionen und Unschärfen zu reduzieren.

Beispiele für Fragen und Bewertungsmethoden sollten ergänzt werden. Die umfassende Beschreibung der Anwendung ist in Dvorak et al., 2024b dargelegt.

Darüber hinaus wurde anhand einer Pumpe-Düse-Einheit (PDE) die Entscheidungslogik zur Auswahl der CE-Strategien systematisch angewandt. Dabei wurde die Entscheidungslogik auch um zusätzliche Verzweigungen, wie die Nachfrage außerhalb des Marktes, ergänzt, um realistische Optionen nicht auszuschließen.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Validierung zeigen, dass alle fünf R-Strategien grundsätzlich möglich sind aber stark davon abhängig, in welchem Zustand die PDE (und ihrer Komponenten) sich befindet. Zum Beispiel ist die R-Strategie Reuse zwar wünschenswert, jedoch in der Praxis selten realisierbar da PDEs meist defekt zurückgegeben werden. Den höchsten Nutzwert gab es bei Repair und Remanufacture (stimmen überein mit Umwelt- und Unternehmenszielen), gefolgt von Recycling (für Metallteile der PDE) und Recover (für nicht recycelbare Kunststoffteile). Die Validierung zeigte, trotz Anpassungsbedarf für spezifische Anwendungsfälle, die praktische Anwendbarkeit der Entscheidungslogik für die strukturierte Auswahl von CE-Strategien und dient als Entscheidungsunterstützung für Produkte in den letzten Phasen der Lebensdauer. Aufbauend auf dem zuvor beschriebenen Ansatz wurde die Methode weiter

konkretisiert und validiert, indem die Einflussfaktoren zusätzlich durch paarweisen Vergleich der Kriterien use-case-spezifisch hierarchisiert wurden. Zudem wurden strategische Faktoren (z.B. Infrastruktur) höher priorisiert als operative Faktoren (z.B. Produktzustand).

Eine abstrakte Beschreibung von Prozessen zu R-Strategien wurde von Sundin (2004) umgesetzt. Hier wird mit einer Beschränkung auf Inspektion und Demontage nur ein Auszug dessen betrachtet.

Die Planung und Steuerung von Demontagesystemen wurde an vielen Stellen bereits als Herausforderung bezeichnet (Kurilova-Palisaitiene et al., 2018). Hierbei ist insbesondere die Varianz der Prozesszeiten von Bedeutung, welche schlussendlich dazu führt, dass sowohl bei Ressourcenplanung als auch Steuerung im System Abweichungen auftreten, welche ausgeglichen werden müssen.

Im Rahmen des Projekts ZirkulEA wurde ein zweistufiges Verfahren zur Planung des Demontagesystems genutzt. Die Modellierung des Produktionssystems wird dabei als ereignisorientierte Simulation umgesetzt. Dies bedeutet, dass der Start eines Events, also beispielsweise die Durchführung eines Prozesses, durch ein weiteres, vorangegangenes Event ausgelöst wird. Für jedes Produkt wird ein Set aus notwendigen Prozessen definiert, welche zur Bearbeitung erforderlich sind. Dieses kann, je nach dem originären Zustand der Produkte und damit der ausgewählten R-Strategie, unterschiedlich viele Prozesse enthalten. Zugleich wird für jeden Prozess eine Komplexitätskennzahl bestimmt, welche darüber entscheidet, welche Ressourcen welche Prozesse ausführen können. Dies ist ein gängiges Vorgehen zur Bestimmung von auch beispielsweise der Automatisierbarkeit (Görgens et al., 2025).

Die im Folgenden dargestellten Inhalte sind auch in Dvorak et al., (2025) beschrieben. In einem nächsten Schritt wird eine zufällige Kombination an Altprodukten bestimmt mit unterschiedlichen Zuständen. Die Demontage wird dann simuliert und die Produktionsaufgaben verschiedenen Ressourcen zugewiesen. Dies ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Hierbei werden auch verschiedene Faktoren ausgewiesen, welche die Generation von Szenarien darstellen:

- **Bereitstellung der Anzahl von Produkten:** Die Anzahl der bereitgestellten Produkte ist variabel aufgrund der hohen Unsicherheiten der Produktrückführung (Güngör & Gupta, 1999). Dies hat einen Einfluss auf die Auslastung von Produktionsressourcen und damit auch auf die Kosten, welche im System entstehen
- **Bereitstellung von Information:** dies wurde bereits ausführlich in den Arbeiten von Klenk untersucht (Klenk, 2023). Hierbei ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass dies einen Einfluss auf die Inspektion und auch auf die potenzielle Nutzung von wertschöpfender Zeit haben kann. Werden Teile demontiert, welche aufgrund

des schlechten Zustands aussortiert werden müssen, so entstehen unnötige Arbeitsaufwände.

- **Veränderungen im Produktdesign:** Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die automatisierten Produktionsressourcen, da nicht alle Prozesse eine hohe Automatisierbarkeit aufweisen. Im dargestellten Demontagegraph (vgl. Abbildung 4) wird dies deutlich. Werden nun beispielsweise grüne Prozesse ersetzt durch herausforderndere Prozesse, so kann nur noch ein Teil automatisiert ausgeführt werden. Kommt es zu einem Mix der Varianten, so müssen dennoch alle Fähigkeiten weiterhin im System vorhanden sein.

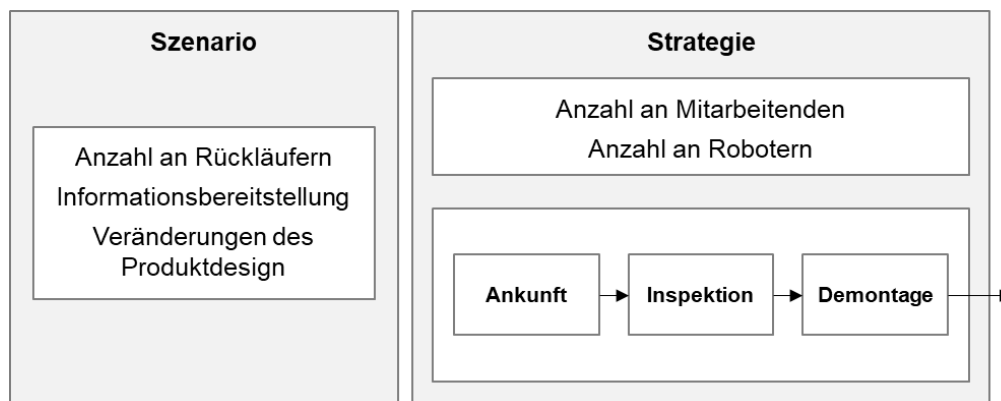


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Simulationsszenarien mit variierten Eingangsgrößen und Strategieparametern

Die Simulationsdauer beträgt eine Schicht, was einer absoluten Zeit von 28.800 Sekunden entspricht. Die Ergebnisse der Simulation dienen somit zur Abschätzung der Prozesszeiten, welche an die Planung übergeben werden.

Bei zirkulären Wertschöpfungsketten, aber auch bei zirkulären Netzwerken ist eine fundierte Planung notwendig, um diese robust und ganzheitlich optimal auszugestalten. Dazu sind unterschiedliche Szenarien durchzuspielen, um für potenzielle Störungen optimal vorbereitet zu sein. Kleinste Abweichungen wie unvorhergesehen feststehende Schrauben lassen den ursprünglich vorgesehenen Prozess scheitern, es muss auf eine reaktive Planung und Steuerung umgesprungen werden, die den Produktzustand berücksichtigt. So kann beispielsweise das automatisierte Lösen der Schraube nicht mehr das probate Mittel sein, vielmehr muss auf eine manuelle Entschraubung umgeschwenkt werden. Dazu muss natürlich zum einen die Personalressource mit den entsprechenden Fähigkeiten kurzfristig verfügbar sein, zum anderen wird aber der ursprünglich eingeplante Schraubroboter frei für andere Tätigkeiten, was ebenfalls für diesen eine Umplanung impliziert. Hier ist insbesondere darauf Wert zu legen, dass eine solche Umplanung schnell erfolgt, sodass oftmals für eine tatsächliche Optimierung zu wenig Zeit zur Verfügung steht. Daher muss hier auf heuristische Ansätze zurückgegriffen werden. Durch die Kopplung der Planung mit einer – ebenfalls schnellen – Simulation wird sichergestellt, dass eine Vielzahl von potenziellen Szenarien durchgespielt werden kann

und die entsprechende Ausgestaltung des Produktionssystems bzw. des Produktionsnetzwerks resilient bezüglich möglichst vieler potenzieller Störungen erfolgen kann, wobei immer eine Kosten-Nutzen-Betrachtung mit Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Störungen durchgeführt werden muss.

Simulation zirkulärer Wertschöpfungsketten

An die vorangegangene Bewertung und Priorisierung von Maßnahmen schließt die Simulation von Wertschöpfungsketten als ein zentrales Instrument zur Analyse und Ausgestaltung komplexer, dynamischer Netzwerkstrukturen an. Während statische Betrachtungen vornehmlich strukturelle Merkmale, Kapazitäten und Abhängigkeitsbeziehungen abbilden, ermöglicht die Simulation die Untersuchung des zeitabhängigen Systemverhaltens unter variierenden Rahmenbedingungen (Gutenschwager et al., 2017). Insbesondere in Wertschöpfungsketten, die durch eine hohe Anzahl interdependenter Akteure, stochastische Einflussgrößen, schwankende Bedarfe sowie potenzielle Störungen geprägt sind, bietet sie die Möglichkeit, die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Prozessen und Netzwerkknoten realitätsnah abzubilden und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu bewerten.

Im Zentrum der Simulation steht die modellhafte Abbildung von Material-, Informations- und Entscheidungsflüssen entlang der Wertschöpfungskette. Auf dieser Grundlage können unterschiedliche Szenarien systematisch analysiert werden, etwa Nachfrageänderungen, Ausfälle einzelner Standorte, Verzögerungen in Transportprozessen oder Einschränkungen in der Verfügbarkeit kritischer Ressourcen (Katsaliaki et al., 2022). Der wesentliche Erkenntnisgewinn der Simulation liegt dabei nicht allein in der Erfassung unmittelbarer Effekte einzelner Ereignisse, sondern insbesondere in der Sichtbarmachung ihrer Folgewirkungen innerhalb des Gesamtnetzwerks (Klenk, 2023). Auf diese Weise kann untersucht werden, in welchem Umfang lokale Störungen auf vor- und nachgelagerte Prozesse, Bestandsverläufe, Durchlaufzeiten, Auslastungen oder die Liefertreue wirken und wie sich diese Effekte über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg fortpflanzen.

Darüber hinaus eröffnet die Simulation die Möglichkeit, alternative Steuerungslogiken und Reaktionsmechanismen unter vergleichbaren Bedingungen zu evaluieren. So können beispielsweise unterschiedliche Priorisierungsregeln, Bestandsstrategien, Pufferkonzepte oder Maßnahmen zur Erhöhung der Reaktionsfähigkeit hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die Robustheit und Leistungsfähigkeit der Wertschöpfungskette untersucht werden. Damit liefert die Simulation eine belastbare Grundlage für die Ausgestaltung resilienter Steuerungsansätze. Insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmenden Volatilität und Unsicherheit in globalen Wertschöpfungs-systemen ist es von zentraler Bedeutung, nicht ausschließlich ideale Sollzustände zu betrachten, sondern das Verhalten des Systems auch unter realistischen Belastungssituationen zu analysieren. Die Simulation leistet hierzu einen wesentlichen Beitrag, indem sie eine

integrierte Bewertung von Zielgrößen wie Kosten, Beständen, Servicegrad, Ressourcenauslastung und Reaktionsfähigkeit ermöglicht.

Ein weiterer methodischer Mehrwert liegt in der Offenlegung komplexer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. In realen Wertschöpfungsketten entstehen Ineffizienzen oder Instabilitäten zumeist nicht durch isolierte Einzelursachen, sondern durch das Zusammenwirken mehrerer Einflussgrößen. So können etwa Störungen in vorgelagerten Prozessen durch unzureichende Puffer, limitierte Transportkapazitäten oder wenig flexible Steuerungsregeln zusätzlich verstärkt werden. Erst durch die dynamische Modellierung solcher Interdependenzen wird erkennbar, an welchen Stellen des Systems die maßgeblichen Hebel für Verbesserungen liegen. Die Simulation dient somit nicht nur der Bewertung bestehender Strukturen und Steuerungsmechanismen, sondern auch der Identifikation systemischer Schwachstellen und der Entwicklung zielgerichteter Maßnahmen zu deren Behebung.

Für die Steuerung von Wertschöpfungsketten ergibt sich daraus ein erheblicher praktischer Nutzen. Simulationsmodelle ermöglichen es, Entscheidungsalternativen vor ihrer Implementierung unter kontrollierten Bedingungen zu erproben, potenzielle Risiken frühzeitig zu identifizieren und die Wirkungen verschiedener Handlungsoptionen vergleichend zu bewerten. Hierdurch kann die Qualität strategischer und operativer Entscheidungen erhöht und die Weiterentwicklung der Wertschöpfungskette fundiert unterstützt werden. Zugleich schafft die Simulation die Voraussetzung dafür, Steuerungsansätze iterativ an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen und damit eine stärker vorausschauende, datenbasierte und systemorientierte Gestaltung von Wertschöpfungsketten zu realisieren.

Informationsbereitstellung

Die Informationsbereitstellung ist eng mit der Planung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungsketten verknüpft. Informationen zu Produktzustand, Nutzungshistorie, Rücklaufmenge, Prozessfortschritt und Marktbedingungen bilden die Grundlage dafür, Entscheidungen unter Unsicherheit fortlaufend anzupassen. Im Projekt wurden daher Ansätze verfolgt, mit denen neue Informationen schrittweise in Planungs- und Steuerungslogiken integriert werden können. Ziel ist es, wirtschaftliche und ökologische Zielgrößen nicht isoliert zu betrachten, sondern in einer informationsadaptiven Bewertung zusammenzuführen. Auf diese Weise kann die Auswahl und Priorisierung von Wertströmen, Ressourcen und Folgeprozessen entlang der Wertschöpfungskette kontinuierlich an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden. Mit zunehmender Informationsverfügbarkeit gewinnt zugleich die Frage der Entscheidungsverantwortung im Netzwerk an Bedeutung. Während einzelne Akteure operative Entscheidungen für ihre jeweiligen Prozessschritte treffen, erfordern netzwerkweite Entscheidungen, etwa zur Weiterleitung, Priorisierung oder Auswahl geeigneter Kreislaufstrategien, eine abgestimmte Zuordnung von Verantwortlichkeiten. Informationsbereitstellung ist damit

nicht nur eine Frage der technischen Verfügbarkeit von Daten, sondern ebenso der strukturierten Verknüpfung von Daten, Entscheidungsrechten und Handlungslogiken im Netzwerk.

Im Kontext der Informationsbereitstellung adressiert das Projekt die Frage, welche Informationen für Planung, Steuerung und operative Entscheidungen in zirkulären Wertschöpfungsketten benötigt werden und wie diese organisationsübergreifend so bereitgestellt werden können, dass sie in angemessener Detailtiefe verfügbar, interoperabel nutzbar und zugleich mit Anforderungen an Datensouveränität, Zugriffskontrolle und Datenschutz vereinbar sind. Ausgangspunkt ist die Zielsetzung, Datenbedarfe zu identifizieren und einen Zielzustand für den Informationsaustausch zur Planung und Steuerung zu definieren. Methodisch folgt die Untersuchung einem mehrstufigen Vorgehen, das Literaturarbeit, empirische Erhebung, konzeptionelle Konsolidierung, prototypische Simulation und praxisorientierte Validierung miteinander verbindet. Das Vorgehen zielte nicht allein auf die Identifikation von Datenbedarfen, sondern auch auf deren Strukturierung in Datenprodukte, deren organisatorische Verankerung über Rollen- und Verantwortlichkeitsmodelle sowie deren exemplarische technische Operationalisierung im Data-Space-Kontext.

Literaturrecherche und konzeptionelle Vorstrukturierung. Zu Beginn wurde eine strukturierte Literatur- und Dokumentenanalyse durchgeführt. Berücksichtigt wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Kreislaufwirtschaft, Traceability, Datenökosystemen, Data Spaces, Asset Administration Shells (AAS) und Data Governance sowie regulatorische und praxisrelevante Dokumente, insbesondere Anforderungen im Kontext des Batteriepasses. Die Literaturrecherche diente dazu, bestehende Erkenntnisse zu Datenbedarfen, Architekturoptionen und Governance-Anforderungen systematisch aufzubereiten und als Grundlage für das weitere Vorgehensmodell zu nutzen. Ergänzend flossen Vorerfahrungen aus vergleichbaren Initiativen in die konzeptionelle Vorstrukturierung ein.

Auf dieser Basis entwickelte das KSRI ein strukturiertes Vorgehensmodell zur Konzeption des organisationsübergreifenden Informationsaustauschs. Dieses wurde zunächst in drei internen Workshops erarbeitet und geschärft. Das resultierende Modell folgt einer vierphasigen Logik:

- (A) Zielbild und Scope,
- (B) Szenarioentwicklung entlang zirkulärer Strategien und Lebenszyklusphasen,
- (C) Definition von Dateninitiativen und alternativen Datenflussmodellen sowie
- (D) Ermittlung und Konsolidierung von Datenbedarfen und deren Strukturierung nach Produkt-, Prozess- und Ökosystemdimensionen.

Die Erhebung der konkreten Datenbedarfe erfolgte anschließend über Experteninterviews mit den Konsortialpartnern. Ziel dieser Interviews war es, informationsbezogene Anforderungen entlang der betrachteten Kreislaufstrategien und Lebenszyklusphasen zu

identifizieren sowie relevante Entscheidungsbedarfe, Rollen, Schnittstellen und Restriktionen sichtbar zu machen. Die Interviews lieferten insbesondere Erkenntnisse dazu, welche Informationen in welchen Prozessschritten benötigt werden, welche Daten heute bereits verfügbar sind, wo Lücken bestehen und welche Anforderungen sich aus unterschiedlichen Akteursperspektiven ergeben. Im Rahmen von Schritt (A) wurden darüber hinaus auf Basis von Interviews und Workshops Ökosystemlandkarten entlang des kreislauffähigen Materialflusses – insbesondere für Batterie und E-Achse – entwickelt. Ergänzend wurden Messgrößen und KPIs zur Bewertung von Zirkularität und Wirtschaftlichkeit sowie eine Lebenszyklusanalyse als strukturierende Grundlage herangezogen.

Zur Klärung der Verantwortlichkeiten wurden die Ergebnisse in einer Informationsmatrix zu Rollen und Verantwortlichkeiten konsolidiert. Als Grundlage wird eine verdichtete Version des in AP3.3 entwickelten Entscheidungsbaums genannt; methodisch wird der RACI-Ansatz explizit verwendet. Zusätzlich werden Prozessschritte entlang von Dateninput und Datenoutput je Phase formuliert, um Datenbedarfe im Wertschöpfungsprozess transparent zu verorten. Das Gesamtkonzept ergänzt diese Logik um eine detaillierte Ausführung der RACI-Definitionen und beispielhafte Zuordnungen je Prozessschritt (u. a. abhängig von der gewählten Kreislaufstrategie).

Für die Umsetzung eines organisationsübergreifenden Informationsaustauschs werden im Gesamtkonzept drei Datenflussmodelle beschrieben (zentral, föderal, OEM-zentriert), jeweils mit spezifischen Stärken und Schwächen. Das zentrale Modell betont konsistente Datenhaltung und zentrale Datenqualitätskontrolle, weist jedoch u. a. Risiken hinsichtlich der Datenhoheit und eines Single-Point-of-Failure auf. Das föderale Modell adressiert demgegenüber Datensouveränität, ermöglicht dezentrale Teilnahme und nennt Verwaltungsschalen (AAS) als Unterstützung für die feingranulare Kontrolle von Zugriffsrechten und Nutzungsbedingungen, verbunden mit Vorteilen für Datensicherheit und Privatsphäre bei gleichzeitig höherer Komplexität. Ergänzend werden Governance-Prinzipien für den Datenaustausch beschrieben: klare Regeln für Zugriff, Nutzung und Weitergabe, inklusive Datenschutz und geistiges Eigentum: Der Data Governance Act (DGA) wird als rechtlicher/struktureller Rahmen für vertrauenswürdigen Datenaustausch eingeordnet; außerdem werden Vertrauensbildung sowie faire Verteilung von Nutzen/Risiken und Skalierbarkeit/Flexibilität als Prinzipien betont.

Die interviewbasiert erhobenen Datenbedarfe wurden nicht isoliert ausgewertet, sondern systematisch mit Ergebnissen aus der Literaturrecherche sowie regulatorischen Anforderungen abgeglichen. Diese Triangulation diente der Konsolidierung und Validierung der identifizierten Informationsbedarfe. Auf diese Weise konnten domänenspezifische Anforderungen der Projektpartner mit übergreifenden wissenschaftlichen und regulatorischen Anforderungen zusammengeführt werden. Als Ergebnis wurden die Datenbedarfe in produktbezogene und produktunabhängige Bedarfe strukturiert.

Im nächsten Schritt wurden mehrere Designoptionen für zukünftige Datenflussmodelle und Architekturvarianten entwickelt. Hierbei wurden zentralisierte, föderierte und OEM-zentrierte Modelle unterschieden und hinsichtlich ihrer Eignung für organisationsübergreifenden Datenaustausch diskutiert. Diese Architekturvarianten wurden im Rahmen der Mobilkreis-Tagung 2024 in Chemnitz vorgestellt und mit Projektbeteiligten reflektiert. Die Diskussion diente dazu, Vor- und Nachteile unterschiedlicher Modelle in Bezug auf Datenqualität, Datensouveränität, Zugriffskontrolle und Integrationsfähigkeit systematisch zu bewerten.

Die konsolidierten Datenbedarfe wurden anschließend in standardisierte Datenprodukte überführt. Ziel war es, Informationen nicht nur als abstrakte Bedarfe zu beschreiben, sondern als klar definierte, interoperable und zweckgebundene Einheiten zu strukturieren. Insgesamt wurden neun Datenprodukte abgeleitet. Ergänzend wurden die Ergebnisse in einer Informationsmatrix zu Rollen und Verantwortlichkeiten verdichtet. Als methodische Grundlage diente hierbei der RACI-Ansatz, um Verantwortlichkeiten für Erstellung, Pflege, Bereitstellung und Nutzung der Datenprodukte entlang der Wertschöpfung transparent abzubilden. Zusätzlich wurden Dateninput und Datenoutput je Prozessschritt formuliert, um die Datenbedarfe unmittelbar im Prozesskontext zu verorten.

Die Informationen entstehen dabei nicht an einem einzelnen Punkt, sondern werden entlang der Wertschöpfungskette schrittweise angereichert. Ausgangsinformationen aus Entwicklung und Herstellung werden in der Nutzungsphase um Zustands-, Wartungs- und Diagnosedaten ergänzt und im weiteren Verlauf durch Erkenntnisse aus Demontage, Prüfung, Aufbereitung und Verwertung erweitert. Dadurch erhöht sich der Entscheidungswert der Informationen sukzessive. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Standardisierung, Zugriffskontrolle und die zweckgebundene Weitergabe zwischen den beteiligten Akteuren. Die im Projekt entwickelten Datenprodukte und Rollenmodelle schaffen hierfür eine strukturierte Grundlage, um diese Anreicherung transparent und anschlussfähig abzubilden. Für eine tragfähige Umsetzung ist entscheidend, dass der organisationsübergreifende Datenaustausch den Interessen der beteiligten Partner gerecht wird und mit geeigneten Geschäftsmodellen verbunden werden kann. Der Nutzen der Informationsbereitstellung liegt nicht nur in regulatorischer Konformität und höherer Transparenz, sondern auch in einer verbesserten Bewertung von Rückläufern, einer präziseren Planung, effizienteren Prozessen sowie der Erschließung datenbasierter Leistungen. Gleichzeitig müssen sensible Informationen geschützt, Datenhoheit gewahrt und klare Regeln für Zugriff, Nutzung und Wertabschöpfung etabliert werden. Erst das Zusammenspiel aus technischem Datenaustausch, Schutzmechanismen und partnerbezogenem Nutzen schafft die Grundlage für ein dauerhaft tragfähiges Informationsökosystem in zirkulären Wertschöpfungsketten.

Um die konzeptionell entwickelten Datenprodukte, Rollenmodelle und Zugriffslogiken nicht nur theoretisch zu beschreiben, sondern auch in einem technischen

Nutzungskontext zu erproben, wurde ein simulationsbasierter Prototypenaufbau entwickelt. Die prototypische Erprobung basierte auf zwei Remanufacturing-Case-Studies mit unterschiedlichen Geschäftsmodell- und Zugriffslogiken: einem Remanufacturer mit OEM-Vertrag und erweiterten Zugriffsrechten sowie einem freien Remanufacturer mit eingeschränktem Informationszugang. Diese Fallunterscheidung ermöglichte die realitätsnahe Simulation unterschiedlicher Rechte- und Freigabeszenarien. Die technische Demonstration erfolgte auf Basis des von Fraunhofer IESE entwickelten *Dataspace for Everybody*. Dieses Setup wurde gewählt, um eine vorhandene Data-Space-Infrastruktur als reproduzierbare Test- und Demonstrationsumgebung zu nutzen. Die prototypische Umgebung wurde lokal gehostet und über eine Docker-basierte Bereitstellung realisiert; technisch kamen Komponenten der Eclipse-BaSyx-Dataspace-Umgebung zum Einsatz. Der Zugriff erfolgte rollenbasiert, sodass unterschiedliche Sichtbarkeiten und Berechtigungen für Datenprodukte nachvollzogen und getestet werden konnten. Damit diente der Prototyp nicht der vollständigen industriellen Implementierung, sondern der Simulation von Datenbereitstellung, Zugriff und Nutzung unter kontrollierten Bedingungen

Die Validierung erfolgte in mehreren Stufen. Zunächst wurde das entwickelte Vorgehensmodell in einem Online-Workshop mit den an AP3.4 beteiligten Partnern diskutiert und validiert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Datenbedarfserhebung, die Strukturierung in Datenprodukte sowie die Rollen- und Verantwortlichkeitslogiken in projektbezogenen Austauschformaten reflektiert. Die prototypische Umsetzung und die simulierten Zugriffs- und Informationsflüsse wurden schließlich in einem Workshop mit Projektpartnern anhand definierter Bewertungskriterien bewertet. Diese Kriterien bezogen sich insbesondere auf Anwendbarkeit, Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit der Zugriffslogiken sowie die praktische Umsetzbarkeit im Data-Space-Kontext. Die Workshop-Validierung zeigte, dass eine unmittelbare Implementierung der entwickelten Lösung mit realen Unternehmensdaten im Konsortium aufgrund rechtlicher, organisatorischer und monetärer Restriktionen nicht realisierbar war. Zugleich bestätigte sie den Nutzen des prototypischen Aufbaus als Simulations- und Erprobungsumgebung, mit der die prinzipielle Umsetzbarkeit des Datenaustausch- und Traceability-Konzepts sowie die Funktionslogik abgestufter Zugriffsrechte untersucht werden konnten.

Als Brücke zwischen Konzeption und technischer Umsetzbarkeit wird im Abschlussbericht ein Steckbrief zur technischen Umsetzbarkeit einer Traceability-Lösung vorgelegt. Ziel ist die systematische Erfassung der IT-Infrastruktur, der Datenerfassungs-/Verwaltungssysteme, der Schnittstellen sowie der Restriktionen/Prioritäten der Partner. Die Auswertung der Rückläufe erfolgte durch das wbk und floss in den dort entwickelten Anforderungskatalog zur Traceability-Lösung ein; aus KSRI-Sicht diente der Steckbrief zudem zur Validierung, welche Technologien/Architekturen im Konsortium kurzfristig anschlussfähig sind. Zusätzlich

wird ein gezielter Austausch des KSRI mit Catena-X und Cofinity-X beschrieben, um Referenzarchitekturen und Use-Cases (Traceability, Datenräume, Nachhaltigkeitsberichterstattung) abzugleichen und die Integrationsfähigkeit in entstehende Branchenökosysteme sicherzustellen.

Ergebnisse und Anwendung

Demonstratoren

In diesem Kapitel sollen sowohl Hardware- als auch softwareseitige Demonstratoren dargestellt werden. Dies bezeichnet die verschiedenen UC sowie auch im speziellen die entwickelten Werkzeuge. Die drei betrachteten Anwendungsfälle sind in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Übersicht der drei Anwendungsfälle (Use Case 1-3) im Projekt ZirkulEA

Arbeitsplätze (automatisiert und manuell)

Batterie

Im Projekt wurde eine automatisierte Demontagestation für HV-Batterien konzipiert, die auf einem Drei-Achs-Linearportal basiert, welches durch eine SPS von Beckhoff gesteuert wird. Dieses Portal verfügt an seiner Z-Achse über ein automatisches Werkzeugwechselsystem, welches die hochpräzise Positionierung verschiedener Werkzeuge über der Batteriegeometrie ermöglicht und so eine effiziente sowie flexible Prozessführung sicherstellt.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Entwicklung lag auf der Implementierung eines umfassenden Sicherheitskonzepts, das sowohl den automatisierten Betrieb als auch manuelle Tätigkeiten in der Anlage absichert. Eine zentrale Rolle übernimmt hierbei ein Zerlegetisch der Firma SEDA, der neben einem integrierten Kühlbecken über Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung der Batterietemperatur verfügt. Sollte es während des Demontagevorgangs zu einer thermischen Instabilität, wie etwa einem rapiden und unkontrollierten Temperaturanstieg innerhalb der Module oder Zellen kommen, wird die Batterie automatisch in das mit Kühl- bzw. Löschmittel befüllte Becken abgelassen. Diese Maßnahme dient dazu, eine Brandentstehung frühzeitig zu verhindern oder die Ausbreitung eines thermischen Ereignisses effektiv einzudämmen.

Ergänzend zur thermischen Überwachung wird die physische Sicherheit durch Schutzzäune und Sicherheitssensoren der Firma SICK gewährleistet, welche den Zutritt zur Anlage im automatisierten Betrieb überwachen. Die installierten Sicherheitslichtvorhänge sind hierbei steuerungstechnisch mit der Sicherheits-SPS von Beckhoff sowie den Servoverstärkern der Portalantriebe verknüpft. Diese Sicherheitsarchitektur stellt sicher, dass sämtliche Achsbewegungen bei einer Verletzung des Gefahrenbereichs durch eine Person unmittelbar und in einen sicheren Zustand stillgesetzt werden.

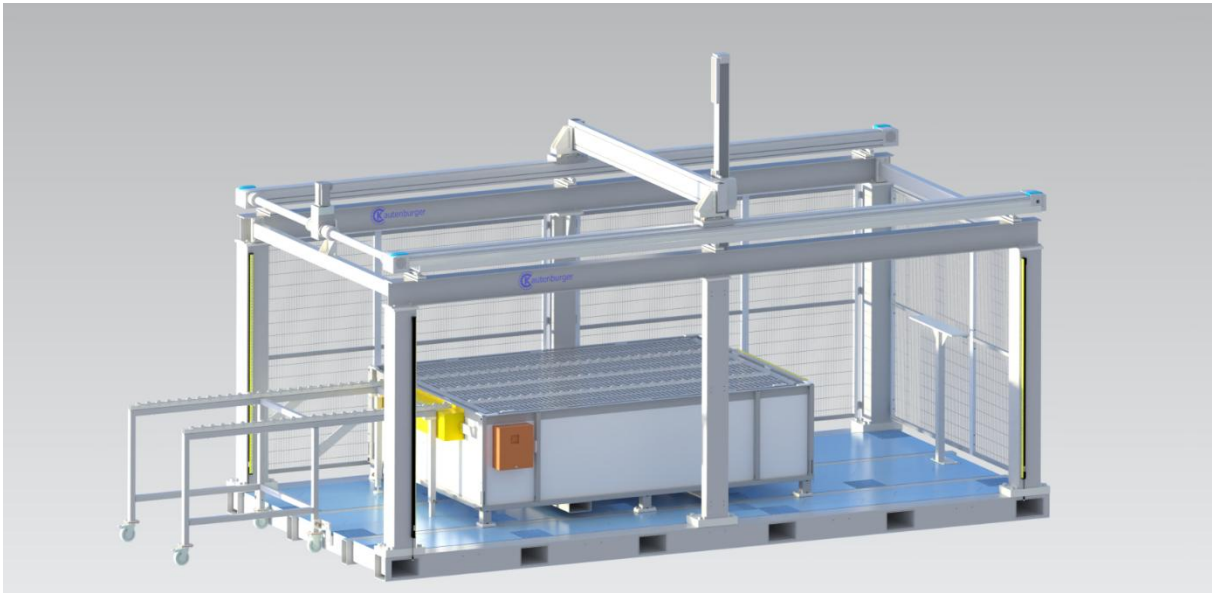


Abbildung 10: Aufbau der Batteriedemontage

Ein wesentliches technisches Ergebnis stellt das von DEPRAG entwickelte Prozessmodul für das Entschrauben ausgewählter Verbindungselemente des Ford Mach E-Akkus dar (vgl. Abbildung 11). Das Modul wurde für die Bearbeitung von fünf Verbindungselementen ausgelegt, darunter vier Schrauben und eine Mutter. Zusätzlich wurde eine Funktion integriert, mit der Schutzklappen aufgeklappt werden können, die eine der Schrauben abdecken. Damit adressiert das Modul sowohl die eigentliche Demontageaufgabe als auch eine vorgelagerte Handhabungsaufgabe, die für die Zugänglichkeit einzelner Verbindungselemente erforderlich ist.

