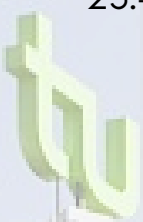


Zweite MobilKreis-Tagung

23.-24. September 2025, Dortmund



Beiträge
der zweiten

MobilKreis-
Tagung



ausgerichtet von

DIONA

Vorwort

In einer Zeit wachsender ökologischer und sozialer Herausforderungen gewinnt Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Die MobilKreis-Projekte, weitere Forschende zur Kreislaufwirtschaft und Unternehmen leisten einen wichtigen Beitrag, indem sie mit kreislauffähiger Wertschöpfung die Mobilität der Zukunft ökonomisch, ökologisch und langfristig tragfähig gestalten. Die 2. MobilKreis-Tagung am 23. und 24. September 2025 bietet eine Plattform für Erfahrungsaustausch, das Sammeln wertvoller Anregungen, die Entwicklung neuer Ideen und interessante Diskussionen, um gemeinsam eine nachhaltige Zukunft zu gestalten.

Wir möchten an dieser Stelle allen Autorinnen und Autoren für ihre bereichernden Beiträge zur Tagung danken. Durch ihre Beteiligung haben sie die Tagung möglich gemacht. Unser Dank gilt ebenso allen Gästen der Tagung, denen wir wertvollen Austausch und viel Freude in Dortmund wünschen. Abschließend gebührt unser besonderer Dank dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, ehemals BMBF) sowie dem Projektträger Karlsruhe, ohne deren Unterstützung diese Tagung nicht möglich gewesen wäre.

Ihr Team

DIONA

Gefördert vom



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

Digitalisierung, Datenmanagement und Datenökosysteme	1
Daten- und Informationsaustausch für eine Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie (ZirkulEA)	1
Plattformansatz zur EaaS-Integration in wandlungsfähige Produktionssysteme (AutoPilot)	12
Sind Daten und Plattformansatz zur EaaS-Integration in wandlungsfähige Produktionssysteme KI tatsächlich der Schlüssel zu nachhaltiger Mobilität? (DAKIMO).....	24
Life Cycle Assessment & zirkuläre Transformation	34
Nachhaltigkeit beleuchtet – Wie gelingen umweltfreundliche Designs für technologisch hochkomplexe Produkte wie Automobilscheinwerfer? (NALYSES)	34
Zwischen Systemwandel und Selbsttäuschung: Vier Thesen zur Ambivalenz der Kreislaufwirtschaft	54
Modellierungssprache für die Visualisierung zirkulärer Wertschöpfung	2
Kreislauffähige Produktion & Betriebsmittel.....	62
Nachhaltige Automobilproduktion durch kreislauffähige Betriebsmittel (AutoPilot)	62
Grundlage und Rahmenbedingungen für eine Skalierung von Equipment-as-a-Servive-Modellen in der Automobilproduktion (AutoPilot)	69
Sächsisches Forschungszentrum CircEcon für zirkuläre Wirtschaft	75
Batteriesysteme.....	81
Von Vorschriften zur Praxis: Moderne Sicherheitskonzepte für die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien (InnoLogBat)	81
Demontage- und Wiederverwendungsstrategien für Traktionsbatteriespeichersysteme (EKODA) ..	87
Recycling von Batterieanbauteilen (ZIRKEL)	97
Remanufacturing, Recycling und Stakeholder-Akzeptanz	102
Verwertung von gebrauchten Förderketten aus Polyoxymethylen (POM) im Sinne einer Kreislaufwirtschaft	102
Remanufacturing durch datenbasierte Entscheidungsfindung und intelligente Prozessplanung (EREP)	113
Die Automobilbranche im Kontext der Kreislaufwirtschaft - Stakeholder-Befragung zu Implikationen im Projekt EKODA (EKODA)	123
Kooperation gestalten in der Circular Economy: Formate für Austausch und Zusammenarbeit im Reallabor OHLF	135
Automatisierte, flexible Demontage.....	141
Automatisierte Demontage von elektrischen Antriebsaggregaten (ZirkulEA)	141
Mögliche zukünftige Strategie der Automobilproduktion – Potenzial der Wiederverwendung von Automobilkomponenten (EKODA)	151
Wiederverwertung einer Lenkgetriebekomponente unter Anwendung einer umformtechnischen Prozesskette für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilproduktion (EKODA)	159
Circular Engineering: Ein Rahmenwerk zur Bewertung und Befähigung zirkulärer Produktentwicklung	167

Daten- und Informationsaustausch für eine Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie

Ann-Sophie Finner¹, Linda Sagnier Eckert¹, Tobias Lachnit², Lars Schaupter³, Matthias Vette-Steinkamp³, Jan-Peter König⁴, Hansjörg Tutsch⁵, Jörg Bonin⁶, Simon Filippov⁷, Florian Bartnick⁸, Daniel Heinz¹

¹Karlsruhe Digital Service Research & Innovation Hub (KSRI), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

²wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

³Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Hoppstädten-Weiersbach, Germany

⁴ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen, Germany

⁵flexis GmbH, Stuttgart, Germany

⁶Vogtmann-Herold+Co.GmbH, Neuwied, Germany

⁷Deprag Schulz GmbH u. Co. KG, Amberg, Germany

⁸Ford-Werke GmbH, Köln, Germany

Abstract. Der Übergang von linearen zu zirkulären Wertschöpfungssystemen zwingt die europäische Automobilindustrie zu einem tiefgreifenden Wandel. Aufbauend auf dem European Green Deal, dem Circular Economy Action Plan sowie der EU-Batterieverordnung entwickelt dieser Beitrag ein ganzheitliches Rahmenwerk für einen souveränen, standardisierten und sicheren Datenaustausch entlang des gesamten Fahrzeuglebenszyklus. Empirische Grundlage sind Ergebnisse des Verbundprojekts *ZirkulEA*, die mittels Literaturanalysen, Experteninterviews und Validierungs-Workshops erhoben wurden. Der Beitrag verknüpft Digitale Produktpässe, Verwaltungsschalen sowie föderierte Data-Space-Architekturen und leitet technische, organisatorische und Governance-Anforderungen sowie einen vierphasigen Implementierungsfahrplan ab. Das vorgeschlagene Modell unterstützt regulatorische Konformität, schafft Transparenz für Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing und Recycling und öffnet Unternehmen neue datengetriebene Geschäftsfelder.

Keywords: Datenaustausch, Informationen, Data Spaces, Kreislaufwirtschaft, Automobilindustrie

1 Einleitung

Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft zählt zu den tiefgreifendsten Wandlungsprozessen der Automobilindustrie (Hoppe et al., 2024). Angestoßen durch den 2019 gestarteten European Green Deal (European Commission, 2020) muss die Branche ihre Geschäftsmodelle und Prozesse grundlegend neu denken, um dem übergeordneten Ziel, Europa bis 2050 klimaneutral zu machen und zugleich wettbewerbsfähig zu bleiben, Rechnung zu tragen. Im Zentrum der Transformation steht der Circular Economy Action Plan (CEAP), der den Wandel von linearer zu zirkulärer Wertschöpfung fordert. Für die Automobilbranche bedeutet dies eine grundlegende Neuausrichtung von Produktstrategien und Prozessen mit der Digitalisierung als zentralem Befähiger (European Commission, 2020).

Im Kontext dieser digitalen Neuausrichtung gewinnt der digitale Produktpass (DPP) und europäische Data Spaces zunehmend an Bedeutung (Gieß & Möller, 2025; Otto et al., 2022). Sie sollen die Rückverfolgbarkeit von Materialien und Komponenten entlang des gesamten Lebenszyklus sicherstellen (Petrik et al., 2024). Ergänzend zur europäischen Perspektive liefert die *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie* nationale Fördermaßnahmen, insbesondere im Bereich Batterietechnologie

und Recycling (Bundesumweltministeriums, n.d.). Eine nachhaltige Batterieproduktion in Deutschland gilt dabei als Schlüssel zur Verringerung internationaler Abhängigkeiten und zur Stärkung der Technologieführerschaft in der Elektromobilität. Zentrales Element für die Umsetzung dieser Strategien ist ein sicherer und transparenter Datenaustausch entlang des Lebenszyklus (Fassnacht et al., 2024). Nur durch vernetzte, standardisierte Datenflüsse können Ressourcen effizient genutzt, Prozesse optimiert und regulatorische Anforderungen erfüllt werden (Antikainen et al., 2018; Ribeiro Da Silva et al., 2023). Die EU-Batterieverordnung verpflichtet die Automobilindustrie ab 2027 einen DPP für Traktionsbatterien einzuführen, die in Kombination mit dem Aufbau europäischer und föderalisierter Data Spaces den Kern zur Sicherstellung ganzheitlicher Rückverfolgbarkeit von Materialien und Komponenten, wie auch die Infrastruktur für einen sicheren Datenaustausch bieten (European Commission, 2024). Es erfordert dafür Investitionen in digitale Infrastruktur, schafft jedoch zugleich neue Geschäftsmodelle für die Kreislaufwirtschaft (Berger et al., 2022). Die Automobilindustrie bereitet sich u.a. mit dem Catena-X¹ Netzwerk auf die Einführung des DPPs vor, einer sektorspezifischen Umsetzung eines Data Space für standardisierten und sicheren Datenaustausch. Rechtlich wird das Ökosystem durch den Data Governance Act (DGA) ergänzt. Der DGA definiert Voraussetzungen für vertrauenswürdige Daten-Intermediäre, führt das Konzept der altruistischen Daten-Bereitstellung ein und verankert Transparenz- und Unabhängigkeitspflichten. Damit schafft er die zwingend nötigen Leitplanken für sicheren und fairen Austausch sensibler Industrie- und Nachhaltigkeitsdaten (Regulation Data Governance Act (EU) 2022/868, 2022).

Vor diesem Hintergrund wurde 2022 das Projekt *ZirkulEA*² ins Leben gerufen. Ziel des Projekts ist es, eine möglichst wirtschaftliche und kreislauffähige Wertschöpfungskette unter Zuhilfenahme eines umfassenden unternehmensübergreifenden Informationsaustauschs der Elektrofahrzeuge (EV)-Batterien und des elektrischen Antriebsstrangs. Dazu wurden Daten- und Informationsflüsse mit besonderem Fokus auf das Batterie-Ökosystem analysiert. Die Ergebnisse des Projekts wurden in einem iterativen, methodisch fundierten Prozess entwickelt. Sie basieren auf einer Kombination aus Literaturanalysen, Experteninterviews und mehreren Workshops, in denen die Erkenntnisse erarbeitet, reflektiert und validiert wurden. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich ein branchenweites Gesamtkonzept für den Daten- und Informationsaustausch in der Automobilindustrie ableiten.

Ein solches Gesamtkonzept bietet die Chance, eine gemeinsame Infrastruktur als Rückgrat der Kreislaufwirtschaft zu etablieren und zielt darauf ab, ein Rahmenkonzept für die Automobilindustrie zu entwickeln. Das Konzept gliedert sich in mehrere Bausteine: Zunächst wird eine einheitliche Festlegung der in der Automobilindustrie verfolgten Kreislaufstrategien vorgenommen, um ein gemeinsames Zielbild zu schaffen. Darauf aufbauend erfolgt eine präzise Bestimmung der involvierten Akteure, ihrer Rollen und Verantwortlichkeiten entlang des Produktlebenszyklus. Im zweiten Schritt werden die Grundlagen für den Daten- und Informationsaustausch definiert. Im Anschluss wird der Einsatz von Data Spaces als technische Infrastruktur vorgestellt, um einen sicheren, standardisierten und souveränen Austausch von Daten zwischen den Akteuren zu ermöglichen. Ein weiterer zentraler Bestandteil des Konzepts ist die praktische Umsetzung: Dabei werden Anreize für Unternehmen herausgearbeitet, die aktive Teilnahme zu fördern. Zudem wird die Bedeutung eines umfassenden Change-Managements betont, um alle Mitarbeitenden von dem Weg in die datengetriebene Kreislaufwirtschaft zu überzeugen. Abschließend werden konkrete Phasen zur technischen Integration vorgestellt, die eine strukturierte und nachhaltige Anbindung an den Data Space gewährleisten.

¹ Catena-X. Catena-X und Gaia-X: Eine gemeinsame Vision für Datenräume. <https://catena-x.net/de/vision/gaia-x>

² Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch intelligente Demontage und Nachverfolgung (ZirkulEA), Bundesministerium für Bildung und Forschung <https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/projekte/kreislauffaehigkeit-des-elektro-antriebsstrangs-durch-intelligente-demontage-und-nachverfolgung-zirkulea/>

2 Kreislaufstrategien in der Automobilindustrie

Im Zentrum einer zirkulären Wertschöpfung steht die Wahl geeigneter Strategien, um Produkte, Komponenten und Materialien möglichst lange im Wirtschaftskreislauf zu halten (Heinz et al., 2023). Diese Strategien verteilen sich grundsätzlich über sämtliche Stufen der automobilen Wertschöpfungskette; in diesem Beitrag richten wir den Fokus jedoch auf jene Maßnahmen, die den Lebenszyklus von Fahrzeugen verlängern oder rückgeführte Bauteile in der Post-Use-Phase erneut in den Kreislauf integrieren. In der Automobilindustrie können solche Strategien auf das gesamte Fahrzeug, auf einzelne Komponenten wie Batterien oder E-Achsen sowie auf spezifische Module angewendet werden. Die Einordnung erfolgt nach dem jeweiligen ökologischen Beitrag auf der Komponentenebene (Morseletto, 2020; Potting et al., 2017).

Die Wiederverwendung (*Reuse*) ist die ökologisch wertvollste Strategie. Nach positiver Nachfrage- und Zustandsbewertung können Produkte oder Komponenten direkt wiederverwendet oder in neue Baugruppen integriert werden – unter der Voraussetzung, dass sie zugänglich, modular aufgebaut und ihre Funktion ist noch mindestens für einen bestimmten Zeitraum gesichert. Wenn eine direkte Wiederverwendung nicht möglich ist, bietet die Reparatur (*Repair*) eine Alternative. Komponenten werden instandgesetzt und weiterverwendet, sofern keine gesundheits- oder umweltschädlichen Stoffe verbaut sind oder sich diese sicher entfernen lassen. *Remanufacture* ist die Strategie der Wiederaufbereitung. Sie greift, wenn Reuse und Repair ausscheiden, aber der Produktaufbau sowie digitale Informationen eine effiziente Demontage und Qualitätsprüfung ermöglichen. Qualitätsgeprüfte Komponenten werden aufgearbeitet und in neue Baugruppen integriert, während nicht aufbereitungsfähige Teile dem Recycling zugeführt werden. Kann keine höherwertige Strategie angewendet werden, erfolgt die stoffliche Verwertung (*Recycling*). Ziel ist die Rückgewinnung wertvoller und kritischer Rohstoffe, beispielsweise Kobalt, Nickel oder Lithium aus Traktionsbatterien, zunächst durch mechanische Verfahren wie Zerkleinern und Sortieren, anschließend durch chemische oder thermische Prozesse zur Materialrückgewinnung. Die thermische Verwertung (*Recover*) bildet die letzte Option in der Kreislaufhierarchie. Voraussetzung für das Recover ist das Vorliegen vollständiger Materialinformationen, die ein Recover erlauben und ermöglichen. Fehlen diese Informationen, müssen alternative Entsorgungswege wie Deponierung geprüft werden (Potting et al., 2017). Die Erkenntnisse aus den Kreislaufstrategien fließen in das *Re-Engineering* von Produkten und Prozessen ein, um Nachhaltigkeit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu steigern. Im Fokus stehen recyclinggerechtes Design, der Einsatz nachhaltiger Materialien sowie die Optimierung der Produktion durch Digitalisierung, KI und erneuerbare Energien.

Zur Umsetzung dieser zirkulären Strategien in der Automobilindustrie sind insbesondere neun Akteure entlang des gesamten Fahrzeuglebenszyklus im Ökosystem relevant. In der Pre-Use-Phase legen *Supplier* und *Manufacturer* mit Produktdesign und Materialwahl den Grundstein für spätere Wiederverwendung oder Recycling. Während der Nutzung, also in der In-Use-Phase, stehen vor allem die *Users* und *Repairer* im Fokus. Sobald das Fahrzeug ans Ende seiner Lebenszeit kommt, übernehmen in der Post-Use-Phase Akteure wie *Dismantler*, *Remanufacturer* und *Recycler* die Demontage, Aufarbeitung und Rückgewinnung von Materialien. *Brokers* spielen dabei die Vermittlerrolle und bringen Angebot und Nachfrage nach aufbereiteten Teilen zusammen. Der *Repurpose Market* stellt die Schnittstelle für neue Märkte dar, um ausgedienten Komponenten neue Einsatzmöglichkeiten zu geben (Heinz et al., 2024). Derzeit liegen die meisten Fahrzeugdaten bei den Herstellern, wodurch Machtasymmetrien im Ökosystem entstehen. Der Datenaustausch ist bislang uneinheitlich geregelt; Initiativen wie Catena-X sollen künftig eine interoperable, sichere Informationsweitergabe ermöglichen.

3 Grundlagen des Daten- und Informationsaustauschs

Die Umsetzung zirkulärer Strategien in der Automobilindustrie ist untrennbar mit einem strukturierten, interoperablen und belastbaren Austausch von Daten und Informationen über Unternehmensgrenzen hinweg verknüpft. Die Steuerung des Produktlebenszyklus, insbesondere im Kontext von Reuse, Repair, Remanufacturing oder Recycling, setzt voraus, dass relevante Informationen zur richtigen Zeit, mit den richtigen Inhalten und in der richtigen Qualität den richtigen Akteuren zugänglich gemacht werden. Dieser Austausch muss über Unternehmensgrenzen hinweg geschehen und gleichzeitig sicher, nachvollziehbar und effizient gestaltet sein. Ein zukunftsfähiges Datenökosystem muss daher bestimmten Prinzipien folgen (Fassnacht et al., 2024; Serna-Guerrero et al., 2022). Im Zentrum steht die Wahrung der Datensouveränität: Jeder Akteur behält die Kontrolle über die von ihm bereitgestellten Daten und entscheidet eigenständig über deren Nutzung (Arenas et al., 2019). Eng damit verbunden sind Fragen der Verfügbarkeit und des Zugriffs. Daten müssen dann zur Verfügung stehen, wenn sie benötigt werden, beispielsweise zur Bewertung der Reparaturfähigkeit oder zur Auswahl eines geeigneten Trennverfahrens. Die Voraussetzung hierfür ist eine hohe Interoperabilität zwischen den beteiligten IT-Systemen sowie die Anwendung gemeinsamer Standards und semantischer Modelle. Nur so kann ein durchgängiger, verlustfreier Informationsfluss zwischen Unternehmen unterschiedlicher Größe und Digitalisierungsgrade sichergestellt werden. Neben technischen Anforderungen spielen auch organisatorische und regulatorische Aspekte eine zentrale Rolle. Die Datenqualität und -sicherheit müssen über den gesamten Lebenszyklus hinweg gewährleistet sein. Gleichzeitig bedarf es klar definierter Governance-Strukturen, die Verantwortlichkeiten, Zugriffsrechte und Nutzungsregeln eindeutig regeln (Heinz et al., 2024). Rechtsgrundlagen wie der DGA schaffen hierfür einen übergeordneten Rahmen und bilden damit die Grundlage für vertrauensvolle Datennutzung.

Diese Leitplanken lassen sich technisch in drei komplementären Datenfluss-modellen abbilden. Ein *zentrales Plattformmodell* bietet einen einzigen Daten-Hub und erleichtert das Onboarding sowie die Standardisierung, riskiert jedoch Machtkonzentration und einen Single-Point-of-Failure. Ein *föderiertes Modell* hingegen setzen auf dezentrale Datenhaltung, wobei die Kontrolle bei den einzelnen Akteuren verbleibt und die Unternehmen über Peer-to-Peer Konnektoren und einen gemeinsamen semantischen Katalog vernetzt sind. Dadurch wird die Datensouveränität maximiert, jedoch liegt die Herausforderung hier insbesondere in der Gewährleistung von Interoperabilität und Effizienz. Zwischen beiden Extremen liegt das *OEM-zentrierte Hybridmodell*, bei dem der Fahrzeughersteller als Lebenszyklus-Orchestrator fungiert: Es skaliert schnell und verteilt Verantwortlichkeiten klar, muss jedoch Machtasymmetrien und herstellerunabhängige Akteure ausbalancieren.

Unabhängig vom gewählten Datenflussmodell werden die Informationen in Datenprodukten gebündelt. Diese aggregieren kontextbezogene Informationen zu einem bestimmten Zweck, etwa zur Identifikation, Zustandsbewertung oder Materialzusammensetzung von Komponenten, und ermöglichen datenbasierte Entscheidungen entlang des Produktlebenszyklus. Grundlage dafür sind die spezifischen Informationsbedarfe unterschiedlicher Akteure, die produktbezogene (z. B. Trennbarkeit, Schadstoffe) und produktübergreifende (z. B. regulatorische Anforderungen, Marktverfügbarkeit) Dimensionen abdecken. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Projekts acht zentrale Datenprodukte identifiziert, die entlang des Lebenszyklus eines Fahrzeugs generiert, angereichert und bereitgestellt werden. Jedes dieser Datenprodukte aggregiert strukturierte Informationen zu einem bestimmten Zweck, erfüllt jeweils spezifische Funktionen im Rahmen zirkulärer Entscheidungsprozesse und adressiert unterschiedliche Abschnitte des Lebenszyklus. Das Datenprodukt zur *Produktidentifikation* gewährleistet nicht nur die eindeutige Zuordnung von Komponenten, sondern bildet auch die Grundlage für Rückverfolgbarkeit und Versionierung digitaler Zwillinge. Die *Produkt- und Komponentenmodularität* ermöglicht eine standardisierte Bewertung von Demontagefreundlichkeit und Austauschbarkeit, beides zentrale Kriterien für Wiederverwendung, Reparatur oder Remanufacturing. Das Datenprodukt zum *Zustand der Komponente* integriert sensorbasierte Betriebsdaten, Diagnoseinformationen und historische Nutzungsprofile, wodurch eine belastbare Einschätzung bezüglich Restlebensdauer oder Remanufacturing-Eignung ermöglicht wird. Die

Materialspezifikation liefert eine detaillierte Beschreibung aller enthaltenen Stoffe und deren Materialeigenschaften und ist damit unerlässlich für die Schadstoffbewertung, Recyclingfähigkeit sowie für die Auswahl geeigneter Trennverfahren. Die *Nachhaltigkeitsbewertung* geht über rein ökologische Kennzahlen hinaus und kombiniert Lebenszyklusanalyse-Ergebnisse mit sozialen und ökonomischen Indikatoren zur umfassenden Bewertung zirkulärer Interventionen. Das Datenprodukt zu *Wertschöpfungskettendaten* adressiert logistische Aspekte, indem es Informationen zu Standortverteilungen, Transportaufwänden oder Lagerzeiten bereitstellt und dadurch wichtige Parameter für die Bewertung zirkulärer Geschäftsmodelle unter ökonomischen Gesichtspunkten enthält. Die *gesetzlichen Anforderungen* stellen eine strukturierte Aufbereitung regulatorischer Rahmenbedingungen bereit, einschließlich Normen, Konformitätsnachweisen und relevanter Dokumentationspflichten, und unterstützen damit die rechtssichere Umsetzung. Abschließend bieten *Marktinformationen* eine dynamische Sicht auf Angebot, Nachfrage, Preisentwicklungen sowie Verfügbarkeiten gebrauchter Komponenten oder Sekundärmaterialien, was insbesondere für Akteure im Repurpose- oder Broker-Segment entscheidungsrelevant ist. Durch diese funktionale Differenzierung und die semantisch konsistente Einbettung in Verwaltungsschalen werden die Datenprodukte sowohl domänenübergreifend orchestriert als auch individuell für spezifische Akteursrollen und Prozessphasen konfiguriert. Sie bilden damit die entscheidende operative Ebene für datengetriebene CE-Strategien in einem Data Space-konformen Systemdesign.

Damit dienen die beschriebenen Datenprodukte nicht nur der Informationsbereitstellung, sondern bilden zugleich die Grundlage für automatisierte Entscheidungsprozesse innerhalb der Kreislaufwirtschaft – etwa bei der Auswahl der am besten geeigneten Strategie im Sinne von Wiederverwendung, Repair oder Remanufacturing. Sie ermöglichen datenbasierte Wertschöpfung, fördern die Transparenz über den Produktlebenszyklus hinweg und schaffen eine gemeinsame Sprache im zirkulären Datenraum.

Tabelle 1: Gebündelte Informationsbedarfe der Akteure in Datenprodukten.

Dimension	Datenprodukt	Zweck	Nutzen
Produkt-bezogen	Produktidentifikation	Eindeutige Identifizierung des Produkts und Zuordnung von Komponenten	Basis für Rückverfolgbarkeit und Versionierung digitaler Zwillinge
	Produkt- und Komponentenmodularität	Bewertung von Demontagefreundlichkeit und Austauschbarkeit sowie dem damit verbundenen Aufwand	Grundlage für Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing
	Zustand der Komponente	Einschätzung der Restlebensdauer und Repair-, Remanufacturing- oder Recycling-Eignung	Integration von sensorbasierten Daten, Diagnose und Nutzungshistorie
	Materialspezifikation	Bewertung von Schadstoffen und Recyclingfähigkeit	Enthält detaillierte Materialinformationen, wichtig für Auswahl von Trennverfahren und Recycling
Produkt-unabhängig	Nachhaltigkeitsbewertung	Ganzheitliche Bewertung zirkulärer Maßnahmen	Verknüpft ökologische, soziale und ökonomische Indikatoren
	Wertschöpfungskettendaten	Bewertung logistischer Aspekte und zirkulärer Geschäftsmodelle	Standort-, Transport- und Lagerdaten, ökonomische und ökologische Entscheidungsgrundlage
	Gesetzliche Anforderungen	Sicherstellung der Regeltreue und Dokumentationspflichten	Umfasst Normen, Konformitätsnachweise, regulatorische Informationen
	Marktinformationen	Unterstützung marktbasierter Entscheidungen	Dynamische Daten zu Angebot, Nachfrage, Preisen, Verfügbarkeiten gebrauchter, reparierter oder wiederaufbereiteter Produkte und Komponenten oder Sekundärmaterialien

Der DPP ist dabei nicht als singuläres Datenartefakt zu verstehen, sondern vielmehr als eine strukturierte Zusammenführung mehrerer Datenprodukte, die modular organisiert und kontextualisiert werden. Im Rahmen des Projekts ZirkulEA wurde hierfür die Verwaltungsschale (*Asset Administration Shell, AAS*) als technischer Rahmen gewählt, da sie eine standardisierte, interoperable und semantisch konsistente Repräsentation von Produktdaten über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglicht. Auch wenn der DPP prinzipiell auch in anderen Formaten umgesetzt werden kann, bietet die AAS insbesondere im industriellen Kontext eine hohe Anschlussfähigkeit an bestehende Datenräume und Referenzarchitekturen, u.a. Catena-X. Die Datenprodukte entwickeln sich dabei dynamisch entlang des Lebenszyklus eines Produkts weiter und werden kontinuierlich durch neue Informationen ergänzt, etwa aus Diagnose-, Wartungs-, Reparatur- oder Demontageprozessen. Die Einbindung dieser Datenprodukte in ein übergreifendes Governance-Modell ist zentral, um die Interoperabilität und Qualität im dynamischen Datenraum sicherzustellen. Aufbauend auf dem RACI-Ansatz (*Responsible, Accountable, Consulted, Informed*) wird für jedes Datenprodukt eine klare Verantwortlichkeitszuordnung vorgenommen, die sowohl technische Rollen (z. B. Datenpflege, Schnittstellenbereitstellung) als auch fachliche Rollen (z. B. Freigabe, Bewertung, Nutzung) berücksichtigt (O'Connor & Mock, 2020). Eine exemplarische RACI-Matrix visualisiert die Zuordnung und Verantwortlichkeitsverteilung entlang des Lebenszyklus und wird im weiteren Verlauf als Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: RACI-Matrix anhand der Datenprodukte.

Rolle	Responsible	Accountable	Consulted	Informed
Datenprodukt				
Produktidentifikation	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier, User	User
Produkt- und Komponenten- modularität	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	-
Nachhaltigkeits- bewertung	Repairer, Remanufacturer	Repairer, Remanufacturer	Manufacturer, Supplier	-
Wertschöpfungsketten- daten	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Supplier, Dismantler	-
Gesetzliche Anforderungen	Manufacturer, Repairer, Remanufacturer	Manufacturer	Supplier, User	User
Marktinformationen	Manufacturerer, Repairer, Remanufacturer, Broker	Manufacturerer, Repairer, Remanufacturer, Broker	User, Repurpose Market	-

4 Föderierte Data Spaces als Basis einer souveränen digitalen Infrastruktur für die Kreislaufwirtschaft

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 IDS³-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 (Heinz et al., 2024; siehe Abbildung 1). (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.

³ IDS steht für *International Data Spaces* – ein von der International Data Spaces Association (IDSA) entwickeltes Referenzarchitekturmodell für einen souveränen, sicheren und standardisierten Datenaustausch.



Abbildung 1: 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 kreislaforientierte Services das operative Rahmenwerk liefern. Erst dieses Zusammenspiel schafft ein vertrauenswürdiges, kollaboratives und wirtschaftlich skalierbares Fundament, auf dem die zirkuläre Automobilwirtschaft tatsächlich umgesetzt werden kann.

5 Die praktische Umsetzung

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.

6 Fazit

Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie erfordert nicht nur ein Umdenken in Bezug auf Produktstrategien und Geschäftsprozesse, sondern auch eine fundamentale Neugestaltung des Daten- und Informationsaustauschs. Der Wandel hin zu einer datengetriebenen Kreislaufwirtschaft stellt die Automobilindustrie vor tiefgreifende Herausforderungen und eröffnet zugleich neue Chancen für nachhaltiges Wachstum und Innovationsführerschaft. Dieses Konzeptpapier skizziert ein integriertes Rahmenwerk, das die strategischen, infrastrukturellen und organisationalen Bausteine miteinander verknüpft, um den Daten- und Informationsaustausch als zentrales Element einer zirkulären Industrie zu verankern. Im Zentrum steht die Etablierung eines strukturierten, standardisierten und sicheren Datenaustauschs als der Schlüssel für eine effiziente Ressourcennutzung, die Einhaltung regulatorischer Vorgaben und die Förderung datengetriebener Innovationen. Die vorgestellten Bausteine, von der Operationalisierung der Kreislaufstrategien über die Gestaltung von Datenprodukten bis hin zur technischen Umsetzung in souveräne Data Spaces, bieten eine fundierte Grundlage für eine resiliente und nachhaltige Dateninfrastruktur. Dabei erfordert der erfolgreiche Aufbau einer solchen Infrastruktur nicht nur technische Lösungen, sondern auch ein umfassendes Change-Management, das nicht nur technische Kompetenzen fördert, sondern auch kulturelle und organisationale Veränderungen innerhalb der beteiligten Unternehmen unterstützt.

Durch eine koordinierte und enge Zusammenarbeit aller relevanten Akteure entlang der Wertschöpfungskette werden die Voraussetzung für eine funktionierende und datengetriebene Kreislaufwirtschaft geschaffen. Das vorgestellte Konzept liefert somit einen konkreten Fahrplan, um den Daten- und Informationsaustausch als Grundlage für die aktive Mitgestaltung einer zukunftsfähigen und ressourceneffizienten Automobilindustrie zu schaffen und diese kreislauffähig zu gestalten.

7 Literaturverzeichnis

- Antikainen, M., Uusitalo, T., & Kivikytö-Reponen, P. (2018). Digitalisation as an Enabler of Circular Economy. *Procedia CIRP*, 73, 45–49.
- 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 & Technology*, 70(10), 1047–1059.
- Berger, K., Schöggel, J.-P., & Baumgartner, R. J. (2022). Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases. *Journal of Cleaner Production*, 353, 131492.
- Bundesumweltministeriums. (n.d.). Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.bmu.de/WS893>
- European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- European Commission. (2024). EU's Digital Product Passport: Advancing transparency and sustainability. <https://data.europa.eu/en/news-events/news/eus-digital-product-passport-advancing-transparency-and-sustainability>
- European Green Deal. (n.d.). Consilium. Retrieved September 27, 2024, from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>
- Fassnacht, M., Leimstoll, J., Benz, C., Heinz, D., & Satzger, G. (2024). Data sharing practices: The interplay of data, organizational structures, and network dynamics. *Electronic Markets*, 34(1), 47.
- Gieß, A., & Möller, F. (2025). Exploring the value ecosystem of digital product passports. *Journal of Industrial Ecology*.
- Heinz, D., Fassnacht, M., Sagnier Eckert, L., Röhrleef, J., & Satzger, G. (2024, December 16). Designing Digital Industrial Platforms for the Circular Economy: A Requirements Catalog. ICIS 2024 Proceedings.
- Heinz, D., Hu, M., Benz, C., & Satzger, G. (2023). Digital Service Innovation for Sustainable Development: A Systematic Literature Review. *WI 2023 Proceedings*.
- Hoppe, C., Winkelmann, S., Schoormann, T., & Möller, F. (2024). Get Ready for the Future: Capabilities for a Circular Economy in the Automotive Industry. *ECIS 2024 Proceedings*.
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553.
- O'Connor, J. T., & Mock, B. (2020). Responsibilities and accountabilities for industrial facility commissioning and startup activities. *Construction Innovation*, 20(4), 625–645.
- Otto, B., Ten Hompel, M., & Wrobel, S. (Eds.). (2022). *Designing Data Spaces: The Ecosystem Approach to Competitive Advantage*. Springer International Publishing.
- Petrik, D., Härer, F., & Schöllkopf, F. (2024). Realization of a Digital Product Passport for a Cross-Company Carbon Accounting. *Herman Hollerith Conference 2024*.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: Measuring innovation in the product chain. *Planbureau Voor de Leefomgeving*, 2544.
- Regulation Data Governance Act (EU) 2022/868, 152 OJ L (2022). <http://data.europa.eu/eli/reg/2022/868/oj/eng>
- 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.
- 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.

Plattformansatz zur EaaS-Integration in wandlungsfähige Produktionssysteme

Viktor Schubert¹, Afschin Dideban², Ali Moghaddam Nejad³, Frank Breitenbach³, Marc-André Weismüller⁴, Theresia Groß⁴, Oliver Petrovic⁴, Christian Brecher⁴

¹SEEBURGER AG, Bretten, Deutschland

²Innoface AG, Karlsruhe, Deutschland

³EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG, Fulda, Deutschland

⁴RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Aachen, Deutschland

Abstract. Das hier zugrunde liegende Projekt AutoPilot stellt einen ganzheitlichen Systemansatz zur Umsetzung zirkulärer Produktionsprozesse in der Fahrzeugindustrie vor. Der Beitrag beschreibt einen neuartigen Plattformansatz zur Ermöglichung und Unterstützung von Equipment-as-a-Service (EaaS) als Geschäftsmodell in wandlungsfähigen Produktionssystemen vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft. Als Schlüsseltechnologie kommen funktionale und verhaltensbasierte digitale Zwillinge (DT) zum Einsatz, um plattformgestützt EaaS in Verbindung mit einer effektiven Kreislaufwirtschaft praktizieren zu können.

Keywords: *Equipment-as-a-Service (EaaS), Kreislaufwirtschaft, digitaler Zwilling, FMU/FMI, Datenplattform*

1 Einleitung

Im Kontext der Bewältigung des Klimawandels rückt die Kreislaufwirtschaft zunehmend in den Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (Wang, K. et al. 2022). Dies impliziert die Notwendigkeit den gesamten Wertschöpfungsprozess, inkl. den darin anfallenden Material- und Energieverbrauch von der Produktentwicklung, über die durch einen Wiedergebrauch verlängerte Nutzungsphase bis zum Lebensende ganzheitlich zu betrachten. Dies gilt gerade auch für die in der Produktion eingesetzten Betriebsmittel, also alle technischen Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen, die zur Herstellung, Bearbeitung, oder Prüfung von Produkten eingesetzt werden und die in den häufig sich dynamisch veränderten Produktionssystemen selbst wandlungsfähig sein müssen. Diese werden bislang häufig nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer entsorgt. Insbesondere individuell angepasste Betriebsmittel, wie z. B. Spannvorrichtungen, werden selten weiterverwendet, obwohl sie ein hohes Potenzial für eine Zweitnutzung oder die Weitergabe an andere Nutzer durch gezielte Adaptionen bieten. Gerade durch den Einsatz von digitalen Zwillingen (DT) können der Lebenslauf kontinuierlich dokumentiert und neue Konfigurationen auch durch Nutzung von Re-X Strategien abgesichert werden. Neue Geschäftsmodelle wie Equipment-as-a-Service (EaaS) können die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft signifikant begünstigen (Blanke, P. et al. 2025).

Im Zuge dieser Überlegungen gewinnen Plattformansätze zunehmend an Bedeutung, die für die Bereitstellung von DT und Services der EaaS-Anbieter eine neue Basis in der Produktions-IT schaffen, um Anwendern eine geeignete und automatisierte Integration zu bieten. Eine zentrale Rolle spielen hierbei Datenplattformen auf cloudbasierter IT-Infrastruktur. Über den Plattformansatz werden Anbieter und Anwender in die Lage versetzt, datenzentrisch zu arbeiten. Durch diese Befähigung wird eine Grundlage auch für den effizienten und effektiven Einsatz des Konzeptes der Datenräume als ein daran angeschlossener erweiterter Bereich gelegt, wie sie aktuell breit in Forschung und Wirtschaft diskutiert werden (Bitkom, 2023).

Im Folgenden wird ein neuartiger Plattformansatz vorgestellt welcher auf die Möglichkeiten und Bedingungen zur Integration neuer datenbasierter Geschäftsmodelle um DT, wie EaaS, insbesondere für den Anwender eingeht. Durch die Befähigung für einen verstärkten datenbasierten Umgang mit Produktionsressourcen kann nicht nur der zu erwartende Mehrwert von EaaS für die Optimierung der Wandlungsfähigkeit eingelöst werden; er stellt vielmehr gleichzeitig, im Falle neuer zirkuläre Geschäftsmodelle, sogar eine wichtige Bedingung dar.

2 Stand der Technik

Die zunehmende Komplexität und Variantenvielfalt moderner Produktionssysteme erfordert flexible und effizient anpassbare Automatisierungslösungen. Insbesondere im Kontext von Industrie 4.0 gewinnen Konzepte, wie Plug-&-Produce, an Bedeutung, die eine modulare und schnelle Integration neuer Betriebsmittel in bestehende Anlagenstrukturen ermöglichen. Voraussetzung hierfür ist eine durchgängige digitale Abbildung der Produktionsumgebung, die von der Planung über die Simulation bis hin zum laufenden Betrieb reicht. Zentrales Element in diesem Zusammenhang sind Datenplattformen für ein effizientes, datenzentrisches Arbeiten und die Nutzung von DT.

2.1 Funktionaler und verhaltensbasierter digitaler Zwilling

Mit einem DT lassen sich reale Systeme digital darstellen und simulieren (IBM, 2021). Die Qualität sowie der Detaillierungsgrad sind hierbei unter anderem abhängig vom benötigten Funktionsumfang des DT sowie der verwendeten Softwarelandschaft. Im Wesentlichen lässt sich der Funktionsumfang eines DT in geometrisch, funktional und verhaltensbasiert unterteilen (Singh et al., 2021). Ein geometrischer DT besteht lediglich aus der dreidimensionalen Repräsentation des realen Systems (z. B. CAD-Modell eines pneumatischen Zylinders) ohne Berücksichtigung eines logischen oder dynamischen Verhaltens. Funktionale DT sind um die logischen Funktionen des realen Systems erweitert und repräsentieren unter anderem zeitunabhängige Zustandswechsel (z. B. Ausgabe der Zustände „ein- und ausgefahren“ eines pneumatischen Zylinders). Ist ein DT verhaltensbasiert, spiegelt dieser zusätzlich das dynamische Verhalten des realen Systems wider (z. B. Ein- und Ausfahrzeiten eines pneumatischen Zylinders verändern sich in Abhängigkeit des Luftdrucks) (Singh et al., 2021).

Neben der funktionalen Einteilung wird in der Praxis auch zwischen typ- und instanzbasierten DT unterschieden. Typbasierte DT repräsentieren die allgemeinen Eigenschaften von bspw. einer ganzen Produktklasse, unabhängig von einem konkreten Exemplar. Im Gegensatz dazu steht der instanzbasierte DT, welcher ein konkretes Exemplar mitsamt Zustandsverlauf, Nutzungsdaten und individueller Konfiguration abbildet (Wilson et al., 2024). Zur Realisierung des erforderlichen Funktionsumfangs eines DT ist eine geeignete, meist unternehmensspezifisch konzipierte Softwarelandschaft notwendig. Diese umfasst typischerweise Visualisierungs- und Simulationsumgebungen wie Siemens NX MCD oder 3DEXPERIENCE zur geometrischen und kinematischen Abbildung des realen Systems. Ergänzend werden virtuelle Robotersteuerungen (z.B. KUKA OfficeLite oder ABB RobotStudio) sowie SPS-Programme der eingesetzten Automatisierungssysteme integriert. Zur Nachbildung des Systemverhaltens kommen Verhaltensmodellierungswerkzeuge wie SIMIT oder WinMOD zum Einsatz. Im Bereich Verhaltensmodellierung werden auch FMUs (Functional Mock-up Units) eingesetzt, um das physikalische oder steuerungstechnische Verhalten standardisiert zu integrieren. Innerhalb des Engineerings sorgt eine leistungsfähige Schnittstellenarchitektur, beispielsweise mit der iSILOG.Connect Toolbox, die sowohl standardisierte (z.B. OPC UA, FMI, TCP/IP, ROS) als auch proprietäre Protokolle unterstützt, beim Aufbau und Nutzung von DT. Daneben nimmt aber der DT zunehmend in leichtgewichtiger Form noch weitere Aufgaben wahr, die zur Vernetzung und Steuerung nachgelagerter Wertschöpfungsprozesse dienen. So sind die Effekte etwa in der Produktion schon heute sichtbar wie etwa die Verkürzung der Inbetriebnahmezeiten um 15–30 % (Wang et al., 2022), oder der effizienten Integration in die übergeordnete Prozesssteuerung (insbesondere MES). Laut einer Marktstudie nutzen bereits 67 % der befragten Unternehmen VIBN- oder Simulationsmodelle in ihren Produktionsumgebungen (Rehman et al., 2025). Diese Entwicklung zeigt, dass die Vernetzung von DT

und automatisierten Signalzuordnungen der Schlüssel ist, um Plug-&-Produce-Konzepte effizient und flexibel umzusetzen (Global Growth Insights, 2024). Mit der Erhöhung des Wertschöpfungsanteils im Bereich von Services und darin insbesondere digitaler datenbasierter Services werden DT aber auch für die Abbildung von Produkt-Service-Systemen (PSS) unerlässlich. Nicht nur im Kontext EaaS-basierter Geschäftsmodelle stellen sie dadurch die Basis von Plug-&-Produce- bzw. Plug -&-Play-Ansätzen dar, die über den DT erlauben weitere Interaktionen etwa mit dem Anbieter aufzubauen und den Bezug von bspw. Produktdaten, Ersatzteile, Diagnosen oder Mehrwertservices zu automatisieren.

Während der Mangel an Standards noch vor einigen Jahren die Umsetzung und den Einsatz von DT in diesen Bereichen verhinderte, ist dieser Zustand heute größtenteils überwunden. Für eine durchgängige horizontale und vertikale Integration von (einzelnen) DT bildet das Konzept der Verwaltungsschale (AAS Typ 1, 2 und 3) sowie OPC UA mit ihren Companion Specifications eine ausreichende Basis. Zur Abbildung oder Integration einzelner DT in komplexen Strukturen etwa auf Ebene des Engineerings und der Simulation ganzer Fabriken kommen weitere Austauschformate, wie AutomationML, ins Spiel um bspw. einzelne PSS zu integrieren (Schleipen et al. 2022) oder das Zusammenspiel des Gesamtsystems „Produktionsengineering“ im Sinne eines Common Data Model abzubilden (DIAMOND, 2025). Dabei bildet der DT nicht das Ziel, sondern den Ausgangspunkt für neue digitale Geschäftsmodelle sowie den Bezug datenbasierter Dienste. Gerade im Kontext der sich noch entwickelnden EaaS-Angebote wird dies deutlich.