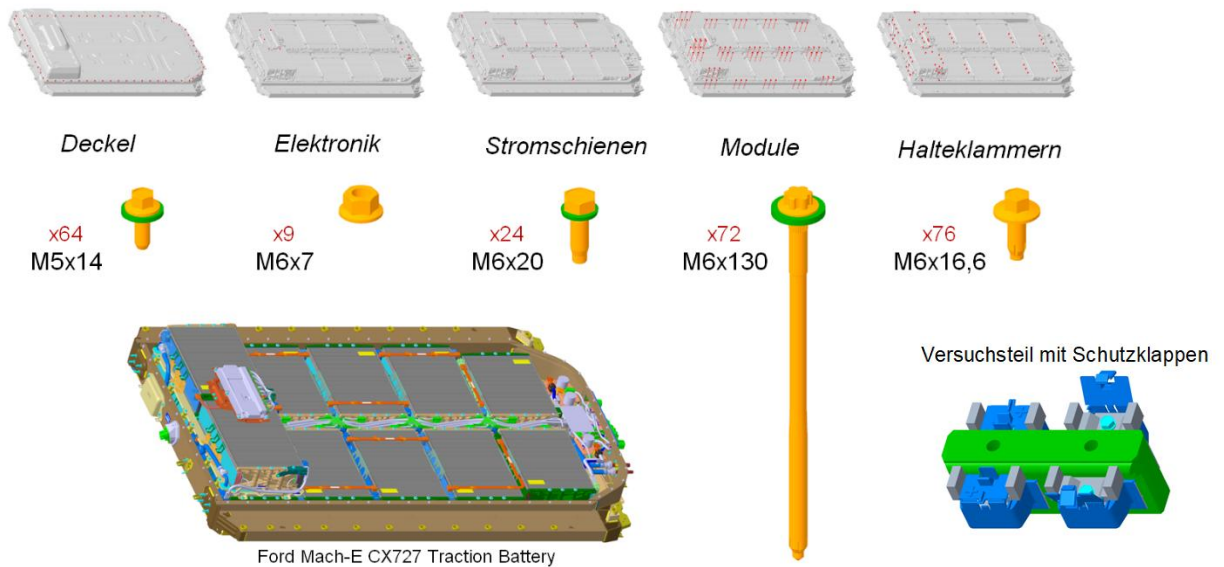


Abbildung 11: Prozessmodul für Entschrauben ausgewählter Verbindungselemente des Ford Mach E-Akkus

Das Entschraubmodul zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus. Über einen Werkzeugwechsler kann zwischen vier erforderlichen Steckschlüsseln gewechselt werden, die jeweils mit einer Vakuumanströmung zur Aufnahme der gelösten Verbindungselemente kombiniert sind. Dabei kann ein Steckschlüssel sowohl für die Mutter als auch für eine der Schrauben eingesetzt werden. Die gelösten Verbindungselemente werden nicht separat abgelegt, sondern unmittelbar nach dem Entschrauben über ein Mundstück und einen Schlauch aus dem Arbeitsbereich abgeführt. Die Abführvorrichtung wurde dabei so ausgelegt, dass trotz gewisser Geometrieunterschiede alle fünf Verbindungselemente mit derselben Vorrichtung abgeführt werden können, da diese einen ähnlichen Durchmesser aufweisen. Dadurch konnte die Zahl erforderlicher Abführkomponenten reduziert werden. Ein weiterer Vorteil des Moduls liegt in der schnellen aufeinanderfolgenden Bearbeitung mehrerer Verbindungselemente. Durch die direkte Abführung über einen Schlauch entfällt ein zusätzliches Verfahren in eine gesonderte Abwurfposition. Das Modul kann nach dem Lösen eines Verbindungselements unmittelbar mit dem nächsten Bearbeitungsschritt fortfahren. Damit wird eine Prozesscharakteristik erreicht, die hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit an taktzeitkritische industrielle Montageprozesse anschließt. Zugleich wurde das Modul so ausgelegt, dass eine umfassende Erfassung von Prozessdaten möglich ist. Sowohl der eingesetzte Schrauber als auch die elektrische Achse und die übergeordnete Steuerung basieren auf universell konfigurierbaren und erweiterbaren Komponenten. Vorgesehen ist die Erfassung von Schraubprozessdaten, die Rückschlüsse auf den Zustand der Verschraubung zulassen. Dazu zählen insbesondere Drehmoment und Drehwinkel, Positionsdaten der elektrischen Achse sowie Vakuumwerte der Anströmung. Auf diese Weise schafft das Modul nicht nur die Grundlage für die eigentliche Demontage, sondern auch für eine datenbasierte Bewertung und Weiterentwicklung des Prozesses. Besondere Anforderungen ergaben

sich aus der Auslegung des Moduls für Hochvoltbauteile mit Spannungen bis zu 1000 V. Für die Verarbeitung potenziell unter Spannung stehender Bauteile mussten alle das Bauteil berührenden Teile des Moduls elektrisch vom restlichen System isoliert werden. Im Rahmen der Entwicklung konnten dabei zwei zentrale technische Herausforderungen gelöst werden. Zum einen musste auf engem Bauraum ein hohes Drehmoment übertragen werden, ohne dafür hochfeste metallische Komponenten im berührenden Bereich zu verwenden. Dies wurde durch den Einsatz entsprechend dimensionierter keramischer Elemente realisiert. Zum anderen war für die Prozessüberwachung eine Positionsrückmeldung bewegter Anlagenteile erforderlich, ohne konventionelle elektrische Sensorik im kritischen Bereich einzusetzen. Hierfür wurden Lichtleiterabfragen verwendet, die durch zusätzliche Maßnahmen gegen Verschmutzung abgesichert wurden.

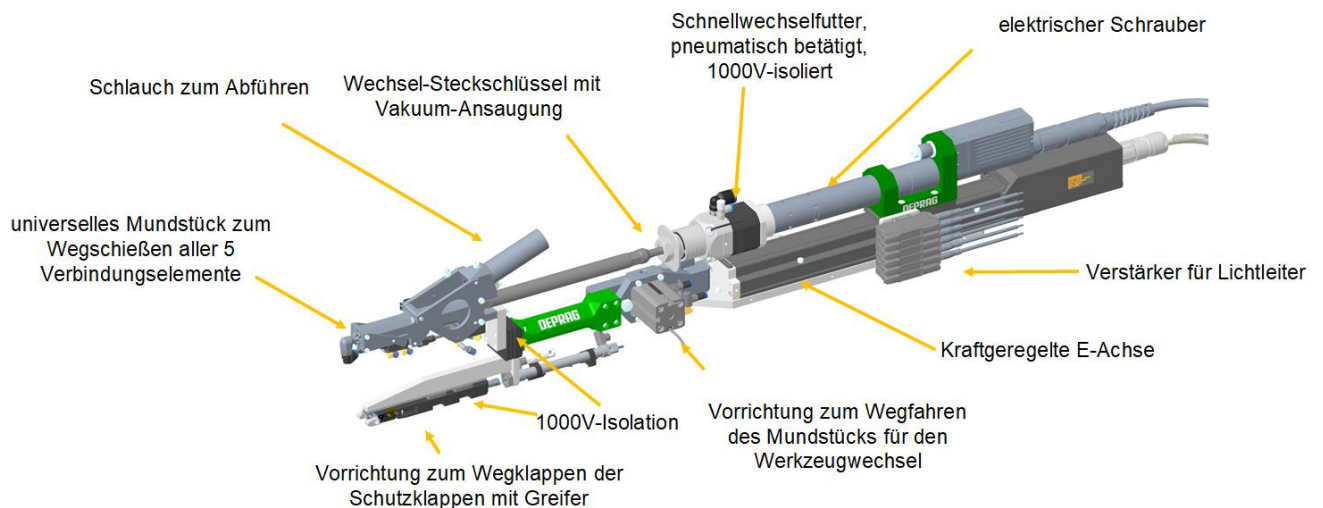


Abbildung 12: Aufbau des Schraubmoduls

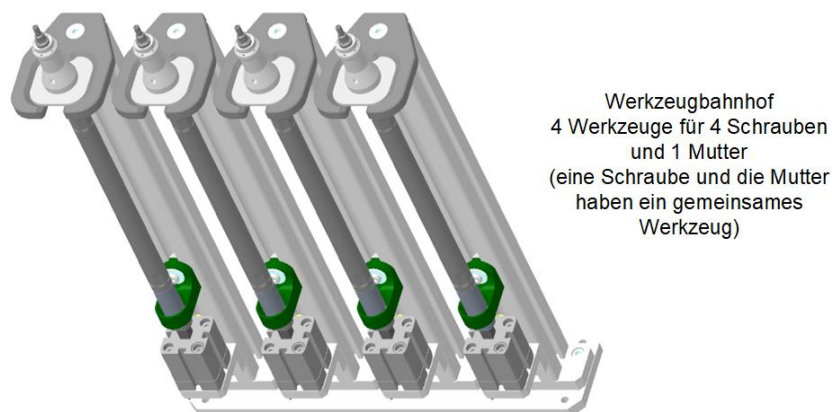


Abbildung 13: Aufnahmen der Entschraubmodule

Zur Prozessentwicklung und Validierung wurde ein Demonstratorarbeitsplatz aufgebaut. Dieser umfasst einen Tisch, einen Roboter, das Entschraubmodul mit Werkzeugbahnhof, ein gefrästes Akkumodell sowie die zugehörigen Steuerungen und Peripherie. Von den insgesamt zwei identisch aufgebauten Entschraubmodulen wird eines im Demonstratorarbeitsplatz eingesetzt, während das zweite Modul in der Anlage der Hochschule Trier am Umwelt-Campus Birkenfeld zum Einsatz kommt. Dadurch wurde eine gemeinsame Erprobung der entwickelten Lösung in unterschiedlichen technischen Umgebungen ermöglicht.

Im Projektverlauf erwies sich das Entschraubmodul grundsätzlich als funktionsfähig und geeignet für die vorgesehene Aufgabe. Insbesondere das Mitnehmen der Verbindungselemente über die Kombination aus Steckschlüssel und Vakuum sowie die anschließende Abführung über den Schlauch arbeiten zuverlässig. Gleichzeitig zeigten sich im Detail weitere Optimierungspotenziale, um Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit noch besser miteinander zu verbinden. Als besonders kritisch stellte sich der Moment des letzten Gewindegangs heraus. Für eine weitere Verbesserung erscheint insbesondere eine präzisere Synchronisation zwischen der Drehbewegung des Schraubers und der Bewegung der elektrischen Achse sinnvoll. Ergänzend kann eine Echtzeitüberwachung des Vakuums dazu beitragen, die Prozessstabilität beim Abführen der Verbindungselemente weiter zu erhöhen. Damit liefert der Demonstrator nicht nur den Nachweis der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit, sondern auch konkrete Ansatzpunkte für die weitere technische Optimierung.



Abbildung 14: Aufbau des Demonstrators mit Kinematikeinheit (oben: Demonstrator-Arbeitsplatz, unten: Akku-Modell mit allen unterschiedlichen Verbindungselementen)



Abbildung 15: Abbild der zu entschraubenden Verbindungen

Um die Funktionalität der entwickelten Prozessmodule unter realitätsnahen Bedingungen nachzuweisen, wurden diese in umfangreichen praktischen Demontageversuchen validiert. Im Fokus der Untersuchung des Deprag-Entschraubmoduls standen sechs im Projektverlauf definierte Verbindungen, deren Auswahl nach zwei zentralen Kriterien erfolgte: zum einen die hohe Häufigkeit der Verbindungsart innerhalb des Batteriesystems und zum anderen die Notwendigkeit, Verschraubungen unter bestehender Hochspannung zu lösen. Die genaue Position dieser Stellen innerhalb der untersuchten Mach-E-Batterie wird in Abbildung 16 verdeutlicht.

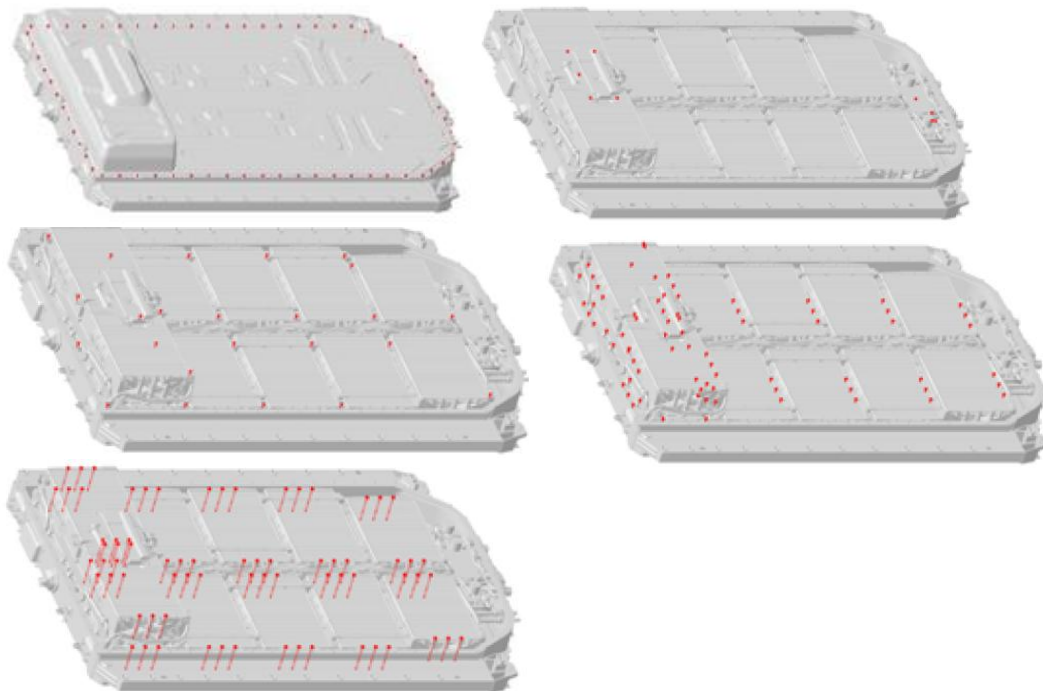


Abbildung 16: Visualisierung der verschiedenen Schraubstellen (von rechts nach links: Deckelschrauben, Schrauben Leistungselektronik, Busbarschrauben, Schrauben der Modulhalteklammern, Modulschrauben)

Nach erfolgreicher Qualifizierung und Optimierung der Funktion des robotergeführten Entschraubmoduls am Demonstrator bei DEPRAG konnte auch die Validierung am 3-Achs-Linearportal vorgenommen werden. Da es sich bei fünf der sechs ausgewählten Verbindungen um Schraubverbindungen handelt, folgte die Validierung einem

einheitlichen Prozessablauf. Dieser begann mit der groben Positionierung des Entschraubwerkzeugs durch das Portal oberhalb der Zielkoordinate, gefolgt von der Feinpositionierung des Werkzeugbits mittels einer integrierten Linearachse. Nach der Herstellung eines sicheren Kraftschlusses zwischen Bit und Schraubenkopf erfolgte der eigentliche Entschraubvorgang sowie das kontrollierte Abführen der gelösten Schraube. Zur statistischen Absicherung wurden sämtliche Verbindungsstellen in zahlreichen Testzyklen demontiert. Dabei wurden sowohl die reinen Entschraubzeiten als auch die Taktzeiten für die Transferbewegungen zwischen den Positionen dokumentiert und gemittelt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Validierung

Prozess	Schrauben	Anzahl	Prozesszeit [mm:ss]	Funktion
Schrauben des Batteriedeckels lösen und abtransportieren	M5x14	64	10:52 (Entschrauben 07:54; Verfahren 02:58)	✓
Muttern der Elektronikbaugruppen lösen und abtransportieren	M6x7	9	01:37 (Entschrauben 01:07; Verfahren 00:30)	✓
Schutzklappe der Busbarschrauben öffnen	-	24	-	✓
Schrauben der Busbars lösen und abtransportieren	M6x20	24	-	✓
Schrauben der Batteriemodule lösen und abtransportieren	M6x130	72	14:18 (Entschrauben 10:14; Verfahren 04:04)	✓
Schrauben der Halteklammern lösen und abtransportieren	M6x16,6	76	13:51 (Entschrauben 11:35, Verfahren 02:16)	✓

Die Ergebnisse der Validierung sind in Tabelle 2 dargestellt und belegen die volle Funktionsfähigkeit des Prozessmoduls für alle untersuchten Verbindungsstellen. Eine Ausnahme bildeten die Schutzklappen sowie die Verschraubungen der Busbars: Diese konnten nicht an einer realen Hochvoltbatterie erprobt werden, da selbst bei zuvor entladenen Systemen im Fehlerfall ein Lichtbogen nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Vor dem Hintergrund der hierfür geltenden Sicherheitsauflagen wurde die Entfernung der Busbars daher ausschließlich mit einem Dummy-Aufbau am Versuchsstand des Projektpartners Deprag nachgewiesen. Angesichts der erfolgreichen Übertragung aller übrigen Prozessparameter vom Versuchsstand auf die Demontageanlage ist jedoch mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass auch diese Teilprozesse vollständig übertragbar sind.

Hinsichtlich der dokumentierten Prozesszeiten ist anzumerken, dass der Fokus der Untersuchungen primär auf der Funktionssicherheit und der Prozessstabilität lag. Die ermittelten Werte stellen daher kein optimiertes Taktzeit-Maximum dar, sondern bieten erhebliches Potenzial für künftige Effizienzsteigerungen durch weitere Parameteroptimierung.

Achse

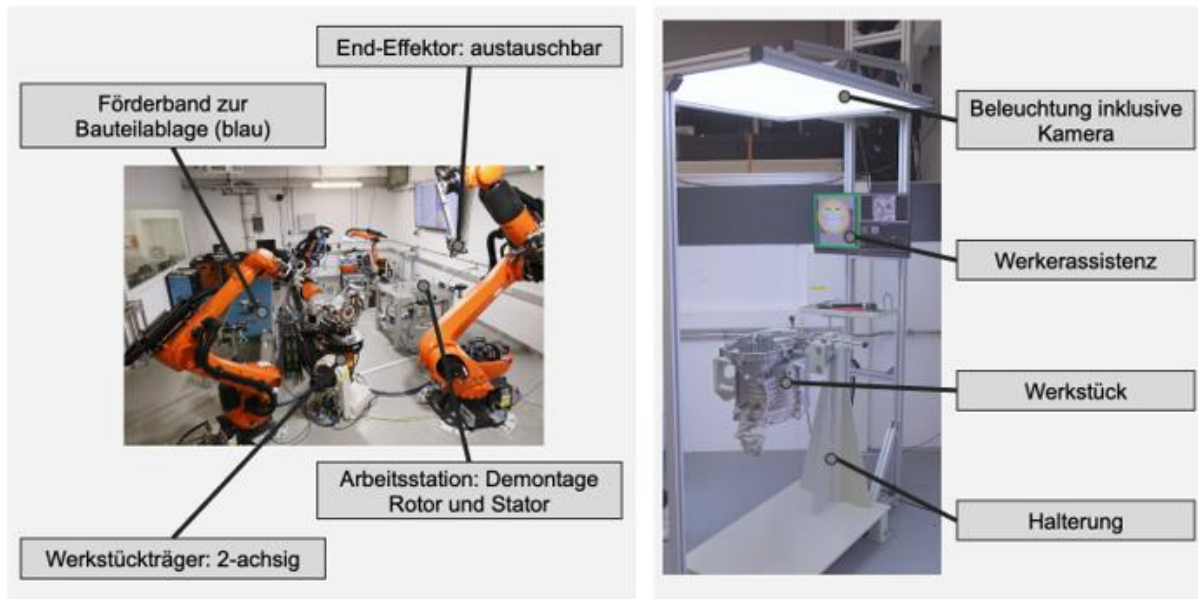


Abbildung 17: Aufbau der automatisierten und manuellen Demontage der E-Achse

Die Umsetzung des Aufbaus des Demonstrators wurde als derzeit nicht geeignet für den realen Aufbau bewertet, jedoch wurden einige potenzielle Erweiterungen des Demonstrators vorgeschlagen, um diesem Ziel näherzukommen. Darunter die Visualisierung von Prozessinformationen direkt auf der Arbeitsfläche mit einem Beamer, die Integration einer zweiten Kamera zur Erkennung der demontierten Bauteile, klare Definition der Reihenfolge und verbesserte Benutzerfreundlichkeit durch Anpassung in der Visualisierung (z.B. die Farbgebung, da Rot im Qualitätsbereich aktuell mit n.i.O. missverständlich ist). Die Anforderungen wurden nach Anforderungsbereich einzeln definiert und validiert mit Bezug auf den Demonstrator.

Die aktuelle Anlernzeit für die Demontageprozesse betrug um die 3 Monate. Die Assistenzsysteme waren besonders vorteilhaft bei hoher Variantenvielfalt und komplexen Prozessen. Entscheidend für die Investitionsbereitschaft war der Einfluss der Assistenzsysteme auf die Prozessgeschwindigkeit.

Die automatisierte Produkterkennung wurde als grundsätzlich möglich bewertet, mit Identifikation von Demontageanleitungen über Bauteilerkennung und geometrische Analyse. Einflussfaktoren waren hierbei Verschmutzungen und Positionsänderungen, die die optische Prüfung erschwerten. Die Echtzeiterfassung der Arbeitsschritte wurde mit Zeitstempeln erfolgreich implementiert. Die Dokumentation von Schäden war noch nicht vorhanden, wurde jedoch als technisch möglich bewertet. Für die Prozesskontrollen mussten die Arbeitsschritte noch detailliert werden (Werkzeuge, Position, Sicherheitsaspekte).

In Bezug auf die Interaktion Mensch-System wurde die Bedienung als überwiegend intuitiv gewertet, trotz physischer Herausforderungen (z.B. Touchscreen mit öligen

Händen). Der Mehrwert der Assistenzsysteme war für unerfahrene Mitarbeitende hoch und für erfahrene gering. Die Assistenzsysteme dienten dazu, monotone Tätigkeiten abzufedern und die Anzahl administrative Aufgaben zu reduzieren. Es wurden keine hohen Belastungen festgestellt.

Trotz Optimierungsbedarf in der technischen Robustheit, Benutzerfreundlichkeit und Feedbackmechanismen war der Demonstrator grundsätzlich geeignet für Demontageprozesse.

Die vollständige Demontage der elektrischen Antriebsaggregate (EAA) im Rahmen des UC3 war unter Durchführung manueller sowie automatisierter Demontageschritte vorgesehen, um eine hohe Effizienz des Gesamtprozesses zu erreichen. Als Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen wurde eine Bewertung der Automatisierbarkeit einzelner Prozessschritte vorgenommen. Als Basis diente ein Demontevorranggraph, welcher die gegenseitigen Abhängigkeiten sämtlicher im Antriebsaggregat vorhandenen Bauteile und Bauteilgruppen darstellt (vgl. Abbildung 4). Weiterhin wurde die Automatisierbarkeit einer jeden Bauteil-/Baugruppenentnahme bewertet, indem drei Kategorien definiert wurden: *unkritisch*, *mit erhöhtem Aufwand* und *sehr schwer automatisierbar*. Bei der Bewertung wurden verschiedene Kriterien wie Zugänglichkeit, Verbindungsart und die Komplexität des Prozesses herangezogen.

Der Demontevorranggraph diente als Grundlage für die Entwicklung eines hybriden Demontagekonzepts mit einer definierten Aufteilung zwischen roboter- und werkerseitigen Demontageprozessen. Es wurden zunächst Teilabfolgen mit der Notwendigkeit einer unterbrechungsfreien Durchführung der Demontage identifiziert. Als Ergebnis wurde eine Demontageabfolge erstellt, welche an früher Stelle im Gesamtprozess die Auftrennung der EAA in Leistungselektronik und Motor-Getriebe-Einheit vorsieht (vgl. Abbildung 18). Diese Prozessabfolge hat den Vorteil, dass ab dem Zeitpunkt der Trennung eine parallele Verarbeitung der erhaltenen Untereinheiten möglich ist. Im hybriden Demontagekonzept ist zudem vorgesehen, dass sich Werker und Roboter einen Arbeitsplatz teilen. Das hat den Vorteil, dass das EAA oder die Baugruppe während der Demontage nicht bewegt werden muss, stellt aber gleichzeitig ein Risiko beim Umgang mit Industrierobotern für den Werker dar. Um die Sicherheit zu gewährleisten, ist vorgesehen, dass der 2-Achs-Positionierer, auf dem der Motor in der Roboterzelle platziert ist, über eine Lineareinheit gesteuert wird, welche den Motor nach Beendigung einer roboterbasierten Arbeitssequenz in einen durch einen Schutzzaun abgetrennten Bereich zurückfährt. Im Anschluss kann der Werker manuelle Tätigkeiten unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorgaben ausführen. Dieses Konzept bietet darüber hinaus den Vorteil, dass die Eigenschaften des Positionierers auch durch den Werker genutzt werden können, was eine optimale Zugänglichkeit für die manuellen Prozessschritte gewährleistet.

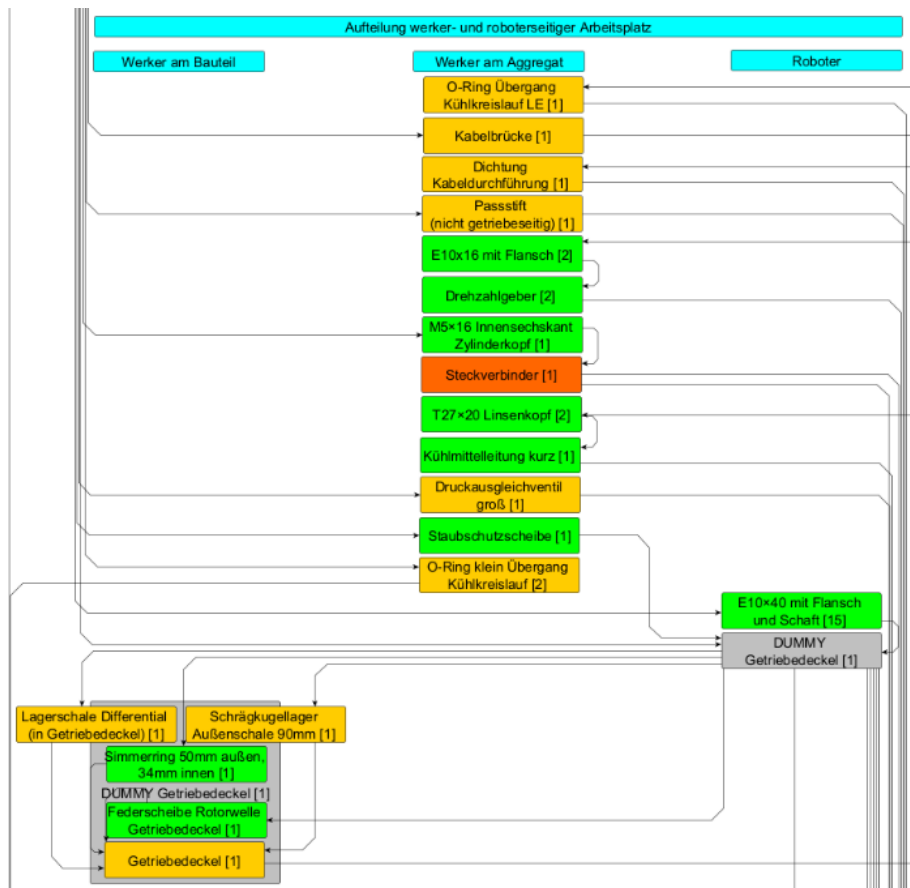


Abbildung 18: Ausschnitt der Demontageabfolge für das hybride Demontagekonzept zur Parallelisierung der Prozesse in werker- und roboterseitige Arbeitsplätze. Bauteilverknüpfungen wurden aus dem Demontagevorranggraph erhalten.

Die Umsetzung der Prozesse zur automatisierten zerstörungsfreien Demontage im Rahmen des UC3 erfolgte am CUTEC Forschungszentrum der TU Clausthal. Die Arbeiten wurden im bestehenden Technikum (vgl. *Abbildung 19*) durchgeführt und beinhalteten die Ausgestaltung der Sequenzplanung sowie die (Weiter-) Entwicklung, Implementierung und Bewertung der einzelnen Demontageprozesse. Aufgrund der unterschiedlichen Demontageanforderungen der Hauptbaugruppen des EAA ist das Technikum in drei separate Stationen unterteilt. Die erste Station ist für den überwiegenden Teil der Demontageschritte von Hauptgehäuse und Getriebe ausgelegt. Die zweite Station dient der Demontage der Leistungselektronik, während die dritte Station eine spezialisierte Demontagestation für die Entnahme von Rotor und Stator der E-Maschine ist.

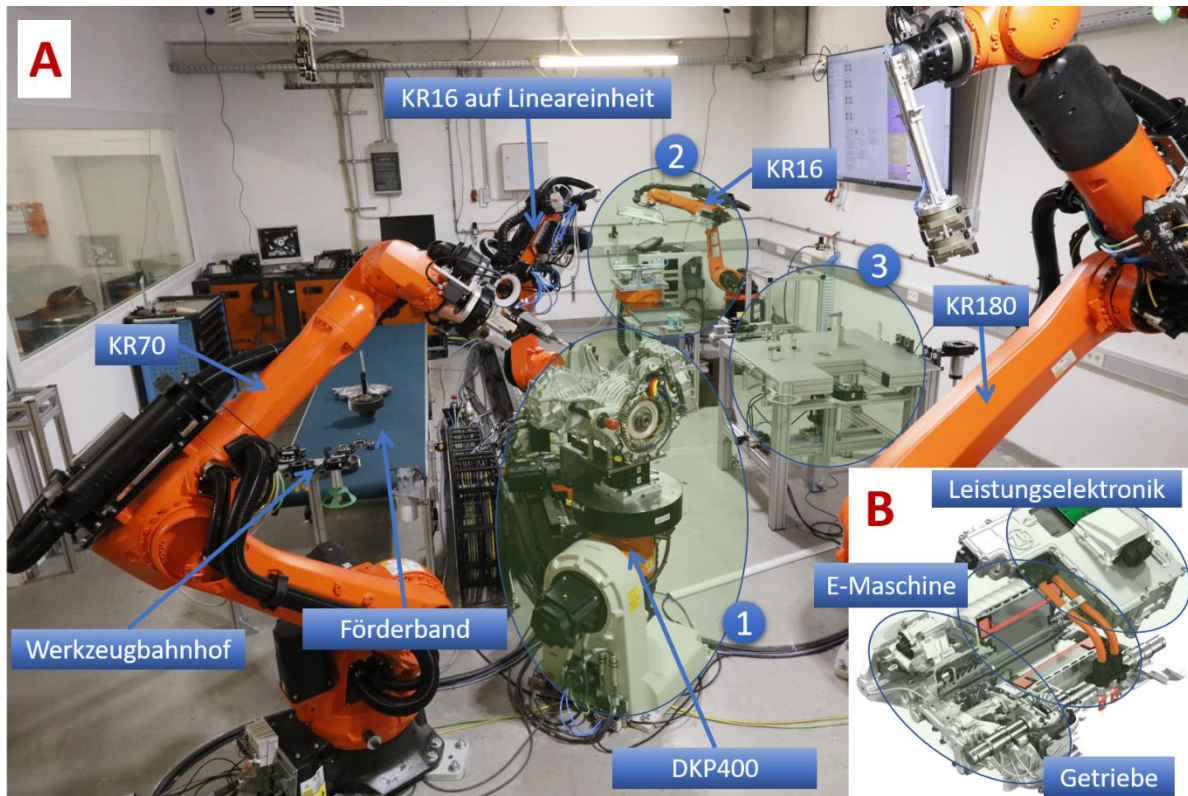


Abbildung 19: A: Demontagezelle mit drei Stationen für das Hauptgehäuse und das Getriebe (1), die Leistungselektronik (2) sowie eine spezielle Demontagestation für die Entnahme von Rotor und Stator (3).
B: E- Antriebsaggregate und die drei Hauptbaugruppen.

Die Demontageprozesse werden von mehreren Teilsystemen, die in eine Netzwerkumgebung eingebettet sind, gesteuert (vgl. Abbildung 20). Das Prozessleitsystem (PLS) und die Datenbank stellen zentrale Instanzen dar, die mehrere Teilsysteme und Datenströme direkt oder indirekt steuern und erfassen. Am Beispiel des Entschraubvorgangs wird im Folgenden erläutert, wie die verschiedenen Subsysteme miteinander interagieren: Im ersten Schritt analysiert das PLS den Demontagefortschritt und bestimmt, ob der nachfolgende Prozessschritt ausgeführt werden kann. Dazu erhält das PLS über die Datenbank einen OK-Status, der auch die Positionsinformationen der Schrauben enthält, die von der Koordinatentransformation offline berechnet wurden (siehe Kapitel *Werkzeug und technische Entwicklung*). Die Koordinaten werden anschließend an die Robotersteuerung übergeben, welche die RobotVision-Kamera über dem Objekt ausrichtet. Die im Anschluss durch das RobotVision-System ermittelte exakte Schraubenposition wird an die Robotersteuerung zurückgemeldet, so dass die Bauteilentnahme durch einen Roboter mittels Schraubwerkzeug durchgeführt werden kann. Abschließend prüft das Prozess-Monitoring, in diesem Fall ein Induktionssensor, die erfolgreiche Abfuhr der Schraube. Die zeitliche Koordination der Subsysteme ist entscheidend, um die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Demontage zu gewährleisten.

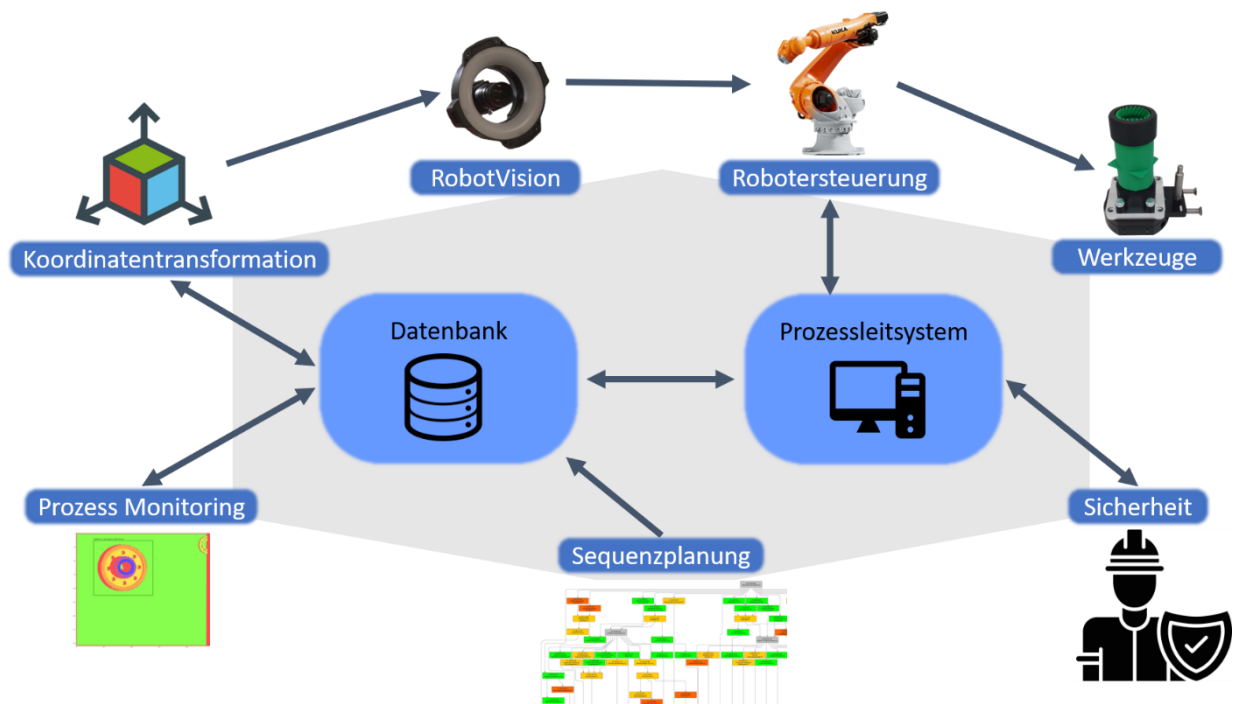


Abbildung 20: Schematischer Aufbau der Demontagezelle mit ihren zentralen Systemen „Prozessleitsystem“ und „Datenbank“ sowie den peripheren Teilsystemen.

Werkzeug und technische Entwicklung

Ein wesentlicher Aspekt bei der automatisierten Demontage ist der Einsatz geeigneter Roboterwerkzeuge. Um den Werkzeugwechsel zu ermöglichen, wurden im Rahmen des UC3 in der Demontagezelle mehrere Werkzeugstationen mit einer Vielzahl von Werkzeughaltern und einem Bit-Wechselsystem installiert. Die größte Herausforderung bei der Konstruktion von Werkzeugen für die automatisierte Demontage besteht darin, die Bauteile unbeschädigt und innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens zu entnehmen. Darüber hinaus ist es unerlässlich, dass die Werkzeuge Sicherheitsmechanismen besitzen, mit denen mögliche Schäden an Personal, Robotern und Peripheriekomponenten vermieden werden. Zudem müssen Spezialwerkzeuge so universell wie möglich ausgelegt sein, um den Zeitaufwand von Anpassungen bei der Umstellung auf andere Produktvarianten zu minimieren. Für Greifvorgänge wurden Schunk-Greifer nach dem Prinzip des Formschluss-vor-Kraftschluss angepasst, um die Verformung der Bauteile zu vermeiden und somit eine mögliche Wiederverwendung zu gewährleisten. Weiterhin wurden Magnetgreifer für die Entnahme von Lagerschalen sowie spezialisierte Werkzeuge, etwa zum Öffnen der Gehäusedeckel oder zum Abziehen von Lagern, konstruiert. Die Werkzeuge wurden jeweils vom Partner CTC entworfen, als Prototypen getestet und entsprechend modifiziert. Die Fertigung erfolgte mittels additiver 3D-Druckverfahren aus Kunststoff und Metall sowie mit konventionellen Zerspanungsmaschinen (CNC-Fräse) in der hauseigenen Werkstatt. Im Folgenden werden ausgewählte Werkzeuglösungen für Demontageprozesse vorgestellt.

Die Demontage des Sicherungsringes auf der Rotorwelle stellt einen der anspruchsvollsten automatisierten Prozessschritte beim vorliegenden EAA dar. Die Entnahme des Sicherungsringes, welcher getriebeseitig in einer Nut auf der schrägverzahnten Rotorwelle sitzt (vgl. Abbildung 21 links), ist eine notwendige Vorbedingung für das spätere Austreiben des Rotors über die E-Maschinenseite. Dieser Prozessschritt gilt als sehr schwer automatisierbar, da schon die manuelle Entnahme von Sicherungsringen eine Herausforderung darstellt, die Lage der Ringöffnung nicht definiert ist und der Zugang durch den begrenzten Bauraum stark eingeschränkt ist.

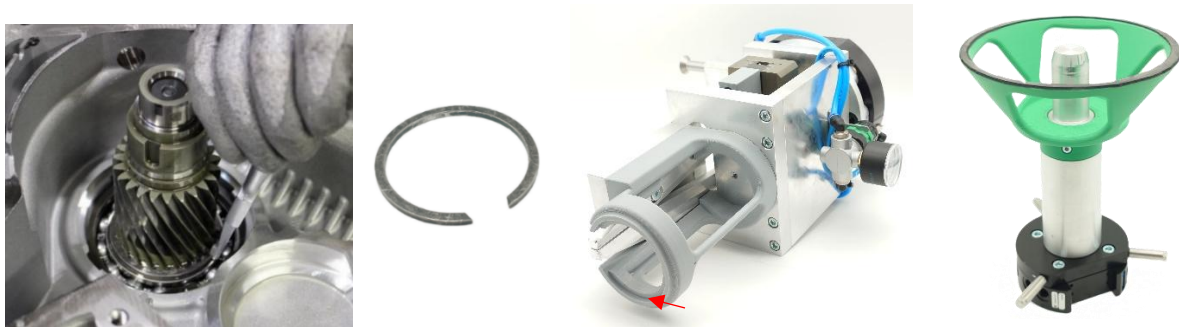


Abbildung 21: Sicherungsring auf der Rotorwelle (links) und einzeln dargestellt (Mitte links). Mitte rechts: Werkzeug zum Lösen und Entfernen des Sicherungsringes, welcher in die Nut (roter Pfeil), eingepresst und abgeführt wird. Rechts: Hilfswerkzeug zum Drehen des Rotors, um die Position der Öffnung des Sicherungsringes in eine vorher definierte Lage zu realisieren.

Für die Entnahme wurde ein Prozess entwickelt, bei dem zwei Werkzeuge synchronisiert und gestützt durch das RobotVision-System zum Einsatz kommen. Bedingt durch den beengten Bauraum und die Werkzeuggeometrie muss sich die Öffnung des Sicherungsringes vor dem Prozessschritt in einer vorher definierten Position befinden. Hierzu dient das in Abbildung 21 rechts gezeigte Werkzeug, welches robotergestützt auf der gegenüberliegenden Seite in die Hohlwelle des Rotors eingeführt wird und einen Kraftschluss erzeugt. Nun wird der Rotor so lange gedreht, bis die Öffnung des Sicherungsringes auf der anderen Seite im Getrieberaum von der von einem zweiten Roboter geführten RobotVision-Kamera detektiert wird. In der anschließenden Feineinstellung wird der Rotor so weit gedreht, bis der Sicherungsring mit einer maximalen Abweichung von $0,05^\circ$ exakt positioniert ist. Zum Lösen des Sicherungsringes kommt im Anschluss das in Abbildung 21 (Mitte rechts) dargestellte Werkzeug zum Einsatz. Es besteht im Wesentlichen aus einem durch einen Parallelgreifer betätigten Zangenwerkzeug und einer Kunststoffführung, welche über die Rotorwelle gefahren wird. Beim Öffnen der Zange wird der Sicherungsring formschlüssig in eine Nut gepresst. So wird sichergestellt, dass dieser beim Abtransport nicht vom Werkzeug springt oder an der Verzahnung der Welle hängen bleibt.

Eine mögliche Flexibilisierung des Werkzeugs wäre eine modular und austauschbar konstruierte Kunststoffführung, so dass für verschiedene Ringgrößen unterschiedliche modulare Einheiten per Schnellwechselsystem vorgehalten werden können. Die

Prozesslösung ist zuverlässig und bietet somit ein hohes Potential für eine Weiterentwicklung in zukünftigen Forschungsvorhaben.

Die Entnahme verschiedener Lagerschalen und dahinter liegender Einstellscheiben wurde als weitgehend unkritisch eingestuft. Die einzige Herausforderung ist, dass die Lagerschalen formschlüssig ohne Toleranz in Gehäuse und Deckelteilen eingelassen sind. Dies kann bei unsachgemäßer Entnahme zur Verkantung des Bauteils führen und die Entnahme verhindern. Für diese Prozessschritte wurden Magnetgreifer entworfen, die durch ringförmig angeordnete Magnete die Lagerschalen formschlüssig aufnehmen können. Zusätzlich sind auf der horizontalen Fläche Magnete eingesetzt, welche eine sichere Abfuhr der unter den Lagerschalen befindlichen Anlauf- oder Einstellscheiben gewährleisten. Versuche mit den Werkzeugen zeigten eine hohe Wiederholgenauigkeit des Vorgangs. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** zeigt exemplarisch das additiv aus PLA hergestellte Werkzeug für die Entnahme der Lagerschale des Kegelrollenlagers am Differential. Der Magnetgreifer ist innen hohl, damit dieser beim Anfahren an die Lagerschale über eine in der Prozessabfolge erst später zu entnehmende Abtriebswelle gelangen kann.

Eine Flexibilisierung des Magnetgreifers würde die Anpassung auf verschiedene Lagergrößen erfordern. Dafür könnten die Magnete, anstatt fixiert am Werkzeug befestigt, flexibel an Bolzen geführt und über einen Mechanismus (pneumatisch oder mechanisch) herausgedrückt werden. Somit bietet sich auch bei diesem Werkzeug Potenzial für weitere Forschung.



Abbildung 22: Magnetgreifer (links) zur Entnahme von Anlaufscheibe und Lagerschale (rechts)

Weiterhin wurde eine universelle Entschraublösung auf Basis von CAD-Daten entwickelt. Die Entwicklung von Demontage-Prozessschritten, wie der Entschraubung, sind mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Ein Grund dafür ist das roboterseitige manuelle Teach-In der Schraubenpositionen sowie die Vermessung von Basis-Koordinatensystemen für die robotergeführte Kamera (Fa. Keyence). Im laufenden Prozess wird diese über einzelnen Schraubenpositionen verfahren und liefert dann die exakten Koordinaten, welche an die Robotersteuerung übertragen werden. Für jede Schraubenebene muss dabei ein Basis-Koordinatensystem über drei Punkte vermessen werden, um die Kamera korrekt ausrichten zu können und um die Zuordnung der Bildkoordinaten zu den Roboterkoordinaten zu gewährleisten (

Abbildung 23A). Sowohl die Basis- als auch die Schraubenkoordinaten werden im manuellen Teach-In Prozess über eine robotergeführte Messspitze bestimmt.

Die im Projektzeitraum weiterentwickelte universelle Entschraublösung umgeht diesen aufwändigen Prozess, indem sie unter Einbeziehung der CAD-Geometriedaten Basis- und Schraubpositionen in das Roboterkoordinatensystem transformiert, welche dann im online Prozess über die zentrale Datenbank an die Robotersteuerung übergeben werden. Im Vorfeld wurden dafür die Transformationsparameter vom CAD- zum Roboterkoordinatensystem über einen Schätzalgorithmus ermittelt. Dafür wurden zwei Punktwolken mit äquivalenten Koordinatenmessungen am EAA aus beiden Bezugssystemen benötigt. Die erste Punktwolke aus 7 Punkten im Roboterkoordinatensystem wurde über eine robotergeführte Messspitze, die zweite im CAD-Modell ausgemessen. Für die Methode sind mindestens 3 Punkte erforderlich, wobei mehr Punkte die Genauigkeit erhöhen. Mit Hilfe der Transformationsparameter konnte im Anschluss jeder beliebige Punkt auf dem EAA unter Nutzung des CAD-Modells mit ausreichender Präzision für die Basiskoordinaten und Schraubenpositionen berechnet werden.

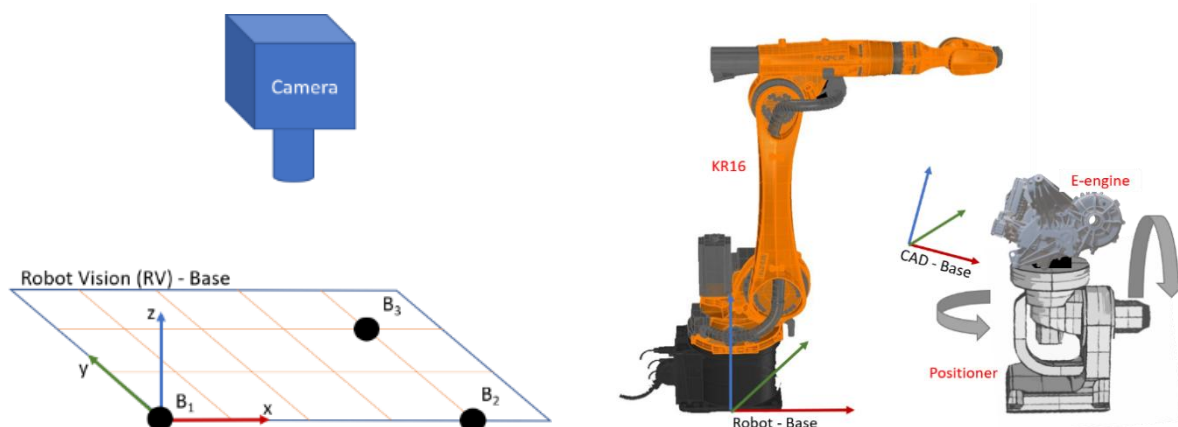


Abbildung 23: A (links) Illustration der Kameraausrichtung zum Basis-koordinatensystem, welches durch drei Punkte definiert ist. B (rechts) Illustration der Transformation vom CAD- zum Roboterkoordinatensystem sowie der beiden Rotationsbewegungen des Aggregats auf dem Positionierer

Da sich das EAA auf einem Zwei-Achs-Positionierer befindet (Abbildung 23B), mussten die sich daraus ergebenden beiden Kreisbahnen im Roboterkoordinatensystem ebenfalls berechnet werden. Dazu wurde das EAA wiederum in verschiedenen Winkelstellungen des Positionierers vermessen, woraus die Kreisparameter im 3D-Raum geschätzt wurden. Anstelle einer Messspitze wurde im Projektzeitraum eine Methode entwickelt, bei der die Rotationsbewegung des Aggregats auf dem Positionierer mit einem zentral darüber installierten 3D Kamerasystem erfasst und mittels eines „Surface Matching“-Algorithmus (proprietäre Software HALCON, Fa. MVTec) das CAD-Modell in die jeweilige Szene eingepasst wird. Aus den verschiedenen Positionen konnten dann die Rotationsparameter für den Positionierer anhand eines Schätzalgorithmus bestimmt werden. Zudem wurde eine Softwarelösung mit Bedienoberfläche für den Nutzer

entwickelt, welche es erleichtert, die Transformations- und Kreisparameter zu berechnen, CAD-Koordinaten in das Roboterkoordinatensystem zu transformieren und in der zentralen Demontagedatenbank abzulegen. Zugleich wurde der Prozess weiterentwickelt, um mittels „Surface Matching“ die Initialposition jedes neu zu demontierenden EAA auf dem Positionierer zu bestimmen.

Die entwickelte Lösung zur automatischen Koordinatenberechnung ermöglicht es, die Entschraubprozesse ohne manuelles Teach-In der Roboter durchzuführen. Die KRL-Programme auf der Robotersteuerung definieren lediglich die Länge der eingesetzten Bitnuss für den aktuellen Schraubentyp, das zugehörige RobotVision-Programm auf dem Keyence-Controller, welches für die Mustererkennung zuständig ist sowie die Anzahl der in dem Prozess zu lösenden Schrauben. Damit weist das System einen hohen Flexibilisierungsgrad auf und konnte im Projekt erfolgreich auf eine neue EAA-Variante (mit Parksperre) angewandt werden.

Aufbau WEAS zur Informationsbereitstellung + humanzentriert

„Der schlaue Klaus®“ begleitet den Werker Schritt für Schritt durch den Montage- bzw. Demontageprozess und überprüft Arbeitsschritte kontinuierlich in Echtzeit. Das System erkennt unter anderem, ob Bauteile korrekt montiert oder demontiert wurden. Rückmeldungen erfolgen direkt während des Arbeitsschritts, sodass Fehler sofort korrigiert werden können, bevor sie in nachgelagerte Prozesse oder Serien übergehen.

Ein Kamera-basiertes Montageassistenzsystem wie der *Schlaue Klaus* der Firma *Optimum* braucht einen Prüfplan, um eine Montage prüfen zu können. Dazu gehört der Ablauf der Prüfungen, wobei bestimmte Prüfungen parallel erfolgen können (Parallelität erhöht die Flexibilität des Werkers). Wann welche Prüfung erfolgt, kann von den Resultaten vorangegangener Prüfungen abhängen. In jedem Fall muss der Ablauf der Prüfungen mit dem Montage- bzw. Demontageplan verträglich sein.

Hinzu kommt die Ausgestaltung der einzelnen Prüfungen, also welche Bildregionen (Regions Of Interest) [ROIs] von welcher Kamera auf welche Merkmale hin mit welchen Parametern und welchen Trainingsbildern überprüft werden sollen. Klassische Merkmale sind Konturen, Muster, Helligkeit und Farbe.

Meist gehört zum Prüfplan auch die Auswahl von sogenannten Ankern, wie etwa ein Schriftzug. Die Abweichungen von Position und Orientierung eines im Bild gefundenen Ankers gegenüber dem Training erlauben es die ROIs an Lageänderungen der zu prüfenden Baugruppe anzupassen.

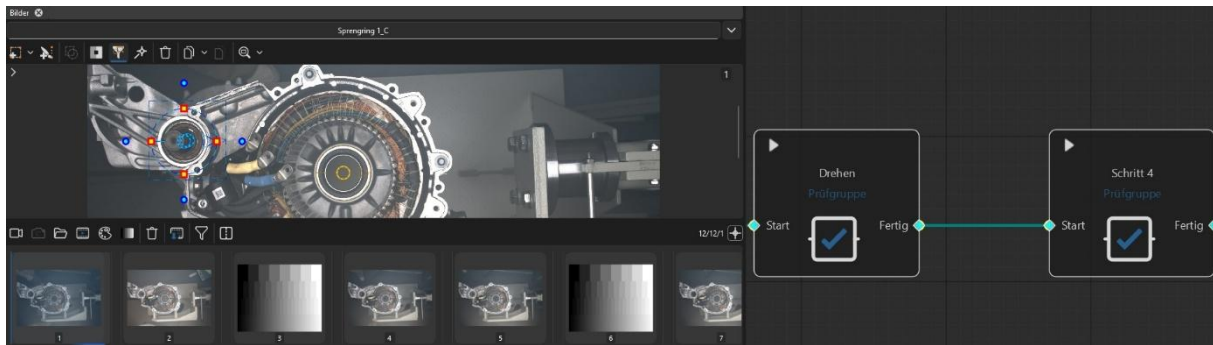


Abbildung 24: Teil der graphischen Oberfläche bei einer Demontageprüfung durch den schlaun Klaus: Links die Bilder zu den Prüfschritten und rechts ein Ausschnitt des Prüfplans mit zwei Prüfungen.

Da die Entwicklung der Use Cases noch in frühen Stadien anzutreffen ist, wurde noch ein weiterer Anwendungsfall für die Betrachtung der Demontage modelliert. Hierbei wurde eine bestehende Prozesslinie digitalisiert und entsprechend dargestellt. Ziel war es den dargestellten Prozess zu untersuchen und basierend darauf Erkenntnisse zu sammeln, welche aktuelle Herausforderungen der Demontage und Kreislaufwirtschaft spiegeln. Somit sollen prototypische Methoden entwickelt werden, welche im Nachgang, sobald eine Industrialisierung der im Projekt betrachteten Anwendungsfälle beginnt, übertragen werden können.

Hierbei konnten insbesondere im Interview verschiedene Verschleißzustände und die Auswirkungen auf beispielsweise Prozesszeiten untersucht und dargelegt werden. Diese wurden simulativ weiter untersucht. Die Modellierung des Produktes erfolgt dabei basierend auf den Volumina dessen und erlaubt in erster Linie eine prozesseitige Untersuchung. Basierend auf der in Abbildung 25 dargestellten Simulation können nun Inputdaten für die Ablaufsimulation, in welcher das gesamte Produktionssystem betrachtet wird, ermittelt werden.



Abbildung 25: imk/wbk: Darstellung der Ergebnisse aus AP2.4 (ema Work Designer Software, 2026)

Systemgestaltung: Mensch & Informationssystem

Für die menschenzentrierte Analyse und Modellierung der Interaktion mit dem Informationssystem (WEAS) wurden die Anforderungen relevanter Nutzergruppen

systematisch erhoben. Grundlage bildete ein nutzerorientiertes Vorgehen nach Methoden des *Design Thinkings*. Als Ergebnis von AP2.4 liegt eine konsolidierte Anforderungssicht für die Gestaltung der Interaktion mit dem Informationssystem (WEAS) vor. Die aus der Videoanalyse, dem Job-Shading sowie den User-Interviews abgeleiteten Anwenderanforderungen wurden differenziert nach Batterie und E-Achse strukturiert und in ein erstes Anforderungstableau überführt. Dieses Tableau bildet die identifizierten Informationsbedarfe und Interaktionsanforderungen entlang der relevanten Arbeitsschritte ab und dient als zentrale Grundlage zur Ableitung der WEAS-Funktionalitäten.

Die Anforderungen wurden anschließend im Austausch mit dem wbk validiert und inhaltlich präzisiert; für den Batteriekontext erfolgte zudem eine Einbettung der Anforderungen in den Demontageprozess der Batterie, um die Prozesspassung sicherzustellen. In zwei Workshops mit den Forschungspartnern wurden die Anforderungen darüber hinaus hinsichtlich technischer Umsetzbarkeit und Priorität diskutiert und konsolidiert.

Das finalisierte Ergebnis ist ein Workflow-Modell zur Prozessgestaltung, das die ermittelten Anwenderanforderungen systematisch abbildet und als konzeptionelle Grundlage für die weitere Ausgestaltung der Informationsbereitstellung und der Assistenzlogik im WEAS-Kontext dient. Damit ist eine strukturierte Basis geschaffen, um die nachfolgenden Arbeiten zur Konzeption und Umsetzung des WEAS zielgerichtet an realen Nutzerbedarfen auszurichten.

Das KSRI leistete einen zentralen Beitrag zur Analyse und Modellierung der humanzentrierten Interaktionen im Kontext der zu entwickelnden Informationssysteme. Insbesondere verantwortete das KSRI die Planung und Durchführung der nutzerorientierten Untersuchungen, die qualitative Auswertung der erhobenen Daten sowie die Ableitung und Strukturierung der Anwenderanforderungen und trug dadurch maßgeblich zur fundierten konzeptionellen Grundlage des WEAS bei siehe Tabelle 1 und Abbildung 5.

Identifikation von Datenbedarfen und Definition des Zielzustandes des Informationsaustauschs zur Planung und Steuerung

Im Arbeitspaket AP3.4 wurde der Zielzustand des Informationsaustauschs zur Planung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungsketten konzeptioniert und inhaltlich vorbereitet. Das KSRI entwickelte hierfür ein strukturiertes Vorgehensmodell zur systematischen Identifikation von Datenbedarfen, das in einem Design-Science-Research-orientierten, iterativen Prozess mit den Konsortialpartnern erarbeitet und validiert wurde. Ausgangspunkt waren interne Workshops zur Modellbildung, gefolgt von einem Online-Workshop mit den AP3.4-Partnern zur Diskussion, Validierung und Anpassung der Modelllogik. Das resultierende Vorgehensmodell umfasst vier Schritte (vgl. Abbildung 26):

- (A) Set the Frame (gemeinsames Problemverständnis/Zielsetzung),

- (B) Szenarioentwicklung entlang von Kreislaufstrategien,
- (C) Definition von Dateninitiativen (u. a. alternative Datenflussmodelle),
- (D) Ermittlung der Datenbedarfe (konkrete Datenanforderungen).

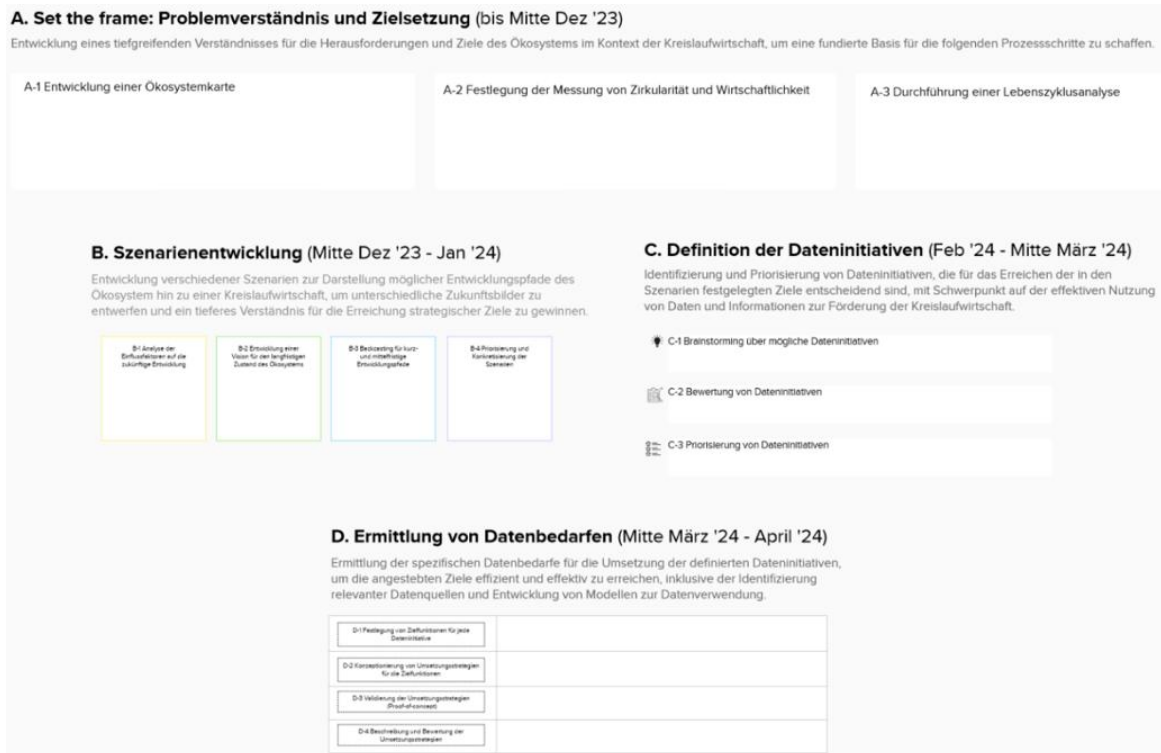


Abbildung 26: Vorgehensmodell zur Datenbedarfserhebung

Im ersten Schritt des Vorgehensmodells wurden ein gemeinsames Problemverständnis sowie die grundlegende Zielsetzung für die Datenbedarfserhebung erarbeitet. Parallel dazu wurden die Unterschritte A-1, A-2 und A-3 durchgeführt, die auf Interviews mit den Konsortialpartnern sowie begleitenden Workshops basierten.

Als zentrales Ergebnis dieser Phase entstand eine Ökosystemlandkarte entlang des kreislauffähigen Materialflusses (Schritt A-1) für eine Batterie sowie für eine E-Achse. Grundlage hierfür bildeten zunächst Interviews mit den Konsortialpartnern, in denen Rollen, Verantwortlichkeiten, relevante Datenflüsse sowie bestehende Schnittstellen identifiziert wurden.

In einem darauf folgenden gemeinsamen Workshop wurden alle Konsortialpartner entlang der erarbeiteten Ökosystemlandkarte innerhalb des kreislauffähigen Wertschöpfungsprozesses verortet (siehe Abbildung 27). Dieser Schritt diente nicht nur der methodischen Strukturierung des Projektökosystems, sondern schuf zugleich interne Transparenz über die jeweiligen Rollen, Abhängigkeiten und Beiträge der beteiligten Partner.

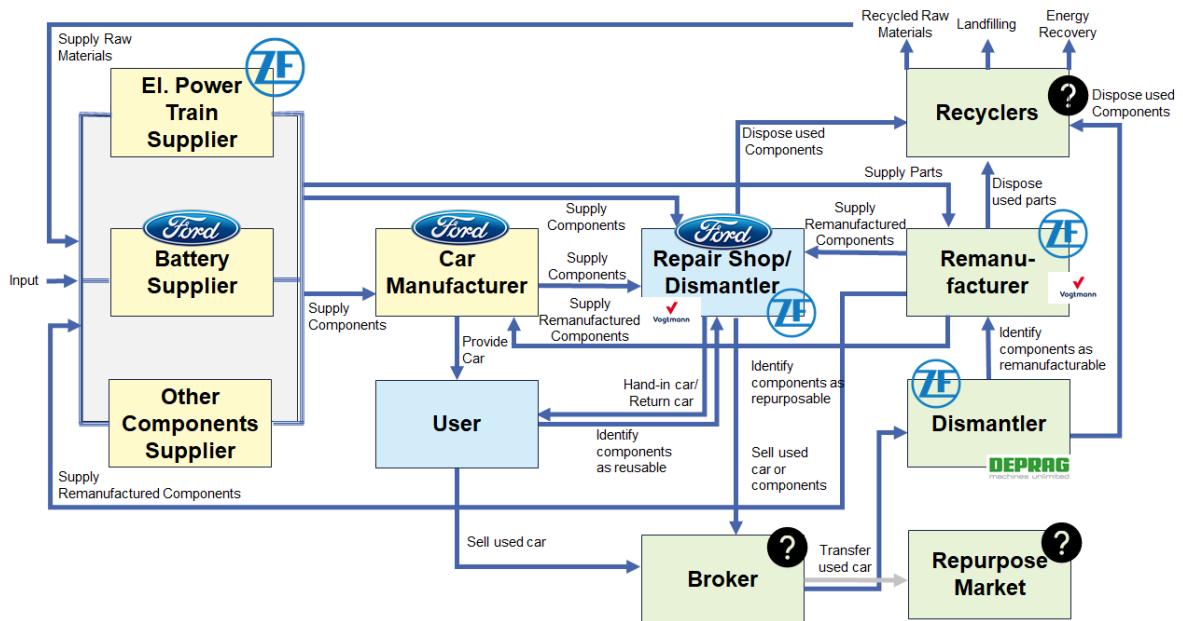


Abbildung 27: Schritt A-1 Ökosystemlandkarte des ZirkulEA Projekts

Im Schritt A-2 wurden die relevanten Messgrößen zur Bewertung von Zirkularität und Wirtschaftlichkeit systematisch definiert. Dabei wurde zunächst zwischen zwei zentralen Kategorien unterschieden: (1) Zirkulierende Teile und Produkte, die repariert, wiederverwendet, remanufactured oder repurposed werden können, sowie (2) zirkulierende Materialien, die recycelt oder recovered werden. Auf Basis dieser Struktur wurde ein Set von KPIs entwickelt, das sowohl die zirkuläre Nutzung als auch die wirtschaftliche Relevanz der jeweiligen Prozesse abbildet (siehe Abbildung 28).

	Recirculate parts & products (E-Achse, Batterie, E-Auto)			Recirculate materials
	Repair	Reuse & Remanufacturing	Repurpose	Recovery & recycling
	<ul style="list-style-type: none"> Planning and Control of Material Flow During and After Usage <ul style="list-style-type: none"> Saved Transportation Cost Saved CO₂-emissions (Repair/Reuse/Reman/Repurpose/Recycle vs. New Production) <ul style="list-style-type: none"> Increased energy efficiency 			
KPI	<ul style="list-style-type: none"> Amount of repairable product/ components Ratio of repaired to replaced parts Average product/component lifespan (Average time a vehicle is kept in use before being repaired or scrapped) Extension of the average lifetime through repair Lifespan (in years) vs. mileage (in kilometres) Average Time to repair 	<ul style="list-style-type: none"> Amount of components (von der E-Achse, Batterie) reused or remanufactured Ratio of returned parts/products to reusable or remanufactured products Lead time for remanufacturing processes Extension of total production time Extension of the average service life of the product Reduced number of early waste of remanufactured products 	<ul style="list-style-type: none"> Amount of products repurposed Percentage of products/components launched in new markets or applications 	<ul style="list-style-type: none"> Material recovery rate: Measurement of the percentage of material that is recovered and recycled at end-of-life Time until the recycled materials are reintroduced into the production cycle
KPI Economic efficiency	<ul style="list-style-type: none"> Revenue of repaired products vs. costs Costs ratio of repair of product to new product Increase in sales from repair services compared to the previous year 	<ul style="list-style-type: none"> Remanufacturing cost versus new parts costs Revenue of remanufactured products vs. costs Customer satisfaction rate with remanufactured products 	<ul style="list-style-type: none"> Sales share of repurposed products compared to total sales Cost ratio of repurposing to new production or disposal 	<ul style="list-style-type: none"> Overall savings through the sale of recycled materials Cost savings due to reduced disposal fees as a result of higher recycling rates

Abbildung 28: Schritt A-2 KPIs zur Messung der Zirkularität und Wirtschaftlichkeit

Die KPIs wurden anschließend in einem gemeinsamen Workshop mit den Konsortialpartnern diskutiert und validiert, um sicherzustellen, dass sie sowohl wissenschaftlich fundiert als auch praxisrelevant und im Projektkontext anwendbar sind.

Im Schritt A-3 wurde eine Lebenszyklusanalyse erarbeitet, die in Abbildung 29 dargestellt ist. Diese Analyse beschreibt die möglichen Pfade der Batterie und der E-Achse sowie deren potenzielle zirkuläre Wertschöpfungsschritte. Sie bildet damit die verschiedenen Optionen für die Weiterverwendung, Aufbereitung und Rückgewinnung ab und schafft eine strukturierte Grundlage für die spätere Identifikation der benötigten Daten entlang dieser Prozesse.

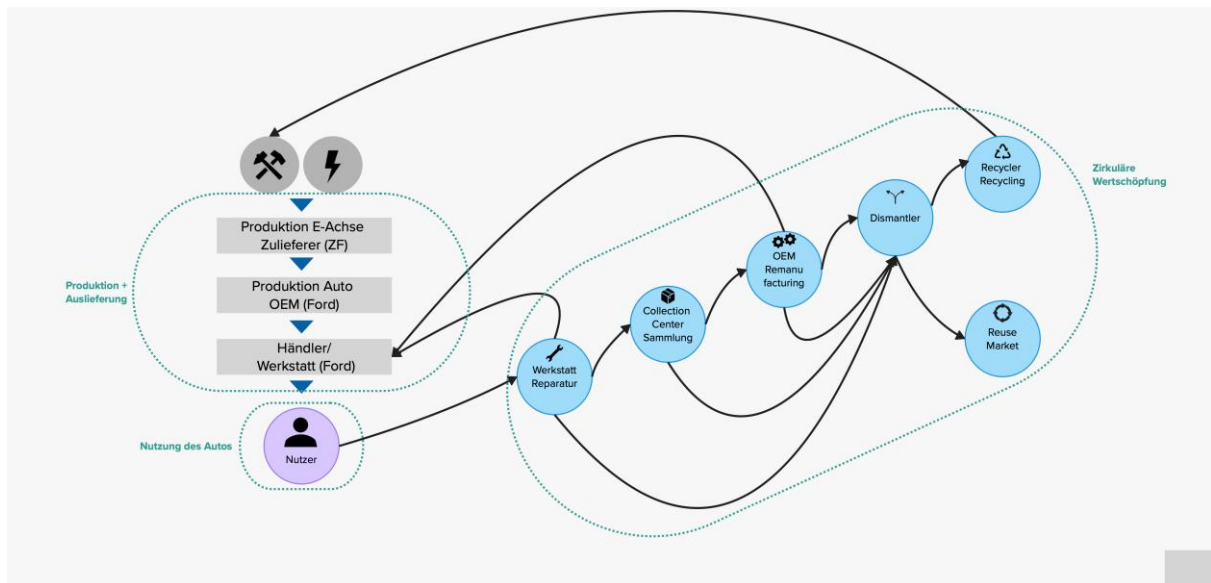


Abbildung 29: Schritt A-3 Lebenszyklusanalyse

Auf Basis des erarbeiteten Problemverständnisses wurden im nächsten Schritt (Schritt B) mehrere Anwendungsszenarien entwickelt (vgl. Abbildung 30). Diese orientieren sich an den zentralen Kreislaufstrategien Reuse, Repair, Repurpose, Remanufacture und Recycle.