2.2 Datenplattformen in der Produktion

Die bisherige Entwicklung der Industrie 4.0 ist eng mit der Entwicklung jener Werkzeuge und Methoden verbunden, die eine effiziente Datenverarbeitung ermöglichen. In der Produktion führte diese Fokussierung auf datengetriebene Entscheidungen zu den heute verbreitenden Vorhersagemodellen für Produktionsressourcen und Prozesse im Bereich Qualität, Wartung oder Auslastung. Klassische und starre Data-Warehouse-Ansätze erwiesen sich hierfür als unbrauchbar und wurden in Folge der Weiterentwicklung von Big Data durch flexible mikroservicebasierte Ansätze abgelöst. So konnten die Sammlung, Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen, die von Maschinen, Sensoren und anderen Quellen stammen, durchgeführt werden. In einer zweiten, zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossenen Entwicklungsstufe wurden diese Datenplattformen, angetrieben durch eine Durchdringung von cloud-nativen Technologien auf allen Rechnerknoten und eines damit zu realisierenden Edge-Cloud-Edge-Kontinuums, weiter dezentralisiert. Eine gängige Form der Systematisierung dieser dezentralen Datenplattformen sind einzelne Bereiche zur Speicherung und Bereitstellung von Daten, den sogenannten Data Hubs, die um weitere Funktionen zur Verarbeitung (Data Fabrik) erweitert sowie im Sinne eines Data-Mesh-Ansatzes weiter virtualisiert und fragmentiert werden, um einzelne Datenprodukte mit klar definierten Schnittstellen ausweisen zu können. Wesentlich ist dabei eine föderierte Governance-Struktur, die klare Regeln für den Datenaustausch im Unternehmen aber auch unternehmensübergreifend definiert und deren Einhaltung sicherstellt. Ein darin strukturgebendes Element sind DT, die selbst als „zentral verwaltetes Datenprodukt“ im Mittelpunkt derartiger Datenplattformen stehen.

Heute spielen diese Entwicklungen eine zentrale Rolle in der Gestaltung und Anpassung moderner Enterprise-Architekturen, die durch neue Formen des dezentralen Datenmanagements im Sinne von DataOps-Methoden selbst modularer und fragmentierter werden. Dabei steht die zentrale IT in der Pflicht, unter Wahrung der unternehmensweiten Sicherheits- und Governance Regeln, die unterschiedlichen Fach- und Produktionsbereiche in ihrem Bedarf an einem datenzentrischen Arbeiten mit Infrastruktur und Integrationsdiensten zu versorgen, wofür sie selbst auf as-a-Service-Leistungen zurückgreifen muss. Im Falle der Produktion gilt es jene Instrumente bereitzustellen, die den Aufbau lokaler Datenplattformen im Umfeld der ebenfalls zunehmenden Knoten an virtuellen, containerbasierten SPS (vPLC) ermöglichen, wodurch neue, zusätzliche Betriebsmodelle, wie etwa Service-Management für OT, den Automatisierungsspezialisten zur Seite stellen kann. Im Hinblick auf eine unternehmensübergreifende Vernetzung dieser Datenplattformen wird mit dem Konzept der

Datenräume auf ähnliche technische Prinzipien zurückgegriffen, wobei spezielle Anforderungen an Transparenz und Governance durch föderale Strukturen sowie Identitäts- und Zugriffs-Mechanismen gestellt werden, um die Durchsetzung von Datensouveränität für jeden Teilnehmer zu gewährleisten (Otto et al, 2022). Ein Vorreiter dieser Entwicklung ist die Automobilindustrie, die mit ihrer Initiative „Catena-X“ wichtige Grundsteine für die Umsetzung von Technologie, Anwendung und Branchenorganisation gesetzt hat (Catena-X, 2025). Unter dem Blickwinkel des Maschinen- und Anlagenbaus und der vertikal vertieften Abbildung von DT werden diese Grundlagen durch das Leuchtturm-Projekt „Factory-X“ in die Produktions-IT und -OT gebracht und weiterentwickelt (Factory-X, 2025). Die Durchsetzung dieser Dataspace-Ökosysteme als Fundament einer europäischen Datenwirtschaft stellen produzierende Unternehmen vor die Herausforderung neue digitale Fähigkeiten aufzubauen, die nicht aus einer Hand zu bekommen sind, sondern unternehmensspezifisch und arbeitsteilig zu organisieren sind. Im Hinblick auf die Herausforderungen der Integration und Nutzung von DT liefert der vorliegende Beitrag ein Beispiel für die ersten Schritte dahin.

3 Ansatz AutoPilot

Der Bedarf an geeigneten Mechanismen zur Gewährleistung von horizontalen Datenketten zwischen Geschäftspartnern für servicebezogene und funktionale DT erfordert eine höhere Flexibilisierung der Integration für Unternehmen, die dem Plattformansatz im Projekt AutoPilot zugrunde liegt. Hierbei wurde die Entwicklung und Erprobung eines ganzheitlichen Systemansatzes zur Umsetzung zirkulärer Produktionsprozesse in der Fahrzeugindustrie verfolgt, welches Fähigkeiten der Plattformintegration für jeden Partner (Anbieter wie auch Anwender) vorsah. Im Projekt wurde u.a. das Zusammenspiel mit Services angegangen, die die Wandlung von kreislauffähigen Ressourcen in Produktionsumgebungen erleichtern: Intelligente Betriebsmittelerkennung und Kalibrierung der Robotersteuerung sowie kleinteilige Simulationsdienste für Umbau und Umrüstung.

Für Anwender nimmt der Plattformansatz die Befähigung der Integration dieser Dienste innerhalb der Unternehmens- und Produktions-IT ins Blickfeld. Diese sind für die Umsetzung industrieller Anwendungen von großer Bedeutung. Gerade auch durch regulatorische Anforderungen, etwa durch den Data Act (European Commission, 2022), die die Freigabe und Nutzung der Daten aus der Nutzung der Produkte für die Betreiber (nicht Besitzer) vorsieht, sind Formen der effizienten Prozess- und Datenintegration unerlässlich. Die bereitgestellten Funktionen als Integrations-Services müssen dabei die Integrationsaufwände für Anwender auf ein Minimum im Sinne des Plug-&-Produce reduzieren und gleichzeitig die Interoperabilität zu Diensten des Anbieters oder weiteren datenraumbasierten Marktplätzen gewährleisten. Dies wirft die zentrale Frage auf, wie sich diese Aufwände systematisch senken lassen, aber auch welche B2B-Interaktionen wann und wo nötig sind. Ein vielversprechender Ansatz besteht in der Verlagerung von Steuerungs- und Schalteinheiten (z. B. Ventilinseln) von der übergeordneten Anlagen- oder Zellebene direkt auf eine nahe Datenverarbeitungsebene, auf der das Betriebsmittel als DT repräsentiert ist. Vor- bzw. nachgelagerte, aber auch in-situ-Auswertungen können so als Teil einer parallelen virtuellen Ausführung und Interaktion vorgenommen werden. Dieser dadurch geschaffene Datenraum kann sowohl den Autonomiegrad der so eingebundenen Produktionsressourcen steigern (Blanke et al, 2024), als auch den Funktions- und Interaktionsrahmen massiv erweitern. So können auf Basis der standardisierten DT weitere spezifische Datenprodukte integriert werden, die bspw. eine kontinuierliche automatische Verhaltensüberwachung oder Komponenten- und Lageidentifikation innerhalb der Roboterzelle vornehmen. Der entwickelte Systemansatz adressiert damit zentrale Herausforderungen einer flexiblen und ressourceneffizienten Produktion und trägt zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit und Adaptivität von Betriebsmitteln bei.

3.1 Architektur der EaaS-Integration

Über die digitale Plattform (DP) werden Softwarekomponenten zur Verfügung gestellt, die es Anbietern sowie Anwendern ermöglichen, auf Basis ihrer Datenplattform zwischen der zentralen Umgebung zum

Management der DT und den einzelnen dezentralen Ebenen oberhalb der Steuerungsschicht für die nötige Integration und Orchestrierung der Interaktionen und Datenketten zu sorgen.

Zwei Ebenen werden in die Enterprise-Architektur eingezogen. Von unten (aus der OT-Schicht heraus) betrachtet, werden nahe der Maschinen- und Steuerungsdaten die Plattformfunktionen für die dezentralen Datenknoten bereitgestellt. Darin werden eine Aggregation und Normalisierung der Maschinen- und Prozessdaten vorgenommen, die ferner um weitere Sensordaten ergänzt werden können, um diese als Datenstrom (Pipeline) einer weiteren Online-Verarbeitung zuzuführen. Im Sinne der erzielten Microservicearchitektur werden die hierzu verwendeten einzelnen Softwareartefakte (z. B. Python-Skripte) als einzelne Datenprodukte behandelt, die um eine entsprechende Schnittstellen- und Sicherheitsschicht erweitert und als Container zur Verfügung gestellt werden. Die Komponenten des Integration-Workspaces beinhalten als Microservices umgesetzte Aggregations- und Transformationsfunktionen (Flows), die den Datenfluss zwischen DT, den Datenprodukten und dem darunterliegenden Data Hub orchestrieren. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Servicebereiche betrachtet: Zum einen Datenprodukte zur Erweiterung der Roboterfähigkeit und zum anderen zur Umsetzung simulationsbasierter Services auf Basis des FMI-Standards.

Für den ersten Service zählen als Inputdaten u. a. Geometrie- und Störkonturdaten und Koordinaten zur definierten Teileablage im Betriebsmittel, die für ein bildbasiertes Verfahren erweiterte Sensoren (Kamerasysteme) benötigen. Aus diesen werden in Kombination mit Plandaten Hinweise zu erforderlichen Zusatzbetriebsmitteln für die Bearbeitung, Kompatibilitätsinformationen zu Werkstücken sowie Ansteuerungsprogramme gewonnen. Durch die automatisierte Bereitstellung dieser Daten kann die Anlagensteuerung einen weitgehend selbsttätigen Integrations- und Inbetriebnahmeprozess durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden bereits mehrere Elemente dieser Integration auf Ebene der dezentralen DP realisiert bzw. befinden sich aktuell in der Umsetzung. Für den simulationsbasierten Service wurden entsprechende FMU-Dienste aufgesetzt deren Konfiguration und Ansteuerung über einzelne Datenprodukte erfolgen. In Abbildung 1 wird dieses Zusammenspiel der Komponenten im Bereich des Shopfloors veranschaulicht. Durch den Einsatz dieser zusätzlichen Services wird die Wandlungsfähigkeit des Demonstrators (hier: ReStackCell) deutlich optimiert. So kann nach der physischen Platzierung und Verkabelung des Betriebsmittels (Energie- und Datenanschluss) zügig und weitgehend automatisiert eine Inbetriebnahme erfolgen. Die hierzu eingesetzten Dienste werden im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

Die im Projekt entwickelten Integrationsfunktionen der DP dienen jedoch nicht nur dazu, DT in OT-nahen Data Hubs einzusetzen, sondern auch als Möglichkeit, diese mit übergeordneten Prozessen bis hin zu B2B-Geschäftsprozessen zu integrieren. Des Weiteren werden nahe der zentralen Datenknoten weitere Plattformfunktionen eingezogen, die als Drehscheibe zwischen den internen dezentralen Edge-Knoten und externen Cloud-Knoten dienen. Auf dieser Ebene wurde zur horizontalen Vernetzung von DT auf Basis des, über das Projekt Catena-X betriebenen, Tractus-X (insbesondere durch den EDC, Eclipse Dataspace Connector) (Eclipse Foundation, 2024) und AASX-Server Komponenten (Eclipse Foundation AASX, 2024) umgesetzt. Diese kommen im Austausch von Informationen zwischen Anbieter und Anwender etwa als Benachrichtigungen zu Störung, Wartung, Umbau und Re-X Ereignissen zum Einsatz. Eine weitere Anwendung ist der Austausch von datenbasierten Services zu DT, etwa der Bezug von FMU-angereicherten AASX-Daten. Auf diesem Level werden die harmonisierten und kontextualisierten Shopfloor-Daten für die weitere Verarbeitungen im Kontext der EaaS-Integration auf Business-Ebene orchestriert.

In Abbildung 1 wird auch die Umsetzungen der DP beim EaaS-Anbieter angedeutet, auf die hier nicht tiefer eingegangen wird. In dieser Perspektive geht es um die Entstehung des DT sowie seiner rückwärtsgerichteten Verwendung im Sinne eines Re-X Änderungsprozesses. Für die hier nötigen Integrationsdienste, insbesondere in die Business- und Engineering- Backbones (ERP, SCM, PLM), wurden entsprechende Software-as-a-Service-Services (CoreFace und BIS) erstellt und wiederum über den Integration-Workspace der DP kleinteiliger orchestriert.

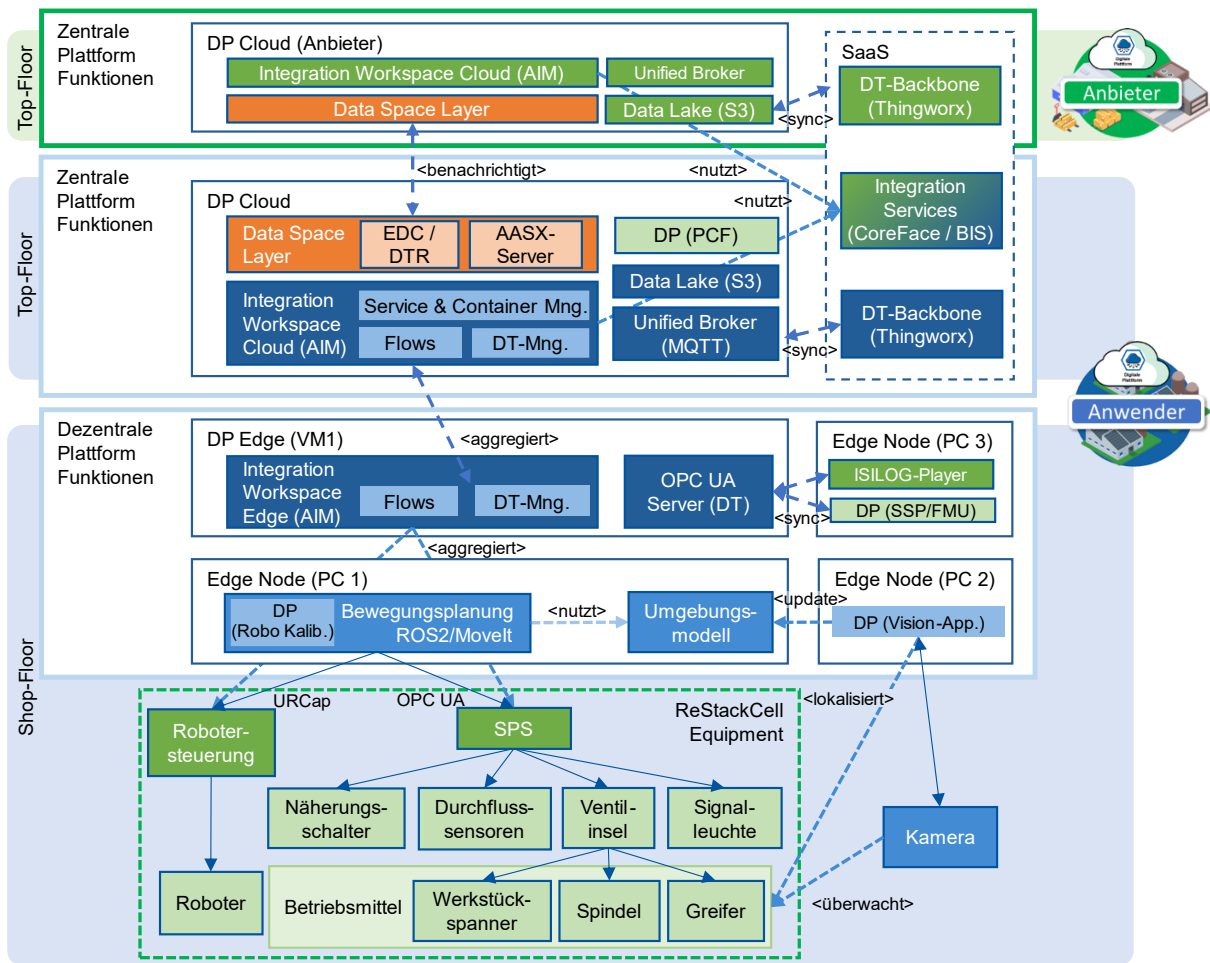


Abbildung 1: Technologiekette zur automatisierten Integration zirkulärer Betriebsmittel

3.2 Ansatz Servicebezug über digitale Zwillinge

3.2.1 Verhaltensabbildung und Zustandsüberwachung eines Betriebsmittels

Im Rahmen des Projekts AutoPilot wurde exemplarisch ein verhaltensbasierter DT eines Werkstückspanners mit Pneumatikzylinder entwickelt. Anhand dieser praxisnahen Komponente lässt sich die modellbasierte Verhaltensabbildung sowie die Integration in ein Produktionsumfeld prototypisch realisieren und erproben. Ziel ist die modulare und simulationsfähige Abbildung des Verhaltens zur flexiblen Integration in automatisierte Produktionsumgebungen.

Die Verhaltensbeschreibung des Pneumatikzylinders erfolgt durch eine FMU, die die dynamischen Eigenschaften (z. B. Position, Beschleunigung, Luftverbrauch) und die logischen Zustände (z. B. ein-/ausgefahren) abbildet. Neben der eigentlichen FMU sollen ergänzend Service-FMUs zum Einsatz kommen, die gezielt die Kommunikation und Analysefunktionen im Gesamtsystem unterstützen. Alle FMUs sind über eine gemeinsame SSP-Datei miteinander verknüpft. Über eine angebundene OPC-UA-FMU sind die Sensorwerte des realen Pneumatikzylinders über die OPC-UA-Schnittstelle zu überführen. Diese Werte fließen in eine nachgelagerte Compare-FMU, welche kontinuierlich Werte des Soll-Verhaltens der Zylinder-FMU mit den Ist-Werten des realen Zylinders vergleicht. Die Compare-FMU erkennt Abweichungen und gibt im Fehlerfall ein Signal zur Anomalieerkennung aus.

Entgegen der üblichen Nutzung der SSP in einem Co-Sim-System wie der ISILOG.Connect Toolbox, wurde der kompakte FMU-Player aus der Toolbox weiterentwickelt, um ihn als Container, bzw., eingebunden in ein weiteres Integrationsskript, als Datenprodukt, ausliefern zu können. Die darüber umgesetzten Funktionen ermöglichen eine automatisierte Konfiguration des FMU-Players hinsichtlich

der einzubindenden SSPs sowie der Konfiguration des entsprechenden Submodells auf den mit der Plattform ausgelieferten OPC-UA-Server. Durch die Plattformnutzung kann der Co-Sim-Service entsprechend auf die notwendige Edge-Umgebung bereitgestellt und über die SSP in einem lokalen verhaltensbasierten DT umgesetzt werden. Hierdurch wird die Kette des Bezugs vom Anbieter bis hin zur Integration und Ausführung größtenteils automatisiert, was deren Aktualisierung und eine mögliche Diagnose vereinfacht.

Der modellbasierte Abgleich zwischen DT und realem Betriebsmittel bildet die Grundlage für eine zustandsorientierte Wartungsstrategie, die perspektivisch zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit, Fehlerfrüherkennung sowie Transparenz über den technischen Zustand des Betriebsmittels beiträgt. Darüber hinaus schafft die gewonnene Datentiefe eine wichtige Voraussetzung für die gezielte Wiederverwendung von Betriebsmitteln in nachgelagerten Produktionskontexten.

3.2.2 Handhabungsservice – Positionierung und Kalibrierung über Bildverarbeitung

Im zweiten Bereich „Handhabungsservice“ wird das Szenario des Bezugs von eigenen bzw. Services Dritter untersucht. Dies zielt darauf ab, den Anwender in die Lage zu versetzen, bei veränderten Positionen und Objektgeometrien innerhalb der Zelle eine automatisierte Anpassung der Programmierung durchzuführen. Auch hierbei wurden eine entsprechende Aggregation auf den OPC-UA-Server sowie zwei einzelne Datenprodukte konzipiert, einmal für das zusätzliche anzubringende Kamerasystem sowie für die Roboterkalibrierung selbst. Basis des ersten Datenproduktes ist ein bildbasiertes Verfahren zur 6D-Posenbestimmung der Lage der Betriebsmittel (Genauigkeit: ca. ± 1 mm). Anschließend erfolgt ein Abgleich mit dem definierten Lochraster der Grundplatte zur Berechnung der Koordinatentransformation zwischen Roboterreferenzsystem und der Zielposition in den Betriebsmitteln. Damit wird die Zelle befähigt, die in ihr installierten Betriebsmittel selbstständig zu erkennen und integrationsrelevante Informationen bereitzustellen. Hieran knüpft eine dynamische Planung der Robotertrajektorien als zweites Datenprodukt an, welche implementiert wurde und die automatische Anpassung der Roboterbewegung an Position und Geometrie der eingesetzten Betriebsmittel erlaubt. Die Bahnplanung nutzt dabei die im DT des jeweiligen Betriebsmittels hinterlegten Störkontur- und Zielkoordinatendaten für die Teileablage, sodass ein physischer Betriebsmittelwechsel einen sehr geringen manuellen Programmieraufwand erfordert.

3.3 Deployment und Interaktionen

Im Projekt Autopilot bestand das Ziel der DP darin, Systeme und Mechanismen für Erstellung und Verwaltung von DT sowie deren Integration mit prototypischen datenbasierten Services und Datenprodukte unter Nutzung der in Abschnitt 2 beschriebenen Datenplattformen auf Seiten der EaaS-Anbieter und -Anwender zu entwickeln. Hierbei galt es, mit DT die Arbeit für beide Seiten einzeln und unternehmensübergreifend zu unterstützen. Im Falle der hier adressierten EaaS-Integration werden die Ansätze und Komponenten aus der Perspektive des Anwenders adressiert, der aufbauend auf der Umsetzung einer Datenplattform mit den Herausforderungen der Verwertung von eigenen und fremden Datenprodukten sowie der Integration übergeordneter Data Hubs und eines zwischenbetrieblichen Datenaustauschs konfrontiert ist.

Im Rahmen des Projektes wurden spezifische (Service-)Komponenten und Datenprodukte implementiert, die zum Aufbau der Datenketten nötig waren, um die erforderlichen Integrationsbereiche zwischen den Partnern zu untersuchen sowie die Funktionen zur Orchestrierung von DT und Services zu testen. Einen Servicebereich stellvertretend für den Bezug von Services Dritter stellt die PCF-Berechnung der einzelnen Betriebsmittel dar, die über weitere Datenprodukte z. B. Schätzung des Energieverbrauchs aus dem simulierten/realen Verhalten für die Bilanzierung der Nutzungsphase, erweitert wurde. Weitere Schwerpunkte bildete die Einbindung datenbasierter Services des EaaS-Anbieters, z. B. des EDAG-DT-Dienstes „FMU-Service“, sowie eigener Handhabungsservices des Anwenders. Wie in Abbildung 1 gezeigt, wurde das Deployment der DP in diesem Fall auf drei Bereiche verteilt (Top-Floor Data Hub beim EaaS-Anbieter sowie Top-Floor- und Shopfloor-Data Hub beim

Anwender). Die Abbildung der DT und deren Orchestrierung (Flow-Mechanismus) in den jeweiligen Umgebungen wurde im SEEBURGER AIM (Asset Information Manager) implementiert, welches in seiner Peripherie u. a. zentrale und lokale Deployments von Kubernetes, MinIO und Keycloak benutzt. Für die Abbildung der DT wurde auf die Verwaltungsschale als Standardformat gesetzt und hierfür auf Seiten der Plattform der AAS-Server der IDTA genutzt. Angelehnt an diesen Standard wurden ebenfalls ein entsprechendes vereinfachtes AAS-kompatibles Datenmodell auf Basis eines eigenen OPC-UA-Servers umgesetzt sowie die Templates und Shapes im DT-Backbone System Thingworx angelegt. Flow-Engine für die lokale Orchestrierung eingebunden wurden. Für letzteres wurden NodeRED sowie eine SEEBURGER-eigene Entwicklung verwendet

Die DP-Architektur wurde mittels DP-Cloud- und DP-Edge-Umgebung in einer Public-Cloud sowie auf zwei lokalen Servern (Karlsruhe und Aachen) aufgebaut. Zwischen diesen Knoten wurde der Zugriffs- und Transfermechanismus des DSP (Dataspace-Protokolls) entsprechend der Tractus-X-Referenzimplementierung (EDC Jupiter Release 0.7.x) umgesetzt, wofür als Dataspace-Layer eigene Software-Komponenten zur Einbindung des EDC, DTR und AAS-Server entwickelt wurden. Im Kontext der Testanwendungen wurde der DSP für den Datenfluss der Benachrichtigungsdienste zwischen den DT-Backbones (Thingworx) erfolgreich verwendet.

4 Prototypische Umsetzung und Anwendung

Im Rahmen des Projekts wurden die entwickelten Technologien in einem Demonstrator implementiert. Dieser stellt ein potentiell modulares EaaS-System, die sogenannte ReStackCell (RC), dar, welche für unterschiedliche Einsatzzwecke mit einzelnen wiederum selbst veränderbaren Betriebsmitteln als wandlungsfähige automatisierte Fertigungszelle konzipiert wurde. Die RC diene als flexible Bearbeitungszelle zur Evaluation der entwickelten Interaktionen und Serviceeinbindungen. Unter vielen virtuellen Kombinationsmöglichkeiten wurden zwei Varianten (RC1 und RC2) in den Laboren des WZL physisch aufgebaut, die mit der teilautomatisierten Montage der Getriebe unterschiedlicher E-Bike-Derivate zwei Anwendungsfälle adressieren. Beide Fertigungszellen verfügen über identische Peripheriekomponenten. Diese Ausstattung ermöglicht die einfache Integration, Ansteuerung und Nutzung neuer Betriebsmittel und die automatisierte Verkettung von Prozessschritten über die Roboterkinematik. Über die Plattform sind beide RCs cloudbasiert vernetzt, sodass DT der Betriebsmittel instanziiert und mit realen Shopfloor-Daten angereichert werden sowie mit den Datenprodukten interagieren können.

4.1 EaaS-Integration über digitale Zwillinge

Im Rahmen des Projekts wurden zentrale Soft- und Hardwarekomponenten des PSS als EaaS-Ansatz realisiert. Dazu zählt unter anderem die Entwicklung einer Grundplatte, die als standardisierte mechanische Schnittstelle (100 mm-Lochraster mit Passbuchsen) für die flexible Aufnahme und präzise Positionierung verschiedener Betriebsmittel dient.

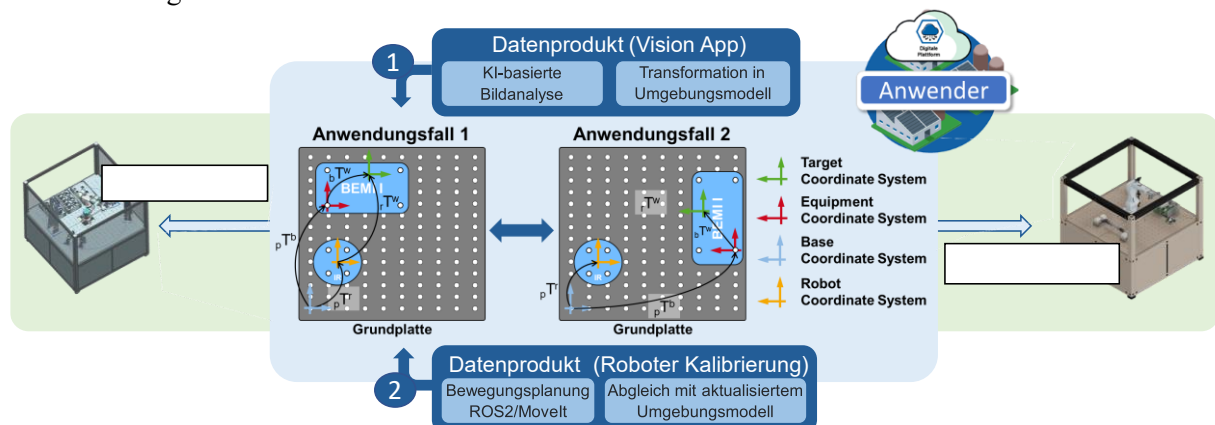


Abbildung 2: Technologiekette zur automatisierten Integration zirkulärer Betriebsmittel

Auf dieser Basis konnten die entwickelten Services für die Zelle angepasst und genutzt werden. Die genaue Position des Betriebsmittels ergibt sich darüber, in welche Passbuchsen dieses montiert wurde. Bei der Neuordnung von Betriebsmitteln oder der Integration eines zusätzlichen Betriebsmittels auf der Plattform können relevante Koordinaten, bspw. zur automatisierten Beladung der Betriebsmittel mit Bauteilen durch einen Roboter, effizient bestimmt werden. Der entsprechende Ablauf ist in Abbildung 2 dargestellt. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung des Zeitaufwands beim Teach-in während der Inbetriebnahme. Die vorgestellte Methode bildet die Grundlage für die präzise Positionierung von Betriebsmitteln und ist essenziell für deren automatisierte Inbetriebnahme sowie eine genaue räumliche Lokalisierung.

Basierend auf dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Ansatz wurde zunächst ein verhaltensbasierter DT für den Pneumatikzylinder der Spannvorrichtung realisiert. Zentrales Element des DT ist hierbei das Verhaltensmodell. Grundlage ist eine erprobte Pneumatikzylinder-FMU der Firma EDAG Production Solutions, die mittels projektspezifischer Parameter angepasst wurde, um das reale Ein- und Ausfahrverhalten präzise zu simulieren. Berücksichtigt werden unter anderem Luftdruck, geometrische Merkmale, technische Details zu den eingesetzten Ventilen sowie externe Kräfte, wie Spannkraften im Rahmen von Montageprozessen. Neben Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung liefert die FMU auch Druckluftkenngrößen, wie den Luftverbrauch. Diese zusätzlichen Informationen des Soll-Zustandes dienen als Grundlage für die zustandsbasierte Überwachung des Betriebsmittels (z. B. zur Identifikation von Leckagen oder erhöhtem Verschleiß). Um den Zustand des realen Zylinders überwachen zu können, ist es notwendig, eine entsprechende Schnittstelle herzustellen. Hier kommt eine OPC-UA-FMU zum Einsatz, welche die Kommunikation mit dem realen Zylinder über das Protokoll OPC UA ermöglicht (siehe Abbildung 3). Übertragen werden steuerungsrelevante Signale wie Ein- und Ausfahrbefehle sowie Sensordaten, wie Luftdurchfluss und Schaltzustand. Zur Synchronisation mit dem DT und zum Ausgleich möglicher Latenzen sind alle Werte mit Zeitstempeln versehen. Innerhalb der SSP wurde die Compare-FMU zwischen der OPC-UA-FMU und der Pneumatikzylinder-FMU eingebunden (siehe Abbildung 3). Damit wird das Soll-Verhalten der Pneumatikzylinder-FMU fortlaufend mit den Ist-Daten der realen Komponente aus der OPC-UA-FMU verglichen. Selbst geringe Abweichungen zwischen dem erwarteten, modellbasierten Soll-Verhalten und dem tatsächlichen Ist-Verhalten des realen Zylinders können so sicher erkannt und ausgegeben werden. Somit bildet die Compare-FMU die Basis zur Anomalieerkennung und zustandsbasierten Bewertung des Betriebsmittels. Zur laufenden Validierung der FMUs sowie zur Simulation der finalen SSP wurde der iSILOG.Connect FMU-Co-Simulator der EDAG Production Solutions eingesetzt, welcher auf dem FMI-Standard basiert. Als Co-Simulationsumgebung ermöglicht er die koordinierte Ausführung mehrerer gekoppelter FMUs innerhalb der SSP (siehe Abbildung 3).

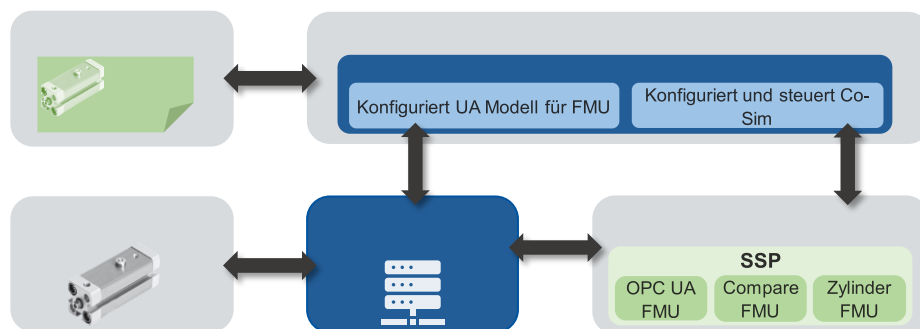


Abbildung 3: Aufbau der FMU Co-Simulation und Integration in die DP Edge

4.2 Integrierte Anwendung und Ergebnisse

Zur Validierung der entwickelten Technologien wurden die beiden Anwendungsfälle zwischen RC1 und RC2 getauscht und im Rahmen einer Fachmesse der Öffentlichkeit präsentiert. Ziel war, die Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit der Plattformarchitektur unter realen Bedingungen zu

erproben und zu demonstrieren. Schließlich sollten durch die Validierung weitere Potenziale identifiziert werden, welche zu einer weiteren Optimierung des Konzeptes Plug-&-Produce für DT wie auch Services beitragen. Die Komponenten der DP zeigten einen hohen Wiederverwendungsgrad und konnten zügig in den einzelnen Zellen eingebunden werden.

In Bezug auf die Einbindung des FMU-Services konnte eine nahezu vollständige Automatisierung gezeigt werden, vom gezippten File bis hin zur Konfiguration, Synchronisation und Start des Überwachungsdienstes (FMU-Service). Die schnelle und unkomplizierte Erweiterung des Funktionsumfangs unterstreicht die hohe Flexibilität und Modularität der zugrunde liegenden Plattform-Funktionen und zeigt die Möglichkeiten aber auch Notwendigkeit der Absicherung multilateraler Datenketten innerhalb und außerhalb des Unternehmens. Im Zuge der durchgeführten Validierung wurden zudem weitere Optimierungs- und Weiterentwicklungspotenziale identifiziert. Aus Hardware-bezogener Sicht wäre eine standardisierte mechanische Schnittstelle für Betriebsmittel, welche neben der mechanischen Verbindung auch die Anschlüsse für Energie- und Signalübertragung umfasst, wünschenswert, um den Austauschprozess und die Integration der Betriebsmittel deutlich zu beschleunigen. Ferner würde die Ausstattung der Betriebsmittel mit eigener Ansteuerungslogik und ggf. integrierten Energieleitelementen (z. B. Schaltventilen) deren Autonomie erhöhen, wodurch sie unabhängig agieren und nicht an bestimmte Steuerungssysteme (z. B. Linux vs. Windows, SPS-Hersteller oder Bussysteme) gebunden wären.

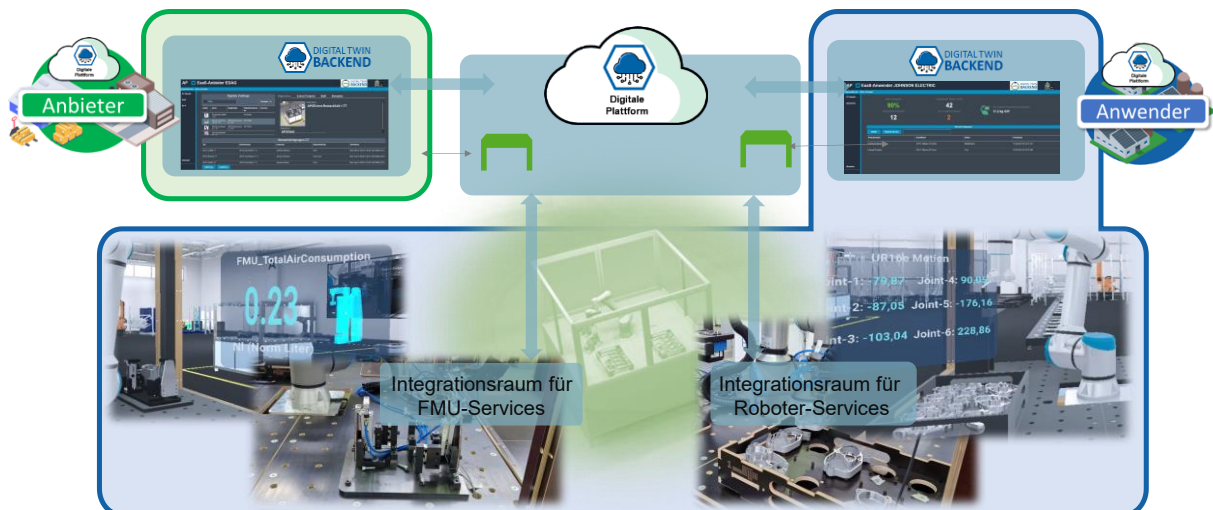


Abbildung 4: Übersicht des Cloud & Edge Integration Workspace

Im Rahmen der Manufacturing-X Initiativen müssen Konzepte für eine weitere Standardisierung von Shopfloor-nahen Datenräumen in der Produktion entwickelt werden, die eine effizientere horizontale Verkettung von „komplexeren“ DT im B2B direkt in den dezentralen Knoten ermöglichen. Ferner muss der Platformeinsatz auch im Kontext zur Bereitstellung und Verwaltung des Digitalen Produktpasses (DPP) in Verbindung mit EaaS-Angeboten untersucht werden, insbesondere wenn gerade im Maschinen- und Anlagenbau unterschiedliche branchenbezogene Datenräume bedient werden müssen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

AutoPilot zeigt, dass modulare, kreislauffähige Ausrüstung kombiniert mit DT und einem EaaS-Modell die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Automobilproduktion nachhaltig erhöht und zirkuläre Produktionssysteme ermöglichen. Künftige Arbeiten werden die Produktionsplattform ReStackCell erweitern und zusätzliche Funktionalitäten einbringen, welche Montage, sowie Integrationsaufwände der Betriebsmittel reduzieren, welche die ökonomische Effizienz von EaaS weiter verbessert. Nach dem Projekt sind erste Industrie-Piloten geplant, um Skalierbarkeit und ROI unter realen Bedingungen zu validieren. Hierzu werden aktuell interessierte Unternehmen und Partner gesucht.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts AutoPilot durchgeführt, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02J21E000 gefördert wird.

Literaturverzeichnis

Bitkom (2023) *Manufacturing-X – Industrie 4.0 Datenraum: Etablierung eines selbstbestimmten Datenökosystems für die Industrie 4.0*. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-12/081222Manufacturing-XPositionBitkomUpdate.pdf> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Blanke, P., Blondrath, A., Petrovic, O., Riesener, M. and Herfs, W. (2024) *Sustainable production with circular equipment: Opportunities and challenges in practice*, in Dröder, K. and Vietor, T. (eds.) *Circularity Days 2024, Proceedings (FAPC & Werkstoffsymposium)*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 217–228. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8>.

Catena-X (2025) *Catena-X-Website*. Verfügbar unter: <https://catena-x.net> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Diamond (2025) *Diamond-Website*. Verfügbar unter: <https://diamond-project.de/> (Zugriff: 11. Juni 2025).

European Commission (2022) *European Commission-Website*. Verfügbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Factory-X (2025) *Factory-X-Website*. Verfügbar unter: <https://factory-x.org/de/> (Zugriff: 11. Juni 2025).

IBM (2021) *IBM-Website*. Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Otto, B., ten Hompel, M., Wrobel, S. (2022) *Designing Data Spaces*. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5>

Schleipen, M., Schubert, V., Dzidic, S., Penner, D., Spieckermann, S. (2022). *A modeling approach for integration and contextualization of simulation-based digital services in IIoT*. In *Proceedings of the 12th International Conference on the Internet of Things (IoT '22)*, November 07–10, 2022, Delft, Netherlands. ACM, New York, NY, USA, 6 pages. Doi: <https://doi.org/10.1145/3567445.3571109>

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D. (2021) *Digital Twin: Origin to Future*. doi: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

Wang, K., Costanza-van den Belt, M., Heath, G., Walzberg, T., Curtis, J., Barrie, J., Schröder, P., Lazer, C. and Altamirano, J. (2022) *Circular economy as a climate strategy: current knowledge and calls-to-action*. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. doi: <https://doi.org/10.2172/1897625>.

Wilson, F., Hurley, R., Maxwell, D., McLellan, J. and Beverley, J. (2024) *Foundations for Digital Twins*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.00960>.

Rehman, H., Chaplin, J.C., Zarzycki, L., Jones, M. and Ratchev, S. (2025) ‘A level-based classification of technical enablers for the realisation of self-configuration in production systems’, in Cheng, K., Russell, D.W., Shunmugam, M.S. und Lazoğlu, I. (eds.) *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London: Springer-Verlag, S. 1883–1904. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15651-3>.

Global Growth Insights (2024) *Global Growth Insights-Website*. Verfügbar unter: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/virtual-commissioning-market-100970> (Zugriff: 11. Juni 2025).

AIMEN Shell Toolkit (2024) *AIMEN Shell Toolkit-Website*. Verfügbar unter: <https://www.aimen-shell-toolkit.com/blog/post/what-is-asset-administration-shell> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Eclipse Foundation (2024) *Eclipse Foundation-Website*. Verfügbar unter: <https://projects.eclipse.org/projects/automotive.tractusx> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Eclipse Foundation AASX (2024) *Eclipse Foundation-Website*. Verfügbar unter: <https://projects.eclipse.org/projects/dt.aaspe> (Zugriff: 11. Juni 2025).

Sind Daten und KI tatsächlich der Schlüssel zu nachhaltiger Mobilität?

M. Böttger¹, T. Günther², R. Herzog³, T. Hilgert², M. Kagerbauer⁵, A. Kuhn⁴, B. Leferink¹, T. Plöger¹,
B. Schönauer⁴, P. Tulodetzki⁵, Th. Usländer³, G. Wilkes⁵, U. Zeltmann³, D. Ziegler⁴, J. Ziehn³

¹raumobil GmbH, Karlsruhe, Deutschland

²INOVAPLAN GmbH, Karlsruhe, Deutschland

³Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Deutschland

⁴INIT GmbH, Karlsruhe, Deutschland

⁵Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen, Karlsruhe, Deutschland

Abstract. Das 2025 abgeschlossene Forschungsprojekt DAKIMO setzte sich zum Ziel, nachhaltige und intermodale Mobilität mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) attraktiver und nahtloser zu gestalten. Auf Grundlage einer Förderung durch das BMFTR wurde unter anderem eine KI-basierte Prognose von Sharing-Verfügbarkeiten entwickelt, der internationale GBFS-Standard um entsprechende Prognosetauglichkeit erweitert, sowie datenschutzsichere Methoden zur Verkehrsdatenerhebung und ein wesentlich fundierteres Verständnis über Wettereinflüsse auf Mobilität erarbeitet. Die Publikation gibt Einblick in die Projektarbeiten und Ansätze, zentrale Ergebnisse, sowie einen Ausblick auf die weiterführende Nutzung der Ergebnisse.

Keywords: *KI, intermodale Mobilität, Sharing, Daten, GBFS*

1 Einleitung

Das 2021 gestartete, und 2025 abgeschlossene Forschungsprojekt DAKIMO¹ („Daten und KI als Befähiger für nachhaltige, intermodale Mobilität“) setzte sich zum Ziel, nachhaltige und intermodale Mobilität mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) attraktiver und nahtloser zu gestalten. Im BMFTR-geförderten Projekt arbeiten die Karlsruher Einrichtungen Fraunhofer IOSB, raumobil GmbH, INIT GmbH, INOVAPLAN GmbH, Institut für Verkehrswesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und KVV zusammen, um über vielfältige Daten von Mobilitätsnutzenden, Kommunen und Verkehrsbetrieben und deren intelligenter Fusion neue und bessere Mobilitätsdienste anzubieten, die Menschen zuverlässig, bequem, flexibel und nachhaltig als Ziel bringen.

2 Hintergrund und Motivation

Die Transformation der Mobilität bietet erhebliche Potentiale zur Verbindung von Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Umweltfreundlichkeit und Individualität. Voraussetzung für deren umfassende Nutzung ist jedoch, die Komplexität aus Angeboten sowie gesellschaftlichen Bedürfnissen handhabbar zu machen.

¹ <https://www.kamo.one/dakimo/>

Dabei steht insbesondere „intermodale Mobilität“ im Fokus, also der Wechsel unterschiedlicher Verkehrsmittel während derselben Verbindung – konkret beispielsweise, einen Teil der Strecke mit Sharing-Fahrrädern zurückzulegen, einen anderen Teil mit Bus oder Bahn. Durch die intelligente Kombination von Verkehrsträgern kann die Erreichbarkeit vergrößert werden und der Komfort bei gleichbleibender Infrastruktur wird optimiert. Die Voraussetzung dafür aber ist, dass die Komplexität dieser Mobilität beherrscht werden kann: Insbesondere, wenn Leihfahrrad oder E-Scooter mit Bus und Bahn kombiniert werden, ergeben sich astronomisch viele denkbare Kombinationen von Fahrzeiten und Haltestellen für den Umstieg. Was davon „die beste Verbindung“ ist, ist wenig offensichtlich – und nichts, was typische Nutzerinnen und Nutzer für jede Verbindung herausuchen möchten. Hinzu kommt der Umgang mit Unsicherheiten und externen Faktoren: Wird in 40 Minuten an der Zielhaltestelle noch ein E-Scooter verfügbar sein? Wie wahrscheinlich gelingt der Umstieg? Und wird es vielleicht dann anfangen zu regnen?

Ein wesentlicher Grund, wieso ein eigenes Auto immer noch als Universalverkehrsmittel genutzt wird, ist, dass sich viele dieser Komplexitäten und Unsicherheiten für Pkw nicht stellen. Gleichzeitig schadet es der Akzeptanz des Automobils, dem verfügbaren Verkehrs- und Parkraum, ebenso wie der Umwelt, wenn es nicht nur für die Verbindungen genutzt wird, wo es objektiv überlegen oder sogar alternativlos ist, sondern für jegliche Wege, vom ländlichen Raum bis hinein in die Innenstadtgebiete.

Soll andererseits die Gesellschaft intermodale, nachhaltigere Mobilitätslösungen nutzen, so muss die Nutzung einer intermodalen Verbindungskette (wie z.B. die Kombination von (Leih-)Fahrrad, ÖPNV und E-Scooter) mindestens genauso einfach sein, wie der Griff zum eigenen Autoschlüssel. Dabei müssen auch Rahmenbedingungen, wie beispielsweise der Einfluss von Wetter auf die individuelle Verkehrsmittelwahl, berücksichtigt werden.

3 Projektansatz

Ein wesentlicher Anknüpfungspunkt des Projekts DAKIMO war es, die regiomove-App des Karlsruher Verkehrsverbunds KVV auszubauen. Die Partner untersuchten dafür, wie das Potential bereits verfügbarer Daten etwa aus Apps, ÖPNV-Betrieb sowie Verkehrs- und Wettervorhersage ausgeschöpft werden kann, um Anwenderinnen und Anwendern passgenaue Vorschläge für Verkehrsmittel zu machen, die optimal zu ihren Bedürfnissen und ihrer Route passen, Dienstleistungen zu verbessern und Nutzungshürden nachhaltiger Verkehrsmittel abzubauen.

Das Potential des Ansatzes lag insbesondere in der Harmonisierung der laufenden Aktivitäten im Bereich Mobilitätsdatenräume mit der Vernetzung und Automatisierung und den individuellen Mobilitäts- und Informationsangeboten. Das ermöglicht, daraus über ein KI-gestütztes Daten-Ökosystem ein neues Verständnis für Mobilität zu entwickeln, das die Mobilitätswende befördert und Herstellern, Betreibern und Dienstleistern die Möglichkeit bietet, Potentiale schneller und genauer zu verstehen und somit nachhaltig erfolgreiche Angebote zu gestalten.

Auf diesem Wege soll das zugrundeliegende Forschungsziel erreicht werden, die Möglichkeiten von KI-basierter Datenauswertung im Mobilitätsanwendungsfall systematisch zu analysieren sowie Verfahren und Architekturen methodisch zu entwickeln. Ihre Eignung wird fundiert am realen Anwendungsfall evaluiert, um die Zukunftspotentiale des Projektansatzes zu bewerten (Böttger, et al., 2023).

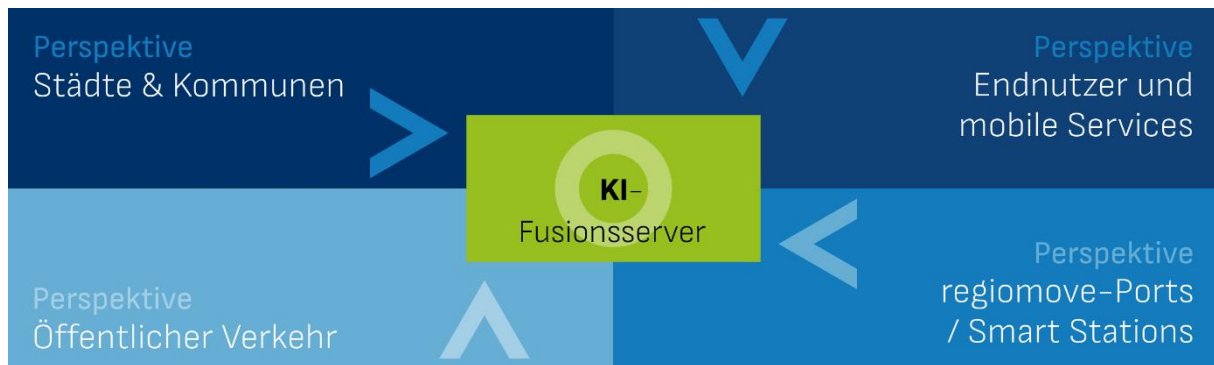


Abbildung 1: Überblick über die Perspektiven und Arbeitspunkte des Projekts.

Das Projekt legt dabei den Ansatz zugrunde, dass unterschiedliche Perspektiven sowohl Daten einbringen als auch mit Anwendungsfällen von einer Interpretation aller Daten profitieren können. Zu diesen Perspektiven zählt das Projekt Städte und Kommunen; den öffentlichen Verkehrsbetrieb; die Nutzung intelligenter, vernetzter Haltestellen (sogenannte „Smart Stations“); und schließlich Endnutzerinnen und Endnutzer, insbesondere durch deren Nutzung mobiler Services und Routing-Apps.

Diese Perspektiven wurden verbunden über den KI-Fusionsserver, der die unterschiedlichen Datenquellen und Modelle nutzt, sie über künstliche Intelligenz zusammenführt, interpretiert, und damit für heterogene Anwendungen nutzbar macht.

4 Zentrale Arbeitspunkte

Zentrale Arbeitspunkte des Projekts, die in den jeweiligen Perspektiven verfolgt wurden, sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

4.1 Städte und Kommunen

Hier wurden heterogene Daten über Verkehrszählstellen und Verkehrsbefragungen integriert, die die Variabilität des Verkehrsaufkommens nach verschiedenen Faktoren darstellen konnten. Insbesondere von Interesse war der Anwendungsfall, wetterabhängige Verkehrsplanung bei Kommunen zu unterstützen. Dazu wurde detailliert analysiert, inwieweit Wetterfaktoren wie Temperatur und Niederschlag, sowie etwa Jahreszeiten und Urlaubsphasen, das Mobilitätsverhalten beeinflussen, und wie Sonderereignisse wie Stadtfeste und Fußballspiele in die Modellierung aufgenommen werden können.

4.2 Öffentlicher Verkehr

Im Bereich des öffentlichen Verkehrsbetriebs lag ein Schwerpunkt auf der zuverlässigen Prognose von Auslastungszahlen von Straßen- und Schienenfahrzeugen. Hierzu wurden umfangreiche Auslastungsdaten des KVV genutzt, sowie externe Faktoren wie Witterung und Sonderereignisse einbezogen, um über maschinelles Lernen zu analysieren, wie sich Belegungsgrade von Fahrzeugen prognostizieren lassen. Die entwickelten Lösungen sollen insbesondere eine zuverlässigere und bedarfsangepasste Disposition ermöglichen.

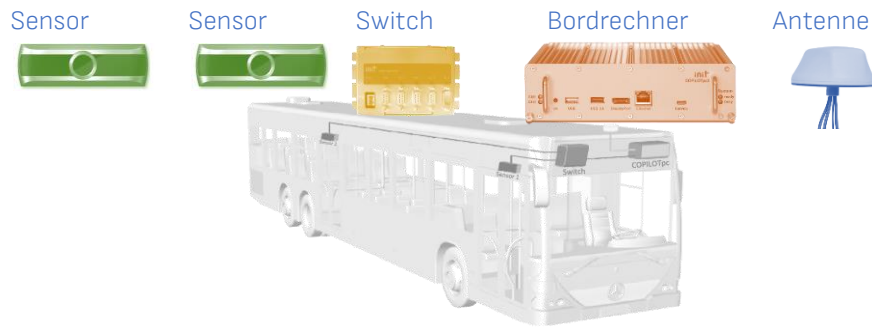


Abbildung 2: Eine umfassende Sensorikausstattung der Fahrzeuge, bereitgestellt durch INIT, ermöglicht die datenschutzsichere Erhebung von Fahrstrecken und Verkehrslasten.

4.3 Smart Stations

Bis Mitte 2022 wurden in insgesamt sieben Gemeinden im Betriebsgebiet des KVV Haltestellen zu sogenannten „regiomove-Ports“ umgebaut. Dabei handelt es sich um umfassend überarbeitete Haltestellen, die den Wechsel zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln so einfach wie möglich gestalten sollen. Am dargestellten Bahnhof Hagsfeld beispielsweise kann zwischen Straßenbahn, Eisenbahn und Bikesharing umgestiegen werden kann. Farblich gekennzeichnete Stationen weisen auf Mobilitäts- und Informationsangebote hin, etwa Bikesharing, ÖPNV oder Parken, sowie Reparaturstationen für Fahrräder, Schließfächer. Große Touch-Informationssysteme binden die ÖPNV-App KVV.regiomove an, und vermitteln multi- und künftig intermodale Verbindungen für Reisende.



Abbildung 3: Der regiomove-Port am Bahnhof Ettlingen.

Um Nutzungsformen und -bedarfe besser zu verstehen, und die Nutzung dieser Haltestellen zu optimieren, wurde im Projekt der regiomove-Port am Bahnhof Ettlingen, südlich von Karlsruhe, mit Sensorik ausgerüstet, um Umstiegsbewegungen von Mobilitätsnutzenden zu erfassen. Dabei stand insbesondere der Datenschutz im Vordergrund: Eine Erfassung nach DIN EN 62676-4, bei der Personen mit größer als 16 mm je Pixel aufgelöst werden, schließt standardkonform eine Identifizierung aus. Die Daten werden über eine gesicherte Verbindung übertragen, in Echtzeit prozessiert und direkt in anonyme Positions- und Bewegungsdaten umgerechnet. Um die KI datenschutzsicher für die Erkennung von Personen zu trainieren, wurde insbesondere auf die Nutzung synthetischer Daten aus Simulationen gesetzt.

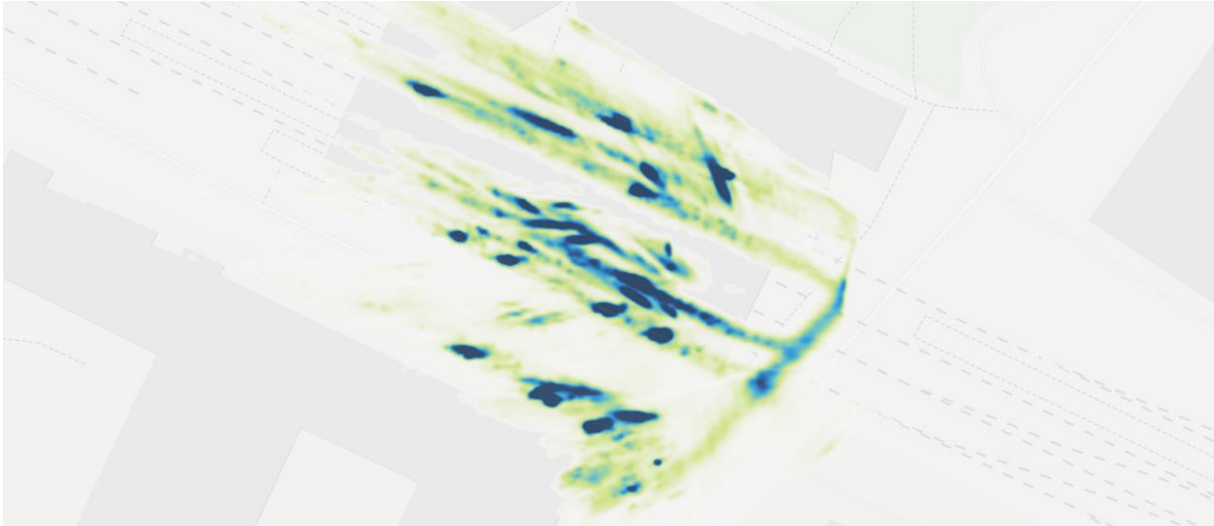


Abbildung 4: Stark frequentierte Wege und Aufenthaltsorte am Bahnhof Ettlingen, die mit der datenschutzsicheren Videodatenerhebung sichtbar gemacht werden.

4.4 Endnutzerinnen und Endnutzer

In Bezug auf die Anbindung von Endnutzerinnen und Endnutzer über mobile Services wurde einerseits die anonyme Nutzung von Verbindungsanfragen behandelt, und andererseits insbesondere entwickelt, wie intermodales Routing für Nutzenden akzeptabel und niederschwellig realisiert werden kann. Dazu zählt einerseits die Weiterentwicklung von intermodalen Routing-Anwendungen, die in der Weiterentwicklung des GBFS-Standards mündeten (wie im Absch. 5.1 dargestellt), aber auch die Erarbeitung von Lösungen in Bezug auf nachvollziehbare Mensch-KI-Schnittstellen und die Evaluation der Nutzungsakzeptanz. Dazu zählte unter anderem die Evaluation, wie Prognoseunsicherheiten der KI (beispielsweise, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Sharing-Fahrrad zukünftig an einem möglichen Umstiegspunkt verfügbar sein wird) dargestellt werden sollten, um schnell verständlich zu sein. Varianten von Ampeln über Prozentangaben bis zu erwarteten Anzahlen von Fahrrädern wurden in unterschiedlichen Studiensetups evaluiert und verglichen (Wilkes, et al., 2024).

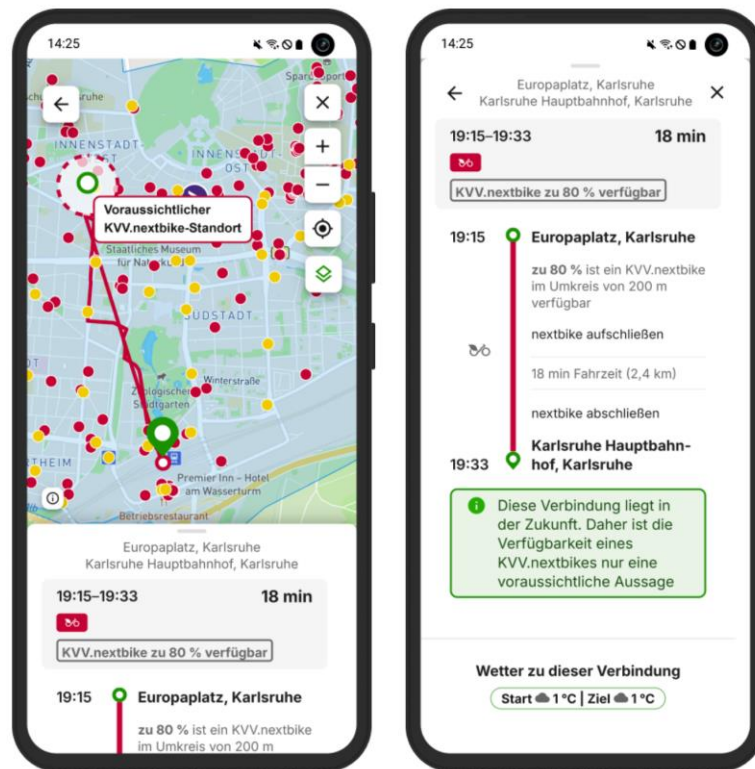


Abbildung 5: Entwickeltes Mensch-KI-Interaktionskonzept für Bikesharing-Verfügbarkeitsprognosen in der mobilen KVV.regiomove-App. Nutzende erhalten eine prozentuale Angabe der Verfügbarkeitswahrscheinlichkeit eines Fahrrads.

4.5 KI-Fusionsserver

Für die Umsetzung des KI-Fusionsservers wurden unterschiedliche technologische Ansätze evaluiert, von Expertenmodellen bis zu Deep-Learning und dem Potential großer Sprachmodelle. Wesentlich bei den Anwendungen war aber, analog zum Projektziel, nicht die universellste und aufwendigste Realisierung zu wählen, sondern im Sinne von Effizienz und Skalierbarkeit ein Verfahren zu implementieren, das mit geringen Datenmengen und begrenzten Rechenressourcen beispielsweise von einer Kommune in Betrieb genommen werden kann und dennoch eine hohe Qualität von Prognosen ermöglicht.

Schwerpunkt war dabei insbesondere die Prognose der Verfügbarkeit von Sharing-Verkehrsmitteln wie E-Scootern, Leihfahrrädern aber auch geteilten Pkw. Dazu wurde ein maschinelles Lernverfahren entwickelt, das zeitlich und räumlich fein aufgelöste, wochenperiodische Wahrscheinlichkeiten für die Verfügbarkeit der Sharing-Verkehrsmittel wiedergibt.

Als Datengrundlage dienten die während der Projektlaufzeit vom Karlsruher Anbieter KVV.nextbike veröffentlichten Standorte freier Leihfahrräder. Räumlich diskretisiert wurde das Stadtgebiet dabei in ein Netz polygonaler Zellen, das Information über Nachbarschaft von Zellen hinsichtlich fußläufiger Erreichbarkeit trägt. Auf diese Weise ist es möglich, die Entfernung abzuschätzen, die ein Fußgänger zurücklegen muss, um etwa zum nächsten freien Leihfahrrad zu gelangen.



Abbildung 6: Prognose der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Sharing-Fahrrädern für einen gegebenen Zeitpunkt (Montag, 18:00) im Karlsruher Stadtgebiet. Unten in der Mitte befindet sich der Karlsruher Zoo.

5 Kernergebnisse und Ausblick

5.1 GBFS-Standard

Um den Transfer der Ergebnisse in die Breite zu tragen, und zu ermöglichen, dass KI-basierte Prognosen – wie in DAKIMO entwickelt – zukünftig standardkonform in Routenplanungs-Apps genutzt werden können, hat sich der Partner raumobil GmbH für die Weiterentwicklung des GBFS-Standards² (General Bikeshare Feed Specification) eingesetzt, über den bereits heute die meisten Sharing-Anbieter die Position von Fahrzeugen kommunizieren. Die eingebrachte Erweiterung sieht die Ergänzung um Prognosen für zukünftige Verfügbarkeiten voraus. Anfang März wurde im internationalen Verbund MobilityData die Abstimmung zur (optionalen) Erweiterung des GBFS-Standards um den entsprechenden Vorschlag beendet, und von der Community akzeptiert. Dadurch werden prognostizierte Verfügbarkeiten mit dem aktuellen GBFS-Release 3.1 vom Mai 2025 umsetzbar. Diese Erweiterung des Standards ermöglicht es insbesondere, die im DAKIMO-Projekt entwickelte KI-Prognose für Verfügbarkeiten in Standard-Software für Routing einzusetzen und ebnet den Weg für die Einführung menschenzentrierter KI für nachhaltige Mobilität.

5.2 Datenschutzsichere Verkehrsdatenerhebung

Die Erhebung von Verkehrsdaten im öffentlichen Raum unterliegt zurecht strengen Einschränkungen durch die europäische Datenschutzgrundverordnung (DSGVO). Die Entwicklung von Verfahren, die eine zuverlässige Erkennung von Verkehrsteilnehmenden trotz datenschutzsicherer sehr niedriger Videoauflösung ermöglichen, und somit konform mit DIN EN 62676-4 sind, ebnet den Weg für die skalierbare und sichere Erhebung von Verkehrsdaten im öffentlichen Raum. Das soll einerseits einem besseren Verständnis von Bedarfen dienen, wie im DAKIMO-Projekt; andererseits wird bereits aufbauend mit der Stadt Freiburg eine Erhebung entsprechender Daten an Unfallschwerpunkten diskutiert, um diese durch geeignete Maßnahmen sicherer zu gestalten. Dazu hat das Fraunhofer IOSB einen internen Datenschutzleitfaden entwickelt, der für künftige Projekte im öffentlichen Raum als Grundlage herangezogen wird, und durch die Entwicklung des Standards DIN SAE SPEC 91518, in

² <https://github.com/MobilityData/gbfs>

Kooperation mit dem zeitgleichen AVEAS-Projekt³, eine Grundlage geschaffen, um reichhaltige Verkehrsdaten für unterschiedlichste Anwendungen auszutauschen, ohne Personenbezug zu erfordern.

Das installierte System in Ettlingen soll im Rahmen des Leistungszentrums KAMO: Karlsruhe Mobility weiterbetrieben werden und über den Projektrahmen hinaus Forschungsdaten für interessierte Anwender bereitstellen.

5.3 Verständnis von Wettersensitivität

Umfassende Analysen in Bezug auf die Wettersensitivität von Verkehrsverhalten haben ein wesentlich differenzierteres Bild der damit verbundenen Phänomene ergeben. Während im Allgemeinen erwartbare Trends quantitativ bestätigt wurden, beispielsweise einen Rückgang von Radverkehr bei kaltem und nassem Wetter, haben sich andere Annahmen trotz unterschiedlicher Analyseansätze nicht bestätigt – darunter die Frage, inwieweit nasses oder kaltes Wetter zu einer Erhöhung der ÖPNV-Auslastung führt (Tulodetzki, et al., 2024), (Tulodetzki, et al., 2024).

Hier haben die im Projekt entwickelten Analysen, und die veröffentlichten Studien, einen wesentlichen Beitrag dazu geleistet, ein quantitatives Verständnis der Effekte zu schaffen, das in Weiterentwicklungen von Verkehrsmodellen einfließen soll.

5.4 KI-Fusionsserver

Der KI-Fusionsserver wurde befähigt, intermodales Routing durch Prognosen von Sharing-Verfügbarkeiten zu unterstützen, und Pilotbetriebe im Karlsruher Umfeld bestätigen, ebenso wie Studienergebnisse zur Akzeptanz (s. Abschn. 6), die Wirksamkeit der entwickelten Verfahren. Zum Beitragszeitpunkt wird eine Übertragung der entwickelten Lösungen an die Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg (NVBW) geprüft, die entsprechend den Weiterbetrieb des Fusionsservers und die dauerhafte Bereitstellung für intermodales Routing ermöglichen soll. Weiterhin werden Übertragungen auf Regionen außerhalb von Baden-Württemberg in aufbauenden Aktivitäten angestrebt.

5.5 Akzeptanz bei Endnutzenden

Zur Bewertung der allgemeinen Akzeptanz und damit Anwendbarkeit der Ergebnisse, wurde durch raumobil, KIT und Fraunhofer IOSB eine Studie über $n = 1500$ Personen durchgeführt. Im Rahmen der Studie wurde das Mobilitätsverhalten erhoben und insbesondere ermittelt, inwieweit KI-basierte Prognosen von Sharing-Verfügbarkeiten intermodale Mobilität tatsächlich „befähigen“, also Nutzungshürden deutlich reduzieren, wie im Projektziel festgelegt.

³ www.avaeas.org

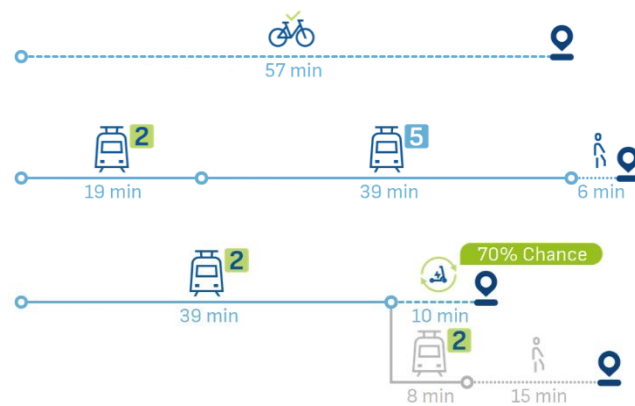


Abbildung 7: Beispiele für Routenoptionen, die im Rahmen der Befragung vorgeschlagen wurden: Der Weg mit dem eigenen Fahrrad, eine lange Bahnstrecke mit Umstieg zur Minimierung des Fußwegs, oder eine mit Unsicherheiten behaftete intermodale Option, wobei hier jeweils angegeben wird, welcher Alternativweg verfügbar ist. Im Beispiel: Eine Weiterfahrt um einige Haltestellen, wenn kein E-Scooter mehr verfügbar ist.

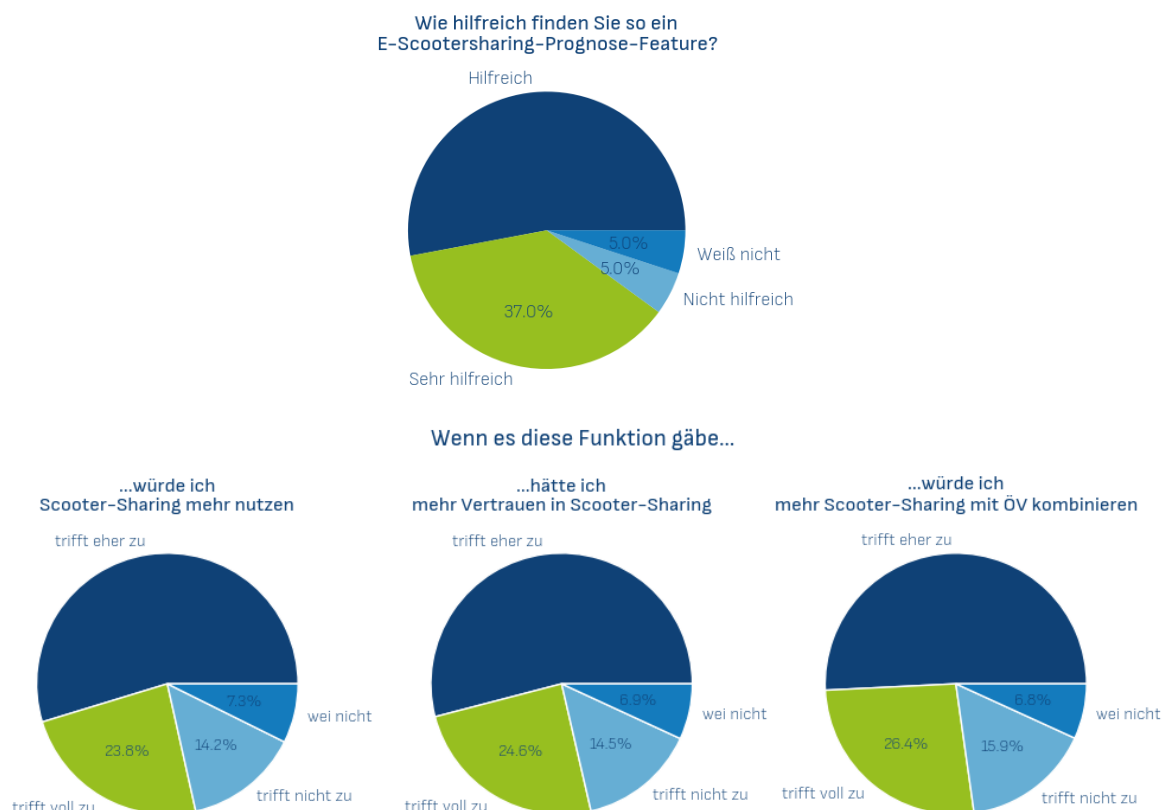


Abbildung 8: Auszüge aus den Studienergebnissen, die eine sehr überwiegende Akzeptanz zeigen.

Dazu wurde Befragten unter anderem eine Auswahl unterschiedlicher Verbindungswege vorgestellt, die mit realistischen Daten modellbasiert errechnet worden waren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Befragten zum allergrößten Anteil das Prognosefeature hilfreich oder sehr hilfreich finden. Die intermodale Option war unter jeweils insgesamt vier Optionen stets entweder die beliebteste oder die zweitbeliebteste Option. Auch wenn die Studie nicht als repräsentativ angelegt war, deuten die Ergebnisse an, dass sowohl Bedarf als auch Bereitschaft für die Nutzung bestehen.

6 Fazit

Die Ergebnisse des Projekts, die detailliert im Open-Access-Abschlussbericht dokumentiert sind, zeigen einerseits, dass KI und Daten dem gesetzten Anspruch gerecht werden können, Befähiger für nachhaltige, intermodale Mobilität zu sein. Ein KI-Fusionsserver, der Daten aus unterschiedlichen Perspektiven fusionieren kann, und die Ergebnisse für Mobilitätsanwendungen bereitstellt, wurde erfolgreich umgesetzt und im Live-Betrieb evaluiert. Eine aufbauende Studie unter 1500 Befragten belegt eine hohe Akzeptanz der entwickelten Lösungen und eine hohe Nutzungsbereitschaft, auch in teilweise sehr herausfordernden abgefragten Anwendungsfällen wie langen Wegen oder geringen Verfügbarkeitswahrscheinlichkeiten. Die Studie zeigt auch, dass die entwickelten Ansätze zur Mensch-KI-Interaktion effektiv die Nachvollziehbarkeit abstrakter KI-Resultate erreichen. Verfahren zur datenschutzsicheren Erhebung und Verarbeitung von den benötigten Daten wurden umgesetzt, und dank erheblichen Beiträgen zur Standardisierung, insbesondere zur Weiterentwicklung des GBFS-Standards, können die Ergebnisse künftig in einem weiteren nationalen und internationalen Umfeld verwertet werden.

Gleichwohl hat das Projekt auch offengelegt, dass erhebliche Herausforderungen in Bezug auf die Verfügbarkeit und Interpretation von Mobilitätsdaten verbleiben, und dass ein wesentlich verbessertes Verständnis notwendig ist, um die komplexen Zusammenhänge so fundiert zu verstehen, dass sich wirksame, akzeptable Mobilitätslösungen daraus gewinnen lassen. Auch hier soll das Projekt mit einer detaillierten Analyse der verbleibenden Herausforderungen dazu beitragen, den Weg für bessere Lösungen zu öffnen und das Verständnis auszubauen.

7 Danksagung

Die Projektpartner bedanken sich für die Förderung des Projekts durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), sowie die vertrauensvolle und intensive Unterstützung durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA), ohne den die hier vorliegende Publikation undenkbar gewesen wäre.

Außerdem danken wir unseren assoziierten Partnern für ihre ausdauernde Unterstützung, darunter insbesondere dem Karlsruher Verkehrsverbund KVV, der Stadt Karlsruhe, der Stadt Ettlingen, dem Zentralen Juristischen Dienst der Stadt Karlsruhe, und der Albtal-Verkehrsgesellschaft AVG.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das BMFTR gefördert und vom PTKA betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

8 Literaturverzeichnis

Böttger, M. et al., 2023. Wie bringen uns Künstliche Intelligenz und Daten nahtlos und nachhaltig ans Ziel?. *KAMO.Magazin*, September, pp. 24-28.

Tulodetzki, P., Wilkes, G., Kagerbauer, M. & Vortisch, P., 2024. *The Impact of Weather on Travel Behavior Throughout the Seasons: An Analysis of Two National German Household Surveys*. Washington D.C., s.n.

Tulodetzki, P., Wilkes, G., Kagerbauer, M. & Vortisch, P., 2024. *Who commutes by bicycle all year round? Analysis of influencing factors based on a survey incorporating weather sensitivity*. Helsinki, s.n.

Wilkes, G. et al., 2024. *Prognose der Verfügbarkeit von Bikesharing-Fahrrädern zur Ermöglichung intermodaler Mobilität*. Stuttgart, s.n.

Nachhaltigkeit beleuchtet – Wie gelingen umweltfreundliche Designs für technologisch hochkomplexe Produkte wie Automobilscheinwerfer?

Felix Siems, Fraunhofer IEM, Paderborn, Deutschland; Ahmet Burak Ertem, Fraunhofer IEM, Paderborn, Deutschland; Stephan Stieren, Fraunhofer IEM, Paderborn; Christian Henke, Fraunhofer IEM, Paderborn und Ansgar Trächtler, Heinz-Nixdorf-Institut, Paderborn

Abstract. This paper presents “Nalyses,” a BMFTR-funded project integrating Life Cycle Assessment (LCA) into the early development of complex mechatronic products, exemplified by a digital twin of a headlamp design and its control unit. By linking LCA software with process and usage data, the project quantifies CO₂ emissions and recycling potential across all life cycle stages (“cradle-to-grave”). Results show that 90 % of the headlamp’s climate impact arises during vehicle use, emphasizing lightweight materials, polymer substitution and energy-efficient electronics. As an outlook, a fully automated toolchain and circular economy strategies are under development to support rapid design iterations and scalable sustainable mobility solutions.

Keywords: *Life Cycle Assessment, Circular Economy, Digital Twin, Automotive Lighting, Sustainable Mobility*

1 Einleitung

1.1 Motivation und Bedarf

Die Automobilindustrie in Deutschland zählt zu den führenden Innovationstreibern und setzt auf die Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme, z. B. moderner LED-Lichtsysteme. Diese übernehmen einerseits Sicherheits- und Komfortfunktionen in Fahrzeugen und prägen andererseits das Design und die Markenidentität. Gleichzeitig steigt in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft das Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz: Mit dem European Green Deal verfolgt die Europäische Union das Ziel, bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen und Wirtschaftswachstum von der Rohstoffnutzung zu entkoppeln (European Commission, Secretariat-General, 2019).

Die Integration einer Lebenszyklusbetrachtung gewinnt vor diesem Hintergrund an Bedeutung. Um die Umweltwirkungen technischer Produkte systematisch zu erfassen und zu steuern, hat sich die Life Cycle Assessment (LCA)-Methodik etabliert. LCA erlaubt die ganzheitliche Quantifizierung von Umweltbelastungen – von der Rohstoffgewinnung über Herstellung und Nutzung bis hin zum Ende-Lebenszyklus inklusive Recycling (Schau, et al., 2011; Azapagic, 1999). Diese Lebenszyklusperspektive deckt ökologische Hotspots auf und schafft belastbare Grundlagen für ressourcenschonende Produktgestaltungen.

Bei Fahrzeugbeleuchtungssystemen ist dieses Vorgehen besonders relevant, da Elektronikkomponenten wie Steuergeräte (ECU) und Leiterplatten (PCBA) wertvolle Metalle (Kupfer, Aluminium, Nickel) sowie kritische Rohstoffe enthalten, deren Förderung und Verarbeitung energie- und emissionsintensiv sind (Boyd, 2012; R. K. Kanth, 2011). Derzeit folgen viele Entwicklungsprozesse noch einer linearen Logik („Take-Make-Waste“), was zu langen Lieferketten, hohem CO₂-Ausstoß und geringen Recyclingquoten führt. Die frühe Einbindung von LCA in die Produktentwicklung ermöglicht hingegen, Designentscheidungen systematisch auf Umweltauswirkungen abzustimmen und zirkuläre Materialströme zu fördern.

1.2 Vorstellung des Projekts Nalyses

Vor diesem Hintergrund hat das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Projekt Nalyses zum Ziel, die Produktentstehungsprozesse der Automobilindustrie konsequent in eine Circular Economy zu überführen. Im Fokus steht ein exemplarischer digitaler Produktzwilling eines Frontscheinwerferdesign. Mithilfe eines datenbasierten Simulationsmodells werden Materialauswahl, Fertigungsprozesse und Nutzungsphasen des Scheinwerfers im Hinblick auf CO₂-Emissionen und Recyclingfähigkeit quantitativ bewertet.

Partner aus Industrie (Hella, BMW, Covestro) und Forschung (Fraunhofer IEM u. a.) entwickeln gemeinsam:

- Ein Simulationsframework, das LCA-Software mit Prozess- und Nutzungsdaten verknüpft.
- Methoden zur frühzeitigen Bewertung von Designvarianten hinsichtlich Umweltleistung und Kreislauffähigkeit.
- Werkzeuge, die etablierte R-Strategien (Reduce, Reuse, Recycle) in den digitalen Entwicklungsprozess integrieren.

So lassen sich schon in der Konzeptphase belastbare Aussagen über den zu erwartenden CO₂-Fußabdruck und die Recyclingquote treffen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen unmittelbar in die Gestaltung künftiger Scheinwerfergenerationen ein und sind auch auf andere Komponenten in der Automobilindustrie und Branchen übertragbar. Zugleich fördert das Projekt den Wissenstransfer über die MobilKreis-Tagung hinaus: Alle Ergebnisse werden durch Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge und weitere Events bereitgestellt und stehen so einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung. Die Übertragbarkeit auf weitere Produktgruppen unterstützt die Ziele des BMFTR-Programms MobilKreis und trägt langfristig zu einer ressourceneffizienten, wettbewerbsfähigen und klimafreundlichen Mobilität bei. Wir danken dem BMFTR und dem Projektträger Karlsruhe (PTKA) für die finanzielle Unterstützung unter dem Förderkennzeichen O2J21E101. Unseren Kooperationspartnern danken wir ebenfalls.

2 Life Cycle Assessment (LCA) im Projekt Nalyses

Im Projekt Nalyses kommt die LCA-Methodik zum Einsatz, um Umweltwirkungen von Automobillichtsystemen ganzheitlich zu erfassen und entlang des gesamten Produktlebenszyklus quantifizierbar zu machen. LCA hat sich seit den ersten Anfängen in den 1960er-Jahren, als es primär zur Analyse von Verpackungsprozessen entwickelt wurde, zu einem international anerkannten und standardisierten Instrument entwickelt (Kaswan, et al., 2020). Mit der Veröffentlichung der ISO-Normen 14040:2006 („Grundlagen und Rahmenwerk“) und 14044:2006 („Anforderungen und Leitlinien“) wurde ein klares methodisches Gerüst geschaffen, das vier aufeinanderfolgende Phasen definiert (Technical Committee ISO/TC 207, 2006; Technical Committee ISO/TC 207, 2006; Matthews, et al., 2014):

- Ziel- und Systemumfang (Goal & Scope)
- Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI)
- Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
- Interpretation und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen

Im Nachfolgenden wird aufgezeigt, wie Nalyses jede dieser Phasen umsetzt und anwendet. Die Stärke von LCA liegt in der systematischen Betrachtung aller Inputs (Rohstoffe, Energie) und Outputs (Emissionen, Abfälle) von der Wiege („Cradle“) bis zur Bahre („Grave“). Nur durch diese Lebenszyklusperspektive lassen sich ökologische Hotspots identifizieren und suboptimale Verlagerungen von Umweltbelastungen zwischen einzelnen Phasen vermeiden (Technical Committee ISO/TC 207, 2006).

2.1 Durchführung der LCA

Zu Beginn des Nalyses-Projekts wurde gemeinsam mit den Industriepartnern Covestro, BMW, Hella und Geba das primäre Ziel definiert: Das LCA soll als datenbasierte Entscheidungsgrundlage für den digitalen Produktzwillling eines Referenzfrontscheinwerfers dienen. Bereits während der Konzept- und Designphase wird ermöglicht, Auswirkungen von Materialauswahl und Konstruktionsentscheidungen auf den CO₂-Fußabdruck und die Kreislauffähigkeit abzuschätzen. Die Ergebnisse fließen in Optimierungsschleifen für Design, Materialsubstitution und Fertigungsprozesse ein.

Als funktionelle Einheit wurde ein einzelner Frontscheinwerfer über eine Fahrzeuglaufleistung von 270 000 km bzw. 5 806 Betriebsstunden festgelegt, basierend auf den Studien (Hill, et al., 2020; WLTPfacts, 2017). Die Systemgrenze umfasst alle relevanten Lebensphasen von „Cradle to Grave“ und wird in ein Foreground- und ein Background-System unterteilt (s. Abbildung 1):

Foreground-System:

- Materialbereitstellung und Komponentenfertigung
- Montage, Verpackung und innerbetriebliche Transporte
- Nutzung (Stromverbrauch der Lichtfunktionen, gewichtsbedingter Mehrverbrauch im Elektrofahrzeug)

Background-System:

- Rohstoffgewinnung und Vormaterialproduktion
- Entsorgung durch thermische Verwertung (100 % Verbrennung ohne Materialrückgewinnung)

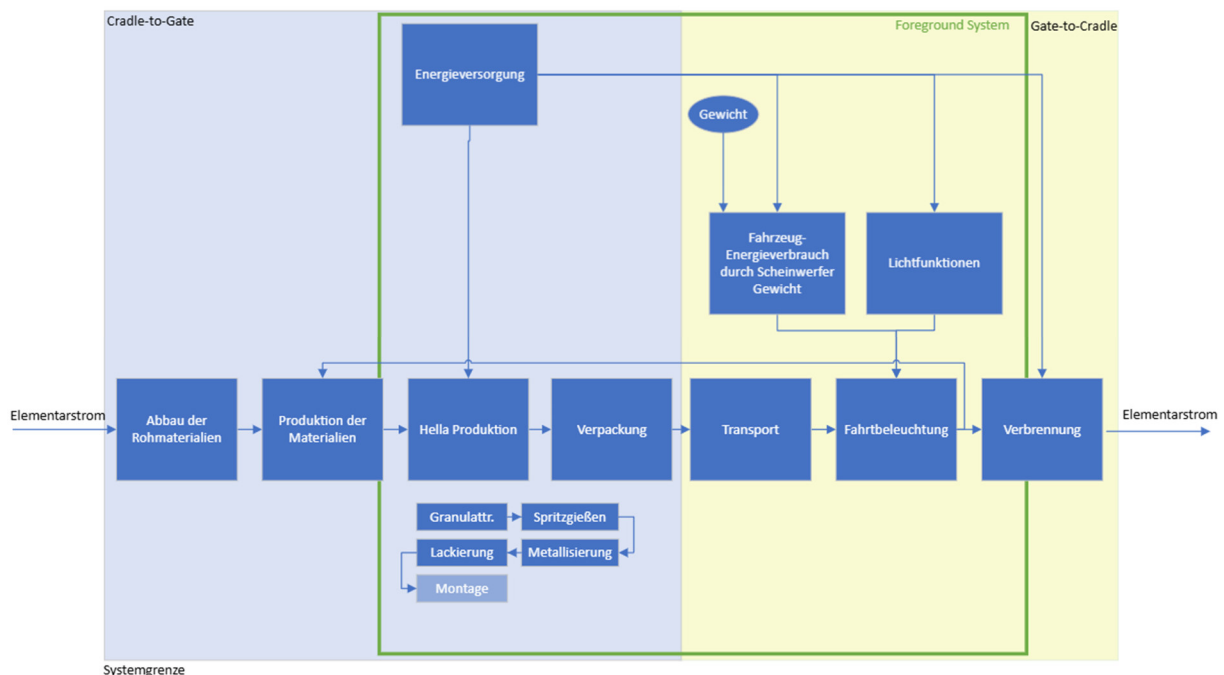


Abbildung 1 Sytemfließbild des Scheinwerfers

Um einen realistischen Wert des Energieverbrauchs der Lichtfunktionen berechnen zu können, wird ein Durchschnittsszenario der Benutzung der einzelnen Lichtfunktionen mit Hilfe eines angenommenen Nutzungsprofils abgeschätzt. So wurde ein repräsentativer Mix aus den verschiedenen Scheinwerferanwendungen (wie beispielsweise Tagfahrlicht, Abblendlicht, Fernlicht, Abbiegelicht) bei wechselnden Umweltgegebenheiten generiert. Laut der Studie von (Kley, 2014) wird das Abblendlicht 47 % der Zeit, das Fernlicht 3 %, das Tagfahrlicht 50 %, der Blinker 4 % und das Positionslicht (PO) 50 % bei einem Autoscheinwerfer verwendet. Zur Begrenzung des Modellaufwands wurden Prozesse mit einem Einzelbeitrag von unter 1 % der Masse bzw. kumulativ unter 5 % ausgeschieden (Frisknecht,

2020). Die Datengrundlage setzt sich zusammen aus primären Unternehmensdaten für Produktion, Material- und Energieverbrauch sowie sekundären Datensätzen aus ecoinvent 3.9.1 – projektspezifisch angepasst. Für Nutzung und End-of-Life kamen regionale Emissionsfaktoren für Europa, Nordamerika und Asien zum Einsatz, um den globalen Absatzmarkt des betrachteten Referenzscheinwerfers abzubilden (Ecoinvent, 2023).