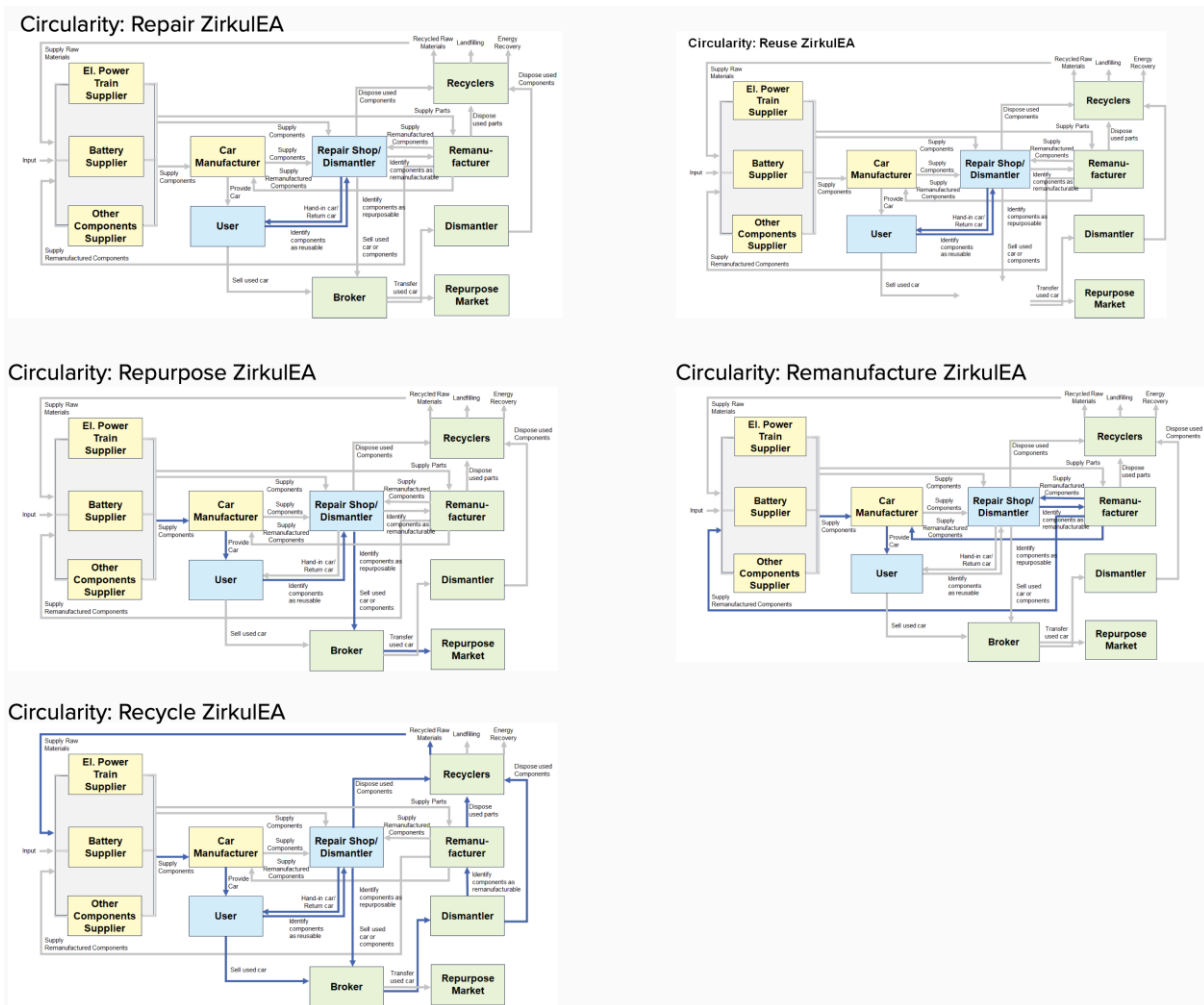


Abbildung 30: Szenarientwicklung – Ökosystementwicklung entlang der Kreislaufwirtschaftsstrategien

Die Szenarien wurden anschließend entlang der zuvor erstellten Ökosystemlandkarte visualisiert (siehe Abbildung 27), sodass die jeweiligen zirkulären Wertschöpfungspfade und Prozessschritte nachvollziehbar dargestellt werden konnten. Dadurch entstand eine konsistente, praxisnahe Grundlage für die nachfolgende Ableitung von Dateninitiativen und Datenbedarfen. Im nächsten Schritt des Vorgehensmodells befasste sich das KSRI mit der Analyse potenzieller Dateninitiativen (Schritt c). Zu diesem Zweck wurden mehrere Design-Optionen für zukünftige Datenflussmodelle in der Automobilindustrie erarbeitet. Die Modelle wurden auf der Mobilkreis-Tagung 2024 in Chemnitz vorgestellt und gemeinsam mit Expertinnen und Experten diskutiert. Konkret wurden drei grundlegende Datenflussarchitekturen entwickelt: (1) Ein zentralisiertes Datenflussmodell, (2) ein föderiertes Modell und (3) ein OEM-zentriertes Modell. Jedes dieser Modelle weist spezifische Stärken und Schwächen auf. Im Folgenden werden die drei Modelle detailliert dargestellt.

Zentralisiertes Data-Sharing-Modell:

- Eine einzige maßgebliche Plattform für den Datenaustausch zwischen allen Beteiligten
- Gewährleistung einer einheitlichen Datenverwaltung und eines einfachen Zugangs für autorisierte Nutzer (z. B. durch eine Gebühr)
- Entschädigung der Beteiligten durch Daten und Dienste
- Zu den Herausforderungen gehören ein einziger Fehlerpunkt, Skalierbarkeitsprobleme und das Vertrauen in eine zentrale Behörde

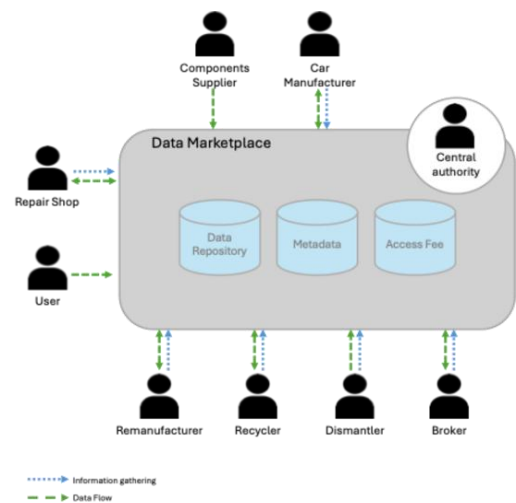


Abbildung 31: Zentralisiertes Data Sharing Modell

Föderiertes Data Sharing Modell:

- Verteiltes Netz miteinander verbundener Akteure mit P2P-Datenaustausch (z. B. Catena-X)
- Wahrung der Datenhoheit und Förderung des Echtzeit-Datenaustauschs
- Robuste Protokolle für Interoperabilität und Standardisierung erforderlich
- Erhöht die Transparenz und Rückverfolgbarkeit von Praktiken der Kreislaufwirtschaft

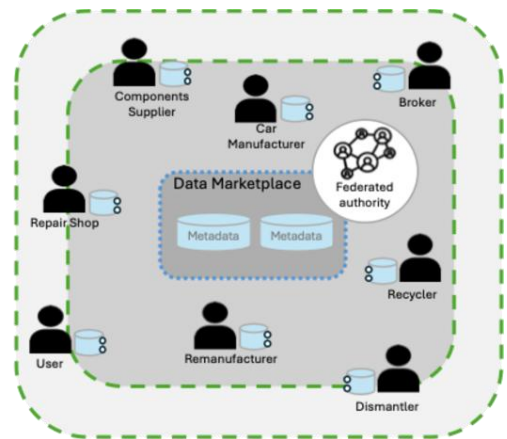


Abbildung 32: Föderiertes Data Sharing Modell

OEM-zentriertes Data Sharing Modell:

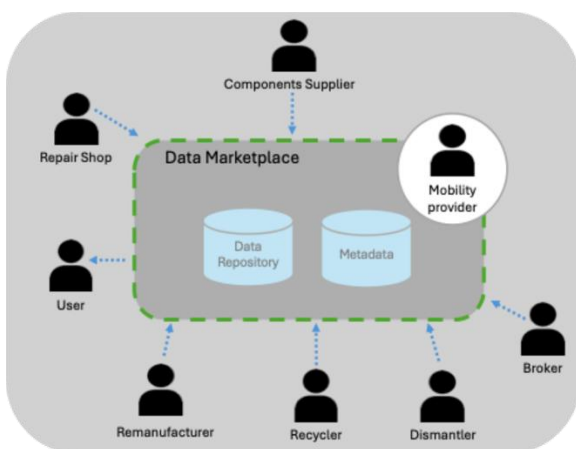


Abbildung 33: OEM-zentriertes Data Sharing Modell

- Zentralisierung der Daten- und Materialflüsse, wobei die Mobilitätsanbieter im Mittelpunkt stehen
- Angetrieben von technologischen Fortschritten und Änderungen in der Gesetzgebung
- Ermöglicht ein optimiertes Lebenszyklusmanagement und maximiert die Kreislauffähigkeit von Materialien
- Überwachung und Verwaltung von Nutzungsdaten, Wartungsplänen und Reparaturen

Weitere potenzielle Dateninitiativen sowie konkrete Beispiele für deren praktische Umsetzung wurden im Rahmen des Projekts eingehend untersucht und vertieft analysiert.

Das Vorgehensmodell schließt mit Schritt D ab, der systematischen Erhebung der Datenbedarfe. Zu diesem Zweck wurden Experteninterviews mit den Konsortialpartnern durchgeführt, um die spezifischen praktischen Anforderungen entlang der zirkulären Wertschöpfungskette zu erfassen. Die daraus resultierenden Bedarfe wurden anschließend mit den Anforderungen des ab 2027 geltenden Batteriepasses abgeglichen (BMW, 2026). Durch diesen Abgleich konnte sichergestellt werden, dass sowohl die praxisrelevanten Anforderungen der Projektpartner als auch die zukünftigen gesetzlichen Vorgaben angemessen berücksichtigt werden. Parallel dazu erfolgte eine umfassende Literaturrecherche, um die Ergebnisse im Kontext des aktuellen wissenschaftlichen Forschungsstandes zu reflektieren. Aus dieser Triangulation ergaben sich die folgenden konsolidierten Datenbedarfe, die sich in zwei grundsätzliche Bedarfe unterscheiden lassen: Produktbezogen und Produktunabhängig. Tabelle 3 stellt diese Datenbedarfe übersichtlich dar.

Tabelle 3: Triangulierte Datenbedarfe

Produktbezogener Informationsbedarf	Begründung/Beschreibung
Produkterkennung	Eindeutige Identifizierung des Produkts: Produkttyp, Zustand und Softwareversion, u.a. um erste potenzielle Abschätzungen bzgl. einer R-Strategie zu treffen.
Produkt- und Komponententrennung	Prüfung der Produktarchitektur zur Aufweisung potenzieller Trennverfahren und dem damit verbundenen Aufwand.
Produktaufbau	Aufbau des Produkts anhand von Parametern wie Gewicht, Volumen, Energiedaten, Temperaturmanagement, Modul- und Zellstruktur, Reman-Anteilen sowie Montageprozessen analysiert, um den Demontageaufwand und die Transportanforderungen zu bewerten. Ggfs. Bereitstellung einer Demontageanleitung.
Funktionalität auf Produkt- und Komponentenebene	Qualitätschecks zur Evaluierung der Funktionalität auf Produkt- und Komponentenebene.
Materialien	Angaben zu den verwendeten Materialien: Zusammensetzung der Batterie, Stoffzusammensetzungen in Anode, Kathode, Elektrolyt und kritische Rohstoffe.
Materialtrennung	Aufweisen einer potenziellen Materialtrennung und dem damit verbundenen Aufwand. Berücksichtigung von Verunreinigungen und Rückstände.
Schädliche Komponenten/Stoffe	Angaben zu den verwendeten schädlichen Komponenten/Stoffen zur Einschätzung, ob eine Gefährdung oder Belastung von Menschen oder Umwelt zu erwarten ist. Insbesondere relevant, wenn ein Produkt demontiert

	wird, um eine Reparatur und Wiederaufbereitung vorzunehmen, sowie bei einer späteren Verwertung oder Rückführung in den Stoffkreislauf.
Produktunabhängige Informationsbedarfe	Begründung/Beschreibung
Gesetzliche Anforderungen	Aufzeigen welche Schritte im Rahmen gesetzlicher Vorgaben umgesetzt werden müssen.
Nachhaltigkeit	Informationen zu CO2-Ausstoß sowie die Verwendung wiederaufbereiteter oder recycelter Materialien
Impact Bewertung	Ganzheitliche Betrachtung sozialer und ökologischer Messwerte zur Bewertung der Gesamtauswirkungen eines Produktes
Wertschöpfungskette	Abwägung und Betrachtung logistischer Aufwendungen aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht
Marktinformationen	Informationen über den aktuellen Markt zur Bewertung von Nachfrage nach reparierten, wiederaufbereiteten oder recycelten Produkten, Komponenten oder Materialien.

Die ermittelten Datenbedarfe wurden zur Unterstützung eines standardisierten und effizienten Datenaustauschs in neun Datenprodukte überführt. In Forschung und Praxis ist die Strukturierung von Daten in standardisierte Datenprodukte ein etabliertes Vorgehen: Sie erleichtert den Austausch zwischen unterschiedlichen Akteuren, erhöht die Interoperabilität und schafft zugleich klare Verantwortlichkeiten sowie definierte Nutzungsmöglichkeiten innerhalb eines Ökosystems.

Die nachfolgende Tabelle 4 stellt die Datenprodukte übersichtlich dar.

Tabelle 4: Datenprodukte

Produktbezogener Informationsbedarf	Beschreibung	Zweck	Datenpunkte
Produktidentifikation	Eindeutige Identifizierung des Produkts und Zuordnung von Komponenten	Basis für Rückverfolgbarkeit und Versionierung digitaler Zwillinge	<ul style="list-style-type: none"> Eindeutige Batterieerkennung (z. B. Batteriepass) Seriennummer, Herstellungsdaten, Modellinformationen Validierungsmechanismen (z. B. Plausibilitätsprüfungen) Zustandsdaten (Echtzeit), Softwarestände, Audit-Logs
Produkt- & Komponentenmodularität	Bewertung von Demontagefreundlichkeit und Austauschbarkeit sowie dem damit verbundenen Aufwand	Grundlage für Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing	<ul style="list-style-type: none"> Materialliste auf Komponentenebene (Optional) CAD-Daten zur Analyse Aggregierte Bewertung der Trennbarkeit mit Aufwandschätzung

			<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Produktanleitungen zur Qualitätssicherung
Zustand der Komponente	Einschätzung der Restlebensdauer und Repair-, Remanufacturing- oder Recycling-Eignung	Integration von sensorbasierten Daten, Diagnose und Nutzungshistorie	<ul style="list-style-type: none"> • Alter, Ladezyklen, Zellaufbau, Energie- und Leistungsdaten • Schäden, Wartungshistorie, eingesetzte Ersatzteile • Vergleich mit Normwerten zur Zustandseinschätzung
Materialspezifikation	Bewertung von Schadstoffen und Recyclingfähigkeit	Enthält detaillierte Materialinformationen, wichtig für Auswahl von Trennverfahren und Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Materialzusammensetzung bis auf 0,1 % Genauigkeit • Gefährliche Stoffe gemäß REACH/GHS mit Risikobewertung • Physikalische/chemische Eigenschaften, Mikrostruktur • Lokalisierung gefährlicher Substanzen
Produktunabhängige Informationsbedarfe	Beschreibung	Zweck	Datenpunkte
Gesetzliche Anforderungen	Sicherstellung der Regeltreue und Dokumentationspflichten	Umfasst Normen, Konformitätsnachweise, regulatorische Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Fußabdruck je Komponente • Anteil recycelter/sekundärer Materialien • Energieverbrauch je Strategie • Sozialindikatoren: Arbeitsplatzwirkung, Gesundheitsrisiken • Nachhaltigkeitsscore
Nachhaltigkeitsbewertung	Ganzheitliche Bewertung zirkulärer Maßnahmen	Verknüpft ökologische, soziale und ökonomische Indikatoren	<ul style="list-style-type: none"> • Produktionsstandorte, Transportdistanzen • Standortverteilung der Akteure in der End-of-Life-Kette • Basis für Kosten-Nutzen-Analysen logistischer Szenarien
Wertschöpfungskettendaten	Bewertung logistischer Aspekte und zirkulärer Geschäftsmodelle	Standort-, Transport- und Lagerdaten, ökonomische und ökologische Entscheidungsgrundlage	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-Normen, EU-Konformitätserklärung • Auflistung verpflichtender Anforderungen je Akteur • Grundlage für gesetzestreuere Handlungsentscheidungen
Marktinformationen	Unterstützung marktbasierter Entscheidungen	Daten zu Angebot/Nachfrage, Preis, Verfügbarkeit von Re-X Produkten & Komponenten oder Sekundärmat.	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage nach rückgeführten oder recycelten Produkten • Verfügbarkeit von Rückläuferkomponenten • Einschätzung wirtschaftlicher Tragfähigkeit von Reuse / Remanufacturing

Abschließend wurden die Ergebnisse in einer Informationsmatrix zu Rollen und Verantwortlichkeiten konsolidiert. Für die Zuordnung wurde eine abstrahierte und verdichtete Version des in Arbeitspaket 3.3 entwickelten Entscheidungsbaums

verwendet. Als methodische Grundlage diente der RACI-Ansatz, um Verantwortlichkeiten strukturiert und nachvollziehbar abzubilden (vgl. Abbildung 34).

Datenprodukte	Rollen	Responsible	Accountable	Consulted	Informed
Produktidentifikation		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier, User	User
Produkt- & Komponentenmodularität		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier	-
Zustand der Komponente		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier, User	User
Materialspezifikation		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer, Recycler	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer, Recycler	Supplier, Manufacturer, Dismantler	-
Nachhaltigkeitsbewertung		Repairer, Remanufacturer	Repairer, Remanufacturer	Manufacturer, Supplier	-
Wertschöpfungskettendaten		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Supplier, Dismantler	-
Gesetzliche Anforderungen		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier, User	User
Marktinformationen		Manufacturer, Repairer, Remanufacturer, Broker	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer, Broker	User, Repurpose Market	-

Abbildung 34: 35RCAI Ansatz in Anlehnung an Sheehan

Zudem wurden die relevanten Prozessschritte entlang des Dateninputs und Datenoutputs für jede Phase formuliert. Auf diese Weise werden die Datenbedarfe innerhalb der kreislauffähigen Wertschöpfung systematisch und transparent dargestellt. Abbildung 36 zeigt einen Ausschnitt der erstellten Informationsmatrix.

Entscheidungspunkt	Relevante R-Strategie	Data Product	Daten Input	Daten Output	Supplier	Manufacturer	User	Repairer	Remanufacturer	Broker	Dismantler	Repurpose Market	Recycler
Befund			Seriennummer: Produktionsdatum und Ableitung der Gewährleistungsfrist	Bericht zu Produkt-/Komponenten-Veränderungs Freigabe	C	R, A		I, C	R	R	-	-	-
Darf das Unternehmen Veränderungen an dem Produkt und seinen Komponenten vornehmen?	je	Produktidentifikation	Normen und Anforderungen Kaufmännik des Produkts/der Komponente	Bericht über gesetzliche Vorgaben									
		Gesetzliche Anforderungen											
Veraltete Produktversion und mangelnde Funktionalität ODER Mangelnde Funktionalität ODER Veraltete Produktversion?	je	Produktidentifikation	Softwarestand										
		Zustand des Produkts/der Komponente (Fehlerauslesung)	Fehlerspeicher										
		Materialspezifikation	Materialdatenblätter, chemische Zusammensetzungsberichte	Diagnosebericht über die Funktionalität des Autos									
Betrachtung der einzelnen Komponenten oder des gesamten Produkts?	je	Zustand des Produkts/der Komponente	Diagnosebericht über die Funktionalität des Autos, interne Erfahrungswerte	Diagnosebericht zur Funktionalität auf Produkt/Komponenten Ebene									
Produkt-/Komponententrennung					C	R, A		R	R		-	-	-
Liegt eine modulare Produktarchitektur vor?	je	Produkt-/Komponentenmodularität	CAD-Daten, Reparaturanleitung	Bericht über modulare Produktarchitektur									
Lassen sich die Komponenten des Produkts dennoch trennen?	je	Produkt-/Komponentenmodularität	CAD-Daten, Reparaturanleitung, Erfahrungswerte	Bericht über Trennbarkeit einer nicht modularen Produktarchitektur									
		Produkt-/Komponentenmodularität	CAD-Daten, Erfahrungswerte, Stundensätze, Aufwandschätzung										
Ist der Aufwand des Trennverfahrens			Ökologische Kosten der Entsorgung vs. ökologische Kosten der										

Abbildung 36: Ausschnitt der Informationsmatrix

Kreislauffähiges Partnerökosystem

Im Rahmen der Arbeiten zum kreislauffähigen Partnerökosystem wurde untersucht, welche organisatorischen, informationellen und technologischen Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit Akteure entlang zirkulärer Wertschöpfungsketten wirksam zusammenarbeiten können. Im Mittelpunkt standen dabei nicht nur die Rollen und Beziehungen der beteiligten Unternehmen, sondern auch die Frage, wie produkt- und

prozessbezogene Informationen über Unternehmensgrenzen hinweg bereitgestellt, angereichert und genutzt werden können. Aufbauend auf den vorangegangenen Arbeiten zu Datenbedarfen, Datenprodukten und Verantwortlichkeiten wurde das Partnerökosystem daher als Verbindung von Wertschöpfungsstruktur, Governance, Datenaustausch und technischer Anschlussfähigkeit verstanden. Ziel war es, Gestaltungsgrundlagen zu erarbeiten, die sowohl die Koordination der Partner als auch die Auswahl und Einbettung geeigneter Traceability Lösungen in ein tragfähiges Datenökosystem unterstützen.

Die Ökosystemperspektive als Grundlage für Datenökosysteme in der Kreislaufwirtschaft

Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft lässt sich nur begrenzt aus einer einzelbetrieblichen Perspektive verstehen. Stattdessen ist ein Ökosystemansatz erforderlich, der die Gesamtheit der relevanten Akteure und deren Interaktionen einbezieht (Adner, 2017; Konietzko et al., 2020). Aufbauend auf dem Konzept des Business Ecosystems (Moore, 1993) wird in der Literatur zunehmend von Circular Ecosystems gesprochen, die die Logik von Geschäftsökosystemen mit zirkulären Strategien verbinden (Bertassini et al., 2021; Trevisan et al., 2022).

Business Ecosystems werden als wertorientierte Netzwerke aus autonomen, aber komplementären Organisationen beschrieben, die gemeinsam ein Wertversprechen erfüllen. Häufig übernimmt ein Orchestrator die Rolle der Koordination und Ausrichtung der Partner (Adner, 2017; Jacobides et al., 2018). Die Übertragung dieser Logik auf zirkuläre Wertschöpfung ermöglicht, Interdependenzen, dynamische Beziehungen und gemeinsam verfolgte zirkuläre Geschäftsmodelle (z. B. Reuse, Repair, Remanufacturing) systematisch zu betrachten (Antikainen & Valkokari, 2016; Bocken et al., 2017). Trevisan et al. (2022) definieren *Circular Ecosystems* als Systeme interdependenter, heterogener Akteure, die ihre kollektiven Anstrengungen auf ein zirkuläres Wertversprechen ausrichten. Im Vergleich zu klassischen Lieferketten sind sie durch höhere Flexibilität, stärkere Unabhängigkeit der Akteure sowie eine ausgeprägte Bedeutung des Informations- und Ressourcenaustauschs gekennzeichnet (de Langen et al., 2020).

Zentrale Elemente zirkulärer Ökosysteme und Anforderungen an das Partnerökosystem

Fünf zentrale Elemente werden in einem zirkulären Ökosystem unterschieden, die zugleich Anforderungen an den Aufbau von Datenökosystemen für die Kreislaufwirtschaft beschreiben:

Wert: Im Zentrum steht ein gemeinsames, zirkuläres Wertversprechen, das von den beteiligten Akteuren gemeinsam geschaffen und kollektiv genutzt wird. Es sind mehrere Wertschöpfungskreise (z. B. Erstnutzung, Aufarbeitung, Zweitnutzung) möglich und erwünscht. Für Datenökosysteme bedeutet dies, dass der Informationsaustausch nicht

nur kurzfristige Effizienzgewinne, sondern auch langfristige ökologische und ökonomische Wertschöpfung fördern muss.

Akteure: Die Akteure – etwa Hersteller, Zulieferer, Dienstleister, Remanufacturer, Recycler oder Nutzer – bringen komplementäre Fähigkeiten in das Ökosystem ein. Voraussetzungen für funktionierende Datenökosysteme sind: (i) Bereitschaft zur Teilnahme und zum Datenaustausch, (ii) Mechanismen zur gemeinsamen Planung, Entscheidungsfindung und Ressourcennutzung, (iii) Vertrauen sowie faire Verteilung des gemeinsam geschaffenen Wertes. Häufig ist ein Orchestrator erforderlich, der die Koordination übernimmt und technische wie organisatorische Infrastruktur bereitstellt (Parida et al., 2019; Trevisan et al., 2022).

Daten, Materialien und Flüsse: Dieses Element ist für Traceability- und Datenökosysteme zentral. Akteure müssen Materialflüsse zirkulär denken (R-Strategien) und produkt- und materialbezogene Daten über den gesamten Lebenszyklus erfassen sowie bereitstellen. Dazu gehören u. a. Daten zu Materialzusammensetzung, Nutzung, Performance, Reparaturen und End-of-Life-Optionen. Gleichzeitig sind die Datenintegration aus unterschiedlichen Quellsystemen und ein strukturiertes Management der Daten- und Materialflüsse erforderlich. Dies setzt Interoperabilität, transparente Schnittstellen und klare Verantwortlichkeiten im Datenmanagement voraus.

Zirkuläre Aktivitäten und Strategien: Die Umsetzung des zirkulären Wertversprechens erfolgt durch Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette (z. B. Design for Disassembly, Predictive Maintenance, Remanufacturing). Diese Aktivitäten sind auf ökologische Ziele ausgerichtet, müssen jedoch zugleich finanziell tragfähig sein (Trevisan et al., 2022). Datenökosysteme müssen daher die für diese Aktivitäten benötigten Informationen in geeigneter Qualität, Granularität und Aktualität bereitstellen.

Governance: Governance umfasst die Koordination, die Rollenverteilung sowie die Regeln und Standards der Zusammenarbeit. Für zirkuläre Ökosysteme wird eine eher nicht-hierarchische, kollaborative Governance empfohlen, die der hohen Unabhängigkeit der Akteure Rechnung trägt (Trevisan et al., 2022). Gleichzeitig ist ein verbindlicher Rahmen aus technischen Standards, Datenformaten, Zugriffsregeln und vertraglichen Vereinbarungen erforderlich (Jacobides et al., 2018). Umweltregulierung und politische Rahmenbedingungen (z. B. EU-Kreislaufwirtschaftspaket) prägen diese Governance maßgeblich.

Für das Vorhaben wurde damit deutlich, dass ein kreislauffähiges Partnerökosystem nur dann belastbar ausgestaltet werden kann, wenn technische und organisatorische Gestaltungsentscheidungen gemeinsam betrachtet werden. Die Bereitschaft zur Teilnahme am Ökosystem, die Verteilung von Verantwortlichkeiten, die Definition gemeinsamer Regeln und die faire Verteilung des erzeugten Nutzens bilden die Voraussetzung dafür, dass Informationsflüsse entlang der Kreislaufwege überhaupt

etabliert werden können. Daraus folgt zugleich, dass Traceability nicht als isolierte Einzellösung verstanden werden kann. Vielmehr muss sie in ein übergeordnetes Partner- und Datenökosystem eingebettet sein, das Datensouveränität, Interoperabilität, abgestufte Zugriffsrechte und eine anschlussfähige technische Infrastruktur systematisch zusammenführt.

Rolle von Daten und Informationsaustausch in der Kreislaufwirtschaft

Die Literatur hebt übereinstimmend hervor, dass Kreislaufwirtschaft eine deutliche Ausweitung der Erhebung, Nutzung und des Austauschs von Daten erfordert (Kristoffersen et al., 2020). Notwendig ist eine systematische Betrachtung des Lebenszyklus von Materialien und Produkten, die über einzelne Unternehmensgrenzen hinausgeht (Velázquez-Martínez et al., 2019). Dabei werden vier zentrale Datenbereiche für zirkuläre Anwendungen unterschieden: (i) Materialflussdaten (z.B. Mengen, Qualitäten, Wege), (ii) Systemperformancedaten (z.B. Effizienz, Verluste, Emissionen), (iii) Kund:innenverhaltensdaten (z.B. Nutzungsintensität, Rückgabe- und Rückführungsquoten), (iv) Produkt- und Servicelebensdauerdaten (z.B. Ausfälle, Wartungszyklen). Die politische Diskussion rund um den Digital Product Passport (DPP) verdeutlicht die Relevanz des Themas. Der DPP beschreibt einen Datensatz mit allen für Umwelt- und Sozialverträglichkeit relevanten Produktinformationen (z.B. Materialien, Komponenten, Chemikalien, Reparatur- und Demontageinformationen, End-of-Life-Optionen) und ermöglicht Track-and-Trace-Funktionen entlang der Wertschöpfungskette. Damit werden Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, -qualität und -zugänglichkeit für alle relevanten Akteure definiert. Gleichzeitig zeigen Studien, dass Datenerhebung und -austausch in vielen Unternehmen noch keine hohe Priorität im Kontext der Kreislaufwirtschaft besitzen (De Mattos & De Albuquerque, 2018). Daten werden eher als unterstützender Faktor als strategischer Enabler gesehen. Dadurch bleiben bestehende Barrieren im Informationsaustausch unerkannt, und Datenlücken entlang der Wertschöpfungskette bestehen fort.

Restriktionen und Barrieren für den Informationsaustausch

Die Literatur identifiziert verschiedene Gründe, warum Unternehmen beim Datenaustausch zögern, obwohl dieser für zirkuläre Geschäftsmodelle essenziell ist:

Strategische und finanzielle Risiken: Daten besitzen hohen strategischen Wert. Das Teilen von sensiblen Produkt-, Prozess- oder Kundendaten wird häufig als Risiko für Wettbewerbsposition, Geschäftsgeheimnisse und Margen wahrgenommen. Die potenziellen Vorteile zirkulärer Aktivitäten werden dadurch überlagert (Serna-Guerrero et al., 2022).

Mangelndes Vertrauen und unzureichende Governance: Die Bereitschaft zur Datenfreigabe ist eng an Vertrauen in die anderen Akteure und in technische wie rechtliche Schutzmechanismen gekoppelt. Fehlen klare Regeln zur Datennutzung, zum Dateneigentum, zur Zugriffskontrolle und zur Haftung, verstärkt das die Zurückhaltung.

Technologien wie Blockchain werden in der Literatur als mögliche Bausteine zur Vertrauensbildung diskutiert, indem sie Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Datennutzung erhöhen (Bressanelli et al., 2022).

Rechtliche Unsicherheit: Unternehmen sehen sich mit komplexen und sich verändernden regulatorischen Rahmenbedingungen konfrontiert, etwa im Hinblick auf Datenschutz, geistiges Eigentum oder Produkthaftung (Demestichas & Daskalakis, 2020). Aus Angst vor Gesetzesverstößen wird der Umfang des Informationsaustausches oft eher begrenzt als erweitert.

Fragmentierte IT-Landschaften und Dateninseln: Lineare Wertschöpfungsketten sind häufig durch eine einfache Weitergabe physischer Produkte gekennzeichnet, während zugehörige Daten bei den jeweiligen Akteuren verbleiben (Hakanen et al., 2017). Fehlende Interoperabilität, proprietäre Formate und heterogene IT-Systeme erschweren die durchgängige Nachverfolgbarkeit von Komponenten und Materialien.

Die literaturbasierte Analyse zeigt, dass zirkuläre Datenökosysteme

- auf einem klar definierten zirkulären Wertversprechen und einer geeigneten Zusammensetzung von Akteuren beruhen,
- hohe Anforderungen an die Erhebung, Integration und Governance von produkt- und materialbezogenen Daten stellen,
- durch Vertrauens-, Risiko- und Rechtsfragen im Informationsaustausch begrenzt werden,
- sowie graduell mit steigender Maturität komplexere Formen von Traceability und Datennutzung ermöglichen.

Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die im Projekt ZirkulEA entwickelte Anforderungsliste zum Informationsaustausch in einem zirkulären Wertschöpfungsnetzwerk und fließen direkt in die Gestaltung des Partnerökosystems sowie der technischen Traceability-Lösungen ein.

Experteninterviews mit ZirkulEA-Partnern

Ergänzend zur Literaturrecherche wurden sechs semistrukturierte Interviews mit Industriepartnern aus dem Projektkontext geführt. Die Gesprächspartner deckten die verschiedenen Schlüsselrollen der Wertschöpfung ab. Durch die mehrjährige Erfahrung in Entwicklung, Nachhaltigkeit, Daten- bzw. Plattformprojekten und Remanufacturing der Interviewpartner, konnte die Anforderungsliste erweitert werden.

In den mit den ZirkulEA-Partnern durchgeführten Experteninterviews standen drei miteinander verknüpfte Themenbereiche im Fokus, die gemeinsam die Anforderungen an Datenökosystem und Traceability-Lösung konkretisierten.

Zunächst wurden die Rollen der Unternehmen im zirkulären Ökosystem sowie ihre Einbindung in den Lebenszyklus des Produkts betrachtet. Für jedes Unternehmen wurde herausgearbeitet, ob es beispielsweise als Komponentenhersteller, Demontagebetrieb,

Remanufacturer oder Dienstleister agiert und an welchen Stellen des Lebenszyklus es mit anderen Akteuren interagiert. Dabei wurden bestehende wirtschaftliche Beziehungen und Abhängigkeiten entlang der Wertschöpfungsstufen diskutiert, um zu verstehen, an welchen Schnittstellen ein erhöhter Informations- und Datenaustausch erforderlich ist. Diese Perspektive machte deutlich, wo heute bereits Daten entstehen, wo sie verloren gehen und in welchen Konstellationen eine Plattformlösung den größten Mehrwert für die Zusammenarbeit bieten kann.