2.2 Ergebnisse der CO₂-Bilanz für den Referenzscheinwerfer

Für die Wirkungsabschätzung wurde das Global Warming Potential (GWP) mit 100-jährigem Zeithorizont gemäß IPCC 2021 gewählt. Die Umrechnung in CO₂-Äquivalente (CO₂e) bildet den zentralen Indikator für die Klimaauswirkung.

Die Analyse ergab einen Gesamt-GWP von 334,7 kg CO₂e pro Scheinwerfer (s. Abbildung 2). Die Verteilung auf die Lebenszyklusphasen zeigt eine deutliche Dominanz der Nutzung (90,1 % bzw. 301,6 kg CO₂e) gegenüber Produktion (8,3 % bzw. 27,7 kg CO₂e). Distribution und Entsorgung spielen mit weniger als 2 % eine untergeordnete Rolle.

In der Produktionsphase entfallen knapp 80 % der CO₂e (22,0 kg) auf die Materialbereitstellung der Einzelkomponenten. Analog dazu sind innerhalb der Nutzungsphase das Tagfahrlicht mit 38,1 % Beitrag und der gewichtsbedingte Mehrverbrauch des Elektrofahrzeugs mit 30,9 % die Hauptverursacher der GWP-Emissionen. Der Zusatzenergiebedarf des Fahrzeugs durch das Mehrgewicht des Scheinwerfers wurde über die Formel

$$E_W = WLTP \cdot L \cdot (m_H / m_{Car})$$

ermittelt, wobei WLTP den Stromverbrauch (kWh/100 km), L die Laufleistung (km) sowie m_H beziehungsweise m_{Car} die Massen des Scheinwerfers und des Fahrzeugs bezeichnen (Galvin, 2022).

Contribution	Process	Total result [kg CO ₂ -Eq]
▼ 100.00%	Headlight	334.69676
▼ 90.10%	Use Phase	301.54691
> 38.06%	Tagfahrlicht	127.39563
> 30.95%	Gewichtsbedingter Energieverbrauch	103.59533
> 11.63%	Abblendlicht	38.91937
> 05.71%	PO	19.10935
> 02.78%	Fernlicht	9.29988
> 00.96%	Blinker	3.22736
> 08.28%	Production Phase	27.70656
> 01.07%	EoL Phase	3.59359
> 00.55%	Distribution Phase	1.84971

Abbildung 2 Emissionsanteile der Lebensphasen. Dies ist die Registerkarte Contribution Tree der Ergebnisanzeige in OpenLCA. Hier werden die CO₂-Äquivalente für den Referenzscheinwerfer insgesamt und für die einzelnen Lebensphasen angegeben. Zusätzlich sind auf der linken Seite die prozentualen Anteile der Phasen am Gesamtergebnis ersichtlich und nach Höhe sortiert.

Für die Berechnung der Emissionen während der Nutzungsphase wird eine Nutzungsdauer von 5806 Stunden über die gesamte Lebenszeit angenommen. Der durchschnittliche Leitungsumsatz des Scheinwerfers wird mittels eines Nutzungsprofils aller vorhandenen Lichtfunktionen (Tagfahrlicht, Abblendlicht, Fernlicht, Positionslicht und Blinker) ermittelt. Der prozentuale Anteil der Emissionen in der Nutzungsphase skaliert mit den Annahmen der Betriebsstunden und des verwendeten Strommixes. Eine Sensitivitätsanalyse des Strommixes in der Nutzungsphase verdeutlicht die Sensitivität (s. Abbildung 3): Mit dem globalen Durchschnittsmix entstehen 301,6 kg CO₂e; ein ausschließlich europäischer Strommix reduziert die GWP-Emissionen auf 149,3 kg CO₂e (– 50,5 %), und die Nutzung einer Dach-PV-Anlage über die Lebensdauer verringert sie sogar auf 40,1 kg CO₂e (– 86,7 %).

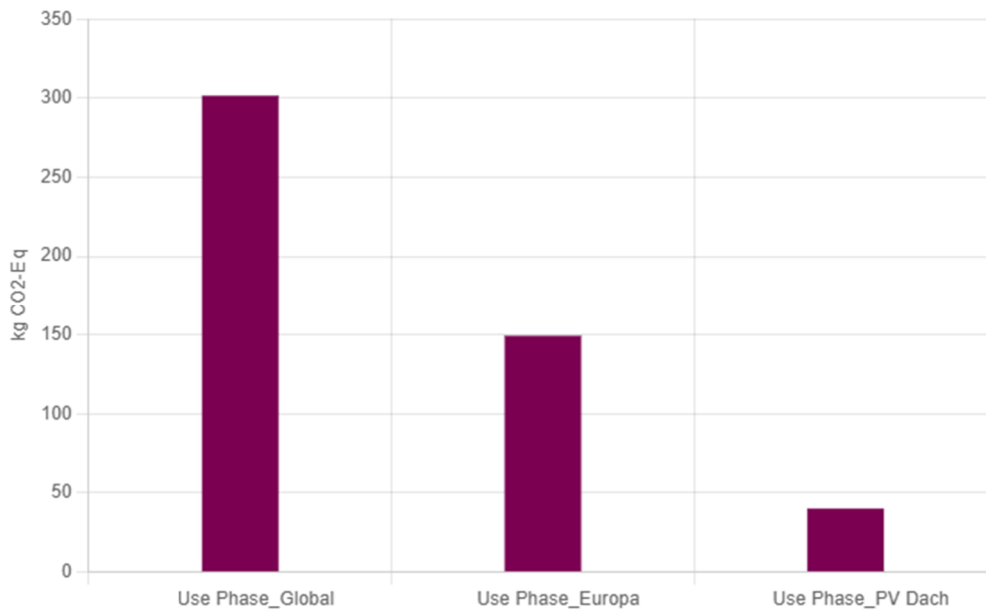


Abbildung 3 Sensitivitätsanalyse des Strommixes in der Nutzungsphase

2.3 Ergebnisse der CO₂-Bilanz für das Steuergerät (ECU)

Parallel wurde eine eigenständige LCA für das Steuergerät (Electronic Control Unit, ECU) des Scheinwerfers durchgeführt. Das Modell basiert auf openLCA 2.4.0 und berücksichtigt alle vier Lebensphasen von Cradle to Grave. Als Datenquellen dienten:

- Stücklisten- und Produktionsdaten (Primärdaten Hersteller)
- ecoinvent 3.9.1-Datensätze für Vormaterialien und allgemeine Prozesse (Ecoinvent, 2023)
- Literaturangaben zum Herstellungsprozess von PCBA-Substraten, Aluminiumkühlern und Klebstoffen (Gómez, 2016; MICHAEL J. ROBERTS, 2003).

Im Produktionssegment erbrachte die PCBA-Fertigung den größten Anteil – insbesondere die Herstellung des Substrats, die Montage integrierter Schaltkreise sowie die Produktion des Aluminiumkühlers und des Klebstoffs. Die Distributionsphase modellierte den Transport vom Fertigungswerk (Deutschland) zu OEM-Standorten und weiter zu Endkunden in Europa, Nordamerika und Asien (je 1/3-Anteil) (Kley, 2014).

In der Nutzung wurde das ECU-Energieprofil analog zum Scheinwerfer über die Formel

$$E_{\text{ECU}} = \text{WLT}_P \cdot T \cdot (m_{\text{ECU}} / m_{\text{Car}}) + P_{\text{ECU}} \cdot \Delta t$$

abgebildet. Hier repräsentiert WLT_P den WLTP-Stromverbrauch, T die Gesamtfahrstrecke, $m_{\text{ECU}}/m_{\text{Car}}$ die Massenrelation ECU zu Fahrzeug, P_{ECU} den Mehrleistungsbedarf der Elektronik (berechnet aus LED-Leistungsaufnahme und Effizienzfaktor C_{ECU}) und Δt die Betriebsdauer. Als Effizienz der Power-Elektronik wurde 72 % angenommen (Raicu, 2021; Galvin, 2022).

Das Ergebnis für das Default-Szenario (270 000 km, 5 806 h, globaler Strommix) zeigt, dass 22 % des Gesamt-GWP auf die Produktionsphase entfallen, während die Use-Phase 78 % ausmachen (s. Abbildung 4). Distribution und EoL tragen jeweils unter 1 % bei. Damit bestätigt sich auch für die ECU, dass Verbesserungen der Energieeffizienz im Betrieb den größten Hebel zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks bieten.

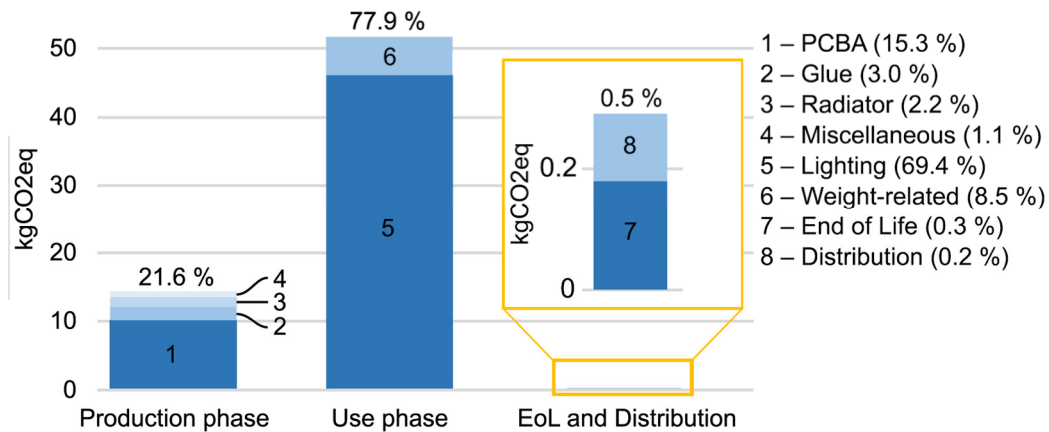


Abbildung 4 LCA-Ergebnisse von der Wiege bis zur Bahre für das ursprüngliche Scheinwerfersteuergerät mit Standardszenario, unterteilt in Lebenszyklusphasen. Angegeben in kgCO₂eq.

2.4 Strategien zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks

Auf Basis der Hotspot-Analyse wurden folgende Hebel identifiziert: Beim Frontscheinwerfer liegt das größte Potenzial während der Produktionsphase in der Substitution konventioneller Polymere durch biobasierte oder rezyklierte Kunststoffe. Durch den Ersatz von 58 % der Polymermasse konnten in ersten Ansätzen 22,5 % der Produktions-CO₂e eingespart werden (Projektinterne Daten). Erste Leichtbaumaßnahmen wie die Verwendung von MuCell®-Schaumstrukturen und dünnere Optiklinsen reduzierten das Gesamtgewicht des Scheinwerfers um 4 %. Diese vergleichbare geringe Gewichtsreduzierung erreicht schon eine Reduzierung der GWP-Emissionen während der Nutzungsphase um 1,35 %. Ein neues Referenzdesign mit einer deutlich geringeren Gesamtscheinwerfermasse wird im Herbst vorgestellt und verspricht eine deutliche Senkung der Use-Phase-Emissionen bei gleichzeitig geringerem Energieaufwand im Spritzgussverfahren.

Für das Steuergerät wurden aus der Literatur und ersten Labortests folgende Verbesserungen identifiziert: Der Einsatz eines bio-basierten Klebers (GWP $\approx$ 2 kg CO₂e/kg) reduziert die Produktionsemissionen gegenüber konventionellen Klebstoffen deutlich (Tserpes, 2022). Thermisch leitfähige Polykarbonat-Mischungen als Ersatz für Aluminiumradiatoren verringern das Bauteilgewicht um bis zu 50 % und senken damit sowohl die energiebedingten Use-Phase-Emissionen als auch die Entsorgungsbilanz (Covestro, 2018). Der Einsatz von Rezyklat im Kunststoffcover kann das GWP des Materials um bis zu 49 % mindern (Baroth, 2011). Schließlich stellt die Erhöhung der Effizienz der Power-Elektronik von 72 % auf 97 % durch Umstellung auf ein 48 V-Bordnetz einen entscheidenden Hebel dar, um die Use-Phase-Emissionen des ECU um mehr als 60 % zu reduzieren (Raicu, 2021).

Eine vergleichende LCA-Rechnung beider ECU-Varianten verdeutlicht den Erfolg: Während das initiale Modell im Default-Cradle-to-Grave-Szenario 66,4 kg CO₂e verursacht, sinkt der Wert im optimierten Design auf 19,8 kg CO₂e – eine Reduktion von 70,2 %.

Mit diesen praxisorientierten Maßnahmen demonstriert das Projekt Nalyses, wie sich durch frühzeitige LCA-Integration in den Entwicklungsprozess substanzielle Klimavorteile erzielen lassen. Die entwickelten Verfahren und Werkzeuge werden künftig in den digitalen Produktzwillig integriert und dienen als Blaupause für weitere zirkuläre Produkte in der Mobilitätsbranche.

3 Fazit und aktuelle Forschung

Die vorangegangenen Kapitel haben belegt, dass eine konsequente Lebenszyklusbetrachtung nach ISO 14040/44 bereits in frühen Entwicklungsphasen von Automobillichtsystemen entscheidende Umweltvorteile erschließt. Am Beispiel des Referenzscheinwerfers und seines Steuergeräts (ECU) ließen sich mit Hilfe von primären Firmendaten und ecoinvent-Datensätzen die Hotspots in der

Produktion und Nutzung identifizieren: Rund 90 % aller CO₂-Äquivalente des Scheinwerfers entfallen auf die Fahrphase, beim ECU sind es 78 %. Die Materialbereitstellung schlägt in der Produktion mit bis zu 80 % der Emissionen zu Buche. Auf dieser Basis entwickelten sich gezielte Optimierungsmaßnahmen – von Polymer-Substitutionen und Leichtbau bis zu Effizienzsteigerungen in der Elektronik –, die Reduktionen von bis zu 70 % realisieren.

3.1 Entwicklung eines Digitalen Zwillings für die Entwicklungsbegleitung

Als direktes Follow-up entsteht derzeit ein digitaler Zwilling, der das LCA weiter automatisiert und in den Designalltag integriert. Mit diesem Ansatz wird die Datenerstellung für den digitalen Zwilling automatisiert und beschleunigt. Kernstück ist eine Toolchain, die Excel-basierte Stücklisten (BOM) automatisiert einliest, daraus Produktsysteme aufsetzt und in openLCA über die OLCAClient-Schnittstelle abbildet. In hierarchisch verknüpften Prozess- und Flusssystemen werden so alle Inventardaten des Scheinwerfers abgebildet. Parallel dazu erfolgt die automatisierte Anbindung an Hintergrunddatenbanken inklusive Qualitätsprüfungen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Nutzung großer Sprachmodelle (LLM) zur semantischen Validierung und Ergänzung fehlender Angaben. Derzeit wird auch geprüft, CAD-Stücklisten aus SolidWorks per API in die Toolchain zu überführen, sodass Ingenieurinnen und Ingenieure ihr Scheinwerferdesign visuell bearbeiten und zugleich Live-Feedback zu Umwelteinflüssen und Circularity-Kennzahlen erhalten (s. Abbildung 5).

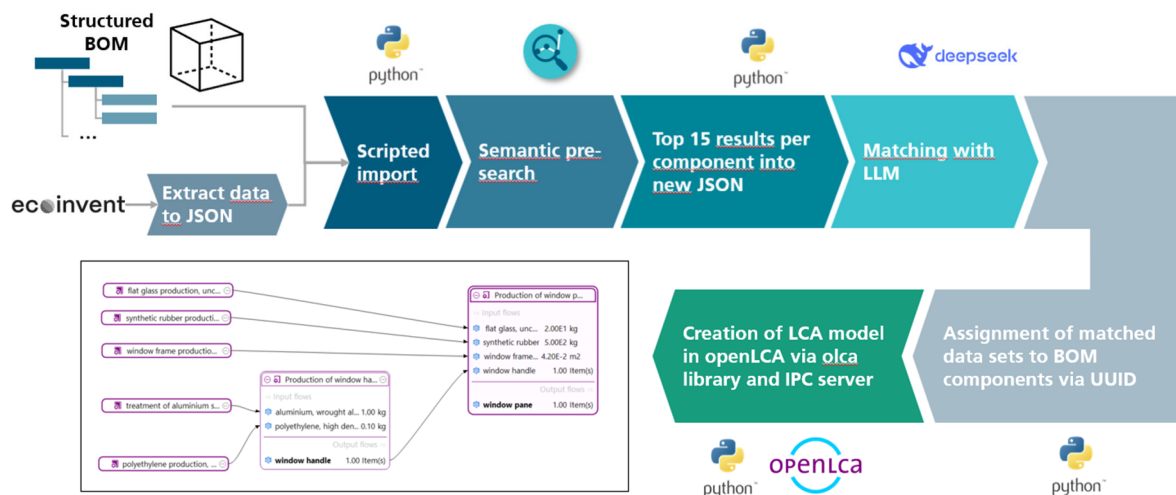


Abbildung 5 Vorläufige Toolchain für eine vollautomatische Erstellung des LCA-Modells in openLCA

3.2 LCA und Circularity Assessment eines alternativen Scheinwerfermodells in der Designphase

Parallel untersucht eine wissenschaftliche Arbeit eine „grünere“ Variante des Referenzscheinwerfers bereits in der Entwurfsphase. Ziel ist eine Cradle-to-Cradle-LCA dieses Prototyps, um Potenziale und Emissionsquellen der verschiedenen Lebenszyklusphasen zu quantifizieren, bevor die Großserienproduktion beginnt. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Bewertung der Zirkularität beider Modelle – des Serien- und des alternativen Prototyps – unter Einbezug alternativer End-of-Life-Szenarien wie Recycling, Wiederaufbereitung oder Wiederverwendung (s. Abbildung 6).

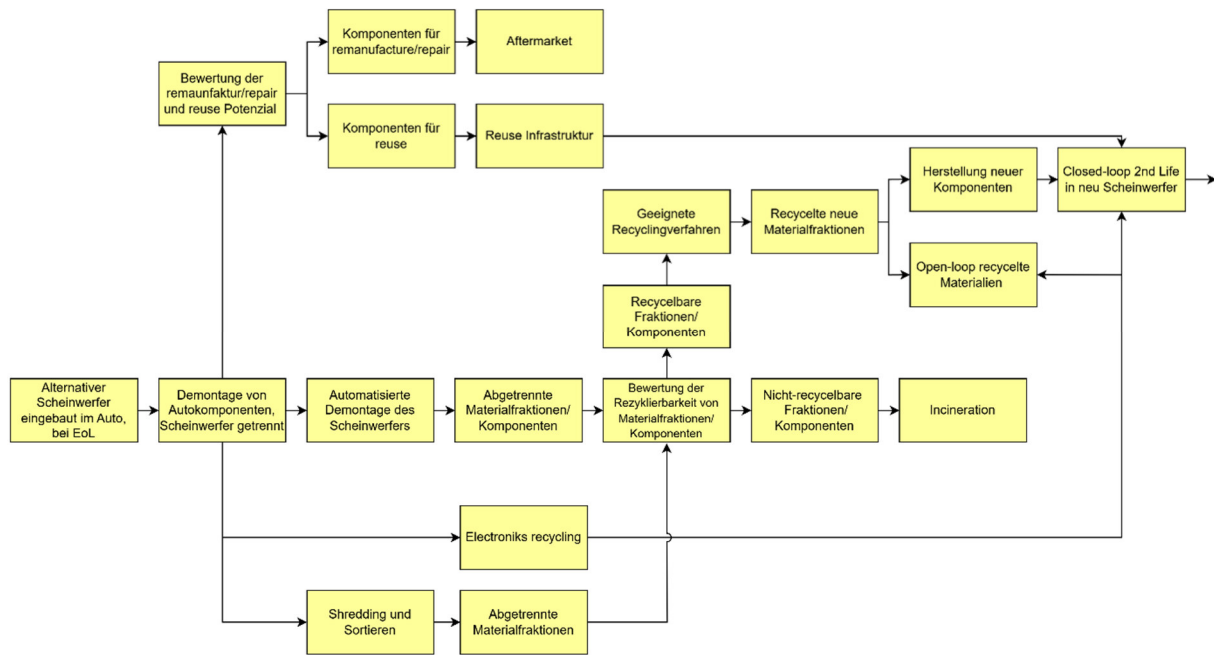


Abbildung 6 Konzeptualisierung von EoL-Pfaden unter Verwendung von R-Strategien für den alternativen Scheinwerfer

Die Arbeit verfolgt dabei folgende Forschungsfragen:

- Wie ist der aktuelle Stand von Forschung, EU-Regulierungen und Strategien zur Nachhaltigkeit und Circular Economy für Fahrzeugbeleuchtung?
- Welche Nachhaltigkeitsszenarien lassen sich im LCA-Modell des grünen Zwillinges abbilden, obwohl Produktion und Nutzung noch simulativ sind?
- Wie sensitiv reagieren die CO₂e-Ergebnisse auf Variationen von Parametern wie Materialmix, Betriebsstunden und Strommix?
- Welche Circularity- und Material-Criticality-Kennzahlen können durch eine Simulation für beide Modelle geliefert werden?
- Auf welche Weise lassen sich LCA- und Circularity-Ergebnisse zu einem ganzheitlichen Optimierungsrahmen für nachhaltiges Design verbinden?

Die Erkenntnisse fließen direkt in die Zielsetzung von Nalyses ein, ressourceneffizientere und emissionsärmere Scheinwerfer zu entwickeln.

3.3 Handlungsempfehlungen für KMU und Unternehmen

Kleine und mittlere Unternehmen können von den im Nalyses-Projekt gewonnenen Erfahrungen unmittelbar profitieren. Bereits in der Konzeptphase sollte das LCA fest verankert werden, damit Emissions-Hotspots frühzeitig erkannt und alternative Designs datenbasiert bewertet werden können. Darüber hinaus empfiehlt sich der Aufbau automatisierter Toolchains, um CAD-Stücklisten und BOM-Daten nahtlos mit openLCA zu verknüpfen, den manuellen Aufwand zu reduzieren und Iterationsschleifen zu beschleunigen. Materialsubstitution und Leichtbaustrategien erweisen sich als besonders wirkungsvolle Hebel: Der Einsatz biobasierter oder rezyklierter Kunststoffe und innovativer Schaumstrukturen führte in Nalyses zu zweistelligen CO₂-Einsparungen in der Produktion und messbaren Reduktionen im Fahrbetrieb. Gleichzeitig sollte die Effizienz und Modularität von Elektronikkomponenten optimiert werden – etwa durch ein höheres Bordnetz (48 V) oder modulare Bauweisen, die Reparatur und Recycling erleichtern. Ergänzend ist jede LCA-Studie um Sensitivitätsanalysen zu Strommix, Nutzungsprofilen und End-of-Life-Szenarien zu erweitern, um das Design gegen künftige Markt- und Regulationsänderungen abzusichern. Abschließend sind Circularity-Assessments unerlässlich, um Materialkreisläufe zu schließen und Wertstoffverluste zu minimieren. Eine konsequente Dokumentation und die harmonisierte Nutzung interner und externer

Datenbanken (z. B. ecoinvent) schaffen Transparenz und Nachvollziehbarkeit – Grundvoraussetzungen für regulatorische Compliance und nachhaltiges Marketing. Mit diesen Maßnahmen können KMU ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und gleichzeitig einen messbaren Beitrag zur CO₂-Reduktion und Kreislaufwirtschaft leisten.

4 Literaturverzeichnis

Azapagic, A., 1999. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), pp. 1-21.

Baroth, A. K. S. M. R., 2011. Environmental benefits of post-consumer recycled PET based Valox iQ resin vs. Valox resin using life cycle assessment approach. *International Conference on Advances in Polymer Science and Rubber Technology*, pp. 1-6.

Boyd, S. B., 2012. *Life-Cycle Assessment of Semiconductors*. 1 Hrsg. New York, NY: Springer New York, NY.

Covestro, 2018. <https://solutions.covestro.com>. [Online]
Available at: <https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/brands/downloads/imported/1556898019.pdf>
[Zugriff am 28 Mai 2025].

Ecoinvent, 2023. <https://ecoinvent.org>. [Online]
Available at: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/market-activities/>
[Zugriff am 14 09 2023].

European Commission, Secretariat-General, 2019. *The European Green Deal*, Brussels: EUROPEAN COMMISSION.

Frischknecht, R., 2020. *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin: Springer Spektrum.

Galvin, R., 2022. Are electric vehicles getting too big and heavy? Modelling future vehicle journeying demand on a decarbonized US electricity grid. *Energy Policy*, Issue 161.

Gómez, P. E. D. S. J. P. C. J. C., 2016. Influence of Composition on the Environmental Impact of a Cast Aluminum Alloy. *Materials*, Issue 6.

Hill, N. et al., 2020. *European Commission: Directorate-General for Climate Action, Ricardo Energy & Environment*, s.l.: Publications Office of the European Union.

Kaswan, M. S., Rathi, R., Khanduja, D. & Singh, M., 2020. Life Cycle Assessment Framework for Sustainable Development in Manufacturing Environment.. In: *Advances in Intelligent Manufacturing*. Singapore: Springer, p. 103–113.

Kley, F. & K. W., 2014. *Abschlussbericht: EFA 2014/2 – Energieeffizientes Fahren 2014*, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt: s.n.

Matthews, S., Hendrickson, C. T. & Matthews, D., 2014. *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter*. Open access textbook,; s.n.

MICHAEL J. ROBERTS, E. J. H. S. N., 2003. A LIFE CYCLE INVENTORY OF ALUMINIUM DIE CASTING. *J-STAGE*, 13(1), pp. 256-260.

R. K. Kanth, P. L. H. T. Q. W. a. L. Z., 2011. Insight into quantitative environmental emission analysis of printed circuit board. *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Issue 10, pp. 1-4.

Raicu, C. C. S. G. C. & E. B., 2021. 48 V network adoption for automotive lighting systems. *Revue Roumaine des Sciences Techniques—Serie Electrotechnique et Énergetique*, 4(66), p. 231–236.

Schau, E. M., Traverso, M., Lehmann, A. & Finkbeiner, M., 2011. Life Cycle Costing in Sustainability Assessment—A Case Study of Remanufactured Alternators. *Sustainability*, 3(11), pp. 2268–2288.

Technical Committee ISO/TC 207, 2006. *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, s.l.: ISO (the International Organization for Standardization).

Technical Committee ISO/TC 207, 2006. *ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, s.l.: ISO (the International Organization for Standardization).

Tserpes, K. & T. V., 2022. Life-Cycle Analysis and Evaluation of Mechanical Properties of a Bio-Based Structural Adhesive. *Aerospace*, 2(9), p. 64.

WLTPfacts, 2017. www.WLTPfacts.eu. [Online]
Available at: <https://www.wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>
[Zugriff am 16 Juni 2025].

5 Biografien

Felix Siems ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhoferinstitut IEM in Paderborn. Seine E-Mail ist felix.siems@iem.fraunhofer.de

Ahmet Burak Ertem ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhoferinstitut IEM in Paderborn. Seine E-Mail ist ahmet.burak.ertem@iem.fraunhofer.de

Meghana Shyam Sunder ist studentische Hilfskraft am Fraunhoferinstitut IEM in Paderborn. Ihre E-Mail ist meghana.shyam.sunder@iem.fraunhofer.de

Zwischen Systemwandel und Selbsttäuschung: Vier Thesen zur Ambivalenz der Kreislaufwirtschaft

Yannik Gehlen

Technische Universität Darmstadt, Institut für Materialwissenschaft, Darmstadt, Deutschland

Abstract: Kreislaufwirtschaft gilt als wichtiger Bestandteil nachhaltiger Entwicklung und findet in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft breite Zustimmung. Der vorliegende Beitrag entwickelt vier Thesen zur ambivalenten Rolle der Kreislaufwirtschaft im Kontext gesellschaftlicher Transformationen. Zwei Thesen betonen ihr Potenzial als Katalysator für kulturellen Wandel, etwa durch neue Konsumpraktiken und stärkere Gemeinschaftsorientierung. Zwei Gegenpositionen problematisieren hingegen die technokratische Vereinnahmung der Kreislaufwirtschaft, ihre Einbindung in wachstumsbasierte Narrative sowie die Reproduktion eines linearen Fortschrittsverständnisses. Der Text argumentiert, dass eine zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft nur gelingen kann, wenn sie mit einem kulturellen Perspektivwechsel einhergeht – weg von Effizienzdenken und Wachstumslogik, hin zu zyklischen, suffizienzorientierten und gemeinwohlgetragenen Lebens- und Wirtschaftsformen.

Keywords: *Kreislaufwirtschaft · Nachhaltigkeit · Wachstumskritik · kultureller Wandel · Fortschrittsverständnis · Postwachstum*

Einleitung

Die in modernen Gesellschaften seit Jahrhunderten vorherrschende Logik von Produktion, Konsumption und Entsorgung von Gütern gerät zunehmend an ihre Grenzen. *Lineare Wertschöpfung* war im Zuge der industriellen Revolution zunächst ein überaus erfolgreiches Modell, das jedoch früher oder später mit einem unausweichlichen – und im Nachhaltigkeitsdiskurs vielbeschworenen – Grundproblem kollidieren musste: Die ökologischen Grenzen unseres endlichen Planeten. Der eindrucksvollen Erfolgsgeschichte der „Take-Make-Waste“-Logik stehen heute erschöpfte Rohstoffvorkommen, überlastete Senken, erodierte Böden, versauerte Ozeane und kollabierende Ökosysteme gegenüber. Ganze Landstriche wurden für den Abbau zentraler Ressourcen wie Kohle oder seltene Erden verwüstet, Flüsse vergiftet, Luft und Atmosphäre mit Emissionen überfrachtet. Selbst entlegenste Regionen sind inzwischen mit Mikroplastik, Chemikalien oder Elektroschrott belastet – stille Zeugen einer Wirtschaftsweise, die lange Zeit nur als Einbahnstraße denkbar war.

Angesichts des ökologischen Scherbenhaufens, den das traditionelle Wirtschaftsmodell hinterlassen hat, ist eine Transformation in Richtung einer Kreislaufwirtschaft die naheliegende Antwort. Mit anhaltendem technologischen Fortschritt könnten schon bald Stoffkreisläufe geschlossen, Abfall als Ausgangsmaterial neuer Produkte verwendet und Ökosysteme so vom zerstörerischen Zugriff des unersättlich wachsenden Industriekapitalismus verschont werden. Diese Vorstellung suggeriert, dass wir nur noch wenige technologische Innovationen davon entfernt sind, unsere Wirtschaftsform radikal umzugestalten – und damit auch endlich von der moralischen Last der Wegwerfgesellschaft befreit würden.

Tatsächlich existiert Technologie allerdings nie für sich allein. Sie ist stets in einen komplexen kulturellen Kontext eingebettet, der mitgedacht werden muss, etwa, um soziale Transformationsbarrieren zu verstehen oder unbeabsichtigte Nebenfolgen und damit verbundene ethische Fragen frühzeitig erkennen und adressieren zu können. Die großen technologischen Durchbrüche der Menschheitsgeschichte – von der Erfindung des Buchdrucks, über die Dampfmaschine und die Elektrifizierung, bis hin zu Kernspaltung, Stammzellforschung und neuerdings die künstliche Intelligenz – hatten stets enorme, mitunter katastrophale gesellschaftliche Konsequenzen und lösten heftige Debatten, Proteste und soziale Gegenbewegungen aus. Ebendeshalb scheint es notwendig, dass technologische Transformationsprozesse so früh und so eng wie möglich von einer Vielzahl wissenschaftlicher Perspektiven begleitet werden. So kann z.B. die Einbeziehung geistes- und sozialwissenschaftlicher Expertise nicht nur das Risiko ungewollter Nebenfolgen reduzieren; sie kann gleichzeitig dazu beitragen, Barrieren für die Implementierung einer Technologie zu überwinden, weil Mensch und Gesellschaft in ihrer Gesamtheit in den Blick genommen werden können. Gerade auch für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft können etwa philosophische, soziologische,

kulturwissenschaftliche und psychologische Blickwinkel eine wichtige Ergänzung zum technischen Diskurs sein, um sowohl die gesellschaftlichen Potenziale und Barrieren sichtbar zu machen, als auch versteckten Annahmen und kulturelle Leitbilder aufzudecken, die unsere kollektiven Vorstellungen von Technik, Fortschritt und Nachhaltigkeit prägen, oftmals ohne dass wir uns ihrer bewusst sind. Unter diesen Vorzeichen liefert dieser Beitrag eine geisteswissenschaftliche Einordnung der aktuellen Debatte um Kreislaufwirtschaft, indem anhand von vier Thesen und unter Rückgriff auf die Perspektivenvielfalt der genannten Disziplinen die Ambivalenz des Konzepts herausgearbeitet wird. Dabei geht es weniger um die Darstellung empirischer Forschungsergebnisse als um die Eröffnung eines Reflexionsraums, der den vorherrschenden Diskurs zur Kreislaufwirtschaft um sowohl ermutigende, als auch kritische Perspektiven erweitern soll.

These 1: Linearität ist ein problematisches Kulturmodell

Die Art und Weise, wie moderne Gesellschaften die Herstellung und Entsorgung von Gütern organisieren – oder allgemeiner: ihre stofflichen Wechselwirkungen mit der natürlichen Umwelt gestalten – ist keineswegs selbstverständlich. Viele vormoderne Kulturen von der Antike bis zur frühen Neuzeit waren Subsistenzwirtschaften, bei denen Produktion, Konsum und Entsorgung lokal gekoppelt und in natürliche Stoffkreisläufe eingebettet waren (vgl. Radkau 2002: 52ff.). Überhaupt ist Zirkularität ein historisch verbreitetes Prinzip, dass z.B. für einige fernöstliche Denkschulen¹ elementar ist (Yang 2025: 255ff.). Die Einführung von streng linearen Produktionsprozessen ist hingegen eine relativ junge Entwicklung, die sich erst im Zuge der industriellen Moderne flächendeckend durchgesetzt hat. Dabei handelt es sich jedoch nicht nur um ein technisches oder ökonomisches Paradigma, dass etwa aus Gründen wirtschaftlicher Effizienz entstand, sondern um ein tiefer liegendes kulturelles Deutungsmuster: Die Vorstellung von „Fortschritt“ als lineare Bewegung nach vorn – von Rohstoff zu Produkt zu Abfall – spiegelt sich auch in anderen gesellschaftlichen Bereichen wider, etwa im Verständnis von Bildung, Karriere, Lebenszeit und Geschichte. Wir produzieren nicht nur linear, wir *denken* linear und richten unser Handeln sowie die darunter liegenden Bewertungsmuster danach aus. So wird Bildung häufig als linearer Prozess verstanden, der möglichst geradlinig vom Kindergarten bis zur Hochschule führt, wobei jedwede Abweichung oder Verzögerung als Rückschritt bewertet wird. In der Karriere wird sodann ein kontinuierlicher Aufstieg zu höheren Positionen erwartet, während ein Wechsel zu weniger prestigeträchtigen Tätigkeiten oft als Verlust gilt, selbst wenn er persönliche Erfüllung bringt. Selbst das Leben an sich wird in aufeinanderfolgende Phasen eingeteilt, wobei Aktivitäten, die nicht zur jeweiligen Phase passen, als untypisch angesehen werden. In der

¹ Eine Verbindung des Konzepts der Kreislaufwirtschaft mit konfuzianistischen und taoistischen Strömungen lässt sich bei Yang (2025: 255ff.) instruktiv nachvollziehen.

Geschichtsschreibung schließlich wird die moderne Gesellschaft als Höhepunkt einer Entwicklung betrachtet, während frühere Epochen als weniger fortgeschritten abgewertet werden, obwohl viele vormoderne Kulturen nachhaltige zirkuläre Praktiken verfolgten – eine Idee, die z.B. prominent in Hegels dialektischer Geschichtsauffassung zu finden ist und später von Marx und anderen aufgegriffen wurde (vgl. Arndt 2015).

Linearität kann also als ein Erbe des aufklärerischen Zeitalters begriffen werden, das zwar mit dem wirtschaftlichen Aufstieg westlicher Gesellschaften einhergeht, aber zugleich einige Schattenseiten mit sich bringt, die die immer lauter werdende Forderung nach mehr Zirkularität – insbesondere einer zirkulären Wirtschaftsform – rechtfertigen. Denn: Das transformative Potenzial, das in der Leitidee der Kreislaufwirtschaft angelegt ist, begrenzt sich nicht auf ökologisch verträglichere Herstellungsprozesse, sondern berührt zugleich unsere Beziehung zur Welt der Dinge und damit unser Selbstverständnis als Konsumenten (vgl. Repohl 2024). So ist etwa Begriff der „Wegwerfgesellschaft“ nicht bloß ein kulturpessimistischer Slogan linker Gesellschaftskritik, sondern eine nüchterne Beschreibung eines dominanten kulturellen Habitus. Moderne Subjekte haben eine Haltung kultiviert, die von Überfluss, Austauschbarkeit, Achtlosigkeit und kurzfristiger Nutzung geprägt ist, während uns die Dinge wiederum durch ihre Beschaffenheit – beispielsweise durch Plastik und Einwegverpackungen – implizit dazu anweisen, ebendiese Mentalität beizubehalten (vgl. Heßler 2013). Diese über lange Zeiträume eingeübte gesellschaftliche Praxis ist zwar bequem, fordert allerdings einen hohen ökologischen Preis und *entfremdet* uns zugleich von den Dingen. Mit Erich Fromm könnte man hier klassisch zwischen *Haben* und *Sein* unterscheiden (vgl. Fromm 1976), oder, etwas zeitgemäßer, auf Hartmut Rosas Konzept der (materiellen) Resonanz verweisen, demzufolge Dinge dann als bedeutsam, wertvoll und sinnstiftend empfunden werden, wenn sie nicht bloß verfügbar sind, sondern als Gegenüber erfahrbar werden, das uns berührt und antwortet (vgl. Rosa 2016: 381ff.). Eine echte Kreislaufwirtschaft erfordert genau diesen Perspektivwechsel: weg vom schnellen Verbrauch und der stummen Verfügbarkeit – hin zu einem bewussteren, resonanzfähigen Umgang mit Dingen, der Wertschätzung, Pflege und Wiederverwendung ermöglicht. Sie erfordert und fördert eine Wiederbelebung zirkulärer Prinzipien für unser Denken und Handeln – und wäre damit nicht nur eine Maßnahme zur Einhaltung planetarer Grenzen, sondern zugleich ein kultureller Orientierungspunkt, der durchaus einige Fehlentwicklungen der kapitalistischen Moderne zu korrigieren im Stande wäre.

These 2: Kreislaufwirtschaft katalysiert soziale Innovationen

Wie bereits angeklungen, ist Kreislaufwirtschaft kein rein technisch-ökonomisches Großprojekt, das lediglich durch raffinierte Ingenieurskunst, angepasste Wertschöpfungsketten und politische Weichenstellungen auf den Weg gebracht werden könnte. Eine solche technokratische Utopie repräsentiert lediglich einen kleinen Teil des Diskurses und unterschätzt tendenziell die sozio-kulturelle Dimension technischen Fortschritts. In einer Metastudie haben Friant et al. (2019) eine Diskurstypologie in Bezug auf die politische und akademische Debatte um Kreislaufwirtschaft entwickelt, aus der das enorme Spektrum möglicher Positionen hervorgeht – von marktliberal-technologischen bis hin zu sozialtransformativen Ansätzen. Demnach unterscheiden sich die Diskurse vor allem hinsichtlich der Frage, ob eine Kreislaufwirtschaft auch auf Verhaltensänderungen beruhen sollte, oder lediglich auf der technologischen Entkopplung der Wirtschaft vom Naturverbrauch.

Die hier vertretene These geht jedoch über diese Unterscheidung hinaus: Sie behauptet, dass Kreislaufwirtschaft nicht nur sozialen Wandel *benötigt*, sondern diesen zugleich *befördert*, weil sich mit der Umgestaltung der materiellen Infrastrukturen auch soziale Praxis verändert. Menschen wachsen in eine Welt hinein, deren Architektur, Infrastruktur und Produktdesigns bestimmte Handlungsmuster erfordern bzw. nahelegen (vgl. Bourdieu 1987). Während Einwegverpackungen eine achtlose Nutzung und Entsorgung suggerieren, eröffnen zirkulär gedachte Infrastrukturen automatisch neue Denk- und Handlungsräume – etwa durch modulare Produkte oder Sharing-Angebote. In diesem Sinne wirkt eine Kreislaufwirtschaft als Katalysator für soziale Innovationen und damit als Gegenmittel zum derzeit kulturell verankerten Wegwerf-Habitus: Sie lädt dazu ein, Dinge gemeinsam zu nutzen, zu tauschen und zu reparieren und schafft Räume für Teilhabe, Kooperation und eine Wiedergewinnung sozialer Begegnungsorte.

Existierende Initiativen wie Reparaturcafés, Tauschbörsen oder solidarische Landwirtschaft zeigen bereits heute, dass ökologisch sinnvolle Praktiken gleichzeitig auch gemeinschaftsfördernd wirken, indem sie neue Formen von Reziprozität und Verantwortungsübernahme hervorbringen. Konsumenten werden dabei zu *Prosumenten*² (vgl. Toffler 1983), indem die Herstellung, Pflege, gemeinsame Nutzung und Weitergabe von Gütern in einem Individuum verschmelzen, wodurch Konsum und Besitz partiell „re-vergemeinschaftet“ werden.

Aus dieser Perspektive ist Kreislaufwirtschaft mehr als ein technisch-ökonomischer Strukturwandel – sie ist vielmehr eine soziale Innovationsmaschine, die neue Alltagspraktiken inspiriert, Gelegenheiten für sinnstiftenden Austausch schafft und damit unser Verhältnis zur sozialen und materiellen Welt

² Das Kofferwort „Prosument“ aus „Produzent“ und „Konsument“ beschreibt eine Person, die sowohl Produkte oder Dienstleistungen herstellt als auch konsumiert, und weist auf die Möglichkeit zur Integration produktiver und konsumtiver Rollen im einzelnen Menschen hin.

rekalibriert. Gleichzeitig darf dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Kreislaufwirtschaft auch Teil eines wachstumsorientierten Diskurses ist, der von politischen und ökonomischen Interessen geprägt wird. So vielversprechend die kulturellen und sozialen Dynamiken also auch sein mögen – sie lösen eine zentrale Frage nicht: Lässt sich ökologische Nachhaltigkeit überhaupt dauerhaft mit ökonomischem Wachstum versöhnen? Gerade weil Kreislaufwirtschaft derzeit häufig mit großen wirtschaftlichen und politischen Versprechungen verbunden wird, wagt die folgende These einen kritischen Blick auf die Fallstricke einer unhinterfragten Kreislaufwirtschafts-Euphorie.

These 3: Kreislaufwirtschaft füttert das Märchen vom grünen Wachstum

Im aktuellen Wahlprogramm von CDU und CSU wird explizit für eine „verantwortungsvolle Kreislaufwirtschaft“ (2025: 23) und gleichermaßen für die Sicherung und Vermehrung wirtschaftlichen Wachstums plädiert. Die Kombination dieser Forderungen ist wenig verwunderlich, gewährleistet sie doch sowohl die Gunst der Wählerschaft, als auch der Wirtschaftslobbies, indem sie weder der Bevölkerung eine Verzichtleistung abverlangt, noch ökonomische Interessen hinter Umweltbelange stellt. Tatsächlich wird die These, dass ökologische Nachhaltigkeit und permanentes Wirtschaftswachstum prinzipiell vereinbar seien, auch in manchen wissenschaftlichen Kreisen vertreten (vgl. etwa Dogaru 2021; Lin 2021; Hallegatte et al. 2012). Demgegenüber steht ein wachstumskritischer Nachhaltigkeitsdiskurs, der die Idee der Entkopplung von Wachstum und ökologischen Schäden kategorisch ausschließt (vgl. Bauwens 2021), etwa aus grundlegenden Überlegungen zur Rohstoffübernutzung (vgl. Meadows et al. 1972; Jackson 2009), aufgrund psychologischer Rebound-Effekte (vgl. Santarius 2012) oder schlichtweg durch thermodynamische Limitierungen in geschlossenen Systemen (vgl. Paech 2025).