Darauf aufbauend richteten sich die Interviews auf konkrete Daten- und Traceability-Anforderungen aus Sicht der Praxis. Die Gesprächspartner beschrieben, welche produkt- und materialbezogenen Daten derzeit erfasst werden und welche zusätzlichen Informationen benötigt würden, um zirkuläre Strategien wie Reparatur, Remanufacturing oder Wiederverwendung effizient umzusetzen. Besprochen wurden Anforderungen an Datenqualität, Granularität und Aktualität ebenso wie die Frage, in welcher Form und mit welchem Detailgrad Daten zugänglich sein müssen, damit sie im operativen Alltag nutzbar sind. Ein zentraler Teil der Diskussionen betraf bestehende Hürden: Die Partner schilderten Vorbehalte gegenüber dem Teilen sensibler Informationen, Unsicherheiten in Bezug auf Datensouveränität, Haftungsfragen und den Schutz von Geschäftsgeheimnissen sowie technische Herausforderungen bei der Integration heterogener IT-Systeme und bestehender Datenbanken.

Ein dritter Themenblock widmete sich den Erwartungen der Partner an eine Plattformlösung im Sinne einer DIP4CE. Hier stand im Vordergrund, welche Funktionen eine solche Plattform bereitstellen muss, um Daten entlang des Produktlebenszyklus zu erfassen, zu verarbeiten, auszutauschen und abzusichern. Genannt wurden unter anderem die Bereitstellung standardisierter Datenprodukte, Werkzeuge zur Unterstützung der Demontage (z. B. digitale Demontageinformationen und Bauteilkennzeichnungen), Entscheidungsunterstützung für Remanufacturer bei der Auswahl geeigneter CE-Strategien sowie klar definierte Prozesse für Datenanfragen und -freigaben. Darüber hinaus wurden rollenspezifische Services herausgearbeitet, etwa spezielle Oberflächen und Funktionen für Demontagebetriebe, analytische Auswertungen für Remanufacturing-Verantwortliche oder Module zur Berechnung und Bereitstellung von CE-Indikatoren und Nachhaltigkeitskennzahlen für Berichtspflichten.

Die Kombination dieser drei Interviewperspektiven – Rollenverständnis im Ökosystem, konkrete Datenbedarfe und Barrieren sowie Erwartungen an eine Plattformlösung – bildete die Grundlage, um die aus der Literatur identifizierten Anforderungen zu schärfen und praxisnahe und rollenspezifische Anforderungen in den Anforderungskatalog zu integrieren.

Konsolidierung zum Anforderungskatalog

Auf Basis der Literaturrecherche und der beschriebenen Experteninterviews wurden die identifizierten Anforderungen in einem nächsten Schritt zu einem konsistenten

Anforderungskatalog zusammengefasst. Zunächst wurden alle aus den Quellen abgeleiteten Einzelanforderungen in einer gemeinsamen Übersicht zusammengeführt. Dabei zeigte sich, dass viele Punkte aus Literatur und Praxis gegenseitig ergänzen oder inhaltlich überlappen, etwa hinsichtlich Datensicherheit, Interoperabilität oder der gezielten Unterstützung von Remanufacturing-Prozessen. In einem iterativen Abstimmungsprozess wurden solche Überschneidungen bereinigt, Begriffe vereinheitlicht und mehrdeutige Formulierungen präzisiert, sodass am Ende ein gemeinsames, zwischen Wissenschafts- und Praxisperspektive abgestimmtes Verständnis der Anforderungen vorlag.

Im Anschluss daran wurden die Anforderungen thematisch gebündelt und zu Kategorien höherer Abstraktion zusammengeführt. Anforderungen, die sich beispielsweise auf Datenschutz, Verschlüsselung, Zugriffsrechte und Datensouveränität beziehen, wurden zu einer gemeinsamen Gruppe verdichtet; Ähnliches gilt etwa für Anforderungen an CE-spezifische Entscheidungsunterstützung, an die Unterstützung von Demontage- und Prüfprozessen sowie an generische Services wie Datenvisualisierung und -handel. Aus dieser thematischen Bündelung gingen insgesamt 18 Kategorien hervor, die die verschiedenen Gestaltungsdimensionen einer Digital Industrial Platform for Circular Economy strukturiert abbilden.

Diese 18 Kategorien wurden anschließend zu sechs Meta-Requirements zusammengefasst, die die zentralen Gestaltungsfelder der Plattform markieren: Governance, Actor Engagement, Development & Implementation, CE-bezogene Services, allgemeine Services sowie übergeordnete Grundvoraussetzungen. Die Meta-Requirements Governance und Foundational Premises bilden dabei den Rahmen, innerhalb dessen sich die anderen vier Meta-Requirements bewegen. Governance fasst alle Anforderungen zusammen, die mit rechtlichen, organisatorischen und technischen Regeln des Datenaustauschs verknüpft sind, während die Foundational Premises die strategische Zielrichtung und den Anspruch an Transparenz, Nutzbarkeit und Kompetenzaufbau definieren. Actor Engagement, Development & Implementation, CE-bezogene Services und allgemeine Services konkretisieren diesen Rahmen in Richtung Beteiligung der Akteure, technische und organisatorische Umsetzung sowie konkrete Serviceangebote der Plattform.

Parallel zur inhaltlichen Strukturierung wurde jede Anforderung hinsichtlich ihrer Spezifität für den Kontext der Kreislaufwirtschaft bewertet. Anforderungen, die unmittelbar auf zirkuläre Strategien und Prozesse abzielen – etwa Restnutzungsdauerschätzungen, Demontageunterstützung oder die Bereitstellung von CE-Indikatoren – wurden als CE-spezifisch gekennzeichnet. Demgegenüber wurden generische Anforderungen, die auch in anderen datengetriebenen Plattformkontexten relevant wären, etwa zu Datensicherheit, Datenformaten oder Usability, als nicht CE-spezifisch eingeordnet. Zudem wurde jede Anforderung derjenigen Phase des Produktlebenszyklus zugeordnet, in der sie primär wirksam wird: Pre-Use (z. B. Design-

und Entwicklungsentscheidungen), In-Use (z. B. Betriebs- und Zustandsdaten) oder Post-Use (z. B. Demontage, Remanufacturing, Recycling).

Durch diese Konsolidierung entstand ein Anforderungskatalog mit insgesamt 46 klar beschriebenen Einzelforderungen, der sowohl wissenschaftlich fundiert als auch an den praktischen Bedarfen der ZirkulEA-Partner ausgerichtet ist (vgl.

Tabelle 5). Für das Projekt ZirkulEA bildet er die zentrale Grundlage, um die Anforderungen an eine Traceability-Lösung systematisch zu erfassen, die technische Umsetzbarkeit bei den Projektpartnern zu bewerten und die Ausgestaltung des Daten- und Informationsaustauschs im zirkulären Wertschöpfungsnetzwerk zielgerichtet weiterzuentwickeln.

Tabelle 5: Anforderungskatalog mit 46 Einzelanforderungen (Heinz et al., 2024)

Category	Requirement	Requirement Description	Main Sources
MR1 - Governance: The DIP4CE allows to secure intellectual property of stakeholders and defines the base for successful data exchange.			
Data Security	Data protection	The DIP4CE must ensure compliance with the basic principles of data protection law (particularly the protection of personal data).	Pauli 2021, I5
	Confidentiality	The DIP4CE should ensure confidentiality with regard to handling partners' business information.	Serna-Guerrero 2022, Pauli 2021
	Data encryption	The DIP4CE should use encryption for data transmission	I4
Standards	Data format	The DIP4CE must use defined data format standards to which all participants adhere and which ensure the exchanged data's usability.	Halstenberg 2017, Orko 2022, Serna-Guerrero 2022, I3
	Data transmission	The DIP4CE must use a defined data transmission standard to which all participants adhere and which enables data exchange.	Pauli 2021, I3
	Data granularity	The DIP4CE must define a binding data granularity for each data product to fulfil the requirements of the data usage processes.	Ribeiro da Silva 2023, I1
	Data Quality	The DIP4CE must require participants to comply with minimum data quality standards where possible.	Ribeiro da Silva 2023
Data rights	Access rights	The DIP4CE must take into account the different levels of confidentiality of the data (e.g. through classification) and define clear requirements for the allocation of access rights depending on these.	Orko 2022, Expert workshop
	Usage policies	The DIP4CE should define data usage policies that are mutually agreed upon by the partners in the ecosystem.	Orko 2022, Expert workshop
	Data sovereignty	The DIP4CE should ensure data sovereignty, giving data owners the power to decide on how the data is used.	I3
Structure	Platform provider	The DIP4CE should be managed by one organization, which is responsible for governance and operation to ensure simple communication and decision.	I2
	Platform owner	The DIP4CE can be owned by a consortium of participant companies.	Pauli 2021, I2
MR2 - Actor Engagement: The DIP4CE ensures ability and motivation for collaboration considering characteristics of the actors.			
Benefits for partners and collaboration	Communication	The DIP4CE should facilitate and promote communication between the participants.	Serna-Guerrero 2022
	Guaranteed incentive	The DIP4CE must provide individual incentives for each participant to share data, especially the actor who currently has the majority of data at its disposal.	Ribeiro da Silva 2023, I6
Expansion of ecosystem	Participant integration	The DIP4CE should be able to expand by integrating new ecosystem partners.	Pauli 2021, Expert workshop
	Onboarding process	The DIP4CE should offer a standardized onboarding process for new participants.	Schoepenthou 2023
Role-specific requirements	Data access for users	The DIP4CE should allow to provide users with access to data on material origin and sustainability.	Orko 2022
	Dismantler support	The DIP4CE should equip the dismantler with necessary digital tools to capture and transmit data on disassembled parts, facilitating informed decision-making throughout the reverse logistics chain.	I2
MR3 - Development & Implementation: The DIP4CE's design is aimed at easy data accessibility and ensures efficient implementation.			
Foundations of platform development	Existing data sharing solutions	The DIP4CE must leverage existing data sharing solutions within the ecosystem (e.g., disassembly guides) and incorporate industry-wide best practices for broader applicability and enhanced value creation.	I5, Expert workshop
	Interoperability	The DIP4CE must have interoperability with external platforms.	Schöppenthou 2023, I3
Technical aspects	DIP4CE as Middleware	The DIP4CE can provide data storage, processing capabilities and an operating system for applications.	Pauli 2021
	Technical realization of data access	The DIP4CE should use two possible ways to access data. One option is via the platform itself and one option is via the physical product (or product component).	I1, I6
	Data referencing on product itself	The DIP4CE should guarantee permanent access via the product (or product component) by using an access point that is not endangered by wear and tear).	I6
Implementation	Implementation Strategies	The DIP4CE should be supported with use-case specific implementation strategies to ensure the quick accession of all participants to support a quick enabling of the platform's benefits.	Pauli 2021
	Customizable Solution	The DIP4CE should be customizable to ensure customer-specific characteristics and requirements.	Pauli 2021
MR4 - CE-Related Services: The DIP4CE supports the ability of users to exploit data sharing possibilities for CE use-cases.			
Worker support	CE decision-support	The DIP4CE should support the remanufacturer in making decisions, e.g. choosing the most economical of the technically feasible CE strategies.	I6
	Disassembly instructions	The DIP4CE should provide disassembly instructions for the worker (e.g. by differentiating between manual and automatic disassembly steps) depending on the condition of the product.	I4
CE-strategy specific support	Component matching	The DIP4CE can include a service for matching used components and existing used parts of components that may be used for repair/remanufacturing.	I1
	Predictive maintenance	The DIP4CE must support predictive maintenance and preventive repairs by analyzing live usage data.	I5
	Quality assessment	The DIP4CE should offer a data-based assessment of the current quality of the product and its components with calculation of "rest of useful life" (time before it is no longer suitable for use in the car)	Ribeiro da Silva 2023
Impact assessment	Sustainability data provider	The DIP4CE should be able to provide CE indicators (e.g., CO2 footprint and recycled content) that can later be used for reporting or internal and external benchmarking.	Ribeiro da Silva 2023, Orko 2022
MR5 - General Services: The DIP4CE enables transaction of data and improves utilization of data.			
Data transfer	Data requests	The DIP4CE must provide a standardized process for requesting data, which can be answered positively or negatively by the data owner.	I3, I6, Expert workshop
	Data trading	The DIP4CE must support dynamic and possibly context-dependent payment for data usage rights.	Orko 2022, I5
	Data products	The DIP4CE should provide the possibility to create modular data packages ('data products') as part of a data catalogue that can be reused across various modules and services within the DIP4CE.	I5
Utilization of raw data	Data visualization	The DIP4CE should be able to visualize the platform data for users.	Halstenberg 2017
	Metadata analysis	The DIP4CE must offer metadata analysis to interpret and use the raw data.	I2, I6, Expert workshop
	Forecasting ability	The DIP4CE must be able to create forecasts based on existing data sets.	Expert workshop
Control of data and participants	Data traceability	The DIP4CE should enable traceability with regard to data collection, data retrieval and data adjustments.	Orko 2022, Expert workshop
	Participants compliance	The DIP4CE should be complied with by each participant to ensure his contribution to the ecosystem.	Orko 2022
MR6 - Foundational Premises: DIP4CE fundamentally improves the participants ability to share and use data.			
Foundations of data utilization	Exchange speed	The DIP4CE should ensure a rapid exchange of information.	I1
	Improving transparency	The DIP4CE should facilitate improved transparency across all service processes and the supply chain to build trust, credibility and confidence to support the establishment of new circular resource integration patterns.	Ribeiro da Silva 2023
	Product design insights	The DIP4CE should promote the integration of insights from disassembly into the product design.	I1
Usability and capacity building	Usability	The DIP4CE should have a good usability for participants.	Orko 2022
	Capacity building CE	The DIP4CE should support participants in understanding and building knowledge in the field of CE.	Pauli 2021
	Data handling capacity	The DIP4CE should promote data handling expertise.	Orko 2022

CE-specificity: Non-CE-specific CE-specific Especially relevant for pre-/in-/post-use: Pre-use In-use Post-use

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine gezielte Literaturrecherche zu bestehenden technischen und organisatorischen Lösungen für Rückverfolgbarkeit in zirkulären Ökosystemen durchgeführt. Der Fokus lag auf digitalen industriellen Plattformen und Data-Space-Ansätzen als infrastrukturelle Basis für Traceability. Ergänzend wurden ein Steckbrief zur technischen Umsetzbarkeit einer Traceability-Lösung im ZirkulEA-Konsortium entwickelt, ein Austausch mit bestehenden Initiativen (Catena-X, Cofinity-X) durchgeführt und die Ergebnisse in einem gemeinsamen Workshop mit den Projektpartnern diskutiert.

Traceability-Systeme als Enabler zirkulärer Strategien

Ausgehend von der ISO-Definition wird Traceability als Fähigkeit verstanden, die Historie, Anwendung oder den Standort eines Objekts anhand aufgezeichneter Identifikationsdaten nachzuverfolgen (ISO 9000:2015). Im Kontext zirkulärer Wertschöpfung bedeutet dies, den Ursprung, die Verarbeitungs- und Nutzungshistorie sowie die Verteilung von Materialien und Komponenten über den gesamten Lebenszyklus hinweg transparent zu machen. Entsprechende Traceability-Systeme erfassen und verknüpfen Informationen von der Produktion bis zum End-of-Life und ermöglichen die Verfolgung physischer Objekte und deren digitalen Repräsentationen.

Die Literatur zeigt, dass Traceability eng mit der Umsetzung von R-Strategien verknüpft ist. Entlang der Rückwärtslogistik unterstützen Track-and-Trace-Funktionen beispielsweise die Tourenplanung, die Sammlung und den Transport (Recycling), die Zustandsbewertung von Produkten und Komponenten (Remanufacturing, Reuse) sowie die vorausschauende Planung zur Vermeidung von Abfällen (Reduce). Für Remanufacturer ist insbesondere die Verfügbarkeit von Informationen zu Produktkonfiguration, Betriebsbedingungen und Verschleißzustand entscheidend, um Rückläufe vorzubereiten und produktspezifische Remanufacturing-Prozesse zu planen. Traceability-Systeme stellen damit eine zentrale Quelle für die Entscheidungsunterstützung in zirkulären Geschäftsmodellen dar.

Technologisch werden neben klassischen Datenbank- und Identifikationslösungen (z. B. Barcodes, RFID, IoT-Sensorik) zunehmend verteilte Technologien wie Blockchain diskutiert. Sie sollen die Nachvollziehbarkeit von Datenzugriffen erhöhen und Vertrauen in die Integrität der Informationen stärken, insbesondere wenn mehrere, teils konkurrierende Akteure in einem Ökosystem zusammenarbeiten. Für ZirkulEA ist diese Diskussion vor allem insofern relevant, als dass Vertrauen, Datenintegrität und klare Verantwortlichkeiten für den Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette zentrale Voraussetzungen für eine funktionierende Traceability-Lösung sind.

Digitale industrielle Plattformen und Data Spaces als Infrastruktur für Traceability

Die Recherche machte deutlich, dass sich zwei technologische Grundkonzepte als Träger von Traceability-Lösungen herausgebildet haben: digitale industrielle Plattformen und Data Spaces.

Digitale Plattformen werden in der Literatur aus technischer, marktlicher und organisatorischer Perspektive beschrieben. Technisch werden sie als geschichtete, modulare Systeme mit standardisierten Schnittstellen verstanden, die die Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Systemen und Anwendungen ermöglichen. Aus marktlicher Sicht stellen sie Marktplätze für Daten, Dienste oder Produkte bereit und zielen auf Netzwerkeffekte ab. Organisatorisch fungieren sie als Instrument zur Orchestrierung von Akteuren in einem Ökosystem, indem der Plattformbetreiber Rollen, Regeln und Interaktionsmechanismen definiert.

Digitale industrielle Plattformen konkretisieren dieses Konzept im Business-to-Business-Kontext. Sie sammeln und integrieren Daten aus industriellen Assets und Prozessen, stellen diese mithilfe technologischer Unterstützung einem Ökosystem von Drittanbietern zur Verfügung und ermöglichen so die Entwicklung komplementärer Anwendungen und Services. Typischerweise umfasst eine solche Plattform Datenhaltung und -verarbeitung, APIs für den Zugriff sowie oft auch einen Marktplatz für datenbasierte Dienste. Für Traceability in der Kreislaufwirtschaft bedeutet dies, dass produkt- und materialbezogene Daten aus unterschiedlichen Quellen – etwa Produktionssystemen, Feldsensorik, Werkstatt- und Remanufacturing-Systemen – zusammengeführt und über die Plattform zugänglich gemacht werden können.

Parallel dazu hat sich mit Data Spaces ein weiteres, stark europäisch geprägtes Konzept etabliert. Data Spaces werden als föderierte, offene Infrastrukturen verstanden, die den souveränen Austausch von Daten auf Grundlage gemeinsamer Policies, Regeln und Standards ermöglichen. Initiativen wie Gaia-X und die International Data Spaces (IDS) legen hierfür Referenzarchitekturen und Governance-Modelle fest. Catena-X überträgt diese Prinzipien spezifisch auf die Automobilindustrie und entwickelt ein domänenspezifisches Ökosystem für den sektorweiten Datenaustausch, unter anderem mit Anwendungsfällen zu Rückverfolgbarkeit und Nachhaltigkeitsberichterstattung. Ergänzende Initiativen wie DigiPrime, die Global Battery Alliance mit dem Global Battery Passport oder DemoBat fokussieren auf zirkuläre Anwendungsfälle – insbesondere im Bereich Elektrofahrzeugbatterien – und arbeiten an Datenanforderungen, Plattformbausteinen und Pilotanwendungen für zirkuläre Wertschöpfung.

Übergreifend zeigte die Literaturrecherche, dass Data-Space-Ansätze für die Ziele von ZirkulEA besonders relevant sind. Sie adressieren zentrale Anforderungen wie Datensouveränität, Interoperabilität, verteilte Datenhaltung und feingranulare Zugriffskontrolle. Damit bieten sie einen geeigneten technischen und organisatorischen

Rahmen, um Traceability-Lösungen über Unternehmensgrenzen hinweg zu realisieren und zugleich die Kontrolle der Akteure über ihre Daten zu sichern. Abbildungen zum generischen Aufbau eines Data Space sowie zu aktuellen Data-Space-Initiativen wurden zur Veranschaulichung in den Bericht aufgenommen (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38).

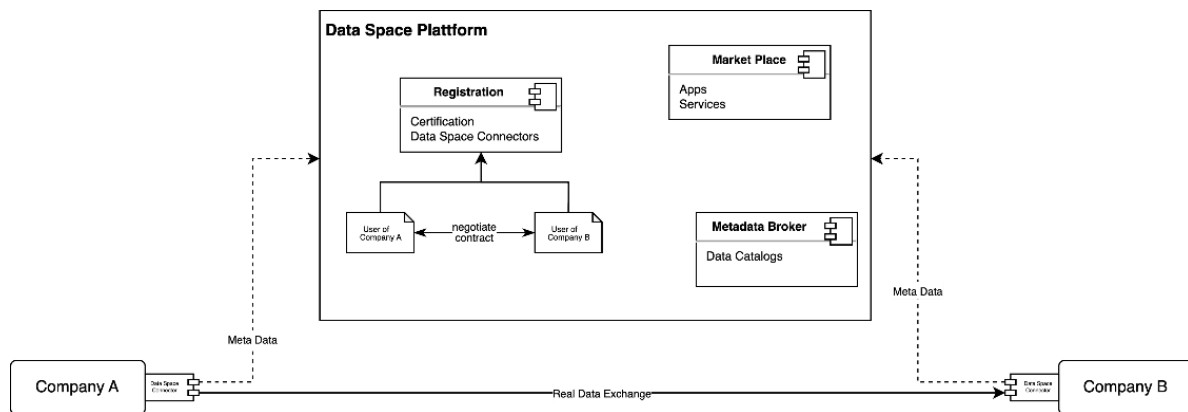


Abbildung 37: Aufbau eines Data Space

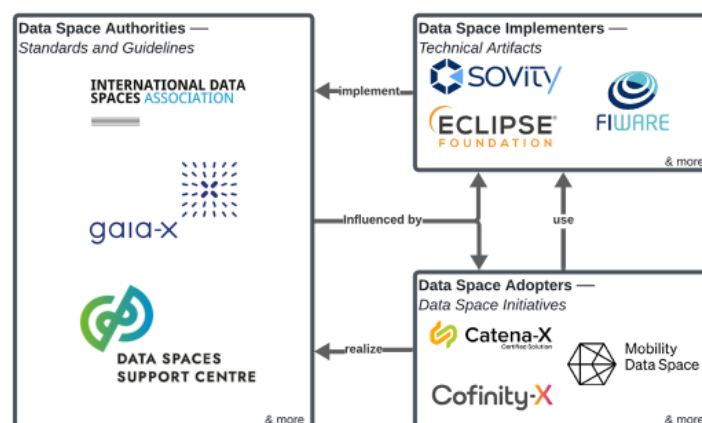


Abbildung 38: Aktuelle Data Space Initiativen

Steckbrief zur technischen Umsetzbarkeit einer Traceability-Lösung

Auf Basis der Literaturrecherche und der im Projekt erarbeiteten Anforderungen wurde ein Steckbrief entwickelt, um die technische Umsetzbarkeit einer Traceability-Lösung aus Sicht der ZirkulEA-Partner systematisch zu erfassen. Der Steckbrief diente als standardisiertes Erhebungsinstrument und zielte darauf ab, den Status quo der IT-Infrastruktur, bestehende Datenerfassungs- und -verwaltungssysteme, relevante Schnittstellen sowie Restriktionen und Prioritäten der Partner abzubilden.

Die Partner wurden unter anderem zu vorhandenen Identifikations- und Datenhaltungssystemen, zu bereits genutzten Plattformen oder Cloud-Lösungen, zu bestehenden Erfahrungen mit Datenökosystemen und zu technischen wie organisatorischen Hürden für den Datenaustausch befragt. Ein Auszug des Steckbriefs ist

in Abbildung Z dargestellt. Die Auswertung der Rückläufe erfolgte durch das wbk und floss unmittelbar in den dort entwickelten Anforderungskatalog für eine Traceability-Lösung ein. Aus Sicht des KSRI diente der Steckbrief zudem als Validierung der in der Literatur identifizierten Lösungsansätze, indem geprüft wurde, welche Technologien und Architekturen im Konsortium bereits genutzt werden bzw. kurzfristig anschlussfähig sind.

ZirkulEA AP4.2 Steckbrief

Ziel: Mit diesem Steckbrief möchten wir gerne mehr über die technische Umsetzbarkeit einer Traceability Lösung in Eurem Unternehmen in Erfahrung bringen. Dafür haben wir Fragen formuliert, die wir Euch bitten, aus der Sicht Eures Unternehmens zu beantworten. Es wäre hilfreich, wenn mehrere Ansprechpartner in Eurem Unternehmen den Steckbrief ausfüllen.

Traceability Lösung: Eine Traceability Lösung ist eine Lösung, die es ermöglicht, die Bewegung und den Weg eines Objekts eindeutig zu verfolgen und Informationen über dieses Objekt zu sammeln, zu verwalten und weiterzugeben.

Firmenname:

Ansprechpartner:

1. Ziel einer Traceability Lösung:

In welchem Rahmen im Projekt spielt eine Traceability Lösung für Euer Unternehmen eine Rolle? Was ist Euer Ziel?

2. Technische Infrastruktur:

Aktuelle Traceability Lösung:

Wie werden Bauteile und Produkte in Eurem Unternehmen aktuell eindeutig identifiziert und rückverfolgt? Welche aktuellen Spezifikationen haben die technischen Traceability Lösungen? Welcher Informationsumfang kann und wird aktuell generiert/geteilt?

Traceability Lösung entlang der Supply Chain:

Welche Traceability Lösung verwenden Eure Partner entlang Eurer Supply Chain? Falls es kein einheitliches Vorgehen gibt, antwortet für die in ZirkulEA relevanten Bauteile und Produkte und gebt diese an.

IT-Systeme und Plattformen für den Datenaustausch:

Welche vorhandenen IT-Systeme, Plattformen und technischen Infrastrukturen (Inkl. externe Plattformen oder Systeme, mit denen sie integriert werden) verwendet Euer Unternehmen für den Datenaustausch?

Datenformate und Protokolle:

Welche gängigen Datenformate und Protokolle nutzt Euer Unternehmen, um Daten innerhalb und außerhalb Eures Unternehmens auszutauschen?

APIs und Schnittstellen:

Gibt es APIs und Schnittstellen, die für den Datenaustausch entwickelt wurden oder genutzt werden können?

Datensicherheit und Datenschutzmaßnahmen:

Welche Sicherheitsmaßnahmen und Datenschutzrichtlinien im Hinblick auf den Datenaustausch sind bei Eurem Unternehmen implementiert?

3. Erfahrungen mit Datenintegration und -austausch:

Frühere Projekte und Partnerschaften:

Habt Ihr Erfahrungen bei der Zusammenarbeit und dem Datenaustausch mit anderen Unternehmen oder Partnern? Welche waren das?

Abbildung 39: Auszug Steckbrief technische Umsetzbarkeit einer Traceability Lösung

Austausch mit bestehenden Initiativen und Workshopteilnahme

Ergänzend zur Literaturarbeit führte das KSRI einen gezielten Austausch mit Vertreter:innen der Initiativen Catena-X und Cofinity-X durch. In diesem Rahmen stellten die Initiativen ihre Ziele, Referenzarchitekturen und laufenden Anwendungsfälle vor, insbesondere mit Blick auf Traceability, Datenräume und Nachhaltigkeitsberichterstattung in der Automobilindustrie. Für ZirkulEA war dieser Austausch wichtig, um sicherzustellen, dass konzeptionelle Überlegungen und prototypische Lösungen langfristig in die entstehenden Branchenökosysteme integrierbar sind und auf bestehenden Standards aufbauen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche, die Erkenntnisse aus dem Austausch mit den Initiativen sowie die Rückmeldungen aus dem Steckbrief flossen in die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Workshops in Zusammenarbeit mit wbk und mit den Projektpartnern ein und wurden dort vorgestellt und diskutiert. Der Workshop diente dazu, ein gemeinsames Verständnis der technologischen Optionen und Grenzen zu

schaffen, Prioritäten für die weitere Arbeit im Projekt abzustimmen und die Schnittstelle zwischen dem Traceability-Konzept, dem Datenökosystem und der konkreten technischen Umsetzung zu schärfen.

Gesamtkonzept: Daten- und Informationsaustausch für eine Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie

Für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie bedarf es eines integrierten Gesamtkonzepts, das technische Infrastruktur, Governance-Mechanismen, Rollenmodelle und konkrete Umsetzungslogiken zusammenführt. Nur wenn Daten über Unternehmensgrenzen hinweg standardisiert, sicher und kontextbezogen ausgetauscht werden können, lassen sich zirkuläre Wertschöpfungsstrategien entlang des Produktlebenszyklus wirksam unterstützen. Das folgende Kapitel bündelt diese Bausteine und skizziert, wie ein solcher Daten- und Informationsaustausch im automobilen Kontext gestaltet werden kann.

Die erfolgreiche Umsetzung des Daten- und Informationsaustauschs hängt maßgeblich von der zugrundeliegenden Infrastruktur ab (Heinz et al., 2024). Gefordert ist eine Lösung, die die sehr unterschiedlichen Bedürfnisse und Fähigkeiten aller beteiligten Unternehmen – darunter auch zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen (KMU) – in einer gemeinsamen, skalierbaren und zugleich souveränen Architektur vereint. Digitale Plattformen müssen daher nicht nur technische, sondern ebenso organisatorische und strategische Anforderungen der Kreislaufwirtschaft adressieren (Ribeiro da Silva et al., 2023; Serna-Guerrero et al., 2022). Ein zukunftsfähiges System stellt Daten standardisiert, sicher und kontextgerecht bereit. Dies erfordert interoperable Datenformate, klare Zugriffskonzepte und normierte Schnittstellen sowie genügend Flexibilität, um auf wachsende Datenmengen, neue Akteure und regulatorische Änderungen zu reagieren. Entscheidend ist eine nutzerzentrierte Gestaltung, die unmittelbar Mehrwerte schafft – etwa durch Prozessoptimierung, Materialeffizienz oder neue datenbasierte Geschäftsmodelle.

Vor diesem Hintergrund gelten föderierte Datenräume (*Data Spaces*) als besonders geeigneter Ansatz. Als dezentral organisierte Plattformarchitektur verbinden sie technische Interoperabilität mit eindeutig definierten Governance-Strukturen und wahren zugleich die Datensouveränität der Teilnehmenden. Technische Grundlage bildet die Verwaltungsschale (*Asset Administration Shell, AAS*), ein standardisierter digitaler Zwilling physischer oder virtueller Assets. Die AAS bündelt Informationen strukturiert, standardisiert und domänenspezifisch über den gesamten Produktlebenszyklus. Ihr modularer Aufbau mit Submodellen kapselt unterschiedliche Datenprodukte – etwa zur Identifikation, zum Zustand, oder zum Carbon Footprint einer Komponente.

Die Einbindung eines Unternehmens in einen Data Space erfolgt entlang mehrerer technischer und organisatorischer Dimensionen: Erstens gewährleistet ein sicheres Identitäts- und Zugriffsmanagement, dass Rollen, Rechte und Beziehungen klar

abgebildet werden. Zweitens verbleiben die Daten dezentral bei ihrer Quelle, während semantische Kataloge deren Auffindbarkeit und die Kontextualisierung ermöglichen. Drittens läuft der Datentransfer über standardisierte, interoperable Schnittstellen, vor allem über IDS¹-konforme Konnektoren, die sich dynamisch orchestrieren und in bestehende IT-Systemlandschaften integrieren lassen.

Über die Technik hinaus lassen sich sechs zentrale Anforderungsbereiche für digitale Plattformen in der Kreislaufwirtschaft unterscheiden (vgl. Abbildung 40). (1) Strategische Grundprinzipien wie Modularität, Interoperabilität und technologische Offenheit sichern die langfristige Anschlussfähigkeit. (2) Robuste Data Governance-Modelle regeln Datenqualität, Verantwortung, Haftung und Nutzenverteilung. (3) Breite Akteursbeteiligung wird durch niederschwellige Angebote für KMU gefördert, etwa Low-Code-Tools, Self-Service-Interfaces oder gemeinsame Lern- und Testumgebungen. (4) Allgemeine technische Services wie semantische Vermittlung, Monitoring, Datenverlinkung und API-Management müssen auf der Plattform zuverlässig verfügbar sein. (5) Spezifische Services für zirkuläre Wertschöpfung – z.B. Zustandsbewertung, (teil-)automatisierte Lebenszyklusanalyse oder Entscheidungsunterstützung beim Remanufacturing – gehen über Basisfunktionen wie Authentifizierung hinaus. (6) Iterative, partizipative Entwicklung sorgt dafür, dass Plattformen rasch auf neue regulatorische oder technologische Impulse reagieren können.



Abbildung 40: Sechs zentrale Anforderungsbereiche für digitale Plattformen in der Kreislaufwirtschaft in Anlehnung an (Heinz et al., 2024).

Im Ergebnis sind föderierte Data Spaces keine starren IT-Artefakte, sondern evolutionsfähige Plattformökosysteme: Standardisierte Verwaltungsschalen, identitätsgesicherte Konnektoren und semantische Kataloge bilden die technische Kernschicht, während gemeinsam ausgehandelte Governance-Regeln und kreislauforientierte Services das operative Rahmenwerk liefern. Erst dieses

¹ IDS steht für *International Data Spaces* – ein von der International Data Spaces Association (IDSA) entwickeltes Referenzarchitekturmodell für einen souveränen, sicheren und standardisierten Datenaustausch.

Zusammenspiel schafft ein vertrauenswürdiges, kollaboratives und wirtschaftlich skalierbares Fundament, auf dem die zirkuläre Automobilwirtschaft tatsächlich umgesetzt werden kann.

Der erfolgreiche Einstieg in den Data Space der Automobilindustrie erfordert einen strukturierten Ansatz, der technische, organisatorische und kulturelle Aspekte integriert. Im Mittelpunkt steht die schrittweise Verankerung eines gemeinsamen Verständnisses für den Wert und die Funktionsweise datengetriebener Kreislaufstrategien entlang des Produktlebenszyklus. Zentral ist hierbei, dass die relevanten Akteure frühzeitig eingebunden werden und der individuelle Mehrwert einer Teilnahme transparent kommuniziert wird. Nur wenn der Datenaustausch als konkrete wirtschaftliche Chance verstanden wird, entsteht die notwendige Beteiligungsdynamik im Ökosystem, etwa zur Erschließung neuer Geschäftsmodelle oder zur Erfüllung regulatorischer Anforderungen.