In diesem Kontext birgt Kreislaufwirtschaft die Gefahr, jene Erzählung vom grünen Wachstum zu bekräftigen, die eine ökologische Modernisierung ohne kulturellen Wandel verspricht. Das heißt: Ewiger Konsum durch saubere Technologie – ganz ohne Einschnitte in die persönliche Lebensrealität. Gerade weil sie sich scheinbar nahtlos mit ökonomischen Interessen verbinden lässt, verstärkt sie ein Narrativ, das Nachhaltigkeit auf Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung im bestehenden System reduziert. Diese Erzählung stabilisiert die bereits kritisierte Grundannahme, dass Lebensqualität und gesellschaftlicher Fortschritt unweigerlich an materielles Wachstum gekoppelt bleiben müssten.

Tatsächlich droht die Idee der Kreislaufwirtschaft – zumindest in ihrer aktuellen politischen Instrumentalisierung – zu einer Art Fortschrittsalibi zu werden. Der „EU Circular Economy Action Plan“ (Europäische Kommission 2020) etwa präsentiert Kreislaufwirtschaft explizit als Teil einer europäischen Wachstumsstrategie. Dabei wird Nachhaltigkeit zur Marktchance umgedeutet, die

Wettbewerbsfähigkeit sichern und neue Investitionsfelder eröffnen soll. Was auf den ersten Blick pragmatisch erscheint, läuft letztlich Gefahr, die eigentlichen Zielkonflikte zu verschleiern. Kreislaufwirtschaft wird in diesem Rahmen nicht als Alternative zum Wachstumsparadigma oder zur Neuerfindung sozialer Praktiken, sondern als seine ökologisch modernisierte Variante gedacht, bei der das gesellschaftliche Transformationspotenzial fraglich bleibt.

Daran gekoppelt ist die Problematik einer moralischen Entlastungswirkung, die mit der Vorstellung einer rein technikbasierten Kreislaufwirtschaft einhergeht. Wenn ökologische Nachhaltigkeit primär durch optimierte Prozesse und zirkuläre Wertschöpfung erreicht werden soll, wird individuelles Umdenken überflüssig. Bewusste Konsumreduktion wäre dann nicht mehr notwendig, weil jegliche Verantwortung externalisiert wird. Eine derartige Vision einer Kreislaufwirtschaft würde demnach wieder zur Stabilisierung einer wachstumsbasierten Konsumlogik beitragen, anstatt diese zu hinterfragen. Eine ernstzunehmende Gefahr besteht also darin, dass die Kreislaufwirtschaft im *worst case* zur Fortschreibung eines Systems beiträgt, das die planetaren Grenzen systematisch überschreitet. Statt uns auf einen neuen Pfad zu führen, verschafft sie dem alten Pfad einen grünen Anstrich. Dadurch verschenkt sie ihr emanzipatorisches Potenzial und verhindert, dass wir als Gesellschaft kollektiv reflektieren, was wir eigentlich unter Wohlstand, Fortschritt und einem guten Leben verstehen wollen.

1 These 4: Es gibt keinen (klassischen) Fortschritt mehr

Das Leitbild des Fortschritts gehört zu den zentralen Erzählungen der Moderne. Es besagt, dass sich die Welt und damit unsere Lebensbedingungen stetig verbessern, sei es durch wissenschaftlichen Erkenntniszuwachs, technische Innovation und institutionellen Wandel. Auch die Kreislaufwirtschaft wird häufig in diesen Fortschrittsdiskurs eingebettet, als nächste Entwicklungsstufe eines nachhaltigen Wirtschaftens, das Umwelt und Wachstum versöhnt. In seinem neuesten Buch „Verlust. Ein Grundproblem der Moderne“ (2024) argumentiert der Soziologe Andreas Reckwitz jedoch, dass diese Fortschrittslogik zunehmend fragwürdig wird. Ein Grundproblem: Das gängige Fortschrittsverständnis ist linear gedacht. Es setzt voraus, dass Entwicklungen auf einem Zeitstrahl voranschreiten – von schlechter zu besser, von ineffizient zu effizient, von traditionell zu modern. Dieses Denken hat zweifellos eine Zeit lang funktioniert, insbesondere im 20. Jahrhundert, als technische Neuerungen ungeahnte Verbesserungen in Lebensqualität, medizinischer Versorgung und wirtschaftlicher Produktivität brachten. Reckwitz betont jedoch, dass die Phase vergleichsweise kurz war und historisch gesehen eher Ausnahme als Regel (2024: 331ff.).

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, was Fortschritt heute eigentlich noch bedeuten kann. In einer Welt, in der die klassischen Innovationspfade an planetare Grenzen stoßen, bedarf es eines neuen Verständnisses von Entwicklung, das nicht mehr lineare Expansion, sondern qualitative Reifung in den

Mittelpunkt stellt, die durch Nachhaltigkeit, soziale Gerechtigkeit und ein gutes Leben geprägt ist. Eine zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft muss sich daher vom klassischen Fortschrittsnarrativ emanzipieren, das Verbesserung stets mit Steigerung gleichsetzt. Denn paradoxerweise reproduzieren manche Strömungen der Kreislaufwirtschaft dieselbe Logik, indem sie unser derzeitiges Konsum- und Wohlstandsniveau in eine Zukunft überführen wollen, in der zirkuläres Wirtschaften jene ökologischen und moralischen Probleme löst, die unsere Gesellschaftsform selbst erzeugt hat. Die Zielvorstellung besteht also wieder in einer Art „Moderne 2.0“, eine Welt im Überfluss und ohne schlechtes Gewissen. Ein sinnvoller Übergang zur Kreislaufwirtschaft müsste jedoch mehr leisten. Er müsste die kulturelle Tiefenstruktur der Moderne hinterfragen, einschließlich ihres Fortschrittsbegriffs. Das hieße, Entwicklung nicht länger als linearen Weg in eine optimierte Zukunft zu denken, sondern als zyklischen, partizipativen und gemeinwohlorientierten Prozess. Fortschritt würde in dieser Lesart bedeuten, die Bedingungen für ein gutes Leben innerhalb planetarer Grenzen gemeinsam auszugestalten.

Gleichzeitig muss auch das Verhältnis von Mensch und Natur neu gedacht werden. Statt weiter an der spekulativen Idee der „Entkopplung“ festzuhalten – also der Vorstellung, dass man Produktion und Konsum technisch so perfektionieren könnte, dass sie ökologisch folgenlos bleiben – bedarf es einer *Wiedereinbettung* ökonomischer Prozesse in natürliche Zusammenhänge. Eine zirkuläre Wirtschaftsweise müsste dann nicht bloß Ressourcen rückführen, sondern sich als Teil eines größeren ökologischen Gefüges begreifen, in dem Stoffkreisläufe, Lebensräume und soziale Beziehungen gleichwertige Elemente sind.

Die These lautet daher: Kreislaufwirtschaft darf die klassischen Fortschrittserzählung nicht verlängern, sondern muss selbst Ausdruck eines kulturellen Wandels sein. Dies gelingt jedoch nur, wenn sie sich selbst neu denkt: Nicht als Fortsetzung der Moderne mit anderen Mitteln, sondern als Bruch mit ihren destruktiven Grundannahmen.

Fazit

Die Kreislaufwirtschaft ist mehr als ein technisches Konzept – sie steht exemplarisch für die Spannungen zwischen ökologischer Transformation und ökonomischer Kontinuität. Die vier Thesen dieses Beitrags zeigen, dass sie sowohl Impulsgeberin für soziale Innovation sein kann, als auch Gefahr läuft, bestehende Wachstums- und Fortschrittserzählungen zu stabilisieren. Damit trägt sie ein ambivalentes kulturelles Potenzial: Sie kann entweder zum Vehikel grüner Wachstumserzählungen werden – oder den Übergang in eine postwachstumsfähige Kultur erleichtern. Ihre Wirkung hängt wesentlich davon ab, wie sie politisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich ausgestaltet wird. Als technokratische Lösung bleibt sie oberflächlich, als Teil eines kulturellen Wandels hin zu Genügsamkeit, Gemeinwohl und ökologischer Einbettung hingegen birgt sie transformatorisches

Potenzial. Entscheidend ist also, dass Kreislaufwirtschaft nicht zum Selbstzweck, sondern zum Baustein einer größeren kulturellen Transformation wird, die neben der technologischen Seite auch neue Erzählungen, Werte und Lebenspraktiken umfasst.

Literaturverzeichnis

Arndt, Andreas (2015) „Geschichte und Freiheitsbewusstsein: zur Dialektik der Freiheit bei Hegel und Marx“, Berlin: Eule der Minerva Verlag.

Bauwens, Thomas (2021) „Are the circular economy and economic growth compatible? A case for post-growth circularity“, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 17., 105852.

Beaurain, Christophe; Chembessi, Chedrak; Rajaonson, Juste (2023): „Investigating the cultural dimension of circular economy: A pragmatist perspective“. *In: Journal of Cleaner Production*, Vol. 417, (138012). Amsterdam: Elsevier.

Bourdieu, Pierre (1987) „Die feinen Unterschiede. Kritik der gesellschaftlichen Urteilskraft“, Berlin: Suhrkamp.

CDU-Bundesgeschäftsstelle (2025) „Politikwechsel für Deutschland. Wahlprogramm von CDU und CSU. Online unter: <https://www.cdu.de/wahlprogramm-von-cdu-und-csu/>

Dogaru, Lucretia (2021) „Green economy and green growth – Opportunities for sustainable development“. *In: MDPI Proceedings*, Vol. 63 (1).

Europäische Kommission (2020) „A new Circular Economy action Plan. For a cleaner and more competitive Europe“, Brüssel. Online unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Friant, Martin Calisto, Vermeulen, Walter & Salomone, Roberta (2020) „A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm“, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 161, 104917.

Fromm, Erich (1976) „Haben und Sein. Die seelischen Grundlagen einer neuen Gesellschaft“, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.

Hallegatte, Stéphane, Heal, Geoffrey, Fay, Marianne & Treguer, David (2012) „From growth to green growth-a framework“ NBER Working Papers No. 17841.

Heßler, Martina (2013) „Wegwerfen. Zum Wandel des Umgangs mit Dingen.“ *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, Vol. 16, 253-266.

Jackson, Tim (2009) „Wohlstand ohne Wachstum. Leben und Wirtschaften in einer endlichen Welt.“ München: Oekom.

Meadows, Dennis L.; Meadows, Donella H.; Zahn, Erich & Milling, Peter (1972) „Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit“, 17. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst.

Lin, Brian C. A. (2020) “Sustainable growth: a circular economy perspective”, Journal of Economic Issues, 54(2), 465-471.

Paech, Niko (2025) “Befreiung vom Überfluss. Eine Postwachstumsökonomie für das 21. Jahrhundert“, München: oekom.

Radkau, Joachim (2002) „Natur und macht. Eine Weltgeschichte der Umwelt“, München: C.H.Beck.

Reckwitz, Andreas (2024) „Verlust. Ein Grundproblem der Moderne“, Berlin: Suhrkamp.

Repohl, Martin (2024) „Die Beziehungsqualität der materiellen Welt. Perspektiven einer weltbeziehungssoziologischen Analyse von Materialität“, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft.

Rosa, Hartmut (2016) „Resonanz. Eine Soziologie der Weltbeziehung“, Berlin: Suhrkamp.

Santarius, Tilman (2012) „Green Growth Unravelling: How rebound effects baffle sustainability targets when the economy keeps growing“, Heinrich Böll Foundation and the Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.

Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/WEB_121022_The_Rebound_Effect-_Green_Growth_Unraveled_TSantarius_V101.pdf

Toffler, A. (1983) „Die dritte Welle - Zukunftschance. Perspektiven für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts“, München: Goldmann.

Yang, Jianming (2025) „Vom Null-Abfall zum geschlossenen Materialkreislauf. Der Weg zur Kreislaufwirtschaft“, Wiesbaden: Springer Vieweg.

2 Biografie

Yannik Gehlen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Materialwissenschaft der Technischen Universität Darmstadt (Kontakt: gehlen@ceramics.tu-darmstadt.de). Als geisteswissenschaftlich orientierter Nachhaltigkeitsforscher liegen seine Forschungsinteressen im Spannungsfeld von Nachhaltigkeit und Lebensqualität. Seine interdisziplinäre Arbeit verknüpft philosophische, soziologische und kulturtheoretische Perspektiven mit dem klassischen Nachhaltigkeitsdiskurs.

Modellierungssprache für die Visualisierung zirkulärer Wertschöpfung

Julia Vehmeyer¹, Anja Rasor¹, Julian Zerbin¹, Christian Koldewey^{1,2}, Roman Dumitrescu^{1,2}

¹Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, Deutschland

²Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik, Paderborn, Deutschland

Abstract. Im Kontext wachsender ökologischer Anforderungen gewinnt die Circular Economy für produzierende Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Die Transformation linearer zu zirkulären Wertschöpfungsnetzwerken erfordert neue Modellierungsansätze, die komplexe Stakeholder-Beziehungen und zirkuläre Logiken abbilden können. Bestehende Modellierungssprachen fokussieren primär auf lineare Systeme und vernachlässigen zirkuläre Logiken wie Rückführung oder Sekundärnutzung. Dieser Beitrag stellt eine praxisorientierte Modellierungssprache vor, die es Unternehmen ermöglicht, bestehende Wertschöpfungsnetzwerke zu analysieren und gezielt in Richtung Circular Economy zu transformieren. Die Sprache kombiniert ein Interaktionsmodell zur Visualisierung von Material-, Informations-, Geld- und Dienstleistungsflüssen mit einem Nutzenmodell zur Darstellung funktionaler, monetärer, partizipativer und ökologischer Mehrwerte. Durch eine systematische Farbkodierung werden lineare und zirkuläre Prozesse sowie Transformationsbedarfe transparent gemacht. Die Evaluation in zwei Industrieunternehmen bestätigt die Praxistauglichkeit als Kommunikationsinstrument und Ausgangspunkt zur zirkulären Transformation.

Keywords: *Kreislaufwirtschaft, Wertschöpfungsmodellierung, Nachhaltigkeit, Wertschöpfungsnetzwerke*

1 Einleitung

Im Kontext wachsender ökologischer und regulatorischer Anforderungen gewinnen Konzepte der Circular Economy für produzierende Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Kernprinzip der Circular Economy ist die Schließung von technischen und biologischen Stoffkreisläufen, um Umweltauswirkungen zu minimieren (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Pavel, 2018). Für Unternehmen bedeutet die Umsetzung der Circular Economy eine grundlegende Transformation ihrer Prozesse und Geschäftsmodelle. Die klassische lineare Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung über Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung wird zugunsten zirkulärer Stoffströme aufgebrochen (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Geissdoerfer et al., 2020; Pavel, 2018). Unternehmen agieren dabei nicht isoliert, sondern sind eingebettet in ein sozioökonomisches Beziehungsgeflecht – ein Wertschöpfungsnetzwerk. Dieses umfasst die Gesamtheit aller Unternehmen und Organisationen, die durch kooperative Beziehungen zusammenwirken, um Produkte oder Dienstleistungen für den Markt zu erstellen. Wertschöpfungsnetzwerke beschreiben Wirkzusammenhänge zur Leistungserstellung und sind Teil eines übergeordneten Gesamtsystems. Komplexe Abhängigkeiten und Querverbindungen ergeben eine Systemstruktur (Schneider, 2018; VDI, 2015). Die Transformation hin zu einer zirkulären Wertschöpfung erfordert daher nicht nur Anpassungen innerhalb einzelner Unternehmen, sondern insbesondere auch entlang der Wertschöpfungskette zwischen Zulieferern, Produzenten, Händlern sowie Entsorgungs- und Recyclingunternehmen (Frishammar and Parida, 2019; Korhonen et al., 2018).

Um diese komplexen Beziehungen zu verstehen und zu einem zirkulären Wertschöpfungsnetzwerk zu transformieren, bedarf es einer praxisorientierten Modellierungssprache. Eine **Modellierungssprache** stellt ein klar strukturiertes Werkzeug zur Erstellung und Kommunikation von Modellen dar, das auf einer festgelegten Syntax und Semantik basiert (Pohl, 2007). Bei der Syntax wird zwischen den Aspekten abstrakt und konkret unterschieden. Die abstrakte Syntax definiert Zeichen und ihre

Kombinationsregeln. Die konkrete Syntax bestimmt das visuelle Erscheinungsbild dieser Zeichen (Braun, 2007; Moody, 2009; Schneider, 2018). Die Semantik legt den konkreten Bedeutungsgehalt der Zeichen fest. Sie umfasst einerseits die dynamische Semantik, die den Bezug der Modellbausteine zur realen Welt herstellt, und andererseits die statische Semantik, die die für die Darstellung notwendige Struktur definiert (Braun, 2007). Die Modellierungssprache soll Unternehmen dabei unterstützen, ihre linearen Wertschöpfungsketten in Richtung einer Circular Economy zu transformieren und diese somit nachhaltiger zu gestalten. Dies geschieht durch eine strukturierte und visuelle Darstellung von Akteuren und ihren Aktivitäten sowie Beziehungen innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks, wodurch Potenziale der Kreislaufwirtschaft transparent gemacht werden.

2 Ausgangslage und bisherige Ansätze

Für die Planung industrieller Wertschöpfungsnetzwerke existieren verschiedene methodische Ansätze. Die integrierte Planungsmethodik nach **Fleischer et al.** sowie das Konfigurationsmodell von **Miroschedji** unterstützen die systematische Zerlegung, Partnerwahl und Kopplung von Wertschöpfungsmodulen (Fleischer et al., 2004; Miroschedji, 2002). Beide bieten wichtige Grundlagen, fokussieren sich jedoch auf lineare, geografisch verteilte Systeme und vernachlässigen zirkuläre Logiken wie Rückführung oder Sekundärnutzung.

Zur grafischen Visualisierung existieren Ansätze wie **VDML** oder die Sprache von **Deelmann & Loos**, die Austauschbeziehungen visualisieren, jedoch kaum intuitiv oder praxistauglich sind, da sie eine hohe Einarbeitungstiefe erfordern (Deelmann, T., Loos, P., 2004; OMG, 2015). Ein relevanter methodischer Beitrag stammt von **Schneider**, der eine Spezifikationstechnik entwickelte, um Struktur und Wirkzusammenhänge in Wertschöpfungsnetzwerken systematisch abzubilden (Schneider, 2018). Diese Technik bietet wertvolle konzeptionelle Grundlagen für die hier vorgestellte Modellierungssprache, fokussiert jedoch primär auf strukturelle und prozessuale Aspekte. Eine explizite Berücksichtigung von Stakeholder-Perspektiven und deren individuellem Nutzen bleibt dabei unberücksichtigt. Diese Lücke adressiert das Nutzenmodell nach **Reinhold**, das die systemische Sicht durch die explizite Modellierung von Nutzenbeziehungen zwischen Stakeholdern ergänzt (Reinhold, 2023). Es differenziert monetäre, funktionale und partizipative Nutzenarten und hilft, Akzeptanzbarrieren zwischen den einzelnen Stakeholdern in Transformationsprozessen zu adressieren. Trotz der genannten Stärken fehlt es den beschriebenen Ansätzen an einer gezielten Ausrichtung auf die spezifischen Anforderungen der Circular Economy.

Spezifische Ansätze zur Modellierung von Circular Economy Prozessen (z. B. Eco Holonic 4.0 oder Sustainable Value Stream Mapping) bilden detaillierte Wertströme ab, zeigen jedoch keine ganzheitliche Visualisierung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerkes (Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Faulkner and Badurdeen, 2014).

Insgesamt zeigt sich, dass bestehende Ansätze vor allem auf die Abbildung linearer Wertschöpfung ausgerichtet sind. Für die Modellierung zirkulärer Strukturen, wie zum Beispiel Rückführungsprozesse, fehlen jedoch ganzheitliche und praxisnahe Lösungen. Die entwickelte Modellierungssprache greift auf bewährte Ansätze wie die Spezifikationstechnik nach Schneider und das Nutzenmodell nach Reinhold zurück und ergänzt diese gezielt um zirkuläre Elemente.

3 Methodik zur Entwicklung der Modellierungssprache

Die Modellierungssprache wurde auf Basis der Methode zur Entwicklung domänenspezifischer Modellierungssprachen nach Frank entwickelt (Frank, 2013). Diese Methode bietet einen strukturierten Rahmen, um eine Modellierungssprache systematisch zu entwerfen, zu spezifizieren, anzuwenden und zu evaluieren. Jede Phase baut auf der vorherigen auf, erlaubt jedoch auch Rücksprünge für Iterationen. Zu Beginn wurde der Anwendungsbereich definiert und der Zweck der Modellierungssprache konkretisiert. Diese Phase dient der Formulierung der Zielsetzung sowie der konzeptionellen

Abgrenzung der Modellierungssprache (Frank, 2013). Als Anwendungsbereich wurden Industrieunternehmen aus dem verarbeitenden Gewerbe festgelegt, mit dem Ziel, bestehende Wertschöpfungsnetzwerke in Richtung zirkulärer Wertschöpfung zu transformieren.

Darauf aufbauend wurden Anforderungen an die Modellierungssprache abgeleitet (Frank, 2013). Dazu zählen insbesondere die Abbildbarkeit zirkulärer Prozesse, eine intuitive Visualisierung komplexer Wertschöpfungszusammenhänge, eine praxisnahe Anwendbarkeit, die ganzheitliche Beschreibung des Wertschöpfungsnetzwerks sowie die explizite Darstellung aller relevanten Stakeholder und ihres Zusammenwirkens.

In der nächsten Phase der Methode erfolgt laut Frank die Entwicklung und Spezifikation der Modellierungssprache, insbesondere durch die Definition zentraler Konzepte, ein Metamodell sowie formale Semantiken (Frank, 2013). Dementsprechend wurden für die Modellierungssprache ein Metamodell sowie geeignete grafische Notationselemente erarbeitet. Die Notation wurde so gestaltet, dass sie eine verständliche und zugleich anwendungsnahe Visualisierung zirkulärer Prozesse ermöglicht. Die Sprache greift zentrale Bausteine bestehender Ansätze auf und erweitert diese gezielt. Ausgangspunkt bildete die Spezifikationstechnik nach Schneider, da sie eine einfache Visualisierung, eine hohe Praxisnähe sowie eine systematische Abbildung der Stakeholder und des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks ermöglicht (Schneider, 2018). Ergänzend wurde das Nutzenmodell nach Reinhold integriert, das eine strukturierte Kommunikationsgrundlage zwischen Stakeholdern schafft (Reinhold, 2023). Darüber hinaus wurden neue Elemente zur Darstellung zirkulärer Prinzipien ergänzt. Die resultierende Sprache gliedert sich in zwei sich ergänzende Sichten: das Interaktionsmodell und das Nutzenmodell.

In der abschließenden Phase der Evaluierung und Weiterentwicklung wurde die Modellierungssprache in zwei Unternehmen exemplarisch eingesetzt, analysiert und hinsichtlich der zuvor definierten Anforderungen durch ein unstrukturiertes Interview evaluiert (Frank, 2013). Dadurch konnte sowohl die Praxistauglichkeit als auch der Nutzen der Modellierungssprache nachgewiesen und gezielt weiterentwickelt werden.

4 Modellierungssprache

Im Folgenden wird zunächst die Modellierungssprache vorgestellt und anschließend ihre Instanziierung anhand zweier sich ergänzender Sichten erläutert: dem Interaktionsmodell und dem Nutzenmodell. Die Sprache besteht aus vier Wertschöpfungseinheiten: die betrachtete Einheit, Stakeholder, Wertschöpfungsaktivitäten und Wertschöpfungsressourcen, sowie vier Interaktionsflüssen für das Interaktionsmodell und vier Nutzenbeziehungen für das Nutzenmodell (Abbildung 1). Die betrachtete Einheit steht als zentraler Akteur im Fokus. Die Stakeholder führen Prozesse durch, verantworten Ressourcen und stehen in Interaktion zueinander. Sie repräsentieren weitere Akteure im Wertschöpfungsnetzwerk, darunter fallen Unternehmen, Zulieferer, Kunden, Tochtergesellschaften oder Behörden. Es ist auch möglich, einzelne Bestandteile von Organisationen (z. B. maßgebliche Abteilungen) als Stakeholder zu modellieren.

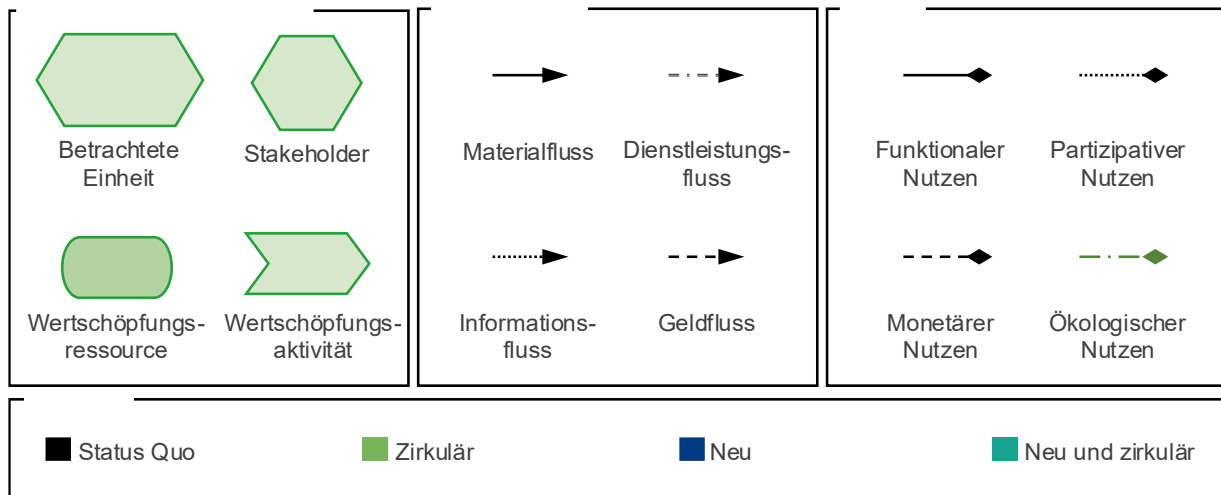


Abbildung 1: Grundkonstrukte der Modellierungssprache

Die Interaktionsflüsse werden im **Interaktionsmodell** genutzt, um sämtliche Beziehungen zwischen Stakeholdern innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks zu visualisieren. Dabei wird zwischen vier Interaktionsflüssen unterschieden: Material-, Informations-, Geld- und Dienstleistungsflüsse. Materialflüsse bilden die physischen Produktwege ab, Dienstleistungsflüsse umfassen alle Dienstleistungen im Wertschöpfungsnetzwerk, Geldflüsse repräsentieren sämtliche monetären Transaktionen zwischen den Akteuren, während Informationsflüsse den Austausch von Informationen in Form von Daten und Wissen visualisieren. Diese Differenzierung ermöglicht eine detaillierte Analyse der bestehenden Austauschbeziehungen, sodass bestehende Interaktionslücken sichtbar werden. Die grafische Notation verwendet eine klar definierte Farblogik: schwarze Pfeile für bestehende Interaktionen, grüne für bestehende zirkuläre Verbindungen, blaue für neu geplante lineare Elemente, sowie blaugrüne Pfeile für neu zu etablierende zirkuläre Beziehungen. Zirkuläre Beziehungen stellen alle Interaktionen dar, die eines der R-Prinzipien, wie zum Beispiel Repair, Remanufacture oder Recycle, abbilden. Durch diese visuelle Codierung lassen sich Transformationsbedarfe und Entwicklungsmöglichkeiten schnell erfassen.

Das **Nutzenmodell** ergänzt das Interaktionsmodell durch die systematische Darstellung des erwarteten Mehrwerts für alle beteiligten Akteure. Dabei werden Nutzenbeziehungen in vier Kategorien unterteilt: funktional (z. B. verbesserte Qualität oder Performance), monetär (z. B. Kosten- oder Erlöspotenziale), partizipativ (z. B. Mitgestaltung oder Wissensaustausch) sowie ökologisch (z. B. CO₂-Reduktion oder Ressourcenschonung). Die Darstellung erfolgt über Pfeile mit rautenförmiger Spitze, die den Nutzenfluss zwischen Stakeholdern repräsentieren. Diese Perspektive trägt dazu bei, Akzeptanzbarrieren zwischen den Wertschöpfungspartnern bei der Einführung zirkulärer Strategien abzubauen, da sie den konkreten Nutzen sichtbar und nachvollziehbar macht.

Abbildung 2 stellt ein vereinfachtes, exemplarisches Beispiel eines Interaktionsmodells dar, welches im Folgenden beschrieben wird. Das **Interaktionsmodell** zeigt ein zirkuläres Wertschöpfungsnetzwerk in der Automobilindustrie mit einem Tier-1-Zulieferer als betrachtete Einheit. Dieser ist ein zentraler Komponentensystemproduzent und nutzt spezialisierte Anlagen, die sowohl Primär- als auch Sekundärmaterialien verarbeiten können.

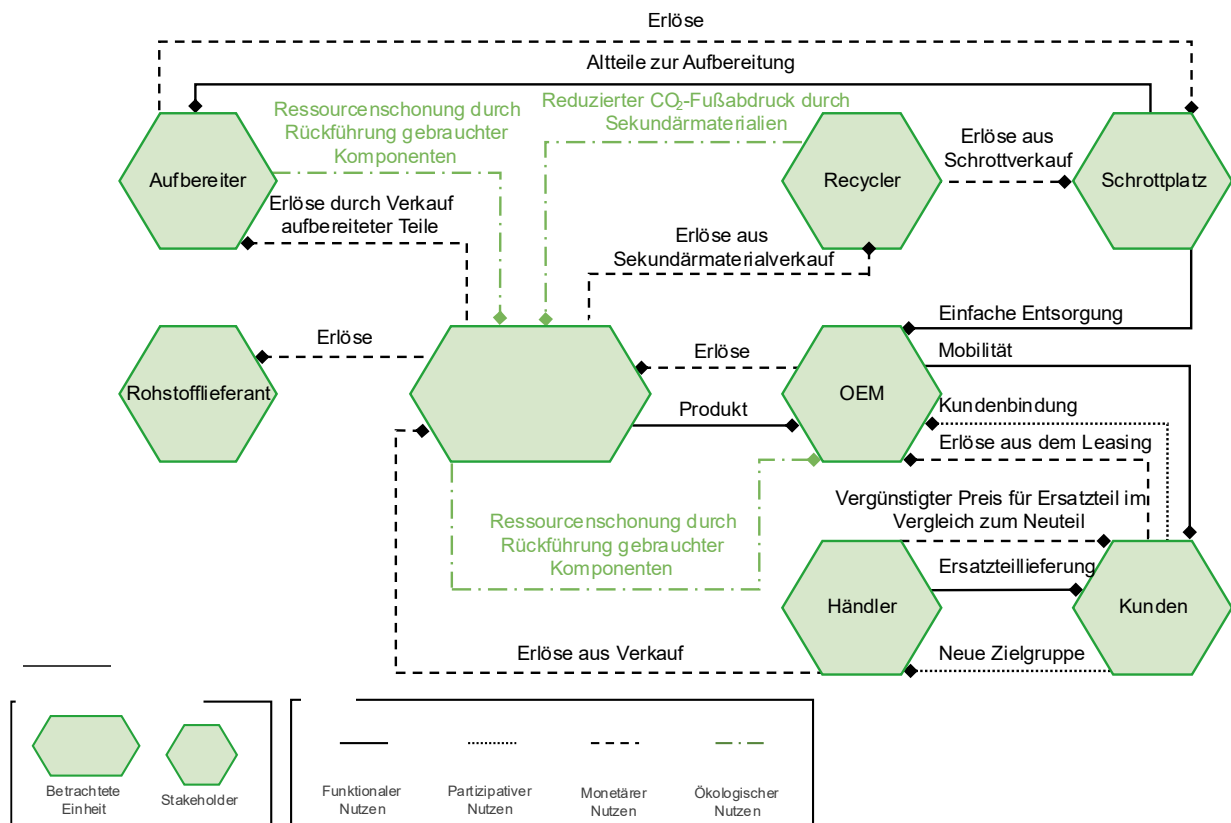


Abbildung 3: Beispiel eines Nutzenmodells

Mittels der Modellierungssprache werden auch partizipative und funktionale Nutzen durch die Einbindung zirkulärer Strategien für die Stakeholder modelliert, wie den Zugang zu neuen Zielgruppen oder die Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Stakeholdern. Insgesamt verdeutlicht das Nutzenmodell, wie zirkuläre Geschäftsansätze nicht nur ökologische Vorteile schaffen, sondern zugleich wirtschaftliche und funktionale Anreize setzen. Es dient damit als argumentatives Werkzeug zur internen und externen Kommunikation zwischen den Stakeholdern im Transformationsprozess.

5 Anwendung und Ergebnisse aus der Praxis

Die Modellierungssprache wurde in Zusammenarbeit mit zwei produzierenden Unternehmen unterschiedlicher Branchen evaluiert. In einem Unternehmen wurde die Wertschöpfung eines Smart-Service-Konzepts für Wartung und Reparatur betrachtet, im anderen die enge Kooperation mit Lieferanten, um teildefekte Leiterplatten weiterzuverwenden. In beiden Unternehmen konnten durch die modellbasierte Analyse konkrete Lücken in bestehenden Prozessen identifiziert werden, die ein zirkuläres Wertschöpfungsnetzwerk benötigt – beispielsweise fehlende Rückführstrukturen oder ungenutzte digitale Schnittstellen sowie fehlende Informationsflüsse. Die Technik lieferte damit nicht nur einen Ist-Zustand, sondern konkrete Impulse zur Weiterentwicklung und Neugestaltung von Prozessen.

Die Trennung in Nutzenmodell und Interaktionsmodell ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Nutzen einzelner Stakeholder sowie den Interaktionsflüssen zwischen diesen. Insbesondere bei der Diskussion mit skeptischen oder heterogenen Partnern erwies sich das Nutzenmodell als wirkungsvolle Kommunikationshilfe. Die eingeführte Farblogik erleichtert dabei das Verständnis für fachfremde Stakeholder und dient als Kommunikationsgrundlage in Transformationsprozessen. Die Modellierung diente als "gemeinsame Sprache" zwischen Fachabteilungen, Management und externen Partnern.

Nach der Anwendung der Modellierungssprache in den Unternehmen wurden unstrukturierte Interviews mit beteiligten Personen durchgeführt. Die Befragten bewerteten die Technik als intuitiv verständlich, anschlussfähig an bestehende Prozesse und hilfreich zur internen Sensibilisierung für zirkuläre Themen. Besonders betont wurde dabei das Potenzial der Sprache als Grundlage für Strategie-Workshops sowie als Ausgangspunkt für weiterführende Innovationsprojekte.

6 Diskussion

Die vorgestellte Modellierungssprache bietet eine strukturierte Möglichkeit, Wertschöpfungsnetzwerke zu modellieren, zu analysieren und gezielt zu zirkulären Systemen weiterzuentwickeln. Im Unterschied zu bestehenden Ansätzen wie der Spezifikationstechnik nach Schneider oder VDML integriert sie zirkuläre Logiken explizit und verbindet diese mit einer differenzierten Nutzensicht nach Reinhold. Dadurch lassen sich Interaktionen und Nutzen systematisch abbilden.

Die visuelle Notation erleichtert das Erkennen von Transformationspotenzialen und unterstützt die Kommunikation mit verschiedenen Stakeholdern. Das Einbeziehen von Abteilungen als Stakeholder unterstützt die Detailtiefe, da auch die erforderlichen Anpassungen an internen Interaktionen für die Transformation hin zu einem zirkulärem Wertschöpfungsnetzwerk abgebildet werden können.

In der Anwendung konnten fehlende Rückführstrukturen, ungenutzte Sekundärmaterialien oder unzureichende Informationsflüsse identifiziert und diskutiert werden. Die Modellierungssprache erwies sich dabei als praxistauglich.

Trotz dieser Stärken sind auch Limitationen zu benennen. Die Modellierungssprache wurde bislang nur mit zwei Unternehmen aus der verarbeitenden Industrie erprobt. Eine breitere Evaluation, insbesondere in anderen Branchen oder unternehmensübergreifenden Netzwerken, steht noch aus. Auch der manuelle Modellierungsaufwand kann bei komplexeren Netzwerken zu einer Hürde werden, was die Notwendigkeit digitaler Modellierungs- oder Simulationswerkzeuge unterstreicht.

Ein weiterer Entwicklungsbedarf ergibt sich aus der Integration quantitativer Bewertungsansätze. So könnten Methoden wie Lebenszykluskostenanalysen oder CO₂-Bilanzen dabei helfen, die Wirkung zirkulärer Maßnahmen noch fundierter zu bewerten. Auch domänenspezifische Erweiterungen – etwa für die Automobil- oder Elektronikbranche – erscheinen sinnvoll, um branchenspezifische Anforderungen gezielter zu adressieren.

Insgesamt bietet die Modellierungssprache sowohl für die Praxis als auch für die Forschung relevantes Potenzial. Unternehmen erhalten ein anwendungsorientiertes Werkzeug zur systematischen Gestaltung zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke. Gleichzeitig ergeben sich Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschung im Kontext zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke.

7 Fazit

Mit der entwickelten Modellierungssprache steht ein praxisnahes Instrument zur Verfügung, das bestehende Wertschöpfungsprozesse transparent macht und dabei unterstützt, Lücken im Hinblick auf zirkuläre Aktivitäten zu identifizieren. Durch die Trennung in Interaktions- und Nutzenmodell lassen sich operative Abläufe und strategische Mehrwerte differenziert analysieren. Die Anwendung zeigte, dass die Sprache konkrete Transformationspotenziale aufdecken und strukturiert adressieren kann. Damit leistet sie einen Beitrag zur methodischen Unterstützung der zirkulären Transformation industrieller Wertschöpfungsnetzwerke.

8 Literaturverzeichnis

- Ávila-Gutiérrez, M., Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F. and Lama-Ruiz, J. (2020) 'Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition', *Sustainability*,
- Braun, C. (2007) *Modellierung der Unternehmensarchitektur – Weiterentwicklung einer bestehenden Methode und deren Abbildung in einem Meta-Modellierungswerkzeug*, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), Universität St. Gallen.
- Deelmann, T., Loos, P. (2004) 'Visualisierung von Geschäftsmodellen', in Geberl, S., Weinmann, S. and Wiesner, D. F. (eds) *Impulse aus der Wirtschaftsinformatik: 5. Liechtensteinisches Wirtschaftsinformatik-Symposium an der Fachhochschule Liechtenstein*, Heidelberg, s.l., Physica-Verlag HD.
- Ellen MacArthur Foundation (2015) 'Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe'.
- Faulkner, W. and Badurdeen, F. (2014) 'Sustainable Value Stream Map-ping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance', *Journal of Cleaner Production*, vol. 85, pp. 8–18.
- Fleischer, J., Herm, M. and Schell, M.-O. (2004) 'Wertschöpfung in Netzwerken: Integrierte Planungsmethodik zur Konfiguration von globalen Wertschöpfungsnetzwerken', *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 99., no. 9, pp. 470-476.
- Frank, U. (ed) (2013) *Domain-Specific Modeling Languages: Requirements Analysis and Design Guidelines*, Berlin, Heidelberg, Springer.
- Frishammar, J. and Parida, V. (2019) 'Circular Business Model Transformation: A Roadmap for Incumbent Firms. In California Management Review', 61. Jg., S. 5–29.
- Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P., Pigosso, D. C. and Soufani, K. (2020) 'Circular business models: A review', *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 123741.
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A. and Birkie, S. (2018) 'Circular economy as an essentially contested concept', *Journal of Cleaner Production*, 175. Jg, S. 544–552.
- Miroschedji, S. A. D. (2002) *Globale Unternehmens- und Wertschöpfungsnetzwerke: Grundlagen, Organisation, Gestaltung*, Wiesbaden, Springer.
- Moody, F. (2009) 'The “Physics” of Notations', *IEEE Transactions On Software Engineering*, vol. 6, pp. 756–779.
- OMG (2015) *Value Delivery Metamodel – Version 1.0*.
- Pavel, S. (2018) 'Circular Economy: The Beauty of Circularity in Value Chain', *Journal of Economics and Business*, vol. 1.
- Pohl, K. (2007) *Requirements Engineering – Grundlagen, Prinzipien, Techniken*, Heidelberg, dpunkt.
- Reinhold (2023) 'Systematik zur musterbasierten Transformation von Wertschöpfungssystemen für Smart Services'.
- Schneider, M. (2018) *Spezifikationstechnik zur Beschreibung und Analyse von Wertschöpfungssystemen*, Dissertation [Online]. Available at <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:2-31898>.
- VDI (2015) 'Statusreport Industrie 4.0 – Technical Assets. Grundlegende Begriffe, Konzepte, Lebenszyklen und Verwaltung 2015'.

AutoPilot: Nachhaltige Automobilproduktion durch kreislauffähige Betriebsmittel

Marc-André Weismüller ¹, Jan Rauterkus ¹, Theresia Groß ¹, Oliver Petrovic ¹, Christian Brecher ¹
Sven Eichhorn ² und Viktor Schubert ³

¹ RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen

² Igenium GmbH, Annaberger Str. 240, 09125 Chemnitz

³ SEEBURGER AG, Edisonstr. 1, 75015 Bretten

Abstract. Das Verbundprojekt AutoPilot adressiert die dringende Notwendigkeit, die Automobilproduktion im Sinne einer zirkulären Wertschöpfung nachhaltiger zu gestalten. Dieser Beitrag skizziert zunächst den aktuellen Lebenszyklus von Automatisierungsanlagen in der Fahrzeugfertigung, stellt anschließend die Vision modularer, wiederverwendbarer Ausrüstung als Dienstleistung vor und erläutert drei zentrale Technologien – zirkuläre, nachhaltige Betriebsmittel, digitale Zwillinge und „Equipment-as-a-Service“ Geschäftsmodelle. Abschließend werden die im Projekt entwickelten Demonstratoren vorgestellt, die verschiedene Fallstudien präsentieren; gefolgt von einem Ausblick auf künftige industrielle Anwendungen.

Keywords: *Kreislaufwirtschaft, Equipment-as-a-Service, Produktion, Betriebsmittel.*

1 Motivation

Die Automobilindustrie unterliegt einem erheblichen Druck, CO₂-Emissionen zu senken und Materialressourcen effizienter einzusetzen (Verband der Automobilindustrie, 2025). Klassische Fertigungslinien werden ursprünglich für längere Produktlebenszyklen und geringe Variantenvielfalt ausgelegt. Angesichts immer kürzerer Innovationszyklen müssen Hersteller heute Produktwechsel in deutlich kürzerer Zeit realisieren. Üblicherweise führt dies zum Neuaufbau von Fertigungsanlagen und Anfertigung neuer Betriebsmittel, während bestehende Anlagen und Werkzeuge entweder eingelagert oder verwertet werden (Walla und Kiefer, 2011). Betriebsmittel umfassen sämtliche technische Anlagen, Maschinen, Werkzeuge und Hilfsmittel, die für die Produktion, Bearbeitung oder Qualitätskontrolle von Produkten verwendet werden. Diese lineare „Take-Make-Dispose“-Logik verursacht hohe Investitions- und Entsorgungskosten sowie beträchtlichen Ressourcenaufwand.

2 Stand der Technik

Um ein gemeinsames Verständnis der Herausforderungen bei der Umsetzung kreislauffähiger Produktionssysteme in der Automobilindustrie zu schaffen, beschreibt dieser Abschnitt den aktuellen Lebenszyklus solcher Systeme. Zudem wird aufgezeigt, in welcher Form bereits heute Unternehmen nachhaltige Lösungen durch das Geschäftsmodell „Equipment-as-a-Service“ anbieten.

Bei der Planung neuer Fertigungslinien werden in der Automobilindustrie aktuell maßgeschneiderte Betriebsmittel und Roboterzellen für spezifische Fahrzeugplattformen konzipiert. Das entworfene Produktionssystem ist häufig so ausgelegt, dass mehrere Produktserien darauf produziert werden können

(Walla und Kiefer, 2011). Kommt es zu einem Modellwechsel ist die Um- oder Aufrüstung jedoch nicht rentabel, da der finanzielle und technische Aufwand zu groß wird. Die Stilllegung und der Rückbau der Vorrichtungen sind dadurch unumgänglich (Walla und Kiefer, 2011).

Bislang werden Betriebsmittel bei einem Produktwechsel und einer damit verbundenen Nichtnutzung im Fertigungssystem oder nach der Stilllegung ausgemustert. Dadurch geht ungenutztes Potenzial verloren, da diese in anderen Fertigungslinien einen Mehrwert bieten können (Herfs et al., 2024). Eine Ursache dieses Problems liegt in der fehlenden Datendurchgängigkeit. Zum einen ist der aktuelle Betriebsmittelzustand nicht bekannt (Heinbach, 2025), zum anderen sind Ersatzteile schwer zu beschaffen, da etablierte Produktlinien aus dem Sortiment genommen werden. In der Folge halten die neuen Eigentümer die Ersatzteilverfügbarkeit für nicht mehr relevant (German Machine Parts, 2025). Dies führt bei vielen Herstellern dazu, dass ältere Systeme vorzeitig außer Betrieb genommen werden. Für Ladungsträger existieren bislang kein Standard für einen digitalen Zwilling (DZ), der über den gesamten Lebenszyklus hinweg genutzt und geteilt werden kann. Dadurch ist die Interoperabilität zwischen verschiedenen Akteuren oder Standorten desselben Unternehmens stark eingeschränkt. In der Praxis erfolgt die Nachverfolgung häufig über einfache Pfandsysteme, wie etwa Euro- oder Gitterbox-Systeme.

In modernen Produktionsanlagen wird zunehmend auf das sogenannte Retrofit gesetzt. Dabei werden ältere Roboter und Maschinen nachträglich modernisiert, um sie an die Anforderungen von Industrie 4.0 anzupassen. Somit müssen diese nicht durch eine neue Maschine ersetzt werden (Arjoni et al., 2017). Dies hat den Vorteil, dass nicht auf ein aktuelleres Gerät umgerüstet werden muss und die alte Anlagenvorschriften weiterhin gültig sind, wodurch weitere erhebliche Umbauarbeiten vermieden werden. So betreibt Yaskawa als Hersteller von Robotiklösungen Retrofit als lukratives Servicemodell. Die Mechanik von üblicherweise 15 bis 20 Jahre alten Robotern wird gesamtheitlich überholt und das Gerät für weitere zehn bis fünfzehn Jahre einsatztauglich gemacht (MM MaschinenMarkt, 2015). Durch die rechtzeitige Modernisierung kann somit die Leistung und der Funktionsumfang der Produktionsanlagen erhöht werden. So wird die Effizienz gesteigert und die Wettbewerbsfähigkeit durch eine zukunftssichere Automatisierung mit neuesten Technologien und modernster Software bleibt erhalten (KUKA, 2025). Solche Retrofit-Services ermöglichen es, die Produktionslinien langfristig kostengünstig weiter zu betreiben, wenn Budgetrestriktionen eine Neuanschaffung erschweren (MM MaschinenMarkt, 2015).

Derzeit wird der Übergang zu kreislauforientierten Betriebsmodellen in der Automobilindustrie stark diskutiert (Expertenkreis Automobilwirtschaft, 2025). Ein zentrales Konzept hierfür ist Equipment-as-a-Service (EaaS); Betriebsmittel und Roboter werden nicht mehr verkauft, sondern vermietet. Roboterhersteller wie bspw. KUKA vermarkten bereits generalüberholte Roboter als gebrauchte Systemlösungen und bieten Mietverträge an, um Investitionskosten beim Kunden zu senken und die Ressourceneffizienz zu steigern (KUKA, 2025). Bei Original Equipment Manufacturers (OEMs) wird der traditionelle Maschinenservice als strategische Betreuung neu gedacht und neue Dienstleistungen entwickelt. Eine engere Kundenbeziehung zwischen Anlagenhersteller und OEM ermöglicht fortgeschrittene Serviceverträge, welche die komplette Produktionslinie oder gesamte Werke abdecken können. Dies liefert dem Anlagenhersteller wichtige Daten, um innovative Servicelösungen zu entwickeln (Automation World, 2022). Auch in der Forschung wird EaaS als mögliches Modell zur Förderung der Wiederverwendung von Betriebsmitteln vorgeschlagen. Insbesondere modulare, standardisierte Vorrichtungen könnten über EaaS wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden (Herfs et al., 2024). Auch bei Ladungsträgern sind EaaS-Ansätze vorstellbar, etwa in Form von Pay-per-Pick-Modellen. In der Praxis fehlt es jedoch bislang an einer systematischen Umsetzung entsprechender Geschäftsmodelle. Ein wichtiger Befähiger für Anbieter wie Anwender derartiger Geschäftsmodelle sowie der Umsetzung von Re-X Strategien liegt auch in der Modernisierung der Unternehmens- und Produktions-IT, um Datenplattformen und der Fähigkeit hierfür DZ einzusetzen. Auf deren Grundlage kommen u.a. mit Catena-X und Factory-X neue Standards für den Daten-

Austausch und den Konsum von Diensten zum Tragen, die ebenfalls in ersten Pilotanwendungen in der Automobilindustrie umgesetzt werden.

Aus der beschriebenen Untersuchung geht hervor, dass EaaS aktuell besonders bei Roboterherstellern Anwendung findet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Roboter als Universalmaschinen vielseitig einsetzbar sind und sich daher für eine flexible Nutzung eignen. Der Einsatz von EaaS ist bei spezialisierten Betriebsmitteln wie Spannvorrichtungen oder Ladungsträgern bisher kaum verbreitet. Auch für digitale Infrastrukturen rund um standardisierte DZ und ihre Services wurde EaaS in der Forschung bisher wenig betrachtet. Die Übertragung des EaaS-Ansatzes auf produktspezifische Betriebsmittel und der dazugehörige datengetriebene Serviceanteil stellt daher nicht nur in kreislaufbezogenen Prozessen weiterhin einen klaren Forschungsbedarf dar.

3 Konzept des Forschungsprojekts AutoPilot

Das Forschungsprojekt AutoPilot untersucht, wie ein Gesamtpaket für die mehrfache Wiederverwendung von Betriebsmitteln entwickelt werden kann, um diese zielgerichtet in die Kreislaufwirtschaft zu integrieren. Hierfür wird das Konzept einer modularen Plattform aufgegriffen, welche durch den Betriebsmittelausrüster verwaltet wird und mit verschiedenen Betriebsmitteln ausgestattet werden kann, um spezifische Fertigungsschritte automatisiert durchzuführen. Dies ermöglicht den schnellen Austausch unterschiedlicher Spann- und Montagevorrichtungen und erhöht dadurch die Flexibilität und Effizienz im Fertigungsprozess. Der Betriebsmittelhersteller bleibt Eigentümer der Betriebsmittel und stellt diese dem Unternehmen für die Nutzungsphase zur Verfügung. Während der Nutzungsphase erfassen Sensoren den aktuellen Zustand der Betriebsmittel und liefern Prozessdaten für eine prädiktive Wartung und Zustandsbestimmung. Am Ende des Nutzungszyklus erfolgt die Rückführung durch den Kunden an den Betriebsmittelhersteller. Dieser führt anschließend eine Inspektion und Aufbereitung durch, sodass das Betriebsmittel für den nächsten Einsatz bei einem neuen Kunden zur Verfügung steht. Dem Anwender entstehen dadurch lediglich Kosten für die Gebrauchsdauer, welche der Ausrüster als kontinuierliche Einnahmen erhält. Dieses Modell schafft für beide Seiten einen Anreiz, die Ausrüstung langlebig und mehrfach nutzbar zu gestalten.

4 Befähigende Technologische Ansätze

Um das beschriebene Konzept einer modularen Plattform mit austauschbarem EaaS-Equipment umsetzen, bedarf es einiger neuer technologischer Ansätze, die eine nachhaltige und mehrfache Nutzung von Betriebsmitteln ermöglichen. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.1 Zirkuläre Betriebsmittel

Die speziell konstruierten Betriebsmittel bestehen aus standardisierten, wiederverwendbaren Bausteinen, sodass ein schneller Austausch von Verschleißteilen ermöglicht wird. Damit ein maßgeblicher Beitrag zur Kreislaufwirtschaft gewährleistet und der ökologische Fußabdruck reduziert wird, werden die einzelnen Komponenten teilweise durch nachhaltige und wiederverwertbare Werkstoffe wie Holz und recycelbaren 3D-Kunststoffen ausgetauscht. Bei den verwendeten Holzwerkstoffen handelt es sich um Wood Veneer Composites (WVC), also um Verbundwerkstoffe aus Holzfurnierlagen. Diese Materialien zeichnen sich durch mehrere vorteilhafte Eigenschaften aus: Ökologisch leisten sie durch ein vergleichsweise geringes CO₂-Äquivalent bei der Herstellung sowie durch die temporäre Kohlenstoffbindung während des Holzwachstums einen Beitrag zur Reduktion der Umweltwirkungen. Ökonomisch ermöglichen sie aufgrund ihrer kosteneffizienten Herstellung und der geringen Wartungs- und Instandhaltungsbedarfe eine Reduktion der Lebenszykluskosten.

Technisch bieten sie ein günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht, eine hohe Schwingungsdämpfung sowie eine gute Eignung für modulare, wartungsarme und reparaturfreundliche Konstruktionskonzepte. Die Verwendung und Integration von seriengefertigten, standardisierten

Aktoren und Sensoren erlauben eine einfache Rückführung und Aufbereitung der Komponenten, um diese für die sichere Wiederverwendung zur Verfügung zu stellen. Zusammenfassend wurde bei der Gestaltung der Betriebsmittel die Dimensionen nachhaltige Werkstoffe, Modularität, Wiederverwendbarkeit und Demontierbarkeit betrachtet und deren Gewichtung im Auslegungsprozess maximiert.

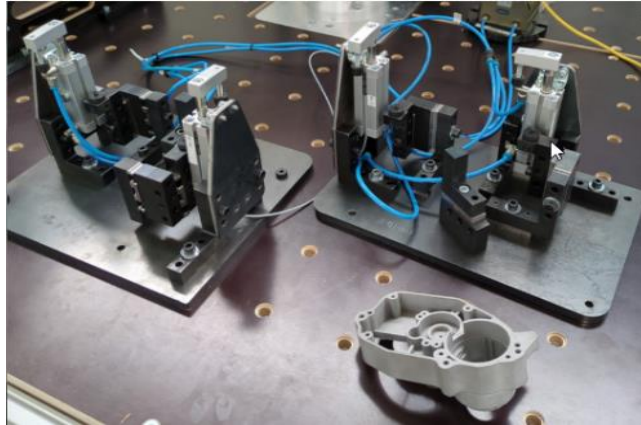


Abbildung 1: Entwickelte modulare Betriebsmittel

4.2 Digitaler Zwilling und digitale Plattform

Um den aktuellen Zustand echtzeitfähig zu kontrollieren, besitzt jedes Betriebsmittel ein digitales Modell, dem sogenannten DZ. In diesem werden Geometrie, Materialdaten und Historie, die durch Prozessdaten aggregiert wird, gespeichert. Durch eine kontinuierliche Messung werden die Daten dem digitalen Zwilling zugeführt und eine Zustandsprognose kann erstellt werden. Diese über den Lebenszyklus aggregierten Daten werden anschließend verwendet, um eine optimale R-Strategie für das Betriebsmittel und die Sub-Komponenten durch den Zwilling zu ermitteln. Dieser Prozess ist in Abbildung 2 dargestellt. Die hierfür erforderlichen Mechanismen basieren auf dem zunehmenden Einsatz von Cloud-Technologien und modernen Datenmanagement-Ansätzen. Diese erweitern herkömmliche IT-/OT-Integrationen im Sinne von DataOps und erleichtern die Nutzung von DZ. Dadurch lassen sich aufwendige Vor-Ort-Tests reduzieren und Betriebsmittel schneller wiederverwenden. Gleichzeitig wird die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Parteien verbessert, etwa durch kontinuierliche Überwachung sowie die Möglichkeit, Funktionen im virtuellen Raum anzupassen und abzusichern, sowohl für potenzielle als auch bereits eingetretene Veränderungen. Im Projekt wurden auch Mechanismen entwickelt die den Entstehungs- und Änderungsprozess sowie das Management von DZ aus dem PLM heraus adressieren.

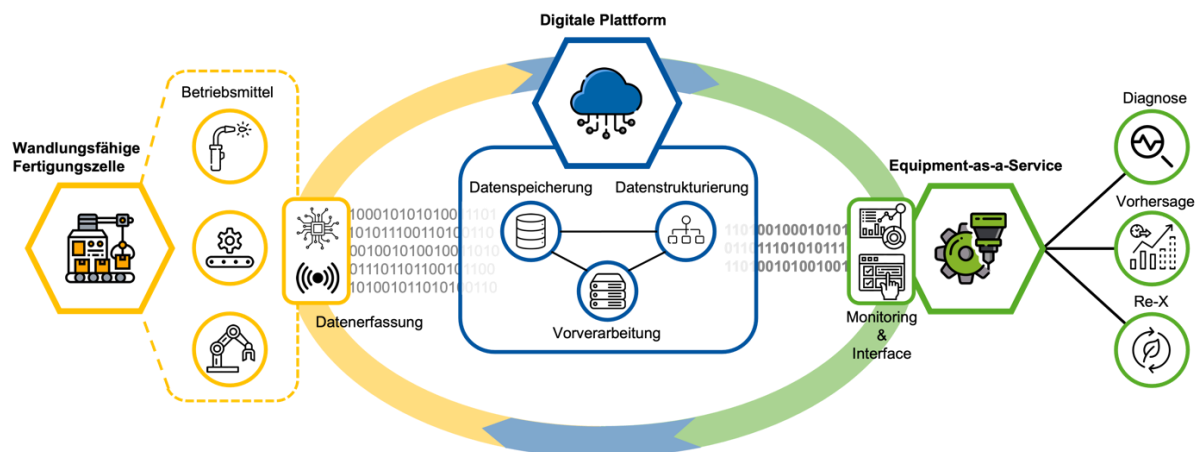


Abbildung 2: Daten Plattform zum Austausch von Betriebsmitteln mittels EaaS

4.3 Equipment-as-a-Service (EaaS)

Das Konzept EaaS zeichnet sich nicht nur im Kontext der Kreislaufwirtschaft aus, sondern ist für Kunden und Hersteller von Betriebsmitteln auch ökonomisch reizvoll. So führt eine nutzungsbasierte Abrechnung durch den Abschluss eines Abonnements für Werkzeuge und Vorrichtungen durch den Kunden zu geringeren Investitionskosten für das Produktionssystem.

Im Projekt wird ein EaaS-Konzept entwickelt, welches Service-Level-Agreements wie Verfügbarkeit, Genauigkeit und maximale Ausfallzeit betrachtet. Zudem wird analysiert, inwieweit diese Vereinbarungen zur Reduktion des Produktionsausfallrisikos beitragen können. Zu den Leistungsversprechen des Servicepakets zählen sowohl Wartung, Kalibrierung als auch das Ersatzteilmanagement. Prozessdaten der Betriebsmittel fließen über die DZ direkt in die Produktentwicklung ein und optimieren beim Betriebsmittelhersteller die Lebenszykluskosten und Nachhaltigkeitskennzahlen. Zur Erarbeitung und Bewertung dieses Konzept wurden im Projekt mehrere Workshops durchgeführt und ein mögliches Geschäftsmodell in einem Business Model Canvas dargestellt.

5 Ergebnisbeschreibung

Verschiedene Lösungen für die technologischen Ansätze wurden innerhalb des Forschungsprojektes anhand von drei Demonstratoren entwickelt, erprobt und evaluiert. Dazu wurden zwei Fallbeispiele betrachtet, wie eine Nutzung von zirkulären und EaaS-fähigen Betriebsmittel erfolgen kann. Die Demonstratoren und Fallbeispiele sind in Abbildung 3 dargestellt.

Fallbeispiel I betrachtet die Anpassung und Erweiterbarkeit der Betriebsmittel. Ein vorhandenes Betriebsmittel kann in seinem Lebenszyklus mehrfach gezielt in der Funktionalität erweitert werden, um damit neue Modellaufgaben eines Produktes oder Produktvarianten herzustellen. Führt beispielsweise ein Automobilhersteller eine Neuauflage seines Serienmodells ein, kann dieses gezielt angepasst werden, um das Betriebsmittel des alten Serienmodell wiederzuverwenden und eine Neuherstellung zu vermeiden. Dies spart sowohl Ressourcen als auch Kosten durch Integrationsaufwände der Neuherstellung.

Fallbeispiel II betrachtet Betriebsmittel mit einem längeren, jedoch schwankenden Nutzungszyklus, die je nach Bedarf unterschiedlich stark benötigt werden. Jedes Betriebsmittel dient dabei der Herstellung eines spezifischen Produktes. Innerhalb der Fertigungslinie können die Betriebsmittel untereinander ausgetauscht werden, um das Produktionssystem für die Herstellung verschiedener Produkte zu befähigen. Beispielsweise kann hierzu ein Automobilzulieferer betrachtet werden, welcher für die Herstellung von Stabilisatoren für drei unterschiedliche Automobilhersteller zuständig ist. Für die Herstellung jedes Stabilisator-Modells wird je ein Betriebsmittel benötigt. Aufgrund der schwankenden Nachfrage der Automobilhersteller werden die Betriebsmittel im Produktionsprozess untereinander laufend ausgetauscht, um jeden Hersteller beliefern zu können und trotzdem eine vollständig ausgelastete Produktion zu erreichen.

Die beschriebenen Fallbeispiele werden im Projekt anhand von drei Demonstratoren betrachtet. Fallbeispiel I wird durch einen Demonstrator in den Laboren des WZLs, die sogenannte Flex-Zelle, dargestellt. Diese Zelle beinhaltet Betriebsmittel, die über den Lebenszyklus gezielt weiterentwickelt und angepasst werden. Fallbeispiel II wird im Forschungsprojekt durch zwei Demonstratoren betrachtet, die sogenannten ReStackCells. Die ReStackCell stellt eine flexible und modulare Produktionsplattform dar und besteht aus einem Maschinengestell aus Aluminiumprofilen. Zusätzlich wird eine zweite Variante der ReStackCell aufgebaut, welche aus einer Holzeinhausung des Herstellers Ligenium besteht. Die Zelle in Holzbauweise wurde mit einem Profilsystem bestehend aus WVC erstellt und kann komplett demontiert werden. Die Struktur ist vergleichsweise leicht und hat einen deutlich reduziertes CO₂-Äquivalent. Die Verwendung zweier Zellen ist dadurch begründet, dass so eine gezielte Austauschbarkeit der Betriebsmittel zwischen diesen durchgeführt und getestet werden kann. Dies lässt

sich auf die spätere Verwendung von kreislauffähigen Betriebsmitteln in der Industrie übertragen, da dort Betriebsmittel zwischen Betriebsmittelhersteller und unterschiedlichen Kunden ausgetauscht werden sollen. Für beide Zellen existieren daher verschiedene Betriebsmittel, die flexibel zwischen den beiden ReStackCells ausgetauscht werden können.

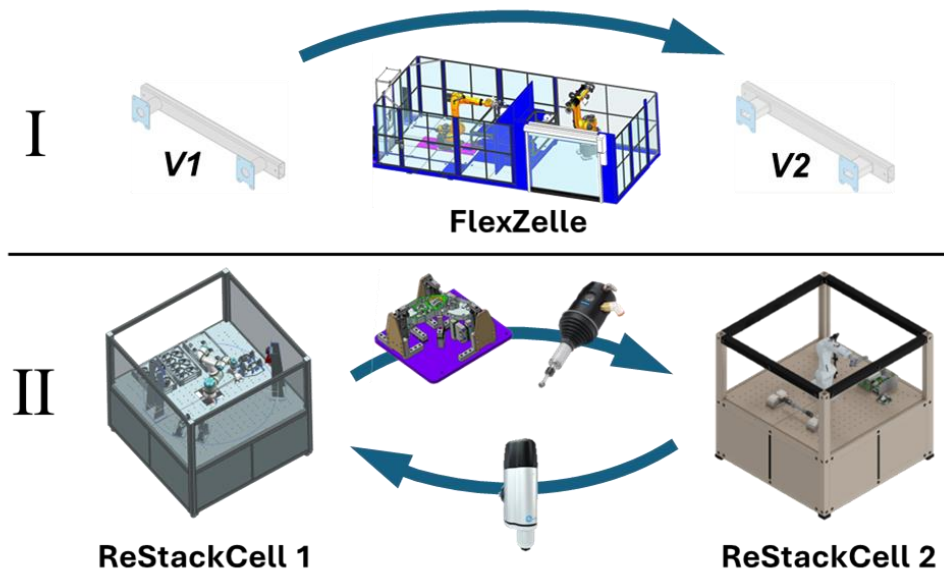


Abbildung 3: Betrachtete Fallbeispiele und entwickelte Demonstratoren im Projekt AutoPilot

Die Betrachtung von Nachhaltigkeitsaspekten soll besonders durch die Verwendung des Werkstoffs Holz in der industriellen Produktion, insbesondere der Automobilindustrie, dargestellt werden. Innerhalb der Demonstratoren findet dieser eine vielseitige Anwendung. So bestehen zusätzlich zu der verwendeten ReStackCell die Ladungsträger für die zu bearbeitenden Werkstücke und die Werkzeugwechselstation für den Roboter aus Holz. Die wesentlichen Vorteile liegen dabei im geringen Gewicht und CO₂-Äquivalent, sowie einer Schwingungsreduktion gegenüber herkömmlichen metallischen Werkstoffen. Die Modularität bei der Aufspannung durch die Lochplatte macht es möglich, dass die Betriebsmittel beliebig auf der Plattform angeordnet werden können, ohne vorherige Bearbeitungsschritte durchführen zu müssen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

AutoPilot demonstriert, dass modulare, kreislauffähige Ausrüstung kombiniert mit DZ und einem Equipment-as-a-Service-Modell die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Automobilproduktion nachhaltig erhöht und zirkuläre Produktionssysteme ermöglichen. Künftige Arbeiten werden die Produktionsplattform ReStackCell erweitern und zusätzliche Funktionalitäten einbringen, welche Montage, sowie Integrationsaufwände der Betriebsmittel reduzieren, welche die ökonomische Effizienz von EaaS weiter verbessert. Nach dem Projekt sind erste Industrie-Piloten geplant, um Skalierbarkeit und ROI unter realen Bedingungen zu validieren. Hierzu werden aktuell interessierte Unternehmen und Partner gesucht.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts AutoPilot, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02J21E000 gefördert wird. Die Autoren danken den Partnern aus Wissenschaft und Industrie für die konstruktive Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch im Rahmen des Projekts. Besonderer Dank gilt den Industriepartnern für die Bereitstellung von Anwendungsdaten und die praxisnahe Validierung der entwickelten Ansätze.

Referenzen

Verband der Automobilindustrie (2025) *Dekarbonisierung des Lebenszyklus eines PKWs: Auf dem Weg zur klimaneutralen Mobilität*. Verfügbar unter: <https://perma.cc/E7JV-DQCA> (Zugriff: 14. Mai 2025), S. 9–11.

Walla, W. und Kiefer, J. (2011) *Life Cycle Engineering – Integration neuer Produkte in bestehende Produktionssysteme in der Automobilindustrie*. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19692-8_36.

KUKA (2025) *KUKA-Website*. Verfügbar unter: <https://www.kuka.com/en-us/services/circular-services> (Zugriff: 15. Mai 2025).

Herfs, W., Riesener, M., Petrovic, O., Blondrath, A. und Blanke, P. (2024) *Sustainable Production with Circular Equipment – Opportunities and Challenges in Practice*. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8_17.

Heinbach, W. (2025) *Life Cycle und Obsoleszenzmanagement für Produktionsanlagen*. Verfügbar unter: <https://perma.cc/GET7-XVHG> (Zugriff: 15. Mai 2025), S. 7.

German Machine Parts (2025) *Obsoleszenz Management im Maschinen- und Anlagenbau*. Verfügbar unter: <https://perma.cc/3R33-QQXP> (Zugriff: 15. Mai 2025), S. 1.

Arjoni, D.H., Madani, F.S., Ikeda, G., de Carvalho, G.M., Cobianchi, L.B., Ferreira, L.F.L.R. und Villani, E. (2017) ‘Manufacture Equipment Retrofit to Allow Usage in the Industry 4.0’. doi: <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.46>.

MM MaschinenMarkt (2015) *Maschinenmarkt-Website*. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de> (Zugriff: 15. Mai 2025).

Expertenkreis Automobilwirtschaft (2025) *Handlungsempfehlungen für die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie: Chancen und aktuelle Herausforderungen*. Verfügbar unter: <https://perma.cc/5XLC-XY43> (Zugriff: 2. Juni 2025).

Automation World (2022) *Automation World-Website*. Verfügbar unter: <https://www.automationworld.com> (Zugriff: 15. Mai 2025).

AutoPilot: Grundlage und Rahmenbedingungen für eine Skalierung von Equipment-as-a-Service-Modellen in der Automobilproduktion

Felipe Andia de Campos Leite ¹, Alexander Sorgenicht ¹, Axel Werner ¹,
Marc-André Weismüller ², Oliver Petrovic ² und Christian Brecher ²

¹ Capgemini Engineering Deutschland S.A.S. & Co. KG, Frankfurter Ring 81, 80807 München

² RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen

Abstract. Das Forschungsprojekt AutoPilot adressiert die Transformation der Automobilproduktion hin zu einer nachhaltigen, kreislauforientierten Wertschöpfung. Im Fokus steht die Entwicklung modularer, wiederverwendbarer Betriebsmittel, die im Rahmen eines Equipment-as-a-Service (EaaS)-Modells bereitgestellt werden. Der Beitrag analysiert zunächst den aktuellen Lebenszyklus von Automatisierungsanlagen und identifiziert zentrale Herausforderungen wie mangelnde Datendurchgängigkeit und hohe Ressourcenverluste bei Produktwechseln. Anschließend werden drei technologische Kernansätze vorgestellt: zirkuläre Betriebsmittel aus nachhaltigen Materialien, digitale Zwillinge zur Zustandsüberwachung und prädiktiven Wartung sowie EaaS-Geschäftsmodelle zur ökonomischen und ökologischen Optimierung. Die Konzepte werden anhand von Demonstratoren in zwei Fallstudien validiert, die flexible Wiederverwendung und modulare Anpassung von Betriebsmitteln in realitätsnahen Produktionsumgebungen zeigen. Die Ergebnisse belegen das Potenzial des Ansatzes zur Reduktion von CO₂-Emissionen, zur Ressourcenschonung und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Abschließend wird ein Ausblick auf industrielle Pilotanwendungen und die Weiterentwicklung der ReStackCell-Plattform gegeben.

Keywords: *Kreislaufwirtschaft, Equipment-as-a-Service, digitale Zwillinge, nachhaltige Produktion, Betriebsmittel, Automobilindustrie*

1. Motivation: EaaS als Schlüsselement für eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Automobilproduktion in Deutschland

Vor dem Hintergrund aktueller wirtschaftlicher und ökologischer Herausforderungen steht die deutsche Automobilproduktion unter erheblichem Transformationsdruck. Steigende Energiepreise, volatile Rohstoffmärkte, globale Lieferkettenrisiken sowie ambitionierte Klimaziele erfordern tiefgreifende Veränderungen in der industriellen Wertschöpfung. In diesem Kontext stellt das Equipment-as-a-Service (EaaS)-Modell einen vielversprechenden Lösungsansatz dar, um Produktionsstrukturen zukunftsfähig, effizient und resilient zu gestalten. EaaS ermöglicht es Unternehmen, Produktionsanlagen nicht mehr klassisch zu erwerben, sondern nutzungsbasiert als Dienstleistung zu beziehen. Dies reduziert hohe Kapitalbindungen und wandelt fixe Investitionskosten in flexible Betriebsausgaben um. Insbesondere in konjunkturell unsicheren Zeiten verbessert dies die Liquidität und Reaktionsfähigkeit von Unternehmen. Darüber hinaus tragen die in EaaS-Modelle integrierten digitalen Monitoring- und Wartungslösungen zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und Ressourceneffizienz bei. Predictive Maintenance vermeidet Stillstandzeiten, reduziert den Energieverbrauch und senkt den Bedarf an Ersatzteilen, was ein entscheidender Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit schafft (Kett et al., 2023; Deloitte Deutschland, 2023).

Auch aus wettbewerbsstrategischer Sicht bietet EaaS Vorteile. Die fortlaufende technologische Aktualisierung der Anlagen ermöglicht kürzere Innovationszyklen und eine schnellere Anpassung an neue Produktionsanforderungen, etwa im Bereich Elektromobilität. Gleichzeitig fördert das Modell eine Kreislaufwirtschaft, da Anbieter für die Instandhaltung, Wiederverwendung oder das Recycling der Anlagen verantwortlich bleiben. Insgesamt unterstützt EaaS somit sowohl wirtschaftliche Effizienz als auch ökologische Verantwortung. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie im globalen Transformationsprozess (SVP Deutschland AG, 2023).

2. Beschreibung des Projektes AutoPilot

Das Projekt AutoPilot bietet einen ersten Ansatz zur Förderung von Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz in der Produktion und behandelt drei Ansätze zu deren Steigerung- Erstens werden in Rahmen des Projektes innovative Konzepte für nachhaltigere Betriebsmittel untersucht, die durch den Einsatz umweltfreundlicher Materialien und modularer Bauweise Re-X-Ansätze wie Wiederverwendung und Aufarbeitung unterstützen. Die Modularität ermöglicht den Austausch und die Anpassung von Komponenten, was die Lebensdauer verlängert und Ressourcen spart. Zweitens wird der Einsatz von Equipment-as-a-Service (EaaS)-Geschäftsmodellen betrachtet, um eine wirtschaftlichere und nachhaltigere Nutzung der Betriebsmittel zu fördern. Diese Geschäftsmodelle verteilen die Kosten und den CO₂-Fußabdruck über die Nutzungsdauer, was besonders bei kapitalintensiven Betriebsmitteln in kleinvolumigen Produktionen Vorteile bringt (Kett et al., 2023). Drittens wird eine digitale Plattform konzipiert, welche den Austausch zwischen Anbietern und Nutzern fördert und Transparenz und Zusammenarbeit steigert sowie die kontinuierliche Optimierung der Produktionsprozesse durch Leistungsdaten ermöglicht.

Für die Evaluation und Testung dieser Ansätze wurden im Projekt AutoPilot wandlungsfähige Produktionszellen entwickelt, die eine Reduzierung des CO₂-Fußabdruck, eine Erhöhung der Zirkularität und somit eine nachhaltigere Fahrzeugproduktion ermöglichen. Zur Bewertung der ökologischen und wirtschaftlichen Effekte der entwickelten Ansätze werden innerhalb des Projektes Lebenszyklusanalysen (LCA) und Lebenszykluskostenberechnungen (LCC) der Betriebsmittel durchgeführt. Diese identifizieren ökologische Hotspots und analysieren die Gesamtkosten über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Zusätzlich werden im Rahmen des Projektes Projektergebnisse auf die Serienproduktion von Fahrzeugen bei Original Equipment Manufacturern (OEMs) übertragen.

3. Skalierung von EaaS-Modellen für die zukünftige Automobilproduktion

3.1 Voraussetzungen und Erfolgsfaktoren

Die Implementierung von Equipment-as-a-Service (EaaS) in der Fahrzeugproduktion erfordert eine Kombination aus technologischer Infrastruktur, organisatorischer Anpassung und strategischer Kundenorientierung. Zentrale Voraussetzungen sind die Integration von IIoT-Sensoren zur Echtzeitüberwachung von Maschinenparametern sowie robuste Schnittstellen, die eine nahtlose Kommunikation zwischen Maschinen, Plattformen und Cloud-Systemen ermöglichen. Erfolgsentscheidend ist zudem die Fähigkeit der Hersteller, kontinuierliche Innovationen in der Produktpipeline voranzutreiben und datengetriebene Dienstleistungen wie vorausschauende Wartung anzubieten. Dies ist notwendig, um die spezifizierte Maschinenverfügbarkeit zu garantieren. Organisatorisch erfordert EaaS die Entwicklung neuer Vertriebskompetenzen, um nutzungsbasierte Abrechnungsmodelle wie Pay-per-Use effektiv zu kommunizieren, sowie den Aufbau von Partnerschaften mit Finanzdienstleistern und Technologieanbietern. Ein weiterer kritischer Faktor ist die langfristige Kundenbindung durch Servicepakete, wie Wartung, Ersatzteile und Software-Updates aufzubauen. Dies schafft die Grundlage für eine Transformation der Kundenbeziehung, weg vom

einmaligen Verkauf hin zu fortlaufenden Kooperation und Wertschöpfung (Deloitte Deutschland, 2023).

3.2 Strukturelle Anforderungen an EaaS-Ökosysteme in der Automobilindustrie

Die erfolgreiche Etablierung von Equipment-as-a-Service (EaaS) in der Automobilindustrie erfordert ein klar definiertes Wertversprechen, das auf nutzungsbasierten Abrechnungsmodellen wie bspw. Pay-per-Use basiert. Diese Modelle ermöglichen eine direkte Kopplung der Kosten an die Produktionsleistung und fördern damit eine höhere Kostentransparenz. Im Zentrum steht die Optimierung der Total Cost of Ownership (TCO), wobei nicht nur Investitionskosten (CAPEX), sondern auch Betriebskosten (OPEX) über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden. Leistungsvereinbarungen (Service Level Agreements, SLAs) bilden dabei die vertragliche Grundlage für Verfügbarkeit, Qualität und Wartung (SVP Deutschland AG, 2023).

Die digitale Infrastruktur ist ein zentrales Element für die Umsetzung eines EaaS-Modells. Sie umfasst die Integration von IIoT-Sensorik zur Erfassung von Echtzeitdaten, die Aggregation dieser Daten auf Cloud- oder Edge-Plattformen sowie deren Analyse mittels KI-gestützter Verfahren. Diese Technologien ermöglichen unter anderem Predictive Maintenance, Auslastungsoptimierung und Effizienzanalysen, was die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Maschinen erhöht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Umsetzung von EaaS-Modellen ist die Zirkularität und Wiederverwendbarkeit der Betriebsmittel. Bereits in der Designphase müssen Reparaturfähigkeit, Wiederverwendung und Recycling berücksichtigt werden. Modularität und Shared-Use-Konzepte ermöglichen die Mehrfachnutzung von Betriebsmitteln durch verschiedene Kunden, was insbesondere in flexiblen Fertigungslinien von Vorteil ist. Ergänzend dazu gewinnt CO₂-Tracking an Bedeutung, um die Umweltwirkungen transparent zu bilanzieren und regulatorischen Anforderungen gerecht zu werden (Kett et al., 2023).

Die Governance-Strukturen eines EaaS-Ökosystems basieren auf der Zusammenarbeit verschiedener Akteure. Darunter befinden sich OEMs, Maschinenhersteller, Plattformbetreiber, Servicepartner und Finanzdienstleister. Offene Standards und Interoperabilität sind essenziell, um technologische Vielfalt zu ermöglichen und Lock-in-Effekte zu vermeiden. Langfristige, vertrauensvolle Partnerschaften mit klarer Risikoteilung bilden die Grundlage für eine stabile Zusammenarbeit.

Finanzierungsmodelle wie Leasing, Pay-per-Part oder Pay-per-Hour bieten flexible Alternativen zur klassischen Investition und senken die Einstiegshürden für OEMs. Ergänzend dazu sind Versicherungslösungen notwendig, um Risiken wie Ausfälle oder Schäden abzusichern.

Schließlich spielen regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle. Datenschutz und Datensouveränität müssen klar geregelt sein, insbesondere im Hinblick auf die Nutzung maschinengenerierter Daten. Vertragsrechtliche Klarheit ist erforderlich, um Haftungsfragen, Garantien sowie Rechte und Pflichten der beteiligten Parteien eindeutig zu definieren.

3.3 Organisation von EaaS-Ökosystemen in der Automobilindustrie

Die erfolgreiche Implementierung von Equipment-as-a-Service (EaaS) in der Fahrzeugproduktion setzt ein komplexes, kooperatives Ökosystem voraus, das verschiedene Akteure mit komplementären Rollen und Interessen integriert. Dieses Ökosystem basiert auf der engen Zusammenarbeit zwischen Automobilherstellern (OEMs), Maschinenbauern, Plattformanbietern, Dienstleistern, Finanzakteuren und weiteren Stakeholdern, die gemeinsam die technische, wirtschaftliche und regulatorische Infrastruktur für EaaS schaffen. Alle Akteure bilden zusammen ein eng vernetztes EaaS-Ökosystem, welches in Abbildung 1 dargestellt ist. Im Folgenden werden die einzelnen Stakeholder und deren Rolle im Ökosystem dargestellt.

OEMs fungieren als Hauptnutzer der Betriebsmittel und streben durch EaaS-Modelle eine höhere Flexibilität, geringere Kapitalbindung (CAPEX) und eine verbesserte Nachhaltigkeit an (Kett et al.,

2023). Maschinen- und Anlagenbauer übernehmen nicht nur die Herstellung, sondern zunehmend auch den Betrieb der Betriebsmittel im Rahmen von EaaS, was ihnen neue Einnahmequellen und wertvolle Nutzungsdaten zur Produktoptimierung eröffnet (Deloitte Deutschland, 2023). Digitale Plattformbetreiber sind häufig Start-ups oder spezialisierte IT-Dienstleister und spielen eine zentrale Rolle als Vermittler zwischen den Akteuren. Sie ermöglichen die Skalierung des Geschäftsmodells durch datenbasierte Services und schaffen die technische Infrastruktur für Pay-per-Use-Modelle. Ergänzt wird dieses Netzwerk durch Servicepartner, die für Wartung, Reparatur und Condition Monitoring verantwortlich sind und langfristige Serviceverträge anstreben. Finanzdienstleister und Leasinggeber tragen zur Risikoverteilung bei, indem sie die Investitionen in Betriebsmittel finanzieren und Pay-per-Use-Verträge strukturieren. Versicherungen wiederum sichern Betriebsrisiken ab und verlangen dafür transparente Schadensmodelle und präzise Risikobewertungen. IT- und IIoT-Anbieter liefern die notwendige Sensorik, Konnektivität und Datenanalysefunktionen, die für die Umsetzung von EaaS essenziell sind. Ihre Interessen liegen in der Systemintegration, Datennutzung und der Bereitstellung von Sicherheitslösungen. Regulierungsbehörden und Standardisierungsgremien schaffen den rechtlichen Rahmen für Datenschutz, Nachhaltigkeit und Vertragsgestaltung. Ihre Rolle ist entscheidend für die Rechtssicherheit und die Förderung eines fairen Wettbewerbs.

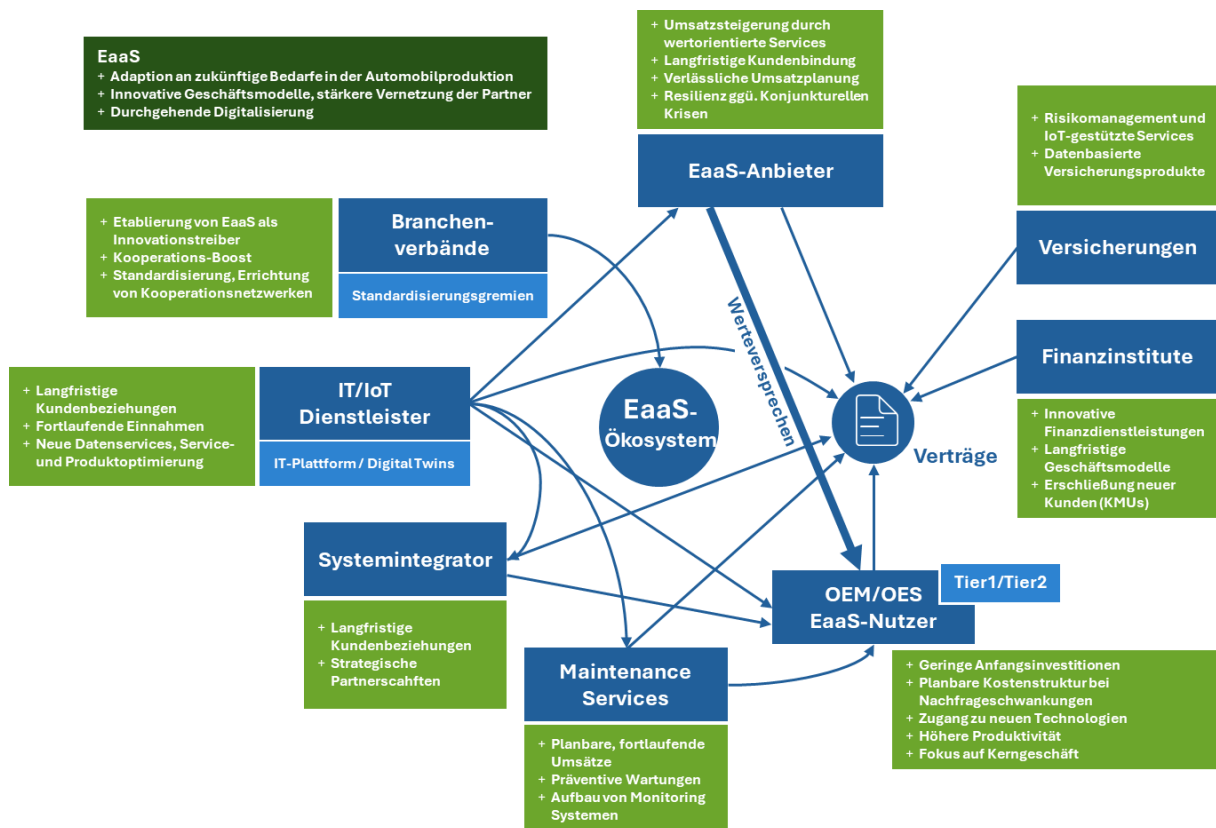


Abbildung 1: EaaS Ökosystem mit involvierten Stakeholdern

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Ökosystems sind Partner aus der Kreislaufwirtschaft, die für die Rücknahme und Wiederverwertung der Betriebsmittel am Ende ihres Lebenszyklus verantwortlich sind. Sie tragen zur Ressourceneffizienz und zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben bei. Nicht zuletzt spielen auch die Mitarbeitenden und Betriebsräte der OEMs eine zentrale Rolle. Sie begleiten die Transformation der Betriebsmodelle und setzen sich für transparente Prozesse und Arbeitsplatzsicherheit ein.

3.4 Skalierungspotenziale durch EaaS-Modelle in der Fahrzeugproduktion

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts AutoPilot zeigen, dass umfassende Equipment-as-a-Service (EaaS)-Modelle einen signifikanten Beitrag zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in

der Fahrzeugproduktion leisten können. Um den zukünftigen Anforderungen der Automobilindustrie gerecht zu werden, sind mehrere technologische und organisatorische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen (SVP Deutschland AG, 2023).

a) Technologische Treiber

Ein zentraler Treiber ist die Entwicklung neuer Markt- und Technologietrends, die auf eine zunehmende Komplexitätsreduktion im Fahrzeugbau, geringere Produktionsvolumina, eine stärkere Ausrichtung auf Nischenprodukte sowie den Einsatz modularer Plattformen und innovativer Fertigungstechnologien wie Additive Manufacturing und Giga-Casting hinweisen.

b) Ökologisches Design von Betriebsmitteln

Ein weiterer Aspekt betrifft das ökologische Design von Betriebsmitteln. Die Kreislauffähigkeit dieser Mittel wird durch modulare Bauweisen, Upgrade-Fähigkeit und den Einsatz nachhaltiger Materialien gefördert. Dies ermöglicht nicht nur Ressourcenschonung, sondern auch die Wiederverwendung in zukünftigen Produktgenerationen.

c) Schrittweise Implementierung von EaaS-Modellen

Da eine vollständige Implementierung von EaaS-Modellen nicht unmittelbar realisierbar ist, erscheint eine schrittweise Einführung sinnvoll. Dabei sollten Betriebsmittel priorisiert werden, die sich durch hohe Investitionskosten, große Stückzahlen, IIoT-Fähigkeit, lange Lebensdauer, geringen Wartungsaufwand und hohe Auslastung auszeichnen.

d) Kooperationen innerhalb der Automobilindustrie

Die Bereitschaft zur Kooperation innerhalb der Automobilindustrie stellt eine weitere entscheidende Voraussetzung dar. Historisch bedingt herrschen in der Branche eine geringe Transparenz und eine starke Wettbewerbsorientierung, was sich negativ auf die Daten- und Plattformkooperation auswirkt. Dennoch führt der zunehmende Druck durch Digitalisierung und Nachhaltigkeitsanforderungen zu einem Wandel. Digitale Zwillinge, Predictive Maintenance und EaaS erfordern eine unternehmensübergreifende Datenverfügbarkeit. Dies lässt erste Öffnungstendenzen bei OEMs erkennen, welche durch Initiativen wie Catena-X, GAIA-X oder Manufacturing-X weiter verdeutlicht werden (Kett et al., 2023; Deloitte Deutschland, 2023).

e) Herausforderungen bei der Kooperation

Die Kooperationsbereitschaft steigt insbesondere in nicht-wettbewerbskritischen Bereichen wie Logistik, Nachhaltigkeitsdaten oder Betriebsmittelnutzung. In strategischen Kernfeldern wie Fahrzeugentwicklung oder Kundenbeziehungen bleibt sie hingegen begrenzt. Use-Case-getriebene Kooperationen, etwa zur gemeinsamen Nutzung von Produktionsdaten für EaaS, gelten als realistischer als umfassende offene Plattformlösungen. Gleichzeitig bestehen weiterhin Hemmnisse wie Datenschutzbedenken, unklare Geschäftsmodelle, inkompatible IT-Systeme und ein Mangel an Vertrauen zwischen OEMs und Zulieferern. Dennoch zeigen Projekte wie Catena-X und Manufacturing-X sowie Pilotinitiativen von Unternehmen wie Bosch, Siemens und TRUMPF, dass datenbasierte EaaS-Modelle mit entsprechender Governance und technischer Absicherung realisierbar sind.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt AutoPilot zeigt, wie durch die Kombination modularer, kreislauffähiger Betriebsmittel, digitaler Zwillinge und nutzungsbasierter Geschäftsmodelle wie EaaS ein nachhaltiger und wirtschaftlich effizienter Wandel in der Automobilproduktion möglich ist. Die entwickelten Konzepte adressieren zentrale Herausforderungen wie Ressourcenverschwendung, mangelnde

Flexibilität und hohe Investitionskosten und bieten konkrete Lösungen zur Steigerung der Anlagenverfügbarkeit, Reduktion von CO₂-Emissionen und Förderung der Kreislaufwirtschaft.