Ein zentrales Element der Umsetzung ist die rollenbasierte Verantwortung für Datenprodukte, wie sie im Rahmen des vorgestellten Konzepts definiert wurden. Die operative Umsetzung dieses Modells basiert auf einer eindeutigen Zuordnung von Rollen wie *Data Owner*, *Data Provider* und *Data Consumer* entlang des Lebenszyklus. So obliegt die Erstellung von Produktidentifikationen oder Materialspezifikationen primär OEMs und deren Zulieferern, während nachgelagerte Akteure wie Repairer, Remanufacturer oder Recycler diese Daten nutzen, aktualisieren oder ergänzen. Ergänzend liefern Intermediäre wie Broker oder Behörden relevante Informationen etwa zu Marktbedingungen oder rechtlichen Anforderungen. Diese differenzierte Rollenverteilung ermöglicht die Umsetzung von Zugriffsrechten, Nutzungsbedingungen und Datenpflegepflichten gemäß datensouveräner Prinzipien. Die technische Umsetzung kann über standardisierte Verwaltungsschalen erfolgen, die als interoperable Container für die Datenprodukte fungieren und über föderierte Data Spaces zugänglich gemacht werden.

Die konkrete Integration in betriebliche Prozesse bietet entlang der automobilen Wertschöpfungskette vielfältige Potenziale. Für Supplier ergeben sich Optimierungspotenziale insbesondere in der Verbesserung ihrer Lieferkettenplanung. Durch den Zugriff auf Echtzeitdaten können sie schneller und flexibler auf Nachfrageschwankungen reagieren, die Materialrückverfolgbarkeit sicherstellen und neue Geschäftsmodelle wie Materialtracking oder Rücknahmeprogramme entwickeln. Manufacturer profitieren gleichermaßen von der Teilnahme am Data Space: Sie können regulatorische Anforderungen wie den digitalen Batteriepass effizient erfüllen und durch die Nutzung von End-of-Life-Daten kontinuierliche Verbesserungen in Produktentwicklung, Design und Materialwahl realisieren. Zudem eröffnet sich ihnen die Möglichkeit, ihre Ressourceneffizienz signifikant zu steigern. Auch User ziehen unmittelbare Vorteile aus datenbasierten Services, etwa durch präzisere Wartungsvorhersagen, eine erhöhte Transparenz hinsichtlich Nachhaltigkeit und Herkunft der Produkte sowie eine daraus resultierende Verlängerung der Produktlebensdauer. Repairer wiederum steigern durch den gezielten Zugriff auf

Produktdaten die Effizienz und Qualität ihrer Reparaturprozesse, was nicht nur die Kundenzufriedenheit erhöht, sondern auch die Kosten senkt. Im Bereich der Marktkoordination profitieren Broker von einer verbesserten Transparenz bezüglich Angebot und Nachfrage auf dem Markt für wiederaufbereitete Komponenten. Dadurch können sie neue Märkte für Sekundärmaterialien erschließen und den Ressourcenkreislauf gezielt fördern. Dismantler verbessern durch den gezielten Zugriff auf Produkt- und Materialdaten ihre Effizienz bei der Trennung und Rückgewinnung hochwertiger Materialien und können gleichzeitig Umwelt- und Recyclingvorgaben zuverlässig einhalten. Auch Remanufacturer nutzen die im Data Space verfügbaren Informationen, um ihre Remanufacturingprozesse zu optimieren, Ausschuss zu reduzieren und qualitativ hochwertige, wiederaufbereitete Produkte anzubieten, wodurch sie ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und neue Geschäftsfelder erschließen können. Schließlich gewinnen Recycler durch präzisere Materialzusammensetzungsdaten die Möglichkeit, ihre Recyclingquoten zu erhöhen, wertvolle Rohstoffe effizienter zurückzugewinnen und Umweltvorgaben besser zu erfüllen.

Nachdem die verschiedenen Akteure der Wertschöpfungskette durch die gezielte Aufzeigung ihrer individuellen Potenziale für die Teilnahme am Data Space gewonnen wurden, richtet sich der Fokus im nächsten Schritt auf die Mitarbeitenden innerhalb der Unternehmen selbst. Eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft kann nur dann erfolgreich etabliert werden, wenn Beschäftigte auf allen Ebenen für die Veränderungen sensibilisiert und gezielt qualifiziert werden. Dabei stehen sowohl technische als auch methodische Kompetenzen – insbesondere zu Datensicherheit, Datensouveränität und Datenqualität – im Mittelpunkt. Der Nutzen für das Unternehmen kommt damit auch den Mitarbeitenden zugute. Im Unterschied zu klassischen Mindset-Change-Programmen basiert die Einführung kreislaforientierter Datenflüsse in der Automobilindustrie primär auf verbindlichen Vorgaben aus Geschäftsleitung, Gesetzen und Normen (VDA-konformes Änderungswesen). Entsprechend sollte das etablierte Change-Management-System von einer linearen auf eine zirkuläre Logik erweitert werden; zusätzliche Compliance- und Reporting-Pflichten (z.B. CO₂-Bepreisung, Batterieverordnung, DPP) schaffen dabei klare ökonomische Anreize. Sobald sich für die beteiligten Unternehmen ein wirtschaftlich attraktives Geschäftsmodell abzeichnet, steigt erfahrungsgemäß auch die Beteiligungsbereitschaft. Entscheidend ist zudem ein belastbares Sicherheits- und Governance-Framework, das eindeutige Verantwortlichkeiten definiert, Auditierbarkeit, Verschlüsselung und Zugriffskontrollen sicherstellt, Haftungs- und Rechtsfragen klärt, und den Kosten-/Nutzen-Ausgleich zwischen Datennutzung und Datendiebstahlrisiko transparent macht. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass das Feedback der Beteiligten ernst genommen, ausgewertet und aktiv in die Weiterentwicklung der Transformationsprozesse integriert wird. Nur durch diesen respektvollen und partizipativen Ansatz kann eine nachhaltige Verankerung der neuen datengetriebenen Denk- und Handlungsweisen innerhalb der Unternehmen gelingen. Letztlich erfolgt die technische Anbindung in vier Phasen:

1. Vorbereitung: Zieldefinition, Ressourcenplanung, Festlegung von Verantwortlichkeiten.
2. Analyse: Überprüfung der IT-Infrastruktur, Bewertung der Datenqualität und Sicherstellung von Datenschutzstandards.
3. Implementierung: Pilotprozesse, Integration von Applikationen, Schulung der Nutzer.
4. Betrieb: Monitoring, kontinuierliche Optimierung, Updates und Einhaltung aktueller Standards.

Wesentlich für den Erfolg sind die Unterstützung des Managements, die enge Zusammenarbeit zwischen IT und Fachabteilungen sowie transparente Entscheidungsprozesse.

Softwarekonzept für Umsetzung

Die prototypische Implementierung verfolgt das Ziel, das zuvor entwickelte Konzept für Daten- und Informationsaustausch im Remanufacturing-Kontext praktisch zu konkretisieren und seine grundsätzliche Umsetzbarkeit in einem Data Space zu demonstrieren. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die vollständige technische Abbildung eines produktiven industriellen Systems, sondern die exemplarische Umsetzung zentraler Prinzipien wie Traceability, rollenbasierte Datenfreigabe, kontrollierter Datenzugriff und die Nutzung verteilter Informationsbestände durch unterschiedliche Akteure. Die prototypische Erprobung soll damit aufzeigen, wie Daten entlang zirkulärer Wertschöpfungsprozesse bereitgestellt, aktualisiert und unter definierten Bedingungen für weitere Akteure nutzbar gemacht werden können.

Inhaltlich fokussiert sich die prototypische Umsetzung auf zwei Remanufacturing-Use-Cases, die unterschiedliche Geschäftsmodellkonstellationen und damit verbundene Informations- und Zugriffsrechte abbilden. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass Traceability-Daten im Kontext der Kreislaufwirtschaft nicht uneingeschränkt zwischen allen Akteuren geteilt werden können, sondern dass deren Verfügbarkeit stark von Rollen, vertraglichen Beziehungen und Schutzinteressen abhängt. Vor diesem Hintergrund wurde das Traceability-Konzept so operationalisiert, dass einerseits ein Mindestmaß an Informationen für netzwerkbezogene Entscheidungen verfügbar gemacht werden kann, andererseits aber unterschiedliche Detailtiefen und abgestufte Zugriffsrechte berücksichtigt werden. Damit wird der in der Praxis zentrale Zielkonflikt zwischen Transparenzanforderungen und dem Schutz sensibler Unternehmensdaten explizit in das Demonstrationsdesign integriert.

Zur praktischen Erprobung wurden zwei Case Studies entwickelt, die unterschiedliche Ausgangssituationen im Remanufacturing realitätsnah nachbilden. Im ersten Fall wird ein Remanufacturer mit OEM-Vertrag betrachtet, der aufgrund seiner vertraglichen Einbindung über erweiterte Zugriffsrechte auf produkt- und komponentenbezogene

Informationen verfügt. Im zweiten Fall wird ein freier Remanufacturer modelliert, dessen Zugriff auf Informationen stärker eingeschränkt ist und der nur auf einen reduzierten Informationsumfang zurückgreifen kann. Die Gegenüberstellung dieser beiden Fälle ermöglicht es, Unterschiede in der Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von Daten systematisch zu analysieren und die Rolle von Zugriffsrechten für zirkuläre Entscheidungs- und Prozesslogiken im Data-Space-Kontext sichtbar zu machen.

Die Case Studies wurden in einen prototypischen Data Space überführt, um Datenzugriffe, Berechtigungsstrukturen und Informationsflüsse unter unterschiedlichen Geschäftsmodellbedingungen simulierbar zu machen. Der Demonstrator operationalisiert damit das entwickelte Datenaustausch- und Traceability-Konzept entlang exemplarischer Prozessschritte des Remanufacturing. Im Fokus steht insbesondere die Frage, welche Informationen in welcher Granularität für welche Akteure zugänglich sein müssen, damit zirkuläre Aktivitäten wie Bewertung, Entscheidung, Weiterverwendung und Aufbereitung praktisch unterstützt werden können. Der prototypische Aufbau dient somit als experimentelle Umgebung, in der nicht nur technische Verbindungslogiken, sondern auch konzeptionelle Annahmen zur Datenverfügbarkeit und Datenfreigabe überprüft werden.

Als technische Grundlage der prototypischen Umsetzung wurde der von Fraunhofer IESE entwickelte *Data Space for Everybody* herangezogen. Die Wahl dieser Umgebung erfolgte, um die Implementierung auf einer bestehenden, für Data-Space-Szenarien konzipierten Infrastruktur aufzubauen und gleichzeitig eine höhere Transparenz und Reproduzierbarkeit des Vorgehens zu ermöglichen. Die prototypische Umgebung basiert auf einer lokal gehosteten Bereitstellung und nutzt eine Docker-basierte Infrastruktur, insbesondere im Zusammenspiel mit Komponenten der Eclipse BaSyx Dataspace-Umgebung. Der Zugriff auf die Benutzeroberfläche sowie auf die bereitgestellten Datenobjekte erfolgt über ein rollenbasiertes Login, sodass unterschiedliche Rechte- und Sichtbarkeitskonfigurationen innerhalb des Demonstrators nachvollzogen werden können. In Anlehnung an den Projektkontext wurden dabei auch digitale Repräsentationen von Komponenten und Informationsobjekten berücksichtigt, etwa über Asset-Administration-Shell-nahe Strukturen bzw. digitale Zwillinge, um die Zuordnung und Bereitstellung relevanter Informationen im Demonstrator konsistent abzubilden.

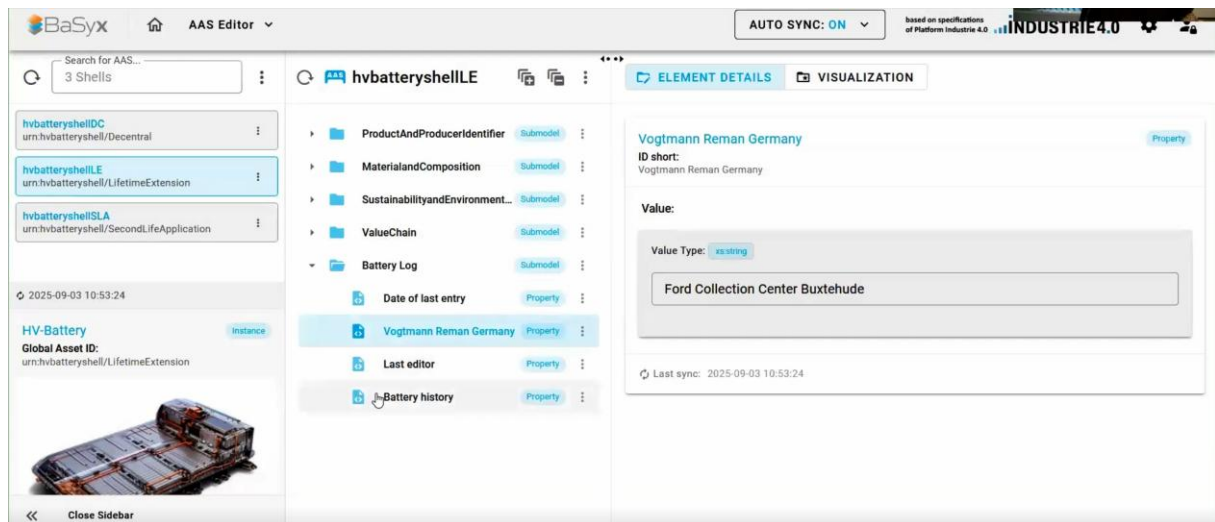


Abbildung 41: Ausschnitt des DataSpace Interfaces

Der Softwaredemonstrator bildet insbesondere die Bereitstellung, den Zugriff und die Nutzung definierter Datenprodukte ab. Dazu wurden für die beiden Case Studies spezifische Informationsobjekte und Zugriffslogiken modelliert, die unterschiedliche Freigabegrade widerspiegeln. Demonstriert wird somit nicht nur, dass Daten technisch innerhalb eines Data Space bereitgestellt werden können, sondern auch, wie abgestufte Informationsfreigaben auf Basis eines Rollen- und Rechtemodells gestaltet werden können. Auf diese Weise lässt sich untersuchen, welche Informationen für bestimmte Akteure sichtbar sind, welche Informationen verborgen bleiben und wie sich diese Unterschiede auf die praktische Nutzbarkeit im Remanufacturing-Kontext auswirken. Der Demonstrator dient somit als Mittel zur Veranschaulichung der Wechselwirkung zwischen technischem Setup, Governance-Logik und konkretem Informationsnutzen.

Gleichzeitig wird in der Darstellung der prototypischen Umsetzung transparent gemacht, dass die Implementierung nicht als linearer und vollständig reibungsloser Prozess verlief. Im Rahmen der technischen Realisierung zeigte sich, dass nicht alle bereitgestellten Anwendungen und Komponenten der verwendeten Umgebung erwartungsgemäß funktionierten. Entsprechend waren Anpassungen, Workarounds und iterative Konfigurationen erforderlich, um eine lauffähige Lösung für die Demonstration zu erzielen. Diese Erfahrungen sind für die Einordnung der Ergebnisse relevant, da sie verdeutlichen, dass die prototypische Erprobung nicht nur zur Prüfung fachlicher und konzeptioneller Annahmen beiträgt, sondern auch Einblicke in die praktische Implementierbarkeit und die derzeitigen Grenzen verfügbarer Data-Space-Werkzeuge liefert.

Zur Evaluation der prototypischen Umsetzung wurde ein Workshop mit Projektpartnern durchgeführt. Ziel dieses Workshops war es, die entwickelten Szenarien, den prototypischen Demonstrator sowie die zugrundeliegenden Zugriffs- und Austauschlogiken gemeinsam zu reflektieren und anhand definierter Kriterien zu bewerten. Die Bewertungskriterien wurden auf Basis der vorangegangenen

Konzeptentwicklung sowie der prototypischen Simulation gemeinsam hergeleitet und bezogen sich insbesondere auf Anwendbarkeit, Verständlichkeit und praktische Umsetzbarkeit. Die Workshopdiskussion diente damit nicht nur der Rückmeldung zur technischen Demonstration, sondern auch der Validierung der konzeptionellen Annahmen hinsichtlich Relevanz, Nachvollziehbarkeit und Nutzen im industriellen Anwendungskontext.

Die Workshop-Ergebnisse wurden systematisch ausgewertet und dokumentiert. Dabei zeigte sich, dass eine unmittelbare exemplarische Implementierung der entwickelten Traceability-Lösung mit realen Industriepartnerdaten im Projektkontext nicht realisierbar war. Ausschlaggebend hierfür waren insbesondere rechtliche, organisatorische und monetäre Einschränkungen, die eine weitergehende operative Umsetzung verhinderten. Dazu zählen insbesondere Unsicherheiten im Umgang mit sensiblen Daten, fehlende Freigaben für konkrete Datenteilungsszenarien sowie der Aufwand, der für eine belastbare Integration realer Unternehmenssysteme erforderlich gewesen wäre. Vor diesem Hintergrund ist der prototypische Aufbau primär als Simulations- und Erprobungsumgebung zu verstehen, mit der Zugriffslogiken, Informationsflüsse und Freigabekonzepte unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden konnten.

Die prototypische Erprobung erfüllt damit zwei Funktionen: Erstens dient sie der technischen und konzeptionellen Veranschaulichung des entwickelten Lösungsansatzes im Data-Space-Kontext. Zweitens ermöglicht sie eine erste Prüfung der prinzipiellen Umsetzbarkeit und Nützlichkeit des Konzepts, ohne bereits den Anspruch einer vollständigen industriellen Implementierung zu erheben. Gerade in dieser bewusst begrenzten, aber strukturierten Form liefert die prototypische Umsetzung wertvolle Erkenntnisse darüber, wie datenbasierte Traceability- und Austauschkonzepte im Remanufacturing gestaltet werden können, welche Voraussetzungen hierfür notwendig sind und an welchen Stellen in der Praxis weiterhin technische, organisatorische und governancebezogene Hürden bestehen.

Software-Prototyp zur Produktionsplanung im Remanufacturing

Im Verlauf des Vorhabens wurde ein Software-Prototyp für die Detailplanung von zirkulären Prozessen im Remanufacturing erstellt. Die Kopplung mit der ereignisdiskreten Simulation des Konsortialpartners wbk führte zu einer zur Schaffung eines durchgängigen Datenmodells, an das sich die einzelnen Softwarekomponenten einfach durch Nutzung von Verwaltungsschalen-Konzepten andocken können. Dies ermöglicht zudem die Option, dass auch weitere Softwarebausteine relativ einfach angebunden werden können, indem das Datenmodell entsprechend erweitert wird, wenn weitere Daten benötigt werden. Auch die Nutzung von Open-Source-Software ist als positiv zu sehen, da Kunden oftmals Investitionsentscheidungen durch Simulation untermauern wollen und die Kopplung von Planung und Simulation helfen kann, die Beschaffung von unnötigen Überkapazitäten zu vermeiden. Hintergedanke ist dabei, dass marktgängige Simulationssoftware nur über eine sehr einfache Planungskomponente verfügt, die beispielsweise Rüstzeiten oder Übergangszeiten nicht ausreichend in der Optimierung berücksichtigen und so dazu tendiert, Engpässe zu identifizieren, die durch eine gute Optimierung vermieden werden können.

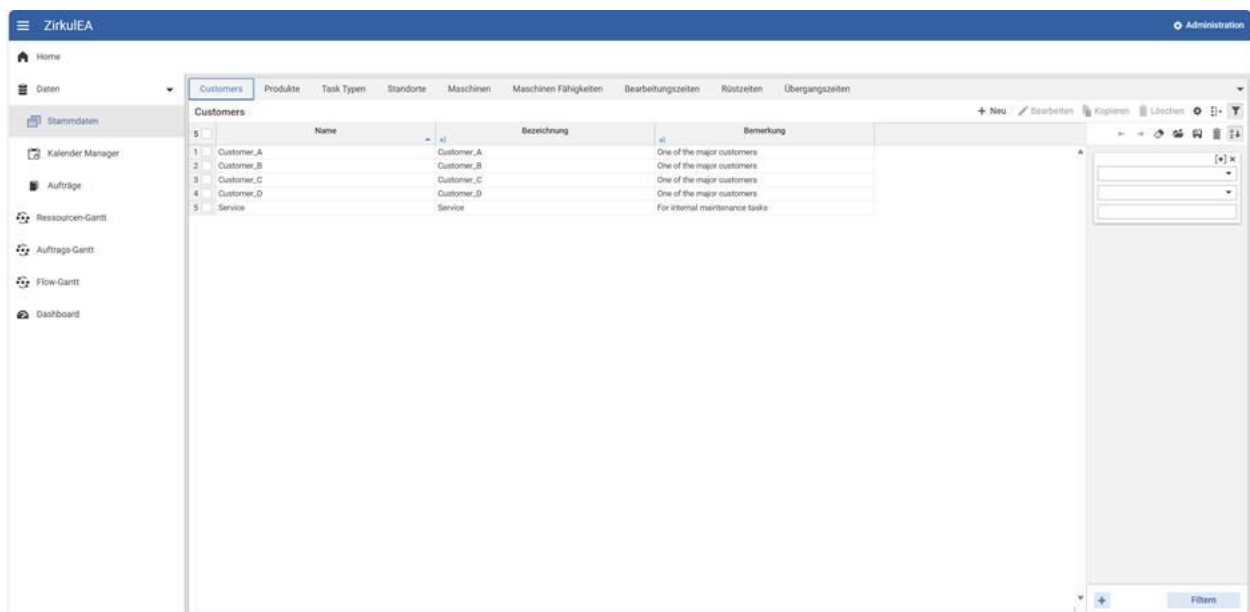
Zudem erlaubt die Kopplung natürlich auch die Validierung der Ansätze in unterschiedlichen Szenarien, sei es die Anschaffung neuer oder die Fähigkeitserweiterung vorhandener Ressourcen oder die Veränderung des Auftragspools bezüglich Varianz oder Mengen. Zudem kann hierüber eine Robustheitsbewertung einer Entscheidung getroffen werden, wenn beispielsweise eine veränderte Konfiguration des Produktionssystems (z.B. veränderte Ressourcen oder veränderte Kapazitäten) mit Mehrmengen oder anderen Produkten belastet wird und eine Bandbreite ermittelt werden kann, bis zu welchen Veränderungen die Dimensionierung noch ausreicht. So können „wandernde Engpässe“ einfach erkannt und dadurch vermieden werden, bei denen Entscheider sich zur Abdeckung von Mehrbedarfen für eine günstige Maßnahme zur Kapazitätsausweitung am aktuellen Engpass entscheiden, aber bei einer minimalen Mengenerhöhung den nächsten Engpass schafft, dessen Behebung dann eventuell nicht mehr wirtschaftlich ist.

Probleme, denen im Rahmen von Reman-Planung begegnet werden muss, ergeben sich beispielsweise bereits aus der Produktgestaltung, wobei hier insbesondere die Fügeprozesse zu nennen sind, die doch teilweise erhebliche Auswirkungen auf die Demontage haben und teilweise sogar eine zerstörungsfreie Trennung der Komponenten unmöglich machen. Durch das Modellieren unterschiedlicher Herstellungsprozesse (z.B. Schrauben statt Schweißen oder Kleben) eines Produkts lassen sich diese planerisch validieren und potenzielle Engpässe erkennbar werden, die – neben den Stabilitätsanforderungen – eine solche Umgestaltung des Produkts entgegenstehen. Daher war die Zusammenarbeit mit anderen, für den Zahlungsempfänger auf den ersten Blick nicht relevanten Arbeitspaketen, in diesem Fall mit dem Konsortialpartner Greening, sehr sinnvoll. Die Planungskomponente wurde stateless ausgestaltet, sodass

für jede Planung ein Upload der kompletten Daten notwendig ist. Dieses Setting war durch die enge datentechnische Kopplung mit der Simulationskomponente notwendig, um sicherzustellen, dass beide Software-Komponenten immer auf dem gleichen Datenstand arbeiten.

Inhaltlich lässt sich die entstandene, prototypisch implementierte Software anhand der folgenden Screenshots in einem Planungsablauf mit den zugehörigen Stamm- und Bewegungsdaten darstellen: In der hier beispielhaft dargestellten Software wird lediglich ein Versuchsaufbau dargestellt, der ein sehr vereinfachtes Planungsproblem umfasst, das durch die Kopplung mit der Simulation an die realen Gegebenheiten angepasst wird. Dennoch erfolgte die systemische Umsetzung dergestalt, dass für Testzwecke ein singular betreibbares Planungssystem geschaffen wurde. Dieses hat die Möglichkeit zur internen Datenmanipulation, sodass nicht bei jedem Testfall ein Datenaustausch und eine entsprechende Simulation stattfinden muss, um den Abstimmungsaufwand zwischen den Partnern während der Entwicklung zu minimieren.

Im dargestellten System (vgl. Abbildung 42) sind fünf Kunden angelegt, zudem gibt es den Kunde „Service“ für eventuelle Wartungsaufgaben.



The screenshot shows the ZirkulEA software interface. The main window displays a table titled 'Customers' with the following data:

ID	Name	Bezeichnung	Bemerkung
1	Customer_A	Customer_A	One of the major customers
2	Customer_B	Customer_B	One of the major customers
3	Customer_C	Customer_C	One of the major customers
4	Customer_D	Customer_D	One of the major customers
5	Service	Service	For internal maintenance tasks

Abbildung 42: Kunden

Als Produkte sind exemplarisch fünf unterschiedliche Cores angelegt (vgl. Abbildung 43), die in den weiter unten gezeigten Datensichten bezüglich des Arbeitsplans detailliert werden:

ID	Name	Bezeichnung	Bemerkung
1	core_variant_0	core_variant_0	core_variant_0
2	core_variant_1	core_variant_1	core_variant_1
3	core_variant_2	core_variant_2	core_variant_2
4	core_variant_3	core_variant_3	core_variant_3
5	core_variant_4	core_variant_4	core_variant_4
6	core_variant_5	core_variant_5	core_variant_5

Abbildung 43: Produkte bzw. Cores

Zugehörig zu den Produkten wird eine Liste aller Arbeitsschritt-Typen angelegt, denen die Prozesse des jeweiligen Anwendungsfalls zugeordnet werden können. Task-Typen umfassen für jeden Core die zwei Arten Inspection und Operation (vgl. *Abbildung 44*):

ID	Name	Bezeichnung	Bemerkung	Task-Rüst-Gruppe	Taskdauer-Gruppe
1	core_variant_0_inspection	core_variant_0_inspection	core_variant_0_inspection	Setup1	duration_core_variant_0_inspection
2	core_variant_0_operation	core_variant_0_operation	core_variant_0_operation	Setup1	duration_core_variant_0_operation
3	core_variant_1_inspection	core_variant_1_inspection	core_variant_1_inspection	Setup1	duration_core_variant_1_inspection
4	core_variant_1_operation	core_variant_1_operation	core_variant_1_operation	Setup1	duration_core_variant_1_operation
5	core_variant_2_inspection	core_variant_2_inspection	core_variant_2_inspection	Setup1	duration_core_variant_2_inspection
6	core_variant_2_operation	core_variant_2_operation	core_variant_2_operation	Setup1	duration_core_variant_2_operation
7	core_variant_3_inspection	core_variant_3_inspection	core_variant_3_inspection	Setup1	duration_core_variant_3_inspection
8	core_variant_3_operation	core_variant_3_operation	core_variant_3_operation	Setup1	duration_core_variant_3_operation
9	core_variant_4_inspection	core_variant_4_inspection	core_variant_4_inspection	Setup1	duration_core_variant_4_inspection
10	core_variant_4_operation	core_variant_4_operation	core_variant_4_operation	Setup1	duration_core_variant_4_operation
11	core_variant_5_inspection	core_variant_5_inspection	core_variant_5_inspection	Setup1	duration_core_variant_5_inspection
12	core_variant_5_operation	core_variant_5_operation	core_variant_5_operation	Setup1	duration_core_variant_5_operation

Abbildung 44: Task-Typen

Als Standorte für den hier gezeigten Prototyp wurde nur ein Standort angelegt, der Standort Reman (vgl. *Abbildung 45*). Für den Fall, dass ein Reman-Netzwerk mit verteilten Ressourcen optimiert werden soll, werden zusätzliche Standorte angelegt inklusive der Transportzeiten zwischen den Standorten, die sogar vom Core abhängig modelliert werden können, etwa wenn der Core besonders sperrig oder – im Fall der Hochvoltbatterie – besondere Transportmittel benötigt.

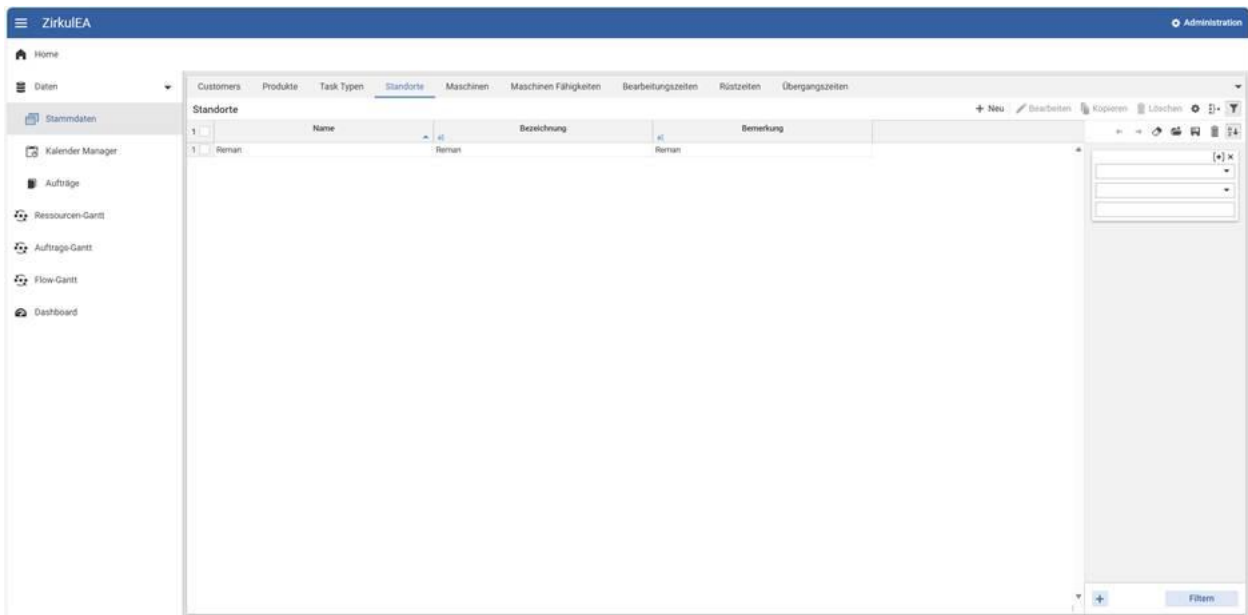


Abbildung 45: Standorte

In der folgenden Ressourcen-Sicht sind fünf Personen angelegt, die über ihre Maschinendauer-Gruppe einer Taskbearbeitungszeit zugeordnet werden (vgl. *Abbildung 46*). Anzumerken ist hierbei, dass alle Daten individuell an den konkreten Anwendungsfall anpassbar sind, sodass hier einfach zwischen unterschiedlichen Sprachen und unterschiedlichen Bezeichnungen gewechselt werden kann:

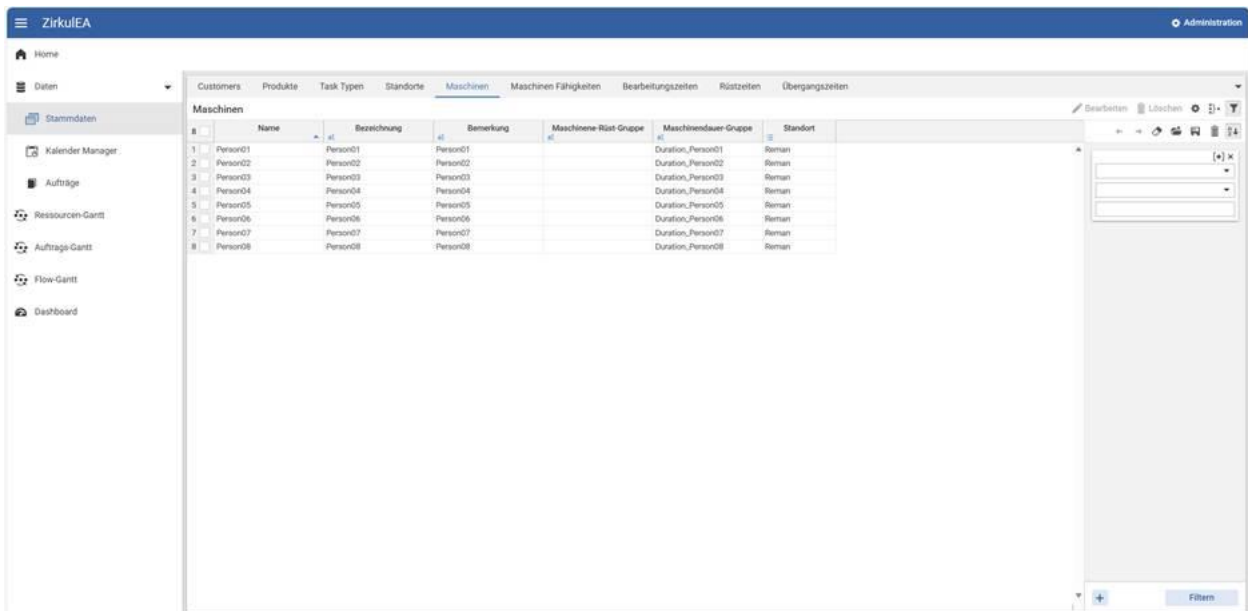


Abbildung 46: Ressourcen bzw. Maschinen

Den Ressourcen werden in einer weiteren Sicht Fähigkeiten zugeordnet (vgl. *Abbildung 47*), wobei die Modellierung der dafür benötigten Bearbeitungszeiten über Bearbeitungs-Zeitgruppen erfolgt. Dies ist notwendig, da im Remanufacturing eine konkrete Instanz A von Produkt X einen anderen Ressourcendurchlauf hat wie die Instanz B, ebenfalls von Produkt X. Dies ist insbesondere dann von Relevanz, wenn redundante Ressourcen

vorhanden sind, welche die für die einzelnen Arbeitsinhalte benötigten Fähigkeiten aufweisen.