Die erfolgreiche Umsetzung erfordert jedoch ein ganzheitliches EaaS-Ökosystem, das technologische Innovationen, digitale Infrastruktur, neue Geschäftsmodelle und kooperative Governance-Strukturen integriert. Die Ergebnisse des Projekts unterstreichen, dass EaaS nicht nur ein technologischer, sondern auch ein kultureller und organisatorischer Wandel ist.

In den kommenden Projektphasen werden Inhalte für die Verstetigung und den Transfer von Projektergebnissen in die Industrie bearbeitet. Parallel werden Konzepte für die Umsetzung eines ersten industriellen Pilotanwendung entwickelt, um die Skalierbarkeit und den Return on Investment (ROI) unter realen Bedingungen zu validieren. Hierfür werden aktuell interessierte Partner aus Industrie und Forschung gesucht, um gemeinsam den Weg zu einer zirkulären, resilienten und zukunftsfähigen Automobilproduktion zu gestalten.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts AutoPilot, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02J21E000 gefördert wird.

Referenzen

Kett, H., Evcenko, D. & Falkner, J., 2023. Equipment-as-a-Service (EaaS) – Canvas zur Entwicklung von EaaS-Geschäftsmodellen. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Verfügbar unter: <https://www.iao.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/aktuelles/mit-eaas-canvas-in-die-produktion-der-zukunft.html> [Zugriff am 4. Juni 2025].

Deloitte Deutschland, 2023. Equipment-as-a-Service – New business models for the machinery industry. Verfügbar unter: <https://www.deloitte.com/de/de/Industries/industrial-construction/perspectives/equipment-as-a-service-eaas.html> [Zugriff am 4. Juni 2025].

SVP Deutschland AG, 2023. Equipment-as-a-Service (EaaS): Ein zukunftsweisendes Geschäftsmodell. Verfügbar unter: <https://www.svp.de/equipment-as-a-service-eaas-ein-zukunftsweisendes-geschaeftsmodell/> [Zugriff am 4. Juni 2025].

Sächsisches Forschungszentrum CircEcon für zirkuläre Wirtschaft

Steve Sockol¹, Mirko Spieler¹, Dr. Matthias Klärner¹, Prof. Wolfgang Nendel¹ und Prof. Lothar Kroll¹

¹Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Technische Universität Chemnitz

Die Technischen Universitäten Chemnitz, Dresden und Freiberg sowie die Hochschule Zittau/Görlitz beabsichtigen auf Basis ihrer Expertisen die Etablierung eines gemeinsamen, europaweit einzigartigen Forschungscampus für treibhausgasneutrale Kreislaufwirtschaft (CircEcon) bis 2026 in der sächsischen Lausitz aufzubauen und als interdisziplinäre Forschungseinrichtung zu betreiben. Das CircEcon-Forschungszentrum wird im vorliegenden Paper sowie in der Präsentation vorgestellt um über dieses zu informieren und nachhaltige Partnerschaften mit Unternehmen und Forschungseinrichtungen zu akquirieren.

Keywords: Kreislaufwirtschaft, Strukturwandel, Forschungszentrum, Recycling

1 Einleitung

Im Rahmen des CircEcon-Campus Lausitz wird eine synergistische Integration der Forschungskompetenzen in Sachsen durch die Implementierung von Pilotlinien, Versuchsanlagen, Laborkonfigurationen und Demonstrationssystemen angestrebt. Ziel ist die Entwicklung innovativer Ansätze für eine äußerst effiziente Kreislaufwirtschaft, die in Zusammenarbeit mit Unternehmen konzipiert, erforscht und bis zur Marktreife vorangetrieben werden sollen. Die geplante Umsetzung beinhaltet die Anwendung erweiterter Methoden wie künstliche Intelligenz, Digitalisierung und Energiemanagement auf Basis von „grünem“ Wasserstoff. Dabei ist vorgesehen, die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung sowie -aufbereitung über Werkstoffe und Verfahren bis hin zu Strukturen sowie Re-Produktion zu betrachten, um sie in einem treibhausgasneutralen Rahmen zu schließen.

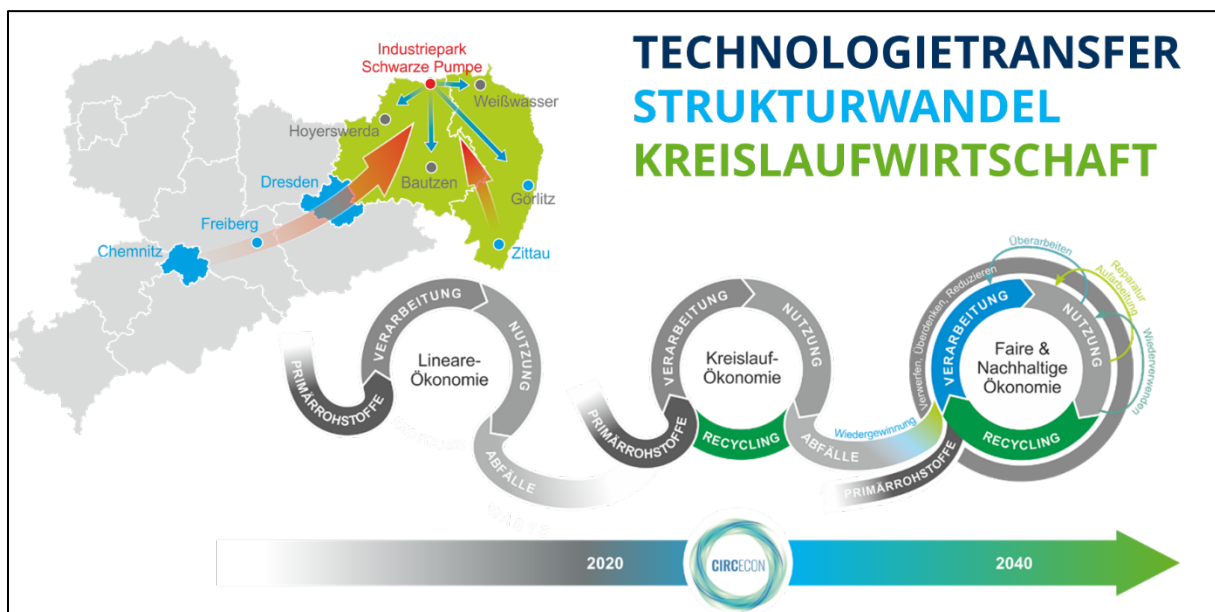


Abbildung 1: Zielstellung und Standort von CircEcon

Der Forschungscampus soll Ende 2026 den Betrieb aufnehmen. Der Bund und der Freistaat Sachsen investieren bis dahin rund 108 Mio. € in das Projekt. Davon fließen rund 48 Mio. € in den Bau des Zentrums und etwa 60 Mio. € in die Ausstattung mit Geräten und Pilotanlagen.

Die Versuchsanlagen und Demonstrationssysteme sollen dazu dienen, zukunftsweisende Technologien für die Kreislaufwirtschaft im Industriemaßstab abzubilden und durch Ansiedlungen und Ausgründungen neue Arbeitsplätze in der Region zu schaffen. Nach Einschätzung des Sächsischen Staatsministeriums für Regionalentwicklung könnten durch „CircEcon“ bis 2028 etwa 450 Arbeits- und Ausbildungsplätze entstehen.

Das Forschungszentrum ist Teil des Strukturwandelprozesses in der Lausitz im Zuge des beschlossenen Kohleausstiegs bis 2038. Im Industriepark Schwarze Pumpe, wo sich früher alles auf die Kohleverstromung konzentrierte, sind mittlerweile 120 Unternehmen angesiedelt.

2 Übersicht der Forschungsschwerpunkte

Das CircEcon-Forschungszentrum befindet sich zum Zeitpunkt der MobilKreis-Tagung im Aufbau und wurde von den vier Hochschulen (siehe Abstract) und insgesamt 16 initialen Professuren geplant, welche ihre speziellen Expertisen in gemeinschaftliche Forschungsaktivitäten einbringen. Die Hauptforschungsfelder von CircEcon sind nachfolgend dargestellt:

- Werkstofftechnologien
 - Hydrierende Depolymerisation und Oberflächentechnik
 - Inline-Charakterisierung (Metalle, Polymere, RC-Polymere, ...)
 - Rezyklate mit gesicherten (vordefinierten) Eigenschaften
- Prozesstechnologien
 - Roboter- und Exoskelett-gestützte Demontage
 - Technologien für wasserstoffbasierte Schmelzöfen
 - Thermochemische Verarbeitung komplexer Stoffgemische
 - Intelligente Sortierung
 - Recycling von Produkten unsicherer Zusammensetzung
- Bewertung und Adaption
 - Prozessübergreifende Stoff- und Energieflussanalyse
 - Erstellung von Interaktionspunkten zur Sektorkopplung
 - Betriebsstrategien für fluktuierende Rohstoff- und Energieversorgung

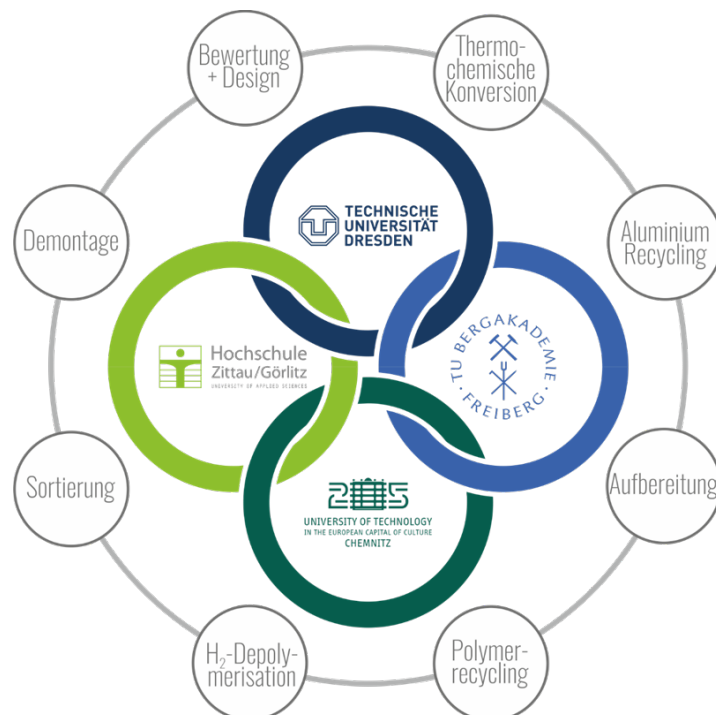


Abbildung 2: Forschungsschwerpunkte

Im nachfolgenden sind Auszüge aus den geplanten Technologien der Hochschulen dargestellt, welche im Rahmen der Investitionen für das CircEcon-Forschungszentrum beschafft werden. Diese Anlagentechnik im Pilotmaßstab ist komplementär zu der bereits an den Hochschulen zur Verfügung stehenden. Die aufgeführte Technik wurde 2024 vordefiniert und stellt einen Planungsstand dar, welcher auf Grundlage neuer Forschungserkenntnisse, der Budgetierung und einer zunehmenden hochschulinternen und -externen Vernetzung bis zur tatsächlichen Inbetriebnahme bis Ende 2026 Änderungen unterlegen ist.

Tabelle 1: Auszug aus den Gerätelisten der Schwerpunktthemen der Hochschulen

Hochschule und Schwerpunkt	Auszug aus der Geräteliste
Hochschule Zittau/Görlitz	
• Demontagetechnologien	Detektionseinheiten, Demontagerobotik mit Endeffektoren, Trockenlegung, ...
• Sortiertechnologien	Sensorbasierte Sortierung, Sortierung nach Dichte, Kunststoffsortierung, ...
TU Bergakademie Freiberg	
• Metallrecycling (nichtmagnetisch)	Innovative Technologien zur Zerkleinerung, Sortierung sowie Schmelz- und Presstechnologien
• Aufbereitungstechnologien	Effiziente Mahl- & Reinigungsanlagen, Anlagen zur Trennung
Technische Universität Dresden	
• Prozesstechnologien	Technologien für wasserstoffbasierte Schmelzöfen, thermochemische Verarbeitung komplexer Stoffgemische, Recycling von Produkten unsicherer Zusammensetzung
• Bewertung & Design	Prozessübergreifende Stoff- und Energieflussanalyse, Erstellung von Interaktionspunkten zur Sektorkopplung, Betriebsstrategien für fluktuierende Rohstoff- und Energieversorgung
Technische Universität Chemnitz	
• Polymerrecycling	Innovative Compoundier- & Extrusionssysteme zur Polymerkettenmodifizierung & -additivierung, selektive Hydrierung, periphere Technologien wie Granulierung & Trocknung für Anschlussprozesse
• Kunststofftechnologien	Pilotierung der Recyclingtechnologien wie innovative (mehrstufige) Spritzgusstechnologien für Rezyklate, Rotomoldingstechnologie für großvolumige Hohlkörper, additive Fertigungstechnologien, Legetechnologien und Analytik

3 Forschungsschwerpunkte der Technischen Universität Chemnitz

Mit der Außenstellenstrategie der TU Chemnitz für die sächsische Lausitz, die neben dem CircEcon-Forschungszentrum in Spreetal auch die CarbonLabFactory bei Boxberg umfasst, wurden zahlreiche Forschungsfelder und -schwerpunkte definiert, welche den Kernkompetenzen der TU Chemnitz zugeordnet werden:

- I. Materialien und intelligente Systeme
 - Neue Fasermaterialien (Carbonfasern)
 - Viskosebasierte Carbonfasern
 - Carbonfasern aus „grünem“ PAN
 - Stabilisierungsprozesse von Precurcoren
 - Ofendesign (z.B. Induktion)
 - Neue Matrixsysteme
 - Hochtemperatursysteme
 - Biobasierte Systeme (Duromere & Thermoplaste)
 - Bi-Stage-Harze
 - Oberflächen und Grenzflächen
 - Oberflächenaktivierung zur Sicherstellung der Haftung zwischen Fasern und Matrix
 - Schlichte für die Faser-Matrix-Anbindung

II. Ressourceneffiziente Produktion und Leichtbau

- Zirkulare Systeme
 - Faserrecycling
 - Selektive Hydrierung
 - Agglomerierbasierte Direktextrusion
 - Werkstoffliches Recycling
- Fügen mit neuen Materialien
 - Schweißtechnik für thermoplastische Kunststoffe
 - Recyclinggerechte Fügeprozesse
- Neue textile und kunststoffverarbeitende Prozesse
 - rCF-SMC
 - Carbonfaservereinzelung
 - Neue Wickel- und Legetechnologien
 - Rotomoldingtechnologie für großvolumige Hohlkörper
 - Additive Fertigungstechnologien

III. Mensch und Technik

- Produktionsmanagement
 - Qualitätsmanagement
 - Energiedesign
 - Neue Sonderprüftechnik für neue Faser- und Matrixsysteme sowie Rezyklate
 - Energierückgewinnung
- Nachhaltigkeit
 - Produktdesign für kreislaufgerechte Anwendungen
 - Lebenszyklusanalysen
 - Soziale und ökonomische Aspekte
- KI, AI, Automatisierung
 - Digitaler Zwilling
 - Datenbanksysteme
 - Prozesssimulation
 - Remote-Steuerungsprozesse

Zu den genannten Forschungsschwerpunkten wurde bereits heute eine Vielzahl an relevanten Projektansätzen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern entwickelt, welche in unterschiedlichen Projektformen mittel- und langfristig bearbeitet werden. Die Investitionen in die Gebäude und Anlagentechnik der Außenstellen bildet hierfür die Grundlage für die zukünftigen Forschungsaktivitäten.

Neben zahlreichen bereits laufenden bzw. beantragten flankierenden FuE-Projekten wurde in unmittelbarem Zusammenhang mit CircEcon zum 01.12.2024 ein nationales ZIM-Innovationsnetzwerk mit dem Titel „H2Select – Neuartige modulare Systemlösung für das Kunststoffrecycling mittels selektiver Hydrierung von KfV-Mahlgut“ gestartet. Hierbei stehen folgende Schwerpunkte im Fokus:

- Polymerchemische & mechanische Analytik und Nachweisführung zu Werkstoffeigenschaften
- Verfahrensentwicklung zur polymerchemischen Modifikation und Aufbereitung der Polymer
- Fokussierung auf die selektive Hydrierung von Kunststoffen mit attraktiven Marktanteilen, wie z. B. PE/LDPE (14,8% im Jahr 2021)
- Entwicklung von Prozessstrategien und Verarbeitungstechnologien zum Einsatz von Wasserstoff und diversen Katalysatoren/Additiven zur Kunststoffmodifikation
- In-Line-Erfassung von Werkstoffkennwerten und Echtzeitanpassung der Verarbeitungsparameter zur Erzeugung von hochwertigen Rezyklaten mit konstanten Eigenschaften

4 Gebäudeplanung und Zeithorizont

Im Rahmen einer von Drees + Sommer durchgeführten 268-seitigen Machbarkeitsstudie wurden 2022/2023 eine umfangreiche Standortanalyse auf Makro- und Mikroebene durchgeführt und Bedarfspläne sowie eine Umsetzungsstrategie entwickelt. Es erfolgten Detailanalysen und -bewertungen potenzieller Bauflächen in der sächsischen Lausitz, aus der der Industriepark Schwarze Pumpe in Spreetal als Sieger hervorging. Das Baudezernat der TU Dresden begann anschließend mit der Gebäudeplanung in enger Abstimmung mit den anderen beteiligten Universitäten und Hochschulen, bevor der Bau des CircEcon-Forschungszentrums 2024 final ausgeschrieben und an die Firma Goldbeck als Generalübernehmer vergeben wurde.

Das Zentrum wird in Systembauweise realisiert und bietet eine ca. 12.000 m² große Forschungshalle sowie ein zweistöckiges Büro- und Laborgebäude. Hier findet permanentes sowie temporäres wissenschaftliches und technisches Personal genügend Platz um Forschungsaktivitäten durchzuführen. Im Außenbereich befinden sich überdachte Legioboxen, in denen angelieferte Komponenten und Bauteile für Forschungsaktivitäten zwischengelagert werden. Über ein zentrales Gaslager und ein Verteilersystem werden Prozessgase wie Stick- oder Wasserstoff der Anlagentechnik bereitgestellt.

Nachfolgend sind zwei Entwürfe der Firma Goldbeck dargestellt, auf denen das Forschungszentrum aus nord- sowie südöstlicher Seite zu sehen sind. Das Grundstück bietet das Potenzial einer Gebäudeerweiterung im Rahmen einer späteren Förderperiode.



Abbildung 3: Nordostseite des Forschungszentrums mit dem zweistöckigem Labor- und Bürokomplex



Abbildung 4: Südostseite des Forschungszentrums mit dem Wareneingang

Der definierte Zeitplan sieht einen Baubeginn im März 2025 und eine Fertigstellung des Gebäudes im Juli 2026 vor, sodass der Bezug sowie die Inbetriebnahme der Anlagentechnik in Q3/Q4 2026 erfolgt.

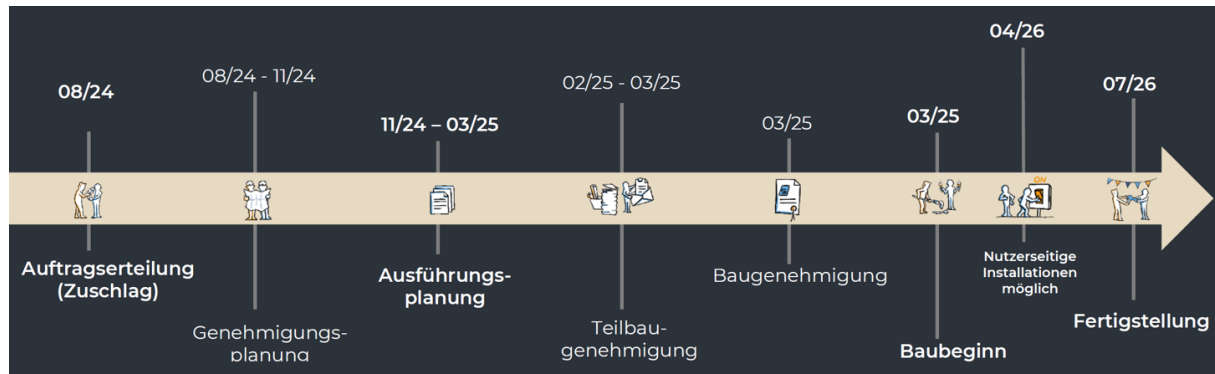


Abbildung 5: Zeitplanung zur Realisierung des CircEcon-Forschungszentrums

5 Forschungsaktivitäten und Möglichkeiten der Partizipation

Allgemein betrachtet kann die Forschungsaktivität im CircEcon-Forschungszentrum, wie nachfolgend, in die Grundlagen- und Anwendungsorientierte Forschung untergliedert werden:

- Grundlagenforschung
 - Erforschung der Prozessskalierung und Entwicklung maßgeschneiderter Recyclingmaterialien mithilfe der installierten Gerätetechnik
 - Ermittlung und Lösung relevanter Detailproblemstellungen entlang der Prozessrouten einschließlich der Stoffströme
 - Road Block (Identifikation von Lücken in den Kreislautsystemen zur circular economy)
- Anwendungsorientierte Forschung
 - Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit regionalen und überregionalen Forschungs- und Industriepartnern
 - Bearbeitung von Forschungs- und Entwicklungsaufträgen
 - Pilotierung von industrienahen Prozessketten
 - Industrieprojekte

Im Fokus steht die Zusammenarbeit der initialen Forschungseinrichtungen (TU Chemnitz, TU Dresden, TU Bergakademie Freiberg und Hochschule Zittau/Görlitz) mit der regional angesiedelten Industrie zur Stärkung der Region im Sinne des Strukturwandels. Weiterhin sind natürlich auch Partnerschaften mit überregionalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen angestrebt um generell den Wirtschaftsstandort Sachsen und Deutschland insgesamt zu stärken und Forschungsergebnisse nachhaltig in die Praxis zu transferieren.

Zur Sicherstellung des wissenschaftlichen Betriebs des gemeinsamen CircEcon-Forschungszentrums für Kreislaufwirtschaft sind die Universitäten und Hochschulen aus Dresden, Chemnitz, Freiberg und Zittau/Görlitz auf die Zusammenarbeit mit Industriepartnern über unterschiedlichste Projektformen angewiesen. Konkrete Anfragen für eine Zusammenarbeit können zentral über den nachfolgenden Kontakt erfolgen und werden entsprechend der Kompetenzen an die geeigneten Ansprechpartner weitergeleitet:

Steve Sockol (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Professur Strukturleichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Chemnitz

Tel.: 0371 531 33834

E-Mail: steve.sockol@mb.tu-chemnitz.de

Von Vorschriften zur Praxis: Moderne Sicherheitskonzepte für die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien

Max Plotnikov¹, Arkadius Schier¹

¹Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Deutschland

Abstract. Die sichere Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien gewinnt mit ihrer wachsenden Bedeutung in der Automobilindustrie zunehmend an Relevanz. Da sie bislang nur als Gefahrgut, nicht jedoch als Gefahrstoff eingestuft werden, fehlen in Deutschland und der EU spezifische gesetzliche Regelungen für ihre Lagerung. Unternehmen müssen daher zahlreiche allgemeine Vorschriften aus dem Arbeits-, Bau- und Umweltschutzrecht sowie Empfehlungen von Fachverbänden beachten. Die damit verbundene Fragmentierung erschwert eine einheitliche Umsetzung effektiver Schutzkonzepte. Gleichzeitig bestehen erhebliche Risiken wie Brand- und Umweltschäden, insbesondere durch Tiefentladung oder Beschädigung der Batterien. Moderne Lagerlösungen setzen deshalb auf eine Kombination aus präventiven und reaktiven Maßnahmen, unterstützt durch IoT- und Machine-Learning-Technologien zur Echtzeitüberwachung und Risikoprävention. Die weitere Standardisierung von Sicherheitskonzepten und die Integration digitaler Technologien sind essenziell, um die Sicherheit und Effizienz der Batterielagerung angesichts steigender Mengen und neuer Anwendungen nachhaltig zu gewährleisten.

Keywords: *Lithium-Ionen-Batterien, Lagerung, Sicherheitskonzept, Circular Economy, Risikomanagement*

1 Einleitung

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen, aber auch von industriellen und privaten Anwendungen, führt zu einem stetig wachsenden Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien. Diese Batterien sind in der modernen Mobilitäts- und Energiebranche unverzichtbar geworden. Die sichere Lagerung dieser Energiespeicher stellt jedoch eine komplexe Herausforderung dar, die sowohl technische, organisatorische als auch rechtliche Fragen umfasst. In Deutschland werden Lithium-Ionen-Batterien bislang ausschließlich als Gefahrgut, nicht jedoch als Gefahrstoff klassifiziert. Dies hat zur Folge, dass sie nicht dem Gefahrstoffrecht unterliegen und für ihre Lagerung keine allgemeingültigen, spezifischen Vorschriften, Normen oder Schutzziele existieren. Unternehmen sind daher verpflichtet, sich an eine Vielzahl allgemeiner Vorschriften zu halten, die für gefährliche Stoffe gelten und ursprünglich nicht auf die besonderen Eigenschaften und Risiken von Lithium-Ionen-Batterien ausgelegt sind (VdS Schadenverhütung GmbH 2019, Umwelt Bundesamt 2024, CEMO GmbH 2024).

Zu den wichtigsten allgemeinen Regelwerken zählen das Arbeitsschutzgesetz und die Betriebssicherheitsverordnung. Diese definieren grundlegende Anforderungen an den Schutz der Arbeitnehmer sowie an die sichere Gestaltung von Arbeitsplätzen und sind daher auch bei der Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien relevant (BGHM Berufsgenossenschaft Holz und Metall 2020). Ebenso spielt das Baurecht, insbesondere die Industriebaurichtlinie, eine zentrale Rolle. Sie legt umfassende Anforderungen an den Brandschutz und die baulichen Gegebenheiten von Industriegebäuden fest und stellt damit sicher, dass Gebäude, in denen Lithium-Ionen-Batterien gelagert werden, den höchsten Sicherheitsanforderungen genügen (DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2024).

Ein weiterer relevanter rechtlicher Rahmen wird durch die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) gebildet. Diese Verordnung ist insbesondere deshalb bedeutsam,

weil Lithium-Ionen-Batterien bei unsachgemäßer Lagerung oder Beschädigung umweltgefährdende Substanzen freisetzen können (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2024). Obwohl die Löschwasser-Rückhalterichtlinie (LöRüRl) offiziell außer Kraft ist, wird sie in der Praxis weiterhin beachtet, um bei Bränden eine Kontamination von Gewässern durch Löschwasser zu verhindern (F. Lienesch et al., UMCÖ 2020). Für die Lagerung von Batterien sind zudem behördliche Genehmigungen sowie die Freigabe durch Versicherungen erforderlich, um die Einhaltung aller Sicherheitsstandards zu garantieren und einen umfassenden Versicherungsschutz sicherzustellen (CEMO GmbH 2024).

Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) gibt spezifische Empfehlungen zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien. Ergänzend dazu veröffentlichen Branchenverbände wie der ZVEI e.V. (Verband der Elektro- und Digitalindustrie) und der Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (bvfa) praxisorientierte Merkblätter mit Hinweisen zum sicheren Umgang und zur Brandbekämpfung (ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. 2016, DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2024, bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e. V. 2020, C. Adamczyk 2020). Weiterhin bieten Unternehmen und Organisationen wie die VdS Schadenverhütung GmbH Handlungsempfehlungen, Klassifikationen und Leitlinien zur Risikobewertung und sicheren Lagerung (CEMO GmbH 2024, FM Global 2016, VdS Schadenverhütung GmbH 2019).

2 Problemstellung

Obwohl der rechtliche Rahmen zahlreiche allgemeine Vorgaben bietet, besteht ein erheblicher Mangel an spezifischen, auf Lithium-Ionen-Batterien zugeschnittenen Lageranforderungen. Die faktische Fragmentierung und teilweise Widersprüchlichkeit der bestehenden Regelungen erschweren die Entwicklung und Umsetzung einheitlicher und effizienter Schutzkonzepte. Diese Unsicherheit stellt Unternehmen vor große Herausforderungen, insbesondere vor dem Hintergrund der rasch zunehmenden Zahl und Vielfalt an Batterien sowie der steigenden Anforderungen an den Umweltschutz und die Betriebssicherheit.

Die Risiken, die von Lithium-Ionen-Batterien ausgehen, sind vielfältig und reichen von Brand- und Explosionsgefahr bis hin zu Umwelt- und Gesundheitsgefahren durch das Austreten gefährlicher Stoffe. Besonders kritisch ist die Gefahr der Tiefentladung: Wird eine Batteriezelle unter die Entladeschlussspannung entladen, können sich irreversible Schäden wie Dendritenbildung einstellen, die wiederum zu Kurzschluss und gefährlicher Überhitzung bis hin zum Brand führen können (O. Schulze 2022). Daher fordern Hersteller und Experten spezifische Lagerbedingungen hinsichtlich Ladezustand, Temperatur und Umgebungsbedingungen. Unterschiedliche Empfehlungen – beispielsweise eine Lagerung bei 50–70 % Ladung oder unter 30 % bei Hochvolt-Batterien – machen eine sorgfältige Bewertung und individuelle Anpassung der Lagerstrategien erforderlich (Jungheinrich 2022, FM Global 2016).

Zusätzlich sind zahlreiche organisatorische und infrastrukturelle Herausforderungen zu bewältigen: Die Auswahl geeigneter Standorte, die Planung von Sicherheitsabständen, die Skalierbarkeit und Drittverwendungsfähigkeit der Lagerimmobilien sowie die Einbindung von Frühwarn- und Notfallkonzepten sind entscheidend für die Risikominimierung (M. Mendes et al. 2022). Die Integration digitaler Technologien und die kontinuierliche Schulung der Mitarbeitenden stellen weitere Anforderungen dar, um die Sicherheit und Effizienz der Lagerprozesse sicherzustellen.

3 Vorgehen und Methode

Um den genannten Herausforderungen zu analysieren, wurden Experteninterviews innerhalb des InnoLogBat-Konsortiums sowie eine Literaturrecherche eingesetzt. Als Ergebnis kam dabei raus, dass Unternehmen in der Praxis auf einen Methoden-Mix aus technischen, organisatorischen und digitalen Maßnahmen setzen. Die Vorgehensweise lässt sich in mehrere zentrale Handlungsfelder unterteilen:

3.1 Analyse und Umsetzung vorhandener Vorschriften

Unternehmen orientieren sich an den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen und branchenspezifischen Empfehlungen. Dabei werden die allgemeinen Vorgaben (Arbeitsschutzgesetz, Betriebssicherheitsverordnung, Baurecht, AwSV) ergänzt durch Merkblätter und Leitlinien von DGUV, ZVEI, bvfa und VdS. Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 510) bieten weitere Hinweise für die Lagerung als Gefahrstoff, auch wenn diese rechtlich nicht zwingend sind (DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2024). Die Einhaltung dieser Vorgaben ist Grundvoraussetzung für den Erhalt von Betriebsgenehmigungen und Versicherungsschutz.

3.2 Technische und organisatorische Schutzmaßnahmen

Die praktische Lagerung erfolgt typischerweise in Bodenblock- oder Regallagern. Best-Practice-Beispiele zeigen, dass hochmoderne Logistikzentren ein umfassendes Sicherheitskonzept implementieren, das folgende Elemente umfasst:

- **Brand- und Löschwasserschutz:** Einsatz von Sprinkler- und Brandmeldeanlagen, Löschwasserrückhaltesysteme, Rauch- und Wärmeabzüge.
- **Abtrennung und Quarantäne:** Defekte oder beschädigte Batterien werden in separaten, brandschutztechnisch gesicherten Bereichen oder mit ausreichendem Abstand zu intakten Batterien gelagert.
- **Bau- und Standortplanung:** Die Lagerimmobilie muss hinsichtlich Standort, Entfernung zur Feuerwehr, Brandlastberechnung und Skalierbarkeit sorgfältig geplant werden (M. Mendes et al. 2022).
- **Präventive Maßnahmen:** Umfassende Wareneingangskontrolle, Überwachung von Temperatur, Feuchtigkeit und Ladezustand sowie regelmäßige Wartung und Überprüfung der Batteriesicherheit.
- **Reaktive Maßnahmen:** Notfallkonzepte, Havariebehälter, automatische Evakuierungssysteme und gezielte Brandbekämpfungsmaßnahmen (z.B. Wasserbecken, Löschmonitore).

3.3 Integration digitaler Technologien: IoT und Machine Learning

Die Digitalisierung der Lagerüberwachung bildet einen zentralen Baustein moderner Sicherheitskonzepte. Über das Internet der Dinge (IoT) werden kontinuierlich relevante Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit und Batteriespannung erfasst und in Echtzeit überwacht. Bei Überschreitung definierter Grenzwerte können automatisierte Warnungen und Maßnahmen ausgelöst werden. Dadurch lassen sich kritische Zustände frühzeitig erkennen und Schäden verhindern.

Ergänzend werden Methoden des Machine Learnings eingesetzt, um große Datenmengen zu analysieren, Anomalien zu identifizieren und prädiktive Wartungs- und Austauschzyklen zu optimieren. Diese Systeme unterstützen die kontinuierliche Verbesserung der Lagerstrategien und ermöglichen eine vorausschauende Instandhaltung, die ungeplante Ausfälle minimiert und die Sicherheit maximiert.

3.4 Bewertung und Training

Zur Bewertung und Optimierung von Sicherheitsmaßnahmen wurde das „Battery Safety Awareness Training“ (BSAT) entwickelt (s. Abbildung 1). Ziel ist es, Unternehmen für präventive und reaktive Maßnahmen zu sensibilisieren und ein möglichst sicheres Lager innerhalb eines festgelegten Budgets zu gestalten. Im Training werden verschiedene Maßnahmen (z.B. Wärmebildkameras, Brandbarrieren, Gasetektion, IoT-Geräte, Evakuierungskonzepte, Havariebehälter) anhand qualitativer Kriterien bewertet und priorisiert. Die Bewertung berücksichtigt sowohl Sicherheitsfaktoren als auch Kostenaspekte. Das Training unterstützt Unternehmen dabei, geeignete Maßnahmenpakete zu identifizieren und umzusetzen.

Tabelle 1: Beispiel für die Bewertung präventiver und reaktiver Maßnahmen

Präventive Maßnahmen	Sicherheitsfaktor	Reaktive Maßnahme	Sicherheitsfaktor
Wärmebildkameras	18	Automatisches Evakuieren	16
Brandbarrieren	16	Evakuierung durch Mitarbeiter	14
Gasdetektion	17	Ferngesteuertes Evakuieren	15
Rauchmelder	15	Wasserbecken	12
IoT-Geräte	14	Sprinkleranlage an der Decke	14
Temperatursensoren	12	Sprinkleranlage an jedem Regalfach	15
Bodenblocklagerung	10	Facesprinkler (Regallagerung)	13
Bodenzeilenlagerung	9	Havariebehältnis	14
Wabenstruktur bei HRL	13	Löschmonitor	18
Brandabschnitte	17		
Mitarbeiterschulungen	15		
Notfallkonzepte	14		
Kartonagen	8		



Abbildung 1: Ausschnitt aus dem BSAT (eigener Screenshot)

4 Fazit und Ausblick

Die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien ist ein zentraler Faktor für die Effizienz und Sicherheit der Circular Economy in der Automobilindustrie, aber auch in anderen Branchen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU sind derzeit komplex und fragmentiert: Es fehlen spezifische gesetzliche Vorgaben, sodass Unternehmen auf eine Vielzahl allgemeiner Vorschriften und brancheninterner Empfehlungen zurückgreifen müssen. Diese liefern zwar eine Grundlage, bleiben aber teilweise lückenhaft und widersprüchlich.

Die Vielzahl der Risiken – von Brandereignissen über Umweltgefahren bis hin zu wirtschaftlichen Schäden – macht deutlich, dass ein umfassendes Schutzkonzept erforderlich ist. Die Kombination aus technischen, organisatorischen und digitalen Maßnahmen hat sich als zielführend erwiesen. Insbesondere die Integration von IoT- und Machine-Learning-Technologien erlaubt eine kontinuierliche, vorausschauende Überwachung und erhöht die Sicherheit signifikant. Das Battery Safety Awareness Training bietet Unternehmen darüber hinaus eine strukturierte Möglichkeit, die Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit ihrer Schutzmaßnahmen zu bewerten und zu optimieren.

Mit Blick auf die Zukunft ist zu erwarten, dass der Bedarf an sicheren Lagerlösungen für Lithium-Ionen-Batterien stetig steigen wird. Die Entwicklung spezifischer gesetzlicher Regelungen ist ebenso erforderlich wie die fortlaufende Weiterentwicklung und Standardisierung von Technologien und Prozessen. Unternehmen sollten deshalb verstärkt in digitale Überwachungs- und Analysesysteme investieren und eng mit Forschungseinrichtungen kooperieren, um innovative, sichere und nachhaltige Lagerstrategien zu entwickeln. Nur so lässt sich der Schutz von Mensch, Umwelt und Unternehmenswerten gewährleisten und die Wettbewerbsfähigkeit im Zeitalter der Elektromobilität langfristig sichern.

5 Danksagung

Dieses Paper ist im Rahmen des InnoLogBat-Projekts bzw. des Schlussberichts entstanden. Der Dank gilt dem gesamten Projektkonsortium, das maßgeblich an den Ergebnissen dieses Papers mitgewirkt hat. Insbesondere sind folgende Personen zu erwähnen: Pia Schreynemackers, Jan Pixberg, Stella Kolarik, Arnd Ciprina, Gerd Kuhlmann, Kaspar Verburg, Marwin Dollendorf, Leon Siebel-Achenbach, Christoph Schrade, Florian Karlstedt, Nico Anderten, Christian Kürpick, Oliver Domnick und Sebastian Müller.

6 Zitationsstil und Literaturverzeichnis

- Enders, M. R. und Hoßbach, N. (2019) “Dimensions of Digital Twin Applications. A Literature Review”, in *Proceedings of the 25th Americas Conference on Information Systems*, Cancun, S. 1–10.
- García, S., Luengo J. und Herrera F. (2015) *Data Preprocessing in Data Mining*. Cham: Springer International Publishing.
- MobilKreis (2025) MobilKreis Website. Verfügbar unter: <https://mobilkreis.de/>. (Zugriff: 01.01.2025).
- Nickerson, R. C., Varshney, U. und Muntermann, J. (2013) “A Method for Taxonomy Development and its Application in Information Systems,” *European Journal of Information Systems*, 22(3), S. 336–359.
- Otto, B., ten Hompel, M. und Wrobel, S. (2019) “Reference Architecture for the Digitization of Industries”, in Neugebauer, R. (Hrsg.) *Digital Transformation*. Berlin: Springer Vieweg, S. 109–128.
- VdS Schadenverhütung GmbH (2019). *Lithium-Batterien*. VdS- Merkblatt 3103: 2019-06 Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV)
- Umwelt Bundesamt (2024). *Batterien und Akkus richtig nutzen und fachgerecht entsorgen*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/batterien-akkus#so-handeln-sie-nachhaltig-beim-umgang-mit-batterien-und-akkus>
- CEMO GmbH (2024). *Vorschriften und Regeln für die Lagerung von Lithium-Batterien*. URL: <https://www.cemo.de/branchenuebersicht/baubranche/gefährstofflagerung/vorschriften-lithium-batterien>
- BGHM Berufsgenossenschaft Holz und Metall (2020). *Arbeiten mit akkubetriebenen Maschinen und Zubehörprodukten*. URL: <https://www.bghm.de/arbeitschuettzer/praxishilfen/arbeitschutz-kompakt/113-akkus>
- DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2024). *Brandschutz beim Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien*. DGUV Information 205-041
- ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (2016). *ZVEI Merkblatt Nr.2 - Sicherer Umgang mit Lithiumbatterien*. Frankfurt.
- bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e. V. (2020). [www.bvfa.de](https://www.bvfa.de/251/presse-medien/pressebereich/pressemitteilungen/sicherheitshinweise-lithium-ionen/). Von <https://www.bvfa.de/251/presse-medien/pressebereich/pressemitteilungen/sicherheitshinweise-lithium-ionen/>
- C. Adamczyk (2020). *Logistikzentrum Zeche Gustav setzt Benchmark als innovativstes und sicherstes Li-Ionen-/Gefahrgutlager*. BMZ GmbH
- FM Global (2016). *Development of Protection Recommendations for Li-ion Battery Bulk Storage: Sprinklered Fire Test*. Research Technical Report
- O. Schulze (2022). *Elektromobilität: Ein Ratgeber für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer – Facetten zu Ladeinfrastruktur, Subventionsregeln, Kosten und Handling*

Jungheinrich (2022). Lithium-Ionen-Akkus lagern: Darauf sollten Sie achten“, 2022
M. Mendes, M. Starre und J. Kraus (2022). Gefahrgut Batterien

Demontage- und Wiederverwendungsstrategien für Traktionsbatteriespeichersysteme

Alexander Bier³, Per Heyser¹, Dennis Mahlstedt²,
Patrick Alexander Schmidt³, Thomas Gübler²
Christian Kraus³, Uwe Frieß³, Andreas Wenzel¹

¹ Atlas Copco IAS GmbH, Gewerbestraße 52, 75015, Bretten, Germany

² FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG, Airbus-Allee 2, 28199, Bremen, Germany

³Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,
Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz, Germany.

Abstract. Das vorliegende Paper zeigt einen Weg, Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen in geschlossene Wertschöpfungskreisläufe zurückzuführen. Für Mokka-e Traktionsbatteriespeichersysteme wurde ein Roboterwerkzeug entwickelt, das an Hochvolt- und Datenschnittstellen andockt und den Batteriezustand. Außerdem wurden Demontageuntersuchungen zur Bestimmung der erforderlichen Kraft zur Entnahme von Batteriemodulen für unterschiedliche Gapfiller durchgeführt.

Keywords: Kreislaufwirtschaft, R-Strategien, Wiederverwendungsstrategien, universelle Montage- und Demontagetechnologien, Batteriespeichersysteme, Gapfiller.