ID	Maschine	Fähigkeit
1	Person01	core_variant_3_operation
2	Person01	core_variant_1_operation
3	Person01	core_variant_1_inspection
4	Person01	core_variant_5_inspection
5	Person01	core_variant_4_inspection
6	Person01	core_variant_2_operation
7	Person01	core_variant_2_inspection
8	Person01	core_variant_3_inspection
9	Person01	core_variant_4_operation
10	Person01	core_variant_4_inspection
11	Person01	core_variant_1_inspection
12	Person01	core_variant_2_inspection
13	Person02	core_variant_3_operation
14	Person02	core_variant_3_operation
15	Person02	core_variant_1_operation
16	Person02	core_variant_2_operation
17	Person02	core_variant_2_inspection
18	Person02	core_variant_1_inspection
19	Person02	core_variant_2_operation
20	Person02	core_variant_3_inspection
21	Person02	core_variant_4_operation
22	Person02	core_variant_5_operation
23	Person02	core_variant_1_inspection
24	Person02	core_variant_2_inspection
25	Person03	core_variant_3_operation
26	Person03	core_variant_5_operation
27	Person03	core_variant_1_operation
28	Person03	core_variant_5_inspection
29	Person03	core_variant_5_operation
30	Person03	core_variant_4_inspection
31	Person03	core_variant_2_operation
32	Person03	core_variant_3_inspection
33	Person03	core_variant_4_operation
34	Person03	core_variant_5_operation

Abbildung 47: Fähigkeiten der Ressourcen

Anschließend werden die Taskdauer-Gruppen mit Maschinendauer-Gruppen kombiniert, um die Bearbeitungszeit der einzelnen Tasks auf den unterschiedlichen Maschinen zu modellieren. Diese Gruppierungen haben den Vorteil, dass dadurch nicht jedes einzelne Planungsobjekt komplett ausmodelliert werden muss.

Zudem können Rüstzeiten und Transport- bzw. Übergangszeiten modelliert werden, wie in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt ist:

ID	Maschinene-Rüst-Gruppe	von Task-Rüst-Gruppe	zu Task-Rüst-Gruppe	Dauer
1	Setup1	Setup1	Setup1	00:00:00:00
2	*	*	*	00:00:00:00

Abbildung 48: Rüstzeiten in Abhängigkeit von Task-Übergängen

ID	Übergangszeitgruppe	Jobtyp-Name	Dauer
1	*	*	00:00:00:00

Abbildung 49: Übergangszeiten

Zudem werden die Kapazitäten der einzelnen Ressourcen in einem Schichtkalender modelliert. Dies hat im Gegensatz beispielsweise zu einer Angabe in Stück pro Tag den Vorteil, dass im Gegensatz zu einer fix getakteten Fließbandfertigung, an der jedes Produkt an jeder Station die exakt gleiche Verweildauer (sei es Bearbeitungs- oder Verweilzeit) hat. Vielmehr kann hier durch die exakten Bearbeitungszeiten der einzelnen Produkte eine sehr detaillierte Planung vorgenommen werden, da die vorhandene Kapazität nur für exakt die benötigte Bearbeitungszeit reserviert wird.

Im Folgenden wird die Sicht zur Pflege der Aufträge angezeigt, die jeweils die Daten z.B. zu Produkt, Menge, frühestem Starttermin (z.B. festgelegt auf Basis der Verfügbarkeit von externen oder internen Zulieferteilen), Zieldatum und spätestem Lieferdatum enthält (vgl. Abbildung 50). Das Auftragsattribut Kunde wird lediglich visualisiert, da im Reman nicht zwangsläufig eine Logik zur Behandlung von Kunden besteht. Vielmehr kann dies über einen manuellen Eingriff anhand des Attributs Priorität der einzelnen Aufträge erfolgen. Dann wird bei zeitlich gleichem Bedarf zweier Aufträge nach einer konkreten Ressource derjenige bei der Einplanung bevorzugt, der eine höhere Priorität hat. Hierzu wurde in der Planungslogik eine konstruktive Heuristik implementiert, die die einzelnen Ressourcen anhand des vorgegebenen Taskablaufs – unter Berücksichtigung einer Wichtig- bzw. Dringlichkeit, die einerseits auf dem Restdurchlauf der Aufträge und eben dieser Priorisierung beruht – der Produkte sequenziell auf die Ressourcen legt. Das Attribut Kunde kann aber beispielsweise zur Gruppierung von Aufträgen oder für bestimmte Auswertungen / Filteraktivitäten genutzt werden.

soo	Auftrag	Bezeichnung	Typ	Menge	Produkt	Frühester Produktionsbeginn	Zieldatum	Spätestes Lieferdatum	Priorität	Kunde
1	Order001_core_variant_1	Order001_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
2	Order002_core_variant_0	Order002_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
3	Order003_core_variant_4	Order003_core_...	production	1	core_variant_4	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
4	Order004_core_variant_5	Order004_core_...	production	1	core_variant_5	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
5	Order005_core_variant_2	Order005_core_...	production	1	core_variant_2	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
6	Order006_core_variant_0	Order006_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
7	Order007_core_variant_0	Order007_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
8	Order008_core_variant_3	Order008_core_...	production	1	core_variant_3	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
9	Order009_core_variant_4	Order009_core_...	production	1	core_variant_4	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
10	Order010_core_variant_3	Order010_core_...	production	1	core_variant_3	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
11	Order011_core_variant_1	Order011_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
12	Order012_core_variant_5	Order012_core_...	production	1	core_variant_5	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
13	Order013_core_variant_0	Order013_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
14	Order014_core_variant_1	Order014_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
15	Order015_core_variant_2	Order015_core_...	production	1	core_variant_2	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
16	Order016_core_variant_4	Order016_core_...	production	1	core_variant_4	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
17	Order017_core_variant_3	Order017_core_...	production	1	core_variant_3	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
18	Order018_core_variant_4	Order018_core_...	production	1	core_variant_4	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
19	Order019_core_variant_5	Order019_core_...	production	1	core_variant_5	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
20	Order020_core_variant_1	Order020_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
21	Order021_core_variant_2	Order021_core_...	production	1	core_variant_2	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
22	Order022_core_variant_3	Order022_core_...	production	1	core_variant_3	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
23	Order023_core_variant_1	Order023_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
24	Order024_core_variant_1	Order024_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
25	Order025_core_variant_2	Order025_core_...	production	1	core_variant_2	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
26	Order026_core_variant_0	Order026_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
27	Order027_core_variant_5	Order027_core_...	production	1	core_variant_5	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
28	Order028_core_variant_0	Order028_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
29	Order029_core_variant_1	Order029_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
30	Order030_core_variant_1	Order030_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
31	Order031_core_variant_0	Order031_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
32	Order032_core_variant_5	Order032_core_...	production	1	core_variant_5	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
33	Order033_core_variant_3	Order033_core_...	production	1	core_variant_3	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
34	Order034_core_variant_0	Order034_core_...	production	1	core_variant_0	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D
35	Order035_core_variant_1	Order035_core_...	production	1	core_variant_1	17.11.2025 00:00:00	18.11.2025 23:59:59	18.11.2025 23:59:59	0	Customer_D

Abbildung 50: Aufträge

Über die in den vorigen Screenshots dargestellte, gestaffelte und dennoch detaillierte Modellierung können einfach und unkompliziert

- Ressourcen und Standorte,

- Ressourcenfähigkeiten,
- Schichten,
- Produkte und deren Arbeitspläne,
- Bearbeitungsdauern,
- Rüst- und Transportzeiten und
- Aufträge mit zugehörigen Terminen, Produkten und Mengen hinzugefügt, modifiziert oder entfernt werden, um unterschiedliche Szenarien von Produktionssystemen zu modellieren und somit Entscheidungen planerisch zu validieren.

Die folgende Abbildung 51 stellt die REST-API zur Übergabe eines JSON-Files dar, das sämtliche Daten enthält und einen Solver-Lauf auslöst.

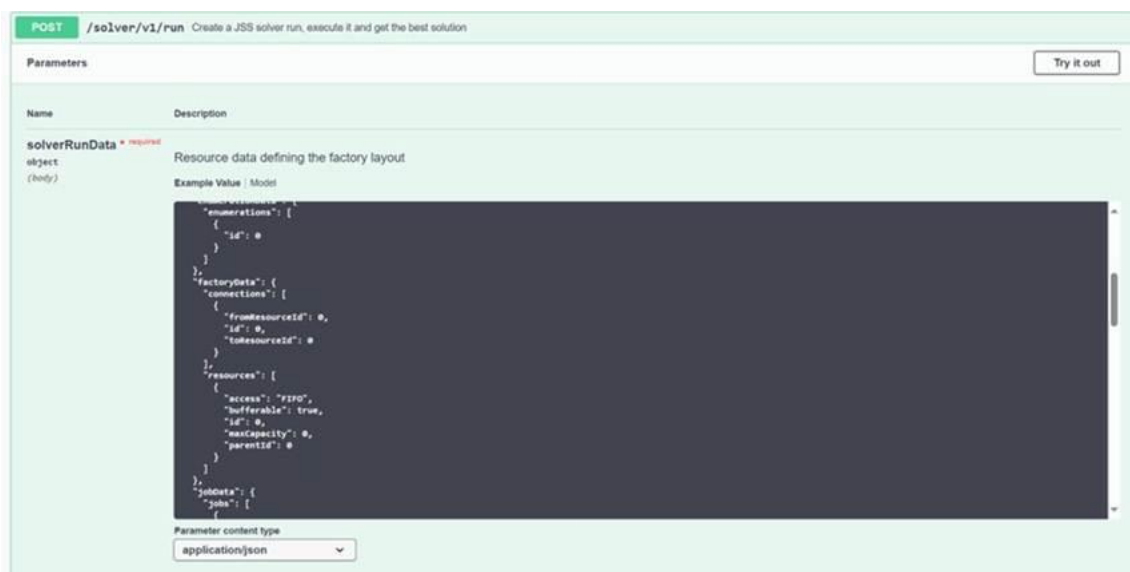


Abbildung 51: Solver-Start mit Datenimport

Anschließend wird, nach Durchführung der Optimierung, das Ergebnis in einem Gantt dargestellt (vgl. Abbildung 52). Dazu wird die Belegung der einzelnen Ressourcen im Zeitverlauf visualisiert.

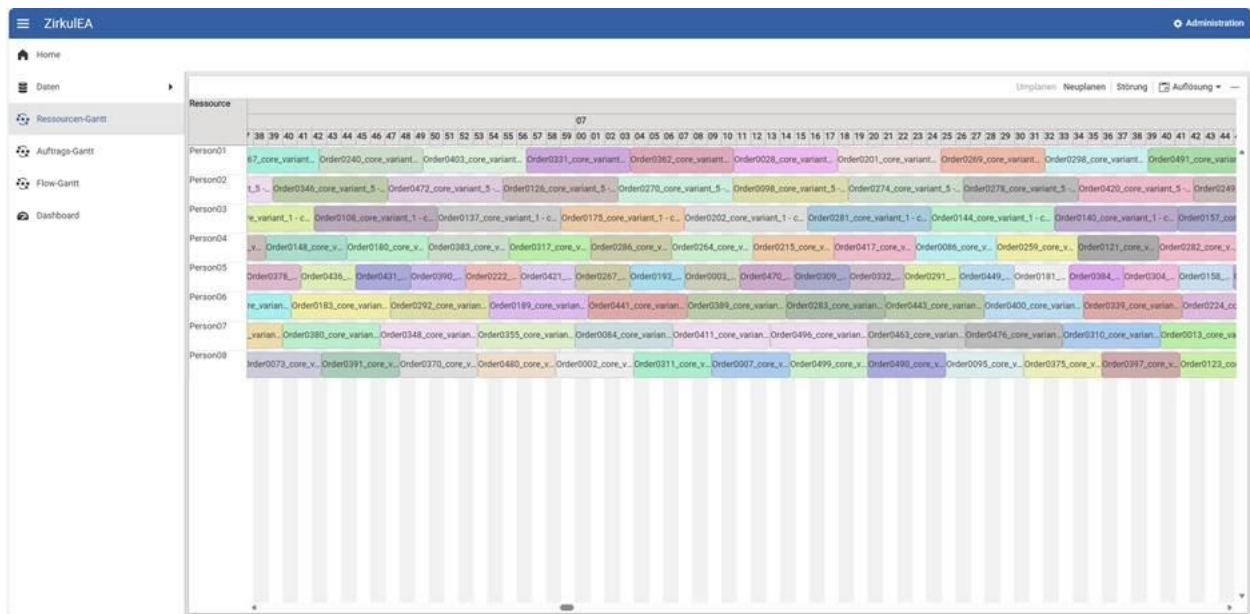


Abbildung 52: Gantt als Ergebnis für die Maschinenbelegung

Eine manuelle Interaktion im Gantt (Drag&Drop) ist im konkreten Anwendungsfall nicht notwendig, da durch die häufig auftretenden Störungen bzw. Planabweichungen eine solche, für die planende Person doch zeitaufwändige Umplanung nicht ermöglicht. Falls Expertenkenntnisse vorhanden sind, die dem Planungsergebnis widersprechen oder eine subjektiv bessere Planung vorliegt, so muss diese über die oben genannten Attribute ins Planungs- bzw. Datenmodell eingebracht werden. Allerdings besteht auch im Gantt die Option, eine bestimmte Ressource auf „Störung“ zu setzen, dann wird im Hintergrund der Schichtkalender dieser Ressource für den angegebenen Zeitraum auf Nicht-Arbeitszeit gesetzt. Dabei ist die Modellierung dergestalt, dass während einer Störung davon ausgegangen wird, dass der aktuell auf der Ressource liegende Auftrag während der Störung auf der Ressource verbleibt, da der Auftrag im Remanufacturing ja zerlegt wird und ein Transport der Einzelteile zu einer anderen Ressource nicht wirklich sinnvoll ist. Falls dies in einem konkreten Anwendungsfall doch sinnvoll ist, dann kann diese Modellierung umgeändert werden, allerdings nicht an der Nutzer-Oberfläche, sondern in der Algorithmik selbst.

Wenn die Maus in der Gantt-View auf einen konkreten Task bewegt wird, dann werden die nicht zu diesem Auftrag gehörenden Tasks ausgegraut, während die zugehörigen Tasks hervorgehoben werden. Dadurch werden Details zum konkret ausgewählten Task visualisiert (vgl. Abbildung 53).

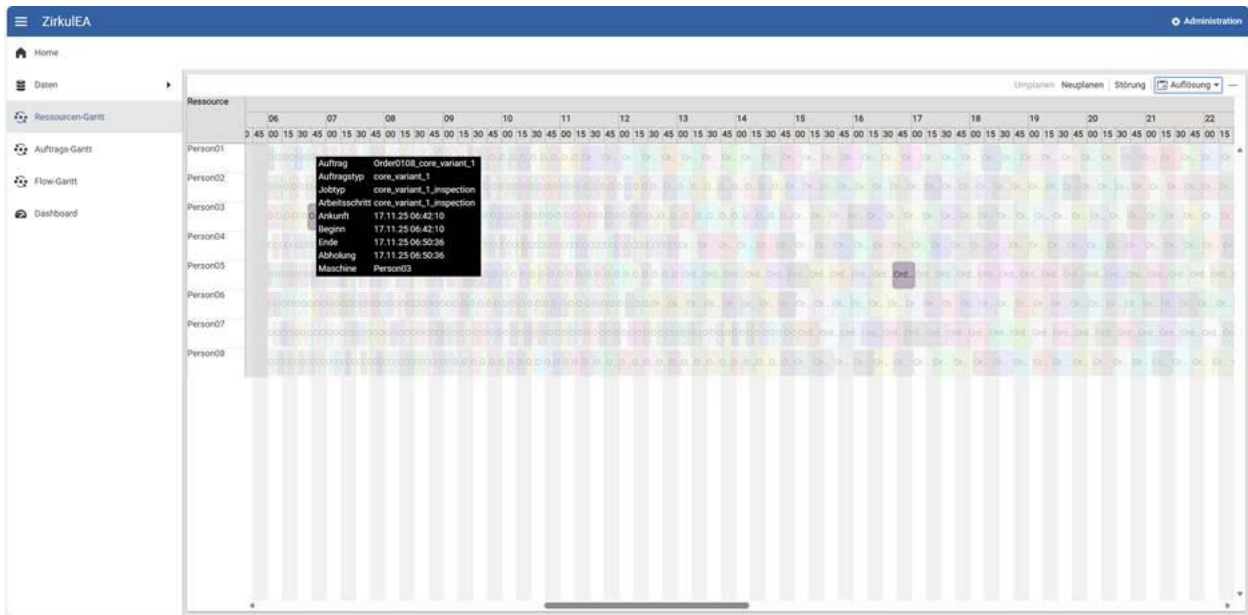


Abbildung 53: Mouseover im Gantt

Das Planungsergebnis wird allerdings im konkreten ZirkulEA-Anwendungsfall nicht in einem Gantt transferiert, dieses diene eher der optischen Validierung der Planungsergebnisse und erlaube ein Erkennen von Modellierungsfehlern oder von Fehlern der implementierten Planungslogik. Der Export kann über JSON oder als Microsoft Excel-File bzw. csv erfolgen (vgl. Abbildung 54):

id	arriveDate	beginDate	endDate	departureDate	label	style	machineld	ordereid	taskid	jobid
1	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:05:20	17.11.2025 06:05:20	Order0320_core_variant_0_core_variant_0_inspection		32	519	630	631
2	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:06:40	17.11.2025 06:06:40	Order0041_core_variant_0_core_variant_0_inspection		31	40	80	81
3	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:07:05	17.11.2025 06:07:05	Order0107_core_variant_0_core_variant_0_inspection		25	106	212	211
4	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:03:45	17.11.2025 06:03:45	Order0134_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	133	266	266
5	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:05:33	17.11.2025 06:05:33	Order0185_core_variant_2_core_variant_2_inspection		28	184	368	368
6	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:07:52	17.11.2025 06:07:52	Order0004_core_variant_5_core_variant_5_inspection		26	3	6	6
7	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:00:00	17.11.2025 06:06:46	17.11.2025 06:06:46	Order0016_core_variant_4_core_variant_4_inspection		30	15	30	30
8	17.11.2025 06:03:45	17.11.2025 06:03:45	17.11.2025 06:07:30	17.11.2025 06:07:30	Order0042_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	41	82	82
9	17.11.2025 06:05:20	17.11.2025 06:05:20	17.11.2025 06:10:40	17.11.2025 06:10:40	Order0229_core_variant_0_core_variant_0_inspection		32	228	456	456
10	17.11.2025 06:05:33	17.11.2025 06:05:33	17.11.2025 06:11:06	17.11.2025 06:11:06	Order0428_core_variant_2_core_variant_2_inspection		28	425	850	850
11	17.11.2025 06:06:46	17.11.2025 06:06:46	17.11.2025 06:13:20	17.11.2025 06:13:20	Order0289_core_variant_0_core_variant_0_inspection		31	288	576	576
12	17.11.2025 06:06:46	17.11.2025 06:06:46	17.11.2025 06:13:32	17.11.2025 06:13:32	Order0018_core_variant_4_core_variant_4_inspection		30	17	34	34
13	17.11.2025 06:07:05	17.11.2025 06:07:05	17.11.2025 06:14:10	17.11.2025 06:14:10	Order0356_core_variant_0_core_variant_0_inspection		25	355	710	711
14	17.11.2025 06:07:30	17.11.2025 06:07:30	17.11.2025 06:11:15	17.11.2025 06:11:15	Order0435_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	434	868	868
15	17.11.2025 06:07:52	17.11.2025 06:07:52	17.11.2025 06:15:44	17.11.2025 06:15:44	Order0200_core_variant_5_core_variant_5_inspection		26	199	398	398
16	17.11.2025 06:09:26	17.11.2025 06:09:26	17.11.2025 06:18:52	17.11.2025 06:18:52	Order0167_core_variant_1_core_variant_1_inspection		27	166	332	332
17	17.11.2025 06:10:40	17.11.2025 06:10:40	17.11.2025 06:16:00	17.11.2025 06:16:00	Order0060_core_variant_0_core_variant_0_inspection		32	59	118	118
18	17.11.2025 06:11:06	17.11.2025 06:11:06	17.11.2025 06:16:39	17.11.2025 06:16:39	Order0471_core_variant_2_core_variant_2_inspection		28	470	940	941
19	17.11.2025 06:11:15	17.11.2025 06:11:15	17.11.2025 06:15:00	17.11.2025 06:15:00	Order0473_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	472	944	944
20	17.11.2025 06:13:20	17.11.2025 06:13:20	17.11.2025 06:20:00	17.11.2025 06:20:00	Order0093_core_variant_0_core_variant_0_inspection		31	92	184	184
21	17.11.2025 06:13:32	17.11.2025 06:13:32	17.11.2025 06:20:18	17.11.2025 06:20:18	Order0252_core_variant_4_core_variant_4_inspection		30	251	502	502
22	17.11.2025 06:14:10	17.11.2025 06:14:10	17.11.2025 06:21:15	17.11.2025 06:21:15	Order0494_core_variant_0_core_variant_0_inspection		25	493	986	986
23	17.11.2025 06:15:00	17.11.2025 06:15:00	17.11.2025 06:18:45	17.11.2025 06:18:45	Order0050_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	49	98	98
24	17.11.2025 06:15:44	17.11.2025 06:15:44	17.11.2025 06:23:36	17.11.2025 06:23:36	Order0416_core_variant_5_core_variant_5_inspection		26	415	830	831
25	17.11.2025 06:16:00	17.11.2025 06:16:00	17.11.2025 06:21:20	17.11.2025 06:21:20	Order0398_core_variant_0_core_variant_0_inspection		32	397	794	794
26	17.11.2025 06:16:39	17.11.2025 06:16:39	17.11.2025 06:22:12	17.11.2025 06:22:12	Order0078_core_variant_2_core_variant_2_inspection		28	77	154	154
27	17.11.2025 06:16:52	17.11.2025 06:16:52	17.11.2025 06:25:18	17.11.2025 06:25:18	Order0457_core_variant_1_core_variant_1_inspection		27	456	912	911
28	17.11.2025 06:18:45	17.11.2025 06:18:45	17.11.2025 06:22:30	17.11.2025 06:22:30	Order0375_core_variant_4_core_variant_4_inspection		29	356	712	711
29	17.11.2025 06:20:00	17.11.2025 06:20:00	17.11.2025 06:26:40	17.11.2025 06:26:40	Order0006_core_variant_0_core_variant_0_inspection		31	5	10	11
30	17.11.2025 06:20:18	17.11.2025 06:20:18	17.11.2025 06:27:04	17.11.2025 06:27:04	Order0474_core_variant_4_core_variant_4_inspection		30	473	946	944
31	17.11.2025 06:21:15	17.11.2025 06:21:15	17.11.2025 06:28:20	17.11.2025 06:28:20	Order0125_core_variant_0_core_variant_0_inspection		25	124	248	244

Abbildung 54: Export des Schedules als Tabelle

Dieses Planungsergebnis wird dann in der ereignisdiskreten Simulation des wbk in SimPy durchsimuliert, wobei stochastisch Störungen und Abweichungen erzeugt werden.

Die Planungsheuristik wurde aus Performancegründen als Service ausgestaltet, containerisiert und über einen Cloud-Zugriff ansprechbar ausgestaltet (semi-automatisierter Daten-Upload, Run, Bereitstellung Schedule). Die Informationsschnittstelle der Planungssoftware zur Feldinformationsdatenbank wurde

über die Simulationskomponente abgebildet, weil natürlich keine reale Anbindung in einem Echtbetrieb stattfinden konnte.

In der folgenden Abbildung 55 wird das Zusammenspiel von Planung und ereignisdiskreter Simulation auf Basis des Datenaustauschs dargestellt:

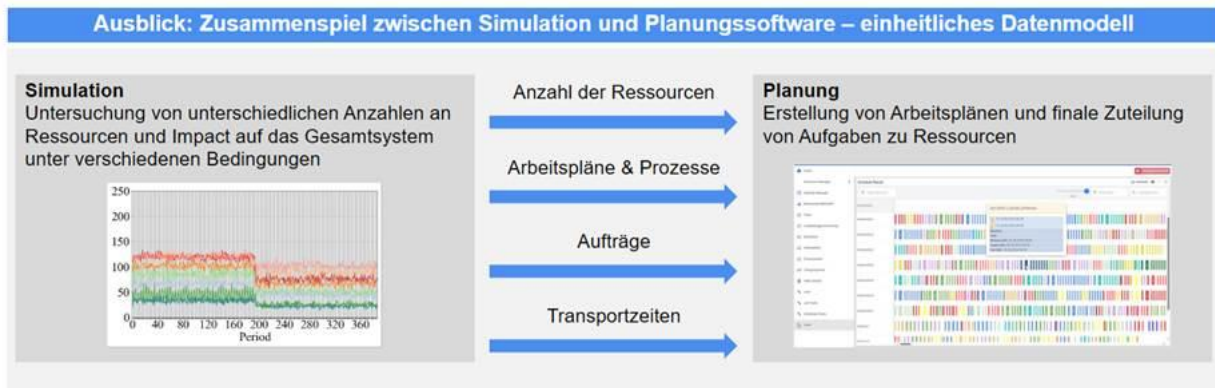


Abbildung 55: Gemeinsame Datennutzung von Ereignisdiskreter Simulation und Planung

Die folgende Beschreibung ist den in Dvorak et al. (2025) veröffentlichten Inhalten zuzuordnen. Ein simulationsbasierter Ansatz wurde zur Bewertung von Entwicklungsstrategien für Demontagesysteme unter Unsicherheit entwickelt. Dabei wurden Produkt-, Prozess- und Ressourcenmodelle unter Berücksichtigung von Rücklaufmengen, Produktdesignänderungen und Informationsverfügbarkeit eingesetzt, um verschiedene Systeme und Szenarien zu bewerten. Zur systematischen Bewertung wurde ereignisdiskrete Simulation eingesetzt, um unterschiedliche Kombinationen von menschlichen Arbeitskräften und Robotern zu betrachten. Die Simulation wurde auf einen fiktiven Anwendungsfall der Demontage von Batterien angewendet. Eine Darstellung ist in Abbildung 56 gegeben.



Abbildung 56: Modellierung des Demontageprozesses mit ema Work Designer (Dvorak et al., 2025)

Das Produktmodell wurde aus einer hierarchischen Struktur basierend auf Verbindungselementen erstellt und die Demontageoperationen basierend auf dieser Struktur abgeleitet. Das Prozessmodell definierte die Aufgaben und Prozesse unter Verwendung hypothetischer Komplexitätsfaktoren zur Differenzierung der Aufgaben. Eine Darstellung ist in Abbildung 57 gegeben.

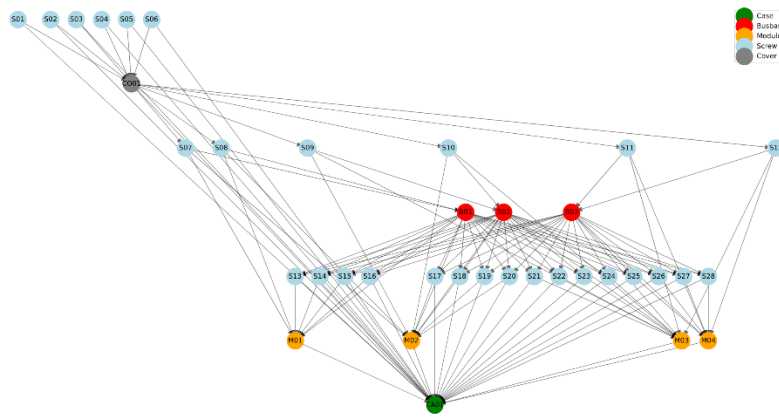


Abbildung 57: Graphenbasierte Darstellung des Demontage-Prozessmodells mit hierarchischer Verbindungsstruktur (Dvorak et al., 2025)

Das Ressourcenmodell betrachtet die menschlichen Arbeitskräfte, die Roboter (Automatisierung basierend auf Komplexität und Verbindungstyp), und das Kostenmodell (inklusive Investitionskosten für Roboterstationen und Lohnkosten für Personal). Szenarien mit unterschiedlichen Rücklaufmengen (Einheiten/Tag), Produktdesigns (Schraubverbindung/Klebeverbindung) und variierende Informationsverfügbarkeiten (vollständig/unvollständig) wurden dabei für unterschiedliche Ressourcenkombinationen (nur Menschen/Menschen und Roboter) mittels DES simuliert. Die Simulationen wurden anhand der Metriken Output (Anzahl demontierter Batterien), Gesamtkosten pro demontierte Einheit (Summe aus Investitions- und Personalkosten) und Ressourcenauslastung bewertet.

Die Szenarien mit vollständiger Informationsverfügbarkeit und hoher Rücklaufmenge wiesen die höchste Effizienz und reduzierte Ausschussquote vor. Designänderung (wie z.B. die Einführung einer Klebeverbindung statt Schraubverbindung) erhöhte die Prozesskomplexität und führte zu einem geringeren Automatisierungspotenzial. Die flexible Modellierung ermöglichte Anpassungen an Produkt- und Prozessänderungen. Deutliche Unterschiede in Kosten und Output zeigten sich in den unterschiedlichen Szenarien, in denen Informationsverfügbarkeit entscheidend für die Wirtschaftlichkeit war. Zudem hatten Produktdesignänderungen einen starken Einfluss auf den Durchsatz und die Kosten. Die Simulation bietet damit eine belastbare Entscheidungsgrundlage für Ramp-up-Planung und Investitionsentscheidung und zeigt die Bedeutung flexibler Systemgestaltung bei Produktänderungen.

Basierend auf den resultierenden Prozesszeiten kann gezeigt werden, dass häufige Designänderungen die Automatisierung vor Herausforderungen stellen und somit insbesondere der Flexibilisierungsgrad des Gesamtsystems eine große Rolle spielt.

Leitlinien für die Gestaltung zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau kreislauffähiger Wertschöpfung nicht auf einzelne technische Lösungen oder isolierte Optimierungen reduziert werden kann. Vielmehr erfordert die Umsetzung ein abgestimmtes Zusammenspiel aus geeigneter Strategieauswahl, kreislaufgerechter Produkt- und Prozessgestaltung, flexibler Planung und Steuerung sowie einer koordinierten Zusammenarbeit der beteiligten Akteure. Die Leitlinien verdichten diese Zusammenhänge zu einem übertragbaren Orientierungsrahmen für Unternehmen, die zirkuläre Wertschöpfungsstrukturen aufbauen oder weiterentwickeln möchten.

Ausgangspunkt einer wirtschaftlich tragfähigen Kreislaufwirtschaft ist die systematische Auswahl geeigneter Kreislaufstrategien. Produkte, Komponenten und Materialien sollten nicht pauschal einer einzelnen Verwertungsoption zugeordnet werden, sondern abhängig von ihrem Zustand, ihrem Restwert, ihrer technischen Eignung und den jeweiligen Rahmenbedingungen bewertet werden. Die im Projekt entwickelten Ansätze machen deutlich, dass diese Entscheidung auf einer strukturierten und nachvollziehbaren Logik beruhen muss, die technische, wirtschaftliche, ökologische und organisatorische Einflussgrößen gemeinsam berücksichtigt. Nur so lässt sich vermeiden, dass wertige Rückführungsoptionen ungenutzt bleiben oder Ressourcen vorschnell in weniger vorteilhafte Kreislaufwege überführt werden.

Darauf aufbauend wird deutlich, dass kreislauffähige Wertschöpfung eine andere Form der Planung erfordert als lineare Produktionssysteme. Rückläufer sind in ihrer Menge, ihrem Zeitpunkt, ihrem Zustand und ihrer Zusammensetzung unsicher. Planung muss deshalb mit Unsicherheit umgehen können und sollte nicht auf einem idealisierten Standardfall beruhen. Stattdessen ist eine robuste Auslegung erforderlich, die unterschiedliche Szenarien berücksichtigt und sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Zielgrößen einbezieht. Die im Projekt entwickelten Simulations- und Bewertungsansätze zeigen, dass gerade unter variierenden Rücklaufbedingungen flexible und informationsgestützte Vorgehensweisen notwendig sind, um tragfähige Entscheidungen für Prozesse, Ressourcen und Folgepfade treffen zu können.

Für die Ausgestaltung der Prozesse bedeutet dies, dass kreislauffähige Systeme wandlungsfähig und differenziert aufgebaut sein müssen. Eine vollständige Automatisierung ist unter den Bedingungen variabler Produktzustände und hoher Heterogenität häufig weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll. Stattdessen zeigt sich der Nutzen modularer Systeme, in denen manuelle, assistierte und automatisierte Prozessschritte je nach Aufgabe und Anforderung sinnvoll miteinander kombiniert werden. Dabei gewinnen Assistenzsysteme, flexible Prozessmodule und rekonfigurierbare Arbeitsplätze an Bedeutung, weil sie helfen, Unsicherheit beherrschbar zu machen, manuelle Tätigkeiten zu stabilisieren und zugleich Effizienzpotenziale zu erschließen. Kreislauffähige Wertschöpfung erfordert damit keine starre Ideallösung,

sondern Systeme, die sich auf unterschiedliche Produkte und Prozesssituationen anpassen lassen. Gleichzeitig machen die Arbeiten des Projekts deutlich, dass Planung und Steuerung in zirkulären Wertschöpfungsketten wesentlich stärker als kontinuierlicher Entscheidungsprozess verstanden werden müssen. Neue Informationen über Zustand, Verfügbarkeit, Bearbeitbarkeit oder Nachfrage verändern fortlaufend die Ausgangslage und müssen in die weitere Prozessführung einbezogen werden. Entscheidend ist daher nicht nur die Verfügbarkeit von Informationen, sondern vor allem ihre wirksame Einbindung in operative und taktische Entscheidungen. Planung und Steuerung werden damit zu einer Aufgabe, die materielle und informationelle Flüsse gemeinsam betrachten muss. Der Mehrwert von Transparenz liegt nicht in der Erfassung selbst, sondern darin, Entscheidungen über Rückführung, Weiterverarbeitung und Ressourceneinsatz präziser, schneller und wirtschaftlicher treffen zu können.

Mit zunehmender Zahl beteiligter Akteure rückt zudem die Ausgestaltung des Netzwerks in den Vordergrund. Kreislauffähige Wertschöpfung entsteht nicht innerhalb eines einzelnen Unternehmens, sondern in der koordinierten Zusammenarbeit mehrerer Partner mit unterschiedlichen Rollen, Fähigkeiten und Interessen. Damit diese Zusammenarbeit tragfähig ist, müssen Verantwortlichkeiten klar zugeordnet, Entscheidungswege abgestimmt und gemeinsame Zielvorstellungen entwickelt werden. Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass zirkuläre Wertschöpfung nicht allein an technischen Fragen scheitert, sondern ebenso an mangelnder Abstimmung, unklaren Zuständigkeiten oder fehlenden Anreizen zur Zusammenarbeit. Eine tragfähige Netzwerkgestaltung muss deshalb immer sowohl die organisatorische als auch die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit der beteiligten Partner berücksichtigen.

Datenaustausch als Enabler zirkulärer Geschäftsmodelle

Neben der Auswahl geeigneter Technologien zur Datenaufnahme und -weitergabe sowie der Erarbeitung eines Gesamtkonzepts zur Datenweitergabe sieht das Vorhaben explizit vor, die für den Datenaustausch notwendigen Geschäftsmodelle und Anreizsysteme zur Partizipation zu berücksichtigen und die Interaktion zwischen Datenaustausch und Geschäftsmodell systematisch zu betrachten. Dabei werden Gestaltungsgrundlagen eines kreislauffähigen Partner-Ökosystems und Mechanismen, die eine nachhaltige, faire und wirtschaftlich tragfähige Teilnahme am organisationsübergreifenden Datenaustausch ermöglichen, konzipiert.

Die Auswertung von 13 Interviews entlang der automobilen Wertschöpfungskette (OEMs, Zulieferer, Remanufacturer, Service Provider, Plattformakteure und wissenschaftliche Expert:innen) zeigt, dass Datenaustausch in kreislauforientierten Geschäftsmodellen nicht als eigenständiges „Produkt“ verstanden wird, sondern als strukturierender Enabler, dessen Nutzen erst durch konkrete Anwendungen entsteht. Dies deckt sich mit der Forschungsliteratur, die Datenaustausch konsistent als ermöglichende Infrastruktur bzw. Koordinationsmechanismus beschreibt, bei dem Wert erst dann entsteht, wenn Daten kontextbezogen genutzt werden (Arenas et al., 2019; D’Hauwers & Walravens,

2022; Fassnacht et al., 2023). DS unterstützt sowohl operative Verbesserungen (z. B. Effizienz, Qualität, Stabilität) als auch zirkuläre Aktivitäten wie Remanufacturing, Recycling oder Footprint-Berechnungen (Agrawal et al., 2021) (Gieß et al., 2024; Hoffmann et al., 2022).

Die Praxis verdeutlicht dabei eine zusätzliche Perspektive: fehlende oder nicht zugängliche Daten erzeugen unmittelbare Wertverluste. Wenn produkt- oder materialbezogene Daten nicht verfügbar sind, müssen Unternehmen in der CO₂-Bilanzierung Worst-Case-Annahmen treffen („If we don't get the data, we basically always must assume the worst case for the calculation.“ – Interview 2). Ähnlich wird der Bedarf nach Lebenszyklusinformationen für die Bewertung von Zuständen und geeigneten R-Strategien hervorgehoben („We need to be able to trace the condition of components ... understanding the life a component has already gone through is essential ...“ – Interview 1). Diese Logik unterstreicht die wechselseitige Abhängigkeit von Datenwert und zirkulärem Wert: Datenwert ist nicht intrinsisch, sondern entsteht durch die Anwendung in zirkulären Praktiken; umgekehrt benötigt zirkuläre Wertschöpfung kontinuierliche, lebenszyklusbezogene Datenflüsse.

Über die Interviews hinweg lassen sich drei empirische Situationen unterscheiden:

- (1) Unternehmen, die Daten bereits im Rahmen etablierter Geschäftsbeziehungen austauschen,
- (2) Akteure, die sich an entstehenden plattformbasierten Initiativen beteiligen (z. B. Catena-X oder DPP-Kontexte), sowie
- (3) Organisationen in frühen, explorativen Phasen, die Datenaustausch als zukünftige Fähigkeit vorbereiten.

In allen drei Situationen variiert die Praxis abhängig vom Datentyp. Technische bzw. produktlebenszyklusbezogene Daten werden eher geteilt als kommerziell sensitive Informationen (z. B. Preis- oder Strategiedaten). Treiber entstehen dual: regulatorische Anforderungen (z. B. DPP, Compliance-Kontexte) wirken als Druck, während operative Motive (Effizienz, Koordination, Qualität) als interne Nutzenargumente wirken. Zunehmend wird DS zudem als Voraussetzung für Marktteilnahme beschrieben („Data as prerequisite for market participation“), da Transparenz in Beschaffungs- und Kooperationsprozessen an Bedeutung gewinnt.

Anreiz- und Geschäftsmodellmechanismen für Datenaustausch

Auf Basis des Literatur-/Praxisabgleichs lassen sich Anreize und Geschäftsmodellmechanismen für DS in kreislauforientierten Wertschöpfungsnetzen entlang mehrerer Dimensionen systematisieren. Die Dimensionen sind so formuliert, dass sie unmittelbar in die Business-Model-Logiken (Value Capture, Proposition, Creation, Delivery, Network) einbeziehbar sind.

- **Wirtschaftliche Mechanismen (Value Capture)**

Die Interviews zeigen, dass ökonomische Anreize häufig als Bedingung für nachhaltige Teilnahme verstanden werden, insbesondere angesichts hoher Vorinvestitionen. Als direkte monetäre Anreize wurden Rabatte, Zahlungen für Datenbereitstellung sowie Vorteile bei Ausschreibungen und Auftragsvergaben genannt. Gleichzeitig wird betont, dass direkte Monetarisierung häufig begrenzt ist, weil der finanzielle Wert von Daten schwer messbar bleibt. Vor diesem Hintergrund wurden in der Praxis mehrere Monetarisierungslogiken diskutiert: direkte Zahlung, Reputation und Marktzugang, Gegenleistung durch andere Daten, Einbettung von Datenaustausch in bestehende Service-/Performance-Verträge. Ein zentraler Befund ist die Kosten-/ROI-Asymmetrie: Investitionen in Infrastruktur, Plattformteilnahme, Personal und rechtliche Absicherung fallen unmittelbar an, während Nutzen häufig diffus und langfristig bleibt. Diese Asymmetrie trifft KMU besonders stark (hohe Eintrittskosten, geringe IT-Kapazität). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Kostenstrukturen transparent zu machen und ROI-Unsicherheiten aktiv zu managen (z. B. über geteilte Investitionen oder Risikoteilung), was in der Literatur ebenfalls als anhaltende Herausforderung der Wertabschöpfung diskutiert wird. (Benyayer & Bick, 2024; D’Hauwers & Walravens, 2022)

- **Strategische Mechanismen (Value Proposition)**

Strategisch wird DS als Investition in Marktpositionierung und Innovationsfähigkeit gesehen. Frühzeitige Teilnahme an Plattform- und Datenrauminiciativen kann Wettbewerbsvorteile erzeugen – insbesondere in Märkten, in denen Produkt-CO₂-Fußabdrücke und Nachhaltigkeit zunehmend kaufentscheidend sind. Zudem tritt DS zunehmend als Teilnahmevoraussetzung in Lieferketten und Beschaffung auf. Diese Entwicklung wird in den Interviews teils als „power play“ beschrieben: Mächtige Akteure (z. B. OEMs) können Datenanforderungen nutzen, um Zulieferverhalten zu beeinflussen. Diese Machtdimension wird in der Literatur zwar thematisiert, in der Praxis jedoch stärker als realer Implementierungsfaktor erlebt.

- **Kooperative Mechanismen (Value Network Creation)**

Kooperative Mechanismen betreffen den Kern der Netzwerklogik: DS ist nur stabil, wenn Provider und Consumer jeweils einen klaren Vorteil sehen. Damit wird eine bilaterale Wertlogik als zentrale Designbedingung sichtbar. Während Literatur diese Gegenseitigkeit häufig implizit annimmt, operationalisieren Praktiker sie als explizites Entscheidungskriterium für Teilnahme. Damit verbunden sind Vertrauen, Fairness und Neutralität. Interviews betonen die Rolle neutraler Intermediäre oder Plattformbetreiber, um Zugang zu balancieren und Dominanz einzelner Akteure zu begrenzen. Diese Erkenntnis konvergiert mit Literaturbefunden zu institutionellem Vertrauen, Governance-Mechanismen und Standardplattformen (Bühler et al., 2023; D’Hauwers & Walravens, 2022; Schweihoff et al., 2023).

- **Technische Mechanismen (Value Delivery)**

Aus technischer Sicht besteht in den Interviews wie auch in der Literatur breite Übereinstimmung darüber, dass Datenaustausch nur dann skalierbar wird, wenn er auf standardisierten, sicheren und interoperablen Infrastrukturen basiert. Plattformen und Data Spaces werden wiederholt als zentrale infrastrukturelle Träger genannt, um den Datenaustausch über Organisationsgrenzen hinweg zu ermöglichen (Kernstock et al., 2024; Schweihoff et al., 2023) (Lefebvre et al., 2023). Im Mittelpunkt der Value-Delivery-Mechanismen stehen daher technische und organisatorische Bausteine, die die Datennutzung kontrolliert ermöglichen: gemeinsame Datenstandards („smart standards“ als Balance zwischen Interoperabilität und Flexibilität), sichere und transparente Zugriffsmechanismen (Ownership, Souveränität, Accountability) sowie die Fähigkeit, Daten selektiv und zweckgebunden bereitzustellen, statt „alles“ offenzulegen. Diese Mechanismen adressieren zugleich zentrale Spannungsfelder der Praxis, insbesondere die Zurückhaltung beim Teilen kommerziell sensibler Daten und die Notwendigkeit, Vertrauen durch nachvollziehbare Zugriffskontrollen zu stützen.

- **Technische Mechanismen (Value Creation)**

Die Praxis erweitert die infrastrukturelle Sicht um einen entscheidenden Punkt: Erfolgreicher Datenaustausch hängt nicht nur von Technologie ab, sondern maßgeblich von organisationaler Readiness und internen Fähigkeiten. Interviewteilnehmende betonen, dass Schwierigkeiten häufig auf fehlenden Zuständigkeiten und unzureichenden internen Strukturen zurückzuführen sind. Entsprechend werden klare interne Verantwortlichkeiten, Management-Awareness sowie die cross-funktionale Koordination zwischen IT, Nachhaltigkeit und Betrieb als notwendige Voraussetzungen beschrieben. In mehreren Fällen wurden dedizierte Teams aufgebaut oder neue Mitarbeitende mit Datenkompetenzen eingestellt. Zu den praktischen „Value-Creation“-Mechanismen zählen zudem die Integration zentraler Datenmanagement-Aufgaben in den operativen Betrieb: Sicherstellung von Stammdatenqualität, Validierung und Aufbereitung, Standardisierung von Formaten, sowie technische Maßnahmen wie Anonymisierung und Verschlüsselung als Teil der regulären Prozesse. Diese Aspekte erhalten in der Literatur vergleichsweise weniger Aufmerksamkeit als externe Infrastrukturen, sind in der Praxis jedoch entscheidend, weil ohne ausreichende interne Datenqualität und Verantwortungsstrukturen eine externe Standardisierung nicht wirksam wird. Standardisierung kann langfristig Integrationsaufwände und Eintrittsbarrieren reduzieren; kurzfristig sind die notwendigen Investitionen in Datenmanagement, Personal und Prozessanpassungen jedoch hoch. Daraus folgt, dass Value Creation eng mit Value Capture zu koppeln ist (Kosten-/ROI-Unsicherheit), insbesondere mit Blick auf KMU.

Die folgende

Abbildung 58 fasst die beschriebenen Mechanismen in einem integrierten Geschäftsmodellframework zusammen und verdeutlicht, wie die einzelnen Dimensionen systematisch zusammenwirken.

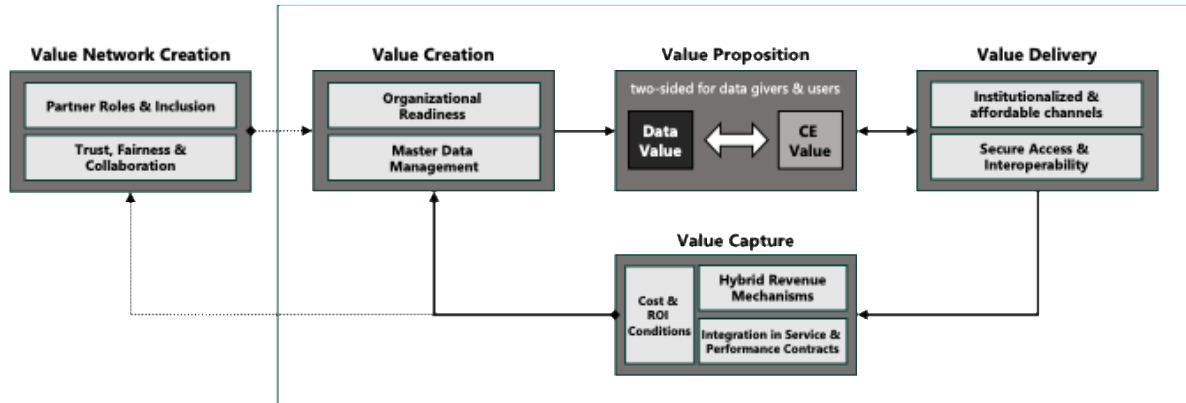


Abbildung 58: Systematisierung von Anreiz- und Geschäftsmodellmechanismen für Datenaustausch entlang der Business-Model-Dimensionen

Geschäftsmodell

Literatur und Praxis stimmen in mehreren Grundlagen überein: Datenaustausch ist Enabler, nicht Endprodukt; Governance und Vertrauen sind fundamentale Voraussetzungen; Kooperation und Ökosystemorientierung nehmen zu; Plattformen/Data Spaces sind zentrale Infrastrukturtäger; Wertabschöpfung bleibt schwierig. Praktiker betonen (i) Wertverlust durch fehlende Daten (z. B. Worst-Case-Annahmen in Footprint-Berechnungen), (ii) bilateralen Nutzen als operationales Designkriterium, (iii) organisatorische Kapazitäten als entscheidenden Erfolgsfaktor, sowie (iv) Kosten-Nutzen-Asymmetrien und ROI-Unschärfe als zentrale Barriere – besonders für KMU. Eine wesentliche Divergenz betrifft Machtbeziehungen. Während die Literatur Datenökosysteme häufig kollaborativ beschreibt, schildert die Praxis eine ungleiche Realität („power play“), in der große Akteure über Datenanforderungen Einfluss ausüben. Standardisierte Infrastruktur und niedrigere Eintrittsbarrieren sind notwendig, aber nicht hinreichend für Inklusion; ergänzend sind Governance-Mechanismen und kompensierende Unterstützungsmodelle erforderlich.

Die folgende Abbildung 59 fasst konkrete Implikationen für die geschäftsmodellseitige Verankerung von Datenaustausch entlang der Business-Model-Dimensionen zusammen.

➔ Anreiz: Integration des Datenaustausch in das Geschäftsmodell

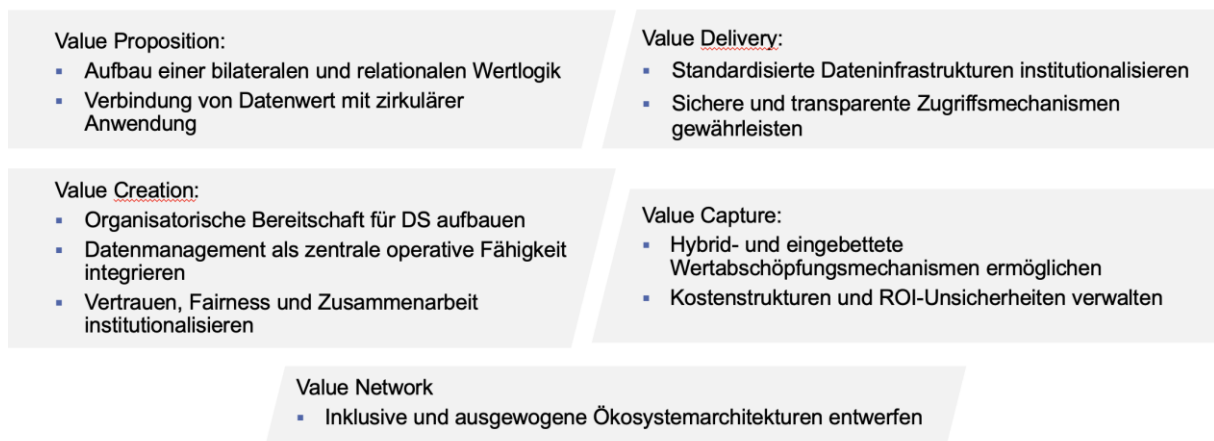


Abbildung 59: Handlungsempfehlungen zur Integration von Datenaustausch in kreislauforientierte Geschäftsmodelle

Methodenbox/Toolbox zur Gestaltung von Anreizen, Geschäftsmodellmechanismen und Governance für Data Sharing

Die Toolbox strukturiert die Einbettung eines organisationsübergreifenden Datenaustauschs in der Kreislaufwirtschaft an drei Ebenen: Makro (Rahmensetzung durch Politik/Regulierung und Standardisierung), Meso (Ökosystem-/Infrastrukturebene zwischen den Akteuren) und Mikro (Umsetzung in Unternehmen, Prozessen und Geschäftsmodellmechanismen). Damit wird sichtbar, dass Datenaustausch nicht isoliert „technisch“ zu lösen ist, sondern als Zusammenspiel von Rahmenbedingungen, Ökosystemgestaltung und betrieblicher Umsetzung. Abbildung 60 zeigt dabei das Drei-Ebenen-Framework zur Gestaltung von Datenaustausch in kreislauforientierten Wertschöpfungsnetzwerken.

Auf der **Makro-Ebene** wird die gesellschaftlich-politische Rahmensetzung verortet. Hierzu zählen insbesondere Standardisierung und Regulierung, die den Druck zur Bereitstellung von Lebenszyklusinformationen erhöhen und Investitionen in Dateninfrastrukturen legitimieren. In der Toolbox werden als Referenzen der Batteriepass, der Circular Economy Action Plan (CEAP) und die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie genannt. Gleichzeitig wird betont, dass Unternehmen nicht nur „compliant“ reagieren, sondern sich aktiv beteiligen müssen, damit Anforderungen in praktikable Austauschlogiken übersetzt werden.

Die **Meso-Ebene** fokussiert die Vernetzung der Akteure der Automobilindustrie und die Schaffung einer gemeinsamen digitalen Infrastruktur. Organisatorisch umfasst sie die Abbildung des Partnerökosystems (Ökosystemlandkarte), Gestaltungsprinzipien der Daten- und Informationsweitergabe sowie ein föderales Datenflussmodell. Inhaltlich werden Datenprodukte entlang des R-Strategie-Entscheidungsbaums verortet und Rollen sowie Verantwortlichkeiten über eine RACI-Logik strukturiert. Technisch wird diese Ebene durch den Data Space operationalisiert, wobei in der Toolbox insbesondere

Zugangsberechtigungen, Services und ein Marktplatzgedanke sowie ein strukturiertes Onboarding der Akteure (z. B. über GitLab) hervorgehoben werden. Die Meso-Ebene bildet damit die Brücke zwischen „wer braucht welche Informationen?“ und „wie wird Austausch im Netzwerk verlässlich und kontrolliert möglich?“.

Die **Mikro-Ebene** beschreibt schließlich die unternehmensinterne Umsetzung. Sie adressiert zum einen die Fähigkeit, digitale Zwillinge so auszugestalten, dass sie in einen Data Space integrierbar sind. Zum anderen rückt sie die praktische Einbettung in Geschäftsmodelle in den Mittelpunkt: Datenaustausch wird erst dann nachhaltig, wenn konkrete, umsetzbare Anreize existieren und Verantwortlichkeiten, Datenqualität sowie Prozessintegration im Unternehmen organisatorisch abgesichert sind.

Als Vorgehenslogik kann die Toolbox so genutzt werden, dass zunächst auf Makro-Ebene die relevanten Rahmenbedingungen und Mindestanforderungen geklärt werden, anschließend auf Meso-Ebene Ökosystem, Governance, Datenprodukte und Infrastruktur gemeinsam gestaltet werden und schließlich auf Mikro-Ebene die operative Integration und die Geschäftsmodell-Anreize umgesetzt werden. Die Toolbox liefert damit eine konsistente Struktur, um technische Lösungen (Data Space, digitale Zwillinge) mit organisatorischen Mechanismen (Rollen, RACI, Datenprodukte) und ökonomischen Treibern (Anreize zur Teilnahme) zusammenzuführen. Die Toolbox zur Operationalisierung von Datenaustausch auf Makro-, Meso- und Mikro-Ebene wird in *Abbildung 61* veranschaulicht.

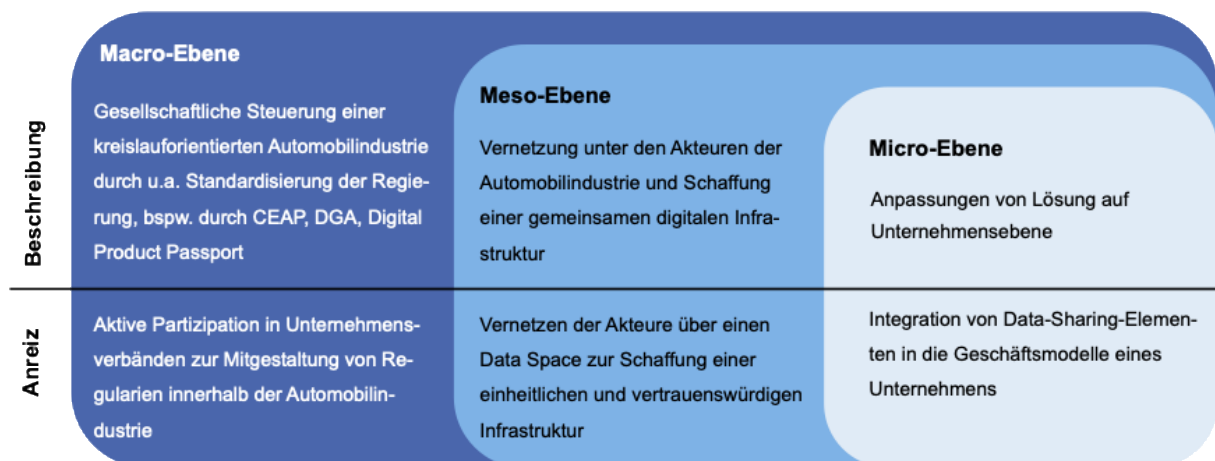


Abbildung 60: Drei-Ebenen-Framework zur Gestaltung von Datenaustausch in kreislauforientierten Wertschöpfungsnetzwerken

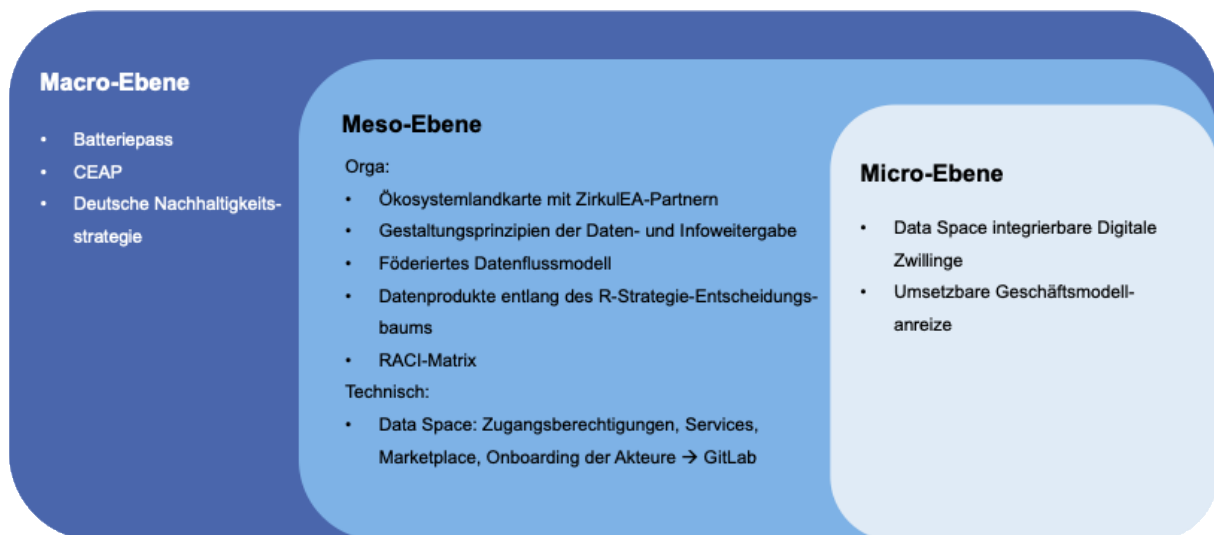


Abbildung 61: Toolbox zur Operationalisierung von Datenaustausch auf Makro-, Meso- und Mikro-Ebene

Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt ZirkulEA hat gezeigt, dass die Kreislauffähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs kein isoliertes technisches Problem ist, sondern ein systemisches Gestaltungsvorhaben, das Produkt, Prozess und Ökosystem gleichermaßen adressieren muss. Die erarbeiteten Ergebnisse greifen dabei eng ineinander und bilden gemeinsam eine übertragbare Grundlage für die industrielle Umsetzung zirkulärer Wertschöpfung.

Auf der **Produktebene** wurden Anforderungen an ein demontagegerechtes Design von EV-Komponenten systematisch erarbeitet. Auf Basis realer Demontageversuche an HV-Batterie und E-Achse entstanden Konstruktions-, Prozess- und Werkzeugrichtlinien, die als Grundlage für zukünftige Produktgenerationen dienen. Entscheidungslogiken zur strukturierten Auswahl geeigneter CE-Strategien ergänzen diese Designperspektive um eine bewertende Dimension.

Auf der **Prozessebene** wurden automatisierte und manuelle Demontageprozesse entwickelt, erprobt und validiert. Die Demonstratoren für Batterie und E-Achse belegen die technische Machbarkeit modularer, hybrider Demontagelösungen. Assistenzsysteme unterstützen Werker situativ, reduzieren Anlernzeiten und steigern Prozesssicherheit. Simulations- und Planungsansätze ermöglichen eine robuste Auslegung von Demontagesystemen unter den für die Kreislaufwirtschaft typischen Unsicherheiten hinsichtlich Rücklaufmenge, -zeitpunkt und -zustand.

Auf der **Ökosystemebene** wurden Datenbedarfe, Datenprodukte und Rollenmodelle für den organisationsübergreifenden Informationsaustausch konzipiert. Ein Anforderungskatalog mit 46 Einzelanforderungen sowie ein strukturiertes Vorgehensmodell bilden die Grundlage für digitale Industriepattformen in der Kreislaufwirtschaft. Data Spaces wurden insbesondere im Kontext von Catena-X und des

ab 2027 verpflichtenden Batteriepasses als geeignete technische Infrastruktur identifiziert und prototypisch erprobt. Ein Drei-Ebenen-Framework (Makro, Meso, Mikro) sowie eine Toolbox zur Gestaltung von Anreiz- und Geschäftsmodellmechanismen runden das Ökosystemkonzept ab.

Zusammenfassend verdeutlicht ZirkulEA, dass kreislauffähige Wertschöpfung nur gelingt, wenn technische Automatisierung, informationsadaptive Steuerung und ein vertrauenswürdiger Datenaustausch zusammenspielen. Die erarbeiteten Leitlinien, Methoden und Demonstratoren schaffen dafür eine belastbare, auf weitere Produkte und Branchen übertragbare Grundlage.

Folgeprojekte und weiterführende Forschungsvorhaben sollten die Industrialisierung der entwickelten Demontagelösungen unter realen Serienbedingungen vorantreiben, die prototypischen Traceability- und Data-Space-Konzepte mit realen Unternehmensdaten validieren sowie die entwickelten Entscheidungslogiken auf weitere EV-Komponenten und Produktklassen ausweiten. Zudem besteht erheblicher Bedarf, die Governance- und Geschäftsmodellmechanismen für einen fairen, souveränen Datenaustausch im Ökosystem weiter zu konkretisieren und in entstehenden Industriestandards zu verankern.

Literaturverzeichnis

- Adner, R. (2017). Ecosystem as Structure: An Actionable Construct for Strategy. *Journal of Management*, 43(1), 39–58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., & Luthra, S. (2021). Analysing the roadblocks of circular economy adoption in the automobile sector: Reducing waste and environmental perspectives. *Business Strategy and the Environment*, 30(2), 1051–1066. <https://doi.org/10.1002/bse.2669>
- Antikainen, M., & Valkokari, K. (2016). A Framework for Sustainable Circular Business Model Innovation. *Technology Innovation Management Review*, 6(7), 5–12.
- Arenas, A. E., Goh, J. M., & Matthews, B. (2019). Identifying the business model dimensions of data sharing: A value-based approach. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 70(10), 1047–1059. <https://doi.org/10.1002/asi.24180>
- Benyayer, L.-D., & Bick, M. (2024). Business Models for Mobility Data Sharing Platforms: Stakeholders' Perceptions. In M. Papadaki, M. Themistocleous, K. Al Marri, & M. Al Zarouni (Hrsg.), *Information Systems* (S. 95–107). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56481-9_7
- Bertassini, A. C., Zanon, L. G., Azarias, J. G., Gerolamo, M. C., & Ometto, A. R. (2021). Circular Business Ecosystem Innovation: A guide for mapping stakeholders, capturing values, and finding new opportunities. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 436–448. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.004>
- BMW, B. für W. und K. |. (2026). *Bundeswirtschaftsministerium Batteriepass*. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/Batteriezellfertigung/batteriepass.html>
- Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017). Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 476–482. <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Pigozzo, D. C. A., & Parida, V. (2022). Circular Economy in the Digital Age. *Sustainability*, 14(9), 5565. <https://doi.org/10.3390/su14095565>
- Bühler, M. M., Calzada, I., Cane, I., Jelinek, T., Kapoor, A., Mannan, M., Mehta, S., Mookerje, V., Nübel, K., Pentland, A., Scholz, T., Siddarth, D., Tait, J., Vaitla, B., & Zhu, J. (2023). Unlocking the Power of Digital Commons: Data Cooperatives as a Pathway for Data Sovereign, Innovative and Equitable Digital Communities. *Digital*, 3(3), 146–171. <https://doi.org/10.3390/digital3030011>
- de Langen, P. W., Sornn-Friese, H., & Hallworth, J. (2020). The Role of Port Development Companies in Transitioning the Port Business Ecosystem; The Case of Port of Amsterdam's Circular Activities. *Sustainability*, 12(11), 4397. <https://doi.org/10.3390/su12114397>

- De Mattos, C. A., & De Albuquerque, T. L. M. (2018). Enabling Factors and Strategies for the Transition Toward a Circular Economy (CE). *Sustainability*, 10(12), 4628. <https://doi.org/10.3390/su10124628>
- Demestichas, K., & Daskalakis, E. (2020). Information and Communication Technology Solutions for the Circular Economy. *Sustainability*, 12(18), 7272. <https://doi.org/10.3390/su12187272>
- D'Hauwers, R., & Walravens, N. (2022). Do You Trust Me? Value and Governance in Data Sharing Business Models. In X.-S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Hrsg.), *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology* (S. 217–225). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2377-6_22
- Dvorak, J., Hörsting, R., Gleich, K., Litterst, J., May, M. C., & Lanza, G. (2024a). *Circular Production in Learning Factories: A Teaching Concept* | Springer Nature Link. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-65411-4_42
- Dvorak, J., Schaupeter, L., Lachnit, T., Bowe, J. J., Bambach, J.-L., Benfer, M., Vette-Steinkamp, M., & Lanza, G. (2025). *Strategic Planning for Electric Vehicle Disassembly Using Simulation*. 2025 2nd International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/EPTS67931.2025.11547533>
- Dvorak, J., Stanzl, L., Lachnit, T., Benfer, M., Balzereit, F., & Lanza, G. (2024b). On the Systematic Selection of CE Strategies for End-of-Life-Products: A Guide for Practitioners. In K. Dröder & T. Vietor (Hrsg.), *Circularity Days 2024* (S. 229–242). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8_18
- ema Work Designer Software. (2026). *Ema Work Designer* (Version 2.5.2) [Software]. imk Industrial Intelligence GmbH. <https://imk-ema.com/ema-work-designer/>
- Fassnacht, M., Benz, C., Heinz, D., Leimstoll, J., & Satzger, G. (2023). *Barriers to Data Sharing among Private Sector Organizations*. Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Sciences. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/6dc8079f-1c91-46c5-ab94-bab8a4d4ed98>
- Görgens, S. J., Hansen, S., Schumacher, P., Meyer, K., & Dröder, K. (2025). Assessing Automation Opportunities in End-of-Life Vehicle Disassembly. In K. Dröder & T. Vietor (Hrsg.), *Circularity Days 2024* (S. 17–31). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8_2
- Güngör, A. & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4), 811–853. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9)

- Güngör, A. & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4), 811–853.
[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9)
- Gutenschwager, K., Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2017). *Simulation in Produktion und Logistik*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55745-7>
- Hakanen, T., Helander, N., & Valkokari, K. (2017). Servitization in global business-to-business distribution: The central activities of manufacturers. *Industrial Marketing Management*, 63, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.10.011>
- Heinz, D., Fassnacht, M., Röhrleef, J. H., Eckert, L. S., & Satzger, G. (2024). *Designing Digital Industrial Platforms for the Circular Economy: A Requirements Catalog*.
- Jacobides, M. G., Cennamo, C., & Gawer, A. (2018). Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*, 39(8), 2255–2276.
<https://doi.org/10.1002/smj.2904>
- Katsaliaki, K., Galetsi, P., & Kumar, S. (2022). Supply chain disruptions and resilience: A major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*, 319(1), 965–1002. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1>
- Kernstock, P., Biermann, K., Sartor, S., Wimbauer, A., Bohnet, Böttcher, T. P., & Hein, A. (2024). *Data Mesh – A Case Study Perspective on Building Industrial Data Platforms*.
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
- Klenk, F. (2023). *Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing*.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000162398>
- Konietzko, J., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2020). Circular ecosystem innovation: An initial set of principles. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119942.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119942>
- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., & Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 120, 241–261.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>
- Kurilova-Palisaitiene, J., Sundin, E., & Poksinska, B. (2018). Remanufacturing challenges and possible lean improvements. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3225–3236.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.023>
- Moore, J. F. (1993). *Predators and Prey: A New Ecology of Competition*. *Harvard Business Review*, 71(3), 75–86.

- Parida, V., Burström, T., Visnjic, I., & Wincent, J. (2019). Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 101, 715–725. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.006>
- Pokorni, B., Popescu, D., & Constantinescu, C. (2022). *Design of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly Based on Quality Function Deployment*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/8/3887>
- Ribeiro da Silva, E., Lohmer, J., Rohla, M., & Angelis, J. (2023). Unleashing the circular economy in the electric vehicle battery supply chain: A case study on data sharing and blockchain potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 193, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106969>
- Rupp, S., Müller, R., Kerker, S., Faltus, F., & Franke, J. (2020). *Problemmanagement in Werker-Assistenz-Systemen...* <https://www.degruyterbrill.com/de/document/doi/10.3139/104.112244/html>
- Schweihoff, J., Jussen, I., Dahms, V., Möller, F., & Otto, B. (2023). *How to Share Data Online (fast) – A Taxonomy of Data Sharing Business Models*. Hawaii International Conference on System Sciences. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2023.078>
- Sundin, E. (2004). Product and Process Design for Successful Remanufacturing (Dissertation No. 906). Linköpings Universitet.
- Serna-Guerrero, R., Ikonen, S., Kallela, O., & Hakanen, E. (2022). Overcoming data gaps for an efficient circular economy: A case study on the battery materials ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 374, 133984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133984>
- Trevisan, A. H., Castro, C. G., Gomes, L. A. V., & Mascarenhas, J. (2022). Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.020>
- Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., & Serna-Guerrero, R. (2019). A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*, 5(4), 68. <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>