1. Einleitung

Der technische Fortschritt, schnell wechselnde Modetrends und politischer Wandel führen häufig dazu, dass noch funktionale und wenig verschlissene Produkte von den Nutzenden durch neue Produkte ersetzt werden. Dies trifft auch für Kraftfahrzeuge und deren Ausstattungskomponenten zu. Den zweiten und dritten Nutzungszeitraum erleben solche Fahrzeuge häufig als Gebrauchtwagen in Ländern des globalen Südens, wo diese abschließend auch verschrottet werden [1]. Hierdurch schwindet der Zugriff auf den Kreislauf von Produkt- und Materialressourcen u. a. von seltenen Erden, Kupfer und hochwertigen Aluminium- und Stahllegierungen. Die daraus resultierende Notwendigkeit, hochwertige Produkte kreislaufbezogen zu entwickeln, zu nutzen und (wieder-) zu verwerten, wird aktuell in zahlreichen Forschungsaktivitäten untersucht, unter anderem im EKODA-Projekt aus der Mobilkreis Initiative des BMBF.

Im Zuge der weiter zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen und der damit verbundene Einsatz von Batteriespeichern bringt eine Vielzahl von ökologischen und ökonomischen Herausforderungen mit sich, wie insbesondere die effiziente und kostengünstige Demontage und Wiederverwertung dieser Komponenten. Dabei weisen die Batteriemodule solcher Batteriespeichersysteme die größte Relevanz sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten auf. Dies resultiert primär daraus, dass diese Batterien wertvolle und teilweise auch versorgungskritische Ressourcen wie Kobalt, Lithium, Nickel und Kupfer enthalten, die zumeist aus Ländern außerhalb der EU importiert werden müssen [2].

Gegenwärtig sind Batteriespeichersysteme hinsichtlich eines linearen Produktionsprozesses optimiert, sodass der Übergang zu zirkulären Wirtschaftskreisläufen noch nicht gegeben ist. Dies ist jedoch notwendig, um eine verbesserte Ressourceneffizienz und -unabhängigkeit von Importen außerhalb der EU zu erreichen. Die Einführung zirkulärer Systeme trägt dazu bei, dass bestehende Ressourcen besser genutzt werden und somit die Notwendigkeit neuer Rohstoffe minimiert wird [3]. Darüber hinaus erhöht eine zirkuläre Wirtschaft die Resilienz der Lieferketten, die in Zeiten globaler Unsicherheiten und geopolitischer Spannungen essenziell sind. Zirkuläre Wirtschaftskreisläufe fördern die lokale Wiederverwertung und Aufbereitung, wodurch die Versorgungssicherheit erhöht wird [4].

Um Batteriespeichersysteme zirkulären Wirtschaftsmodellen zuführen zu können, ist eine Voraussetzung, dass diese auf ihren Gesundheitszustand, den sogenannten State of Health (SOH),

überprüft werden. Der SOH ist ein prozentualer Wert und setzt den Ist-Zustand mit dem Nennzustand ins Verhältnis. Basierend auf dem SOH-Wert kann entschieden werden, ob eine Batterie einer Wiederverwertung im Sinne des stofflichen Recyclings zugeführt wird oder in einer 2nd-Life-Anwendung weiterverwendet werden kann. Aufgrund des Gefahrenpotenzials, das von fehlerhaften Lithium-Ionen-Batterien ausgehen kann, ist neben optischen Prüfungen eine elektrische Zustandserfassung nicht nur im aktiven Betrieb, sondern auch zur Entscheidung für die passende R-Strategie von hoher Bedeutung. Um in Zukunft die voraussichtlich steigenden Rückläufe von EV-Batterien aus 1st-Life Anwendungen wirtschaftlich in eine Kreislaufwirtschaft zu überführen, werden Automatisierungslösungen unter anderem zur Kontaktierung und elektrischen Zustandserfassung für hochratenfähige Prozesse benötigt. Die Variantenvielfalt stellt hierbei eine Herausforderung sowohl auf Hardware-, als auch auf Softwareebene dar.

Obwohl das Konzept der elektrischen Mobilität älter ist als der Verbrennungsmotor, hat es viele Jahrzehnte gedauert, bis sämtliche Automobilhersteller ihr Portfolio um Serienmodelle mit batterieelektrischen Antrieben ergänzt haben. Insbesondere der Einsatz innovativer Batteriesysteme mit Lithium-Ionen-Batterien stellt aus heutiger Sicht einen technischen Meilenstein in der Geschichte der Elektroautos dar. Der Grund für die Leistungsfähigkeit und damit auch für den Erfolg der Fahrzeuge liegt neben der kürzeren Ladezeit in der hohen Leistungsdichte der Lithium-Ionen-Batterien begründet [5].

Das Batteriespeichersystem ist auch heutzutage das Herzstück eines Elektrofahrzeugs. Es gibt gravierende Unterschiede zwischen den verschiedenen Batterien und ihren Zellen. Diese unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, sondern auch in ihrem Aufbau. Neben zylindrischen sowie prismatischen gibt es die sogenannten Pouch-Zellen.

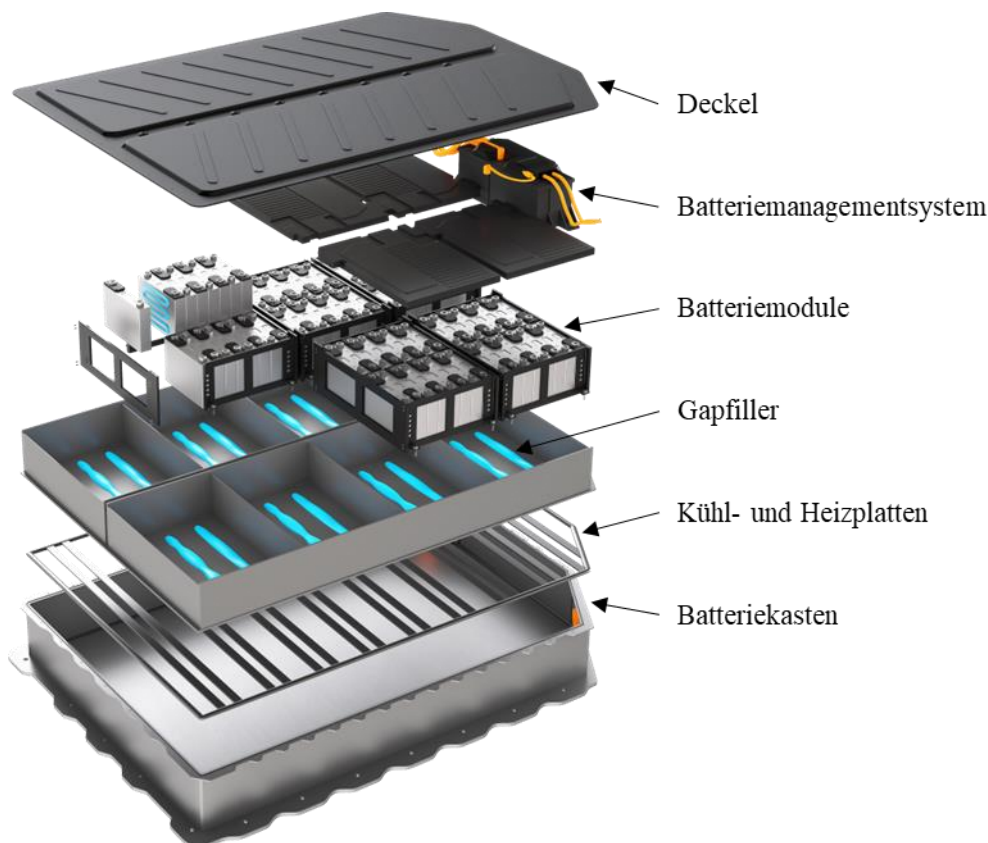


Abbildung 1: Übersicht der Komponenten eines Batteriespeichersystems

Im Folgenden wird erläutert, wie ein modernes Batteriespeichersystem produziert wird. Als Ausgangssituation stehen vollständig montierte und geprüfte Batteriemodule zur Verfügung. Im ersten Schritt werden die Kühl- und Heizplatten im Batteriepackgehäuse (der sogenannte Batteriekasten) montiert. Anschließend wird eine Wärmeleitpaste bzw. ein thermisch leitfähiger Gapfiller auf den

Batterieboden aufgetragen, sodass beim Laden und Entladen die entstehende Wärme abtransportiert werden kann. Diese Klebstoffe bieten außerdem eine strukturelle Verklebung, jedoch muss auch eine Wiederlösbarkeit gewährleistet sein. Danach werden die Module mittels Verschraubungen am Systemgehäuse fixiert. Durch die Kombination von Gapfiller und Verschraubungen wird die Steifigkeit erhöht und ein besserer Schutz der Module vor Vibration gewährleistet. Nach der Befestigung der Module erfolgt im nächsten Schritt der elektrischen und thermischen Integration die Montage von Kühlsystem, Batteriemanagementsystem (BMS) und Hochvoltmodul. Anschließend erfolgt die Verkabelung, sowie das Anschließen des Kühlsystems. Nachdem das Pack mittels eines Deckels verschlossen wurde, erfolgt der Dichtheitstest. Der Deckel wird mittels einer geklebten Dichtung oder einer Dichtschnur abgedichtet. Abschließend erfolgt die „End-of-Line“ Prüfung, in der eine optische und technische Prüfung des Systems vorgenommen wird. [5]

2. Elektrische Zustandserfassung

Die innerhalb des Projektes umgesetzten und untersuchten Technologien, sowohl zur Demontage als auch zur Zustandserfassung, wurden auf Basis eines Batteriespeichersystems, verbaut im Automodell Mokka-e, des Herstellers CATL entwickelt (siehe Abbildung 2). Der Batteriepack des Mokka-e besteht aus insgesamt 18 gleich aufgebauten Modulen, hat eine Gesamtspannung von 400 V und eine Kapazität von 50 kWh.

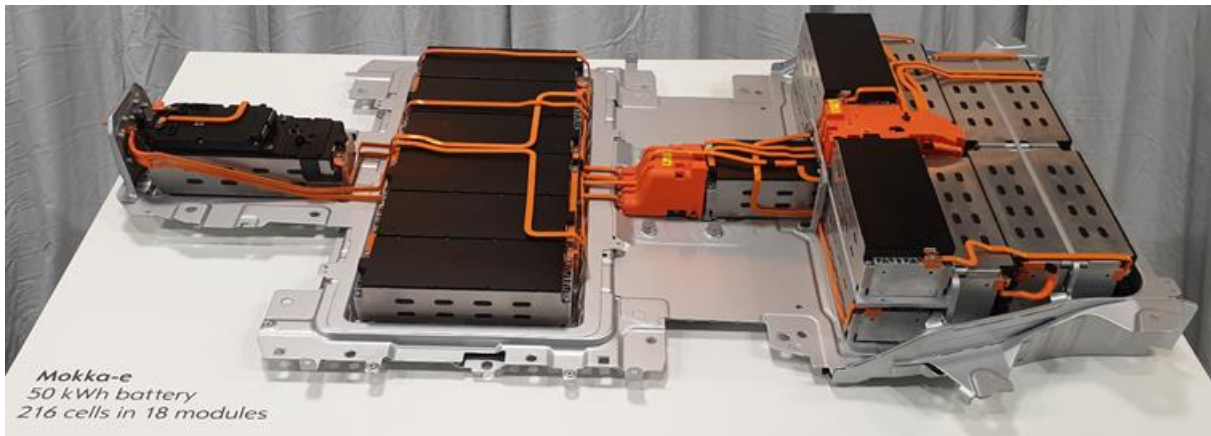


Abbildung 2: Mokka-e Traktionsbatterie ohne obere Gehäusenhälfte (<https://3ve-blog.de/>).

Auf Packebene besitzt die Batterie drei elektrische Schnittstellen. Einen aus zwei Pins bestehenden Hochvoltstecker mit Interlockschnittstelle (Vorder- und Rückseite) und einen Stecker zur Kommunikation mit dem BMS an der Vorderseite. Das Modul besitzt zwei sich an den gegenüberliegenden Seiten befindliche Pol-Kontakte und einen Stecker zur Kommunikation mit dem CMC (Cell Management Controller) (Abbildung 3).

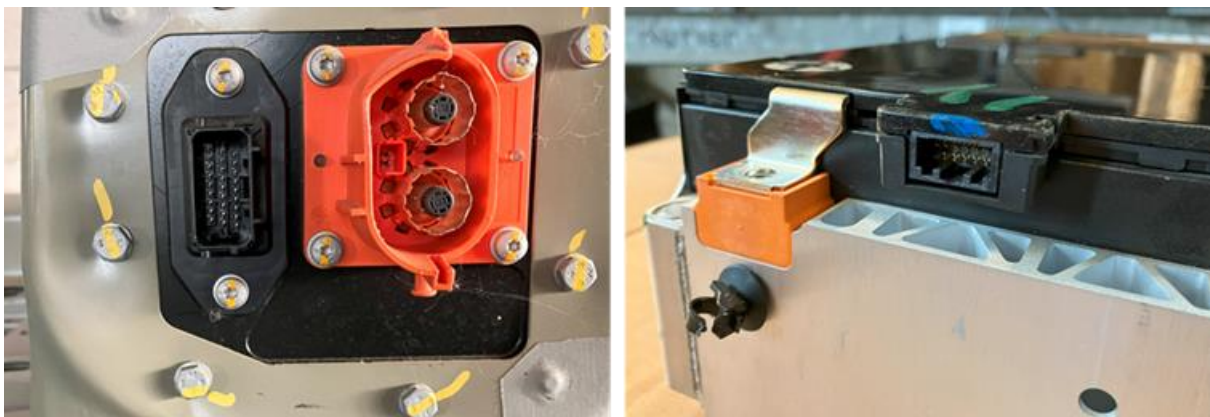


Abbildung 3: Batterieschnittstellen Pack (links) und Modul (rechts).

Um eine vollumfängliche Zustandserfassung durchführen zu können, ist es notwendig, auf Pack-Ebene mit der BMS- und auf Modul-Ebene mit der CMC-Schnittstelle zu kommunizieren. Beide Schnittstellen ermöglichen es den Zustand bis auf Zellebene auszulesen, sodass während Lade- und Entladevorgängen ein Balancing der Zellen stattfinden kann. Das Zell-Balancing gewährleistet, dass die einzelnen Zellen nicht über- oder tiefentladen werden, was zu potenziell gefährlichen Betriebszuständen führen kann.

Im Kontext einer automatisierten Gesamtanlage zur Prüfung und ggfs. Demontage von Traktionsbatterien befindet sich die elektrische Zustandserfassung relativ am Anfang der Prozesskette. Anhand des elektrischen Zustandes der Batteriepacks und -module wird im weiteren Verlauf entschieden, ob der Pack komplett, z. B. als stationäres Energiespeichersystem wiederverwendet werden kann, ob dieses demontiert wird, um einzelne Module weiterzuverwenden. Wenn alle oder einzelne Module nicht für eine 2nd-Life Anwendung geeignet sind, werden diese der stofflichen Verwertung zugeführt.

Zur Bestimmung des SOH, von dem die weitere Verwendung der Batterien abhängt, gibt es mehrere Methoden (Abbildung 4). Die grundlegende Unterscheidung besteht zwischen experimentellen und modellbasierten Methoden. Die erste grundlegende Unterscheidung besteht zwischen experimentellen und modellbasierten Methoden. Bei den experimentellen Methoden wird zwischen direkten Mess- und indirekten Analysemethoden unterschieden. Im Rahmen des Projektes wurde der Fokus auf experimentelle bzw. direkte Messmethoden gelegt.

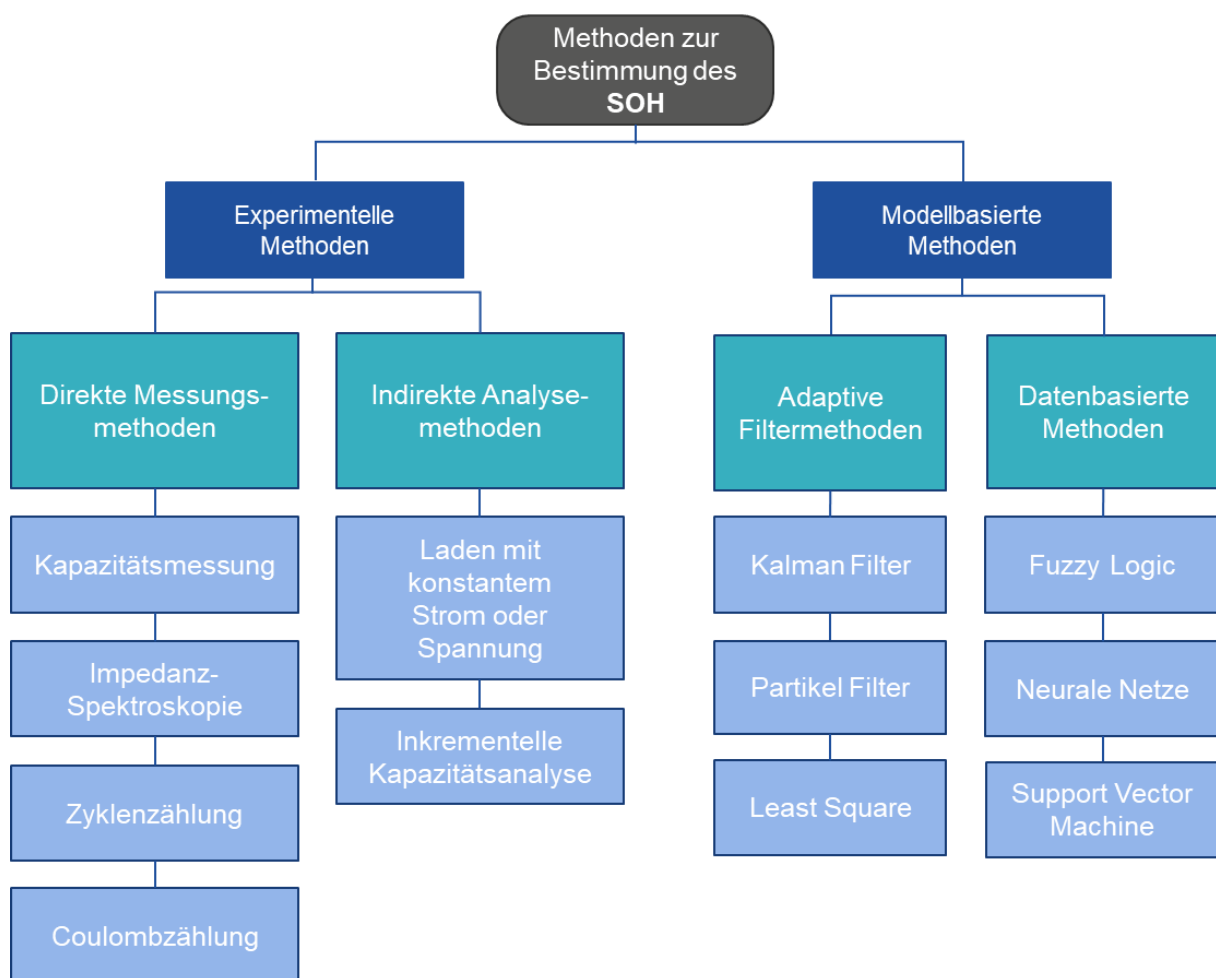


Abbildung 4: Methoden zur Bestimmung des SOH [6]

Bei kapazitätsbasierenden direkten Messmethoden, bei denen die Batterien mit mehreren Zellen ge- und entladen werden, ist es notwendig ein aktives Balancing der einzelnen Zellen durchzuführen. Aufgrund des beschränkten Zugangs zu benötigten Informationen zu dem verwendeten Batteriespeichersystem war es im Rahmen des Projektes nicht möglich, die BMS- und CMC-Schnittstellen zu nutzen, was die praktische Durchführung von kapazitätsbasierenden Methoden, unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten zur Risikominimierung ausschließt. Aufgrund dessen wurde die Impedanzmessmethode ausgewählt, die vereinfacht mit einer Frequenz von 1 kHz durchgeführt wird. Da die Impedanz einer Batterie mit abnehmenden SOH zunimmt, lässt sich so eine Aussage zum Gesamtzustand treffen.

Das System zur automatischen Kontaktierung und Zustandserfassung besteht zentral aus einer für das Projekt EKODA entwickelten Software-Umgebung (EET – EKODA-Evaluation-Tool). Dieses bildet über OPC-UA Server die Schnittstelle zur globalen Prozesssteuerung (TruFleet) und steuert ebenfalls über OPC-UA, sowie serielle Schnittstellen und Ethernet, das Messgerät für die elektrische Zustandserfassung als auch die Endeffektoren zur automatisierten Kontaktierung des Batteriespeichersystems.

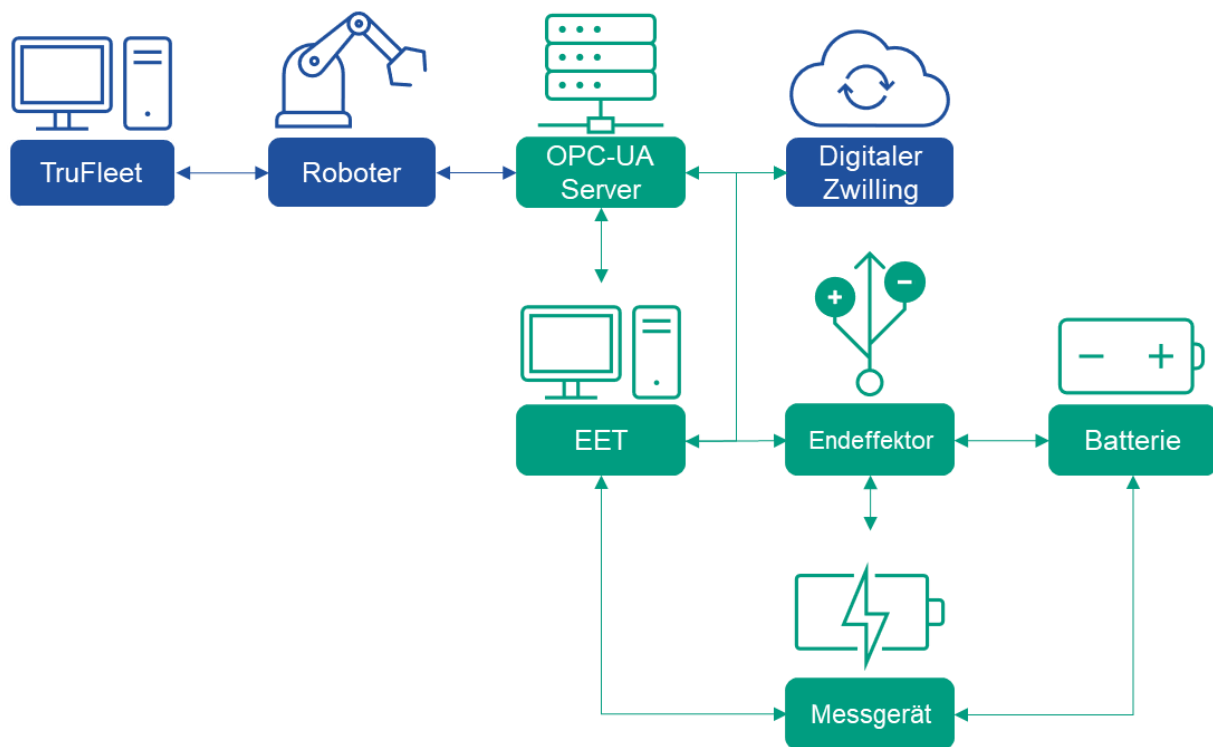


Abbildung 5: Softwareumgebung elektrische Zustandserfassung des Demonstrators

Abbildung 5 zeigt die Schnittstellen von FFT (grün) mit den Technologiebausteinen der Partner (blau) innerhalb des Use Cases zur Batteriedemontage. In diesem Fall sind nur die für die elektrische Zustandserfassung relevanten Elemente dargestellt. Hauptziel für FFT ist die Realisierung einer automatisierten und durchgängigen Gesamtprozesskette. Diese umfasst die Kommunikation mit der Prozesssteuerung (TruFleet) und einem kollaborativen Roboter, an dem die Endeffektoren für die elektrische Zustandsfassung montiert sind, dem digitalen Zwilling zum Datenaustausch (Messprotokollen, batteriespezifischen Daten) und dem Messgerät.

Die folgende Abbildung zeigt zwei Ansichten des Endeffektors für die Packebene des Mokka-e (siehe Abbildung 2 und 3). Der Endeffektor besteht aus einem Schnellwechselsystem, einer Steuerungseinheit, sowie gefederten Hochvoltkontakten, dem Interlock-Stecker und Stecker zur Kontaktierung des BMS. Der mechanische Andockvorgang findet in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt wird der Endeffektor durch den Roboter am Batterie-Pack ausgerichtet und die HV-Pins kontaktiert. Im zweiten Schritt wird

der Gegenstecker des BMS über eine separate am Endeffektor montierte Lineareinheit angeschlossen. Die Steuerung erfolgt hierbei über die separate, am Aktuator verbaute, Steuerungseinheit.

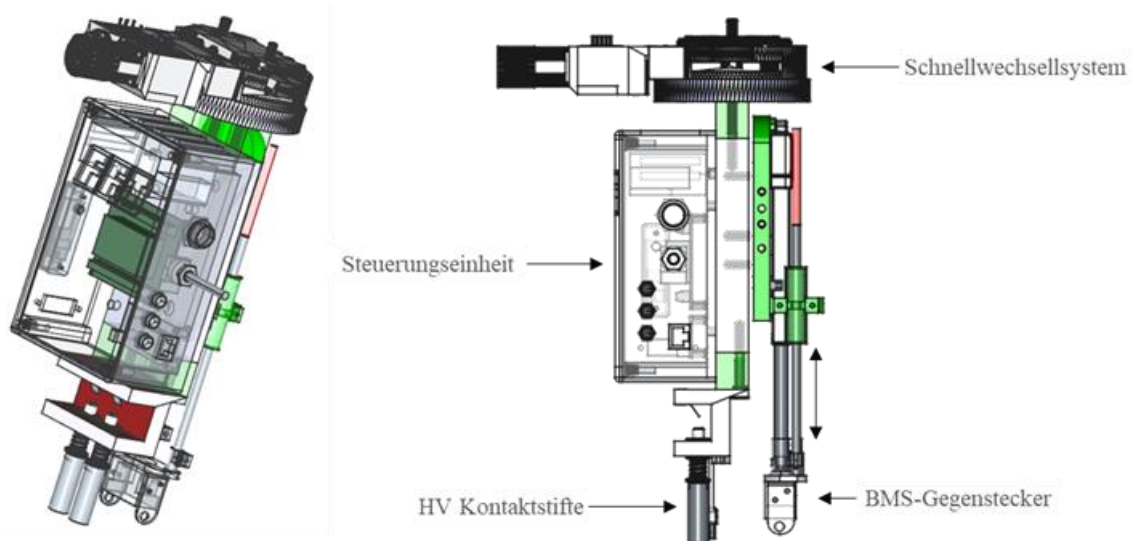


Abbildung 6: Perspektivische- und Seitenansicht des Packendeffektors

Der Modulendeffektor ist aus denselben Grundkomponenten wie der Packendeffektor aufgebaut. Um aber eine gewisse Adaptivität bei unterschiedlichen Abständen der Pol-Kontakte eines Moduls darstellen zu können, kann der Abstand der Pol-Kontakte über eine Linearachse verändert werden. Ähnlich zum BMS-Stecker des Batteriepacks gibt es beim Modul einen CMC-Stecker. Dieser befindet sich seitlich am Modul und kann daher nicht simultan mit den Pol-Kontakten (von oben kommend) durch den Roboter angedockt werden und besitzt dadurch eine eigene autarke Verfahr- und Positioniereinheit. Die Referenzierung und Positionierung wird hierbei durch die Auswertung von Kamerabildern und der Berechnung eines Offset Wertes realisiert. Hierfür wird ein Jetson Orin Nano von NVIDIA mit entsprechenden Softwaremodulen verwendet. Die Kamera befindet sich an der Verfahreinheit des CMC-Steckers.

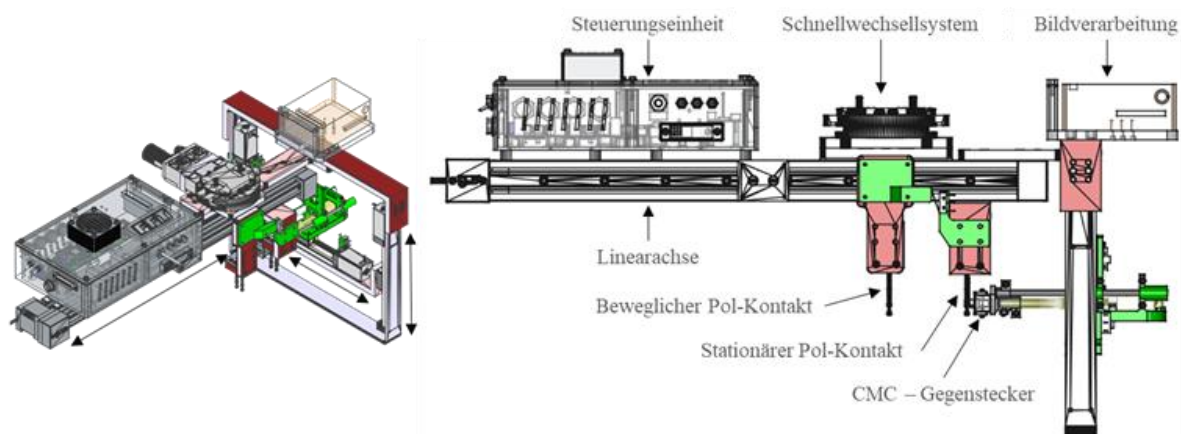


Abbildung 7: Perspektivische- und Seitenansicht des Modulendeffektors

Beide Endeffektoren befinden sich zum Veröffentlichungszeitpunkt in der Inbetriebnahmephase. Abgesehen von ersten Systemtests, wurden noch keine Kontaktversuche an den originalen Speichersystemen durchgeführt.

3. Analyse der Entnahmekräfte von Batteriemodulen mit Gapfillern

Gapfiller sind entscheidend für das Wärmemanagement von Elektrofahrzeugbatterien. Sie dienen als thermische Schnittstellenmaterialien, welche die Wärmeableitung zwischen Batteriemodul und

Kühlsystem verbessern. Bei der Demontage müssen die Module aus dem Batteriekasten entnommen werden, beispielsweise unter Einsatz robotergestützter Greifer. Dabei kann die Haftung der Gapfiller an den Oberflächen erheblich sein, was die Entnahme der Module erschwert. Die Gapfiller variieren hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit, mechanischen Eigenschaften und Klebwirkung. Ziel der folgenden Untersuchung ist es, die Kraft zu quantifizieren, die erforderlich ist, um die Module aus ihrer Einbaulage zu entnehmen. Darüber hinaus wird analysiert, welchen Einfluss die Position des Krafteinleitungspunktes auf die zur Überwindung der Haftwirkung des Gapfillers notwendige Auszugskraft hat. Eine mittige Krafteinleitung bietet den Vorteil, potenziellen Verkantungen während der robotergestützten Entnahme entgegenzuwirken. Bei einer Krafteinleitung an der Modulkante ist hingegen mit geringeren Auszugskräften zu rechnen. Dabei muss die Entnahmebewegung jedoch so gestaltet sein, dass ein Verkanten des Moduls vermieden wird.

Im Folgenden werden zweikomponentige Gapfiller der Hersteller Bergquist, Coratherm, und Loctite betrachtet. In der Tabelle 1 sind die Eigenschaften der Gapfiller dargestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Gapfiller

Hersteller	Bergquist	CORATHERM	LOCTITE
Farbe	Grau	Hellgrün	Blau
Dichte	$3,0 \frac{g}{cm^3}$	$2,05 \frac{g}{cm^3}$	$2,65 \frac{g}{cm^3}$
Thermische Leitfähigkeit	$3,0 \frac{W}{mK}$	$2,0 \frac{W}{mK}$	$3,2 \frac{W}{mK}$
Zustand nach Reaktion	Gummiartig	Pastös	Hart

Um die erforderliche Kraft zum Anheben und Lösen eines Batteriemoduls von einem Gapfiller zu quantifizieren, wurden Moduldummy's hergestellt. Diese Dummies wurden so konzipiert, dass sie hinsichtlich ihrer Abmessungen und Klebefläche den im Projekt untersuchten Batteriemodulen nahekommen. Die mehrfache Abkantung der Bleche erhöht die strukturelle Steifigkeit und reduziert das Durchbiegen der Klebefläche unter Belastung. Abbildung 8 veranschaulicht schematisch die Herstellung der Prüfkörper und das Prüfverfahren. Jeder Prüfkörper besteht aus zwei abgekanteten Aluminiumblechen. Der Gapfiller wurde zunächst auf eines der Bleche appliziert, bevor das zweite Blech aufgelegt und der Verbund anschließend in einer Presse auf eine definierte Schichtdicke von 2 mm komprimiert wurde. Die Prüfvorrichtung wurde so gestaltet, dass die Krafteinleitung an vier Punkten erfolgen kann. Durch die Gelenke wurde sichergestellt, dass beim Ausheben keine Querkräfte auftreten.

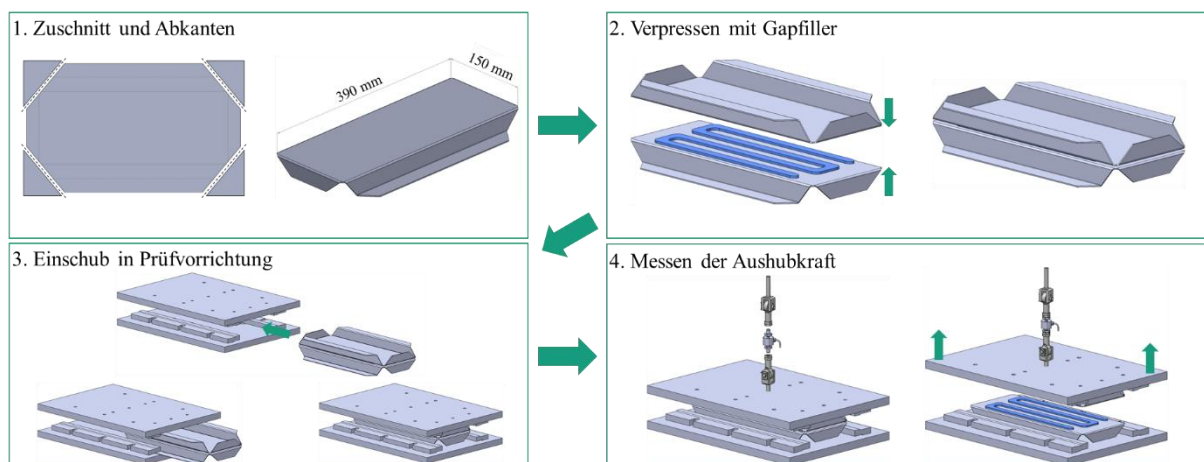


Abbildung 8: Herstellung des Moduldummy und Messen der Aushubkraft

Die Aushubversuche wurden an einer elektromechanischen Presse durchgeführt. In Abbildung 9 ist Versuchsaufbau dargestellt. Dieser besteht aus zwei Aufnahmeplatten, welche den Blech-Gapfiller-

Blech-Verbund über die Flanschbereiche der Aluminiumbleche aufnehmen und spannen. Die Messung der auftretenden Aushubkraft erfolgt anhand einer DMS-basierten Zug-Druck-Kraftmessdose mit einem Messbereich von bis zu 10 kN. Dieses externe Kraftsignal wurde zeitsynchron zur Stoßelposition der Presse aufgenommen und die auftretenden Maximalwerte gegenübergestellt.

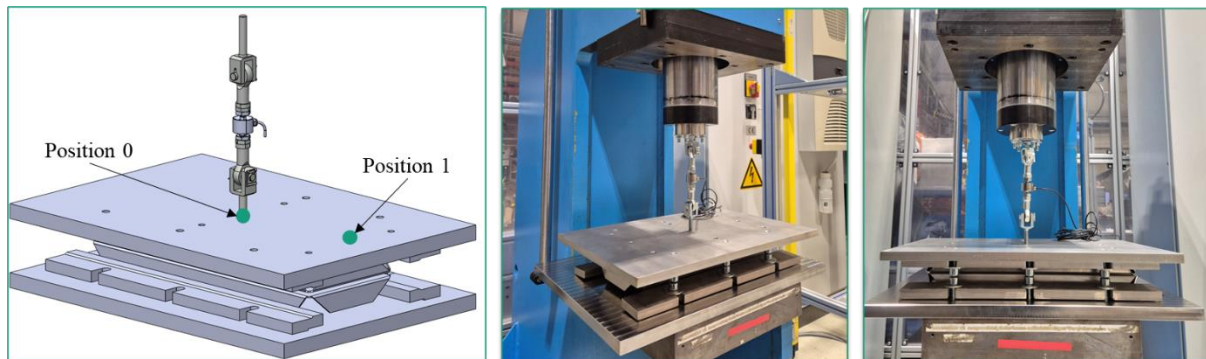


Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Aushubkraft mit mittiger Krafteinleitung

Die Aushubkraft für jeden Gapfiller wurde an zwei spezifischen Positionen gemessen: Position 0 (Pos. 0), welche der zentralen Krafteinleitung entspricht, und Position 1 (Pos. 1), die einer Krafteinleitung an der kurzen Kante des Moduldummy entspricht. Außerdem wurde der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die resultierende Aushubkraft untersucht. Dabei erfolgte die Krafteinleitung mit 0,1 mm/s und mit 1 mm/s. Zusätzlich zur erforderlichen Aushubkraft muss auch die Gewichtskraft der Deckplatte aus Stahl überwunden werden. Deren Masse von 27 kg entspricht jener eines typischen Batteriemoduls. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Aushubversuche.

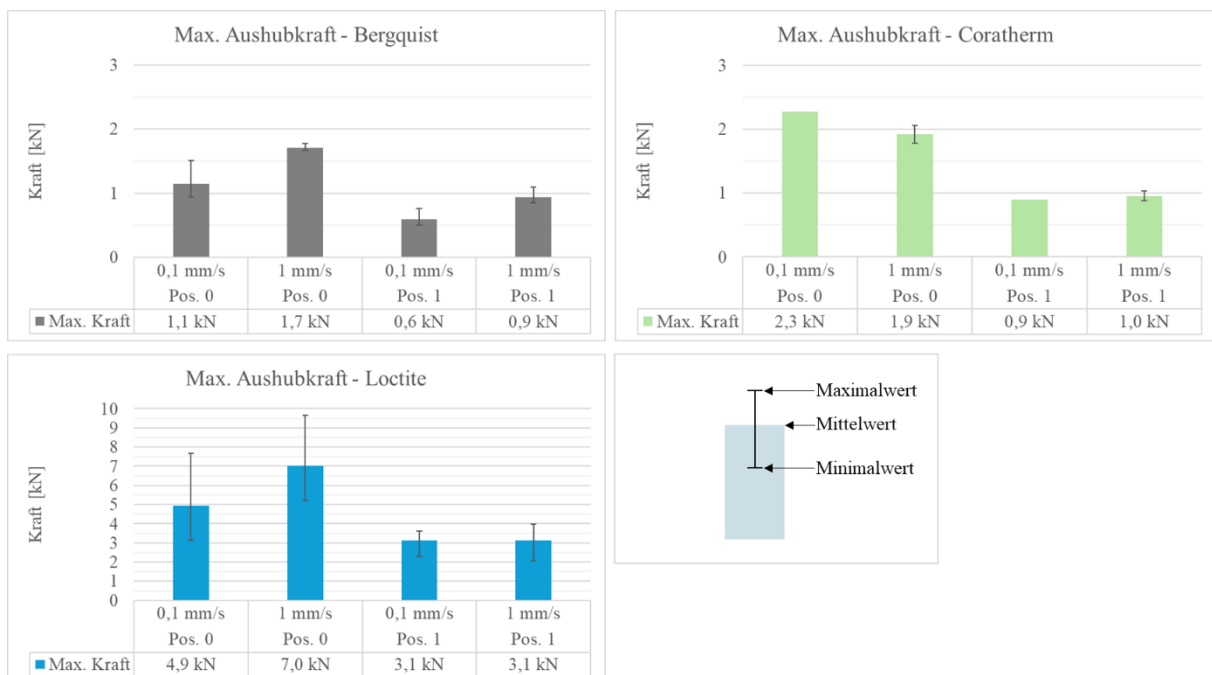


Abbildung 10: Maximale Aushubkraft verschiedener Gapfiller der Hersteller Bergquist, Coratherm und Loctite

Für die Gapfiller von Bergquist und Loctite wurden für jede Position und Prüfgeschwindigkeit drei Versuche durchgeführt. Bei dem Coratherm-Gapfiller konnte aufgrund des geringeren Bestands nur ein bis zwei Versuche pro Position und Prüfgeschwindigkeit durchgeführt werden. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass Aushubkraft stark vom Gapfiller-Typ und dessen Klebwirkung abhängig ist. Wie zu erwarten war, hat die Position der Krafteinleitung einen wesentlichen Einfluss auf die erforderliche Aushubkraft. Durch eine außermittige Krafteinleitung kommt es zu einer Schälbeanspruchung in der

Klebschicht, welche eine Verringerung der notwendigen Aushubkraft bewirkt. Für den Gapfiller von Bergquist bewirkte die außermittige Krafteinleitung eine Verringerung der Aushubkraft um 45 % bis 47 %, bei Coratherm um 47 % bis 60 % und bei dem Gapfiller von Loctite eine Verringerung um 37 % bis 56 %. Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Aushubkraft ist gering und konnte nur bei dem Gapfiller von Bergquist deutlich gemacht werden. Die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s auf 1 mm/s führte hier zu einer Steigerung der Aushubkraft um 33 % bis 35 %.

4. Fazit

Die Kreislaufwirtschaft ist ein wichtiger Schritt, um bestehende Ressourcen besser zu nutzen und die Notwendigkeit neuer Rohstoffe zu minimieren. Batteriespeichersysteme weisen eine hohe Relevanz sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten auf, weil diese wertvollen und teilweise auch versorgungskritischen Ressourcen wie Kobalt, Lithium, Nickel und Kupfer enthalten. Damit Batteriespeichersysteme einem zirkulären Wirtschaftskreislauf zugeführt werden können, ist es erforderlich, dass diese auf ihren Gesundheitszustand (SOH) überprüft werden. Basierend auf dem SOH-Wert kann entschieden werden, ob eine Batterie einer stofflichen Wiederverwertung oder in einer 2nd-Life-Anwendung weiterverwendet werden kann.

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass eine skalierbare, automatisierte Zustandserfassung von Batteriesystemen technisch möglich, allerdings bedingt durch die große Variantenvielfalt bei den mechanischen und softwareseitigen Schnittstellen nicht wirtschaftlich ist. Eine Reduktion der Variantenvielfalt würde eine deutliche Effizienz- und Wirtschaftlichkeitssteigerung bedeuten. Dazu wären sowohl hardware- als auch softwareseitige, standardisierte Schnittstellen notwendig. Ein vergleichbarer Standard wäre hier die sogenannten OBD-Schnittstellen, die seit Jahrzehnten standardisiert in Kraftfahrzeugen vorhanden sind.

Im Rahmen der Verwertung von Batteriespeichersystemen ist es zusätzlich zu den standardisierten Schnittstellen notwendig, dass für die elektrischen Zustandserfassung und auch Demontage umfassende Daten verfügbar sind. Dazu zählen neben batteriespezifischen Nenndaten, wie z.B. Kapazität, Spannung oder Innenwiderstand, auch 3D- und Materialdaten. In Teilen wird hier der Batteriepass als mögliche Lösung zur standardisierten Datenbreitstellung gesehen.

Neben den genannten technischen Punkten gibt es aufgrund der erst entstehenden zirkulären Wirtschaftszweige von Batteriespeichersystemen keine klaren harmonisierten Richtlinien, die Fragestellungen zu verbindlichen Testverfahren und der Haftung für die erneute Inmarktbringung im 2nd-Life Konzept abschließend behandeln.

Gapfiller sind ein wichtiger Teil für das Wärmemanagement von Batteriespeichersystemen. Diese dienen auf der einen Seite als thermische Schnittstelle, die die Wärmeleitung zwischen Batteriemodul und Kühlsystem gewährleistet und auf der anderen Seite tragen sie auch zu den Steifigkeitseigenschaften der Batteriekastens bei. Im Rahmen der Demontageuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Gapfiller sich in den mechanischen unterscheiden und auch ein deutlicher Zusammenhang zwischen der zur Entnahme erforderlichen Kraft und dem Krafteinleitungspunkt besteht. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine außermittige Krafteinleitung die Aushubkräfte um bis zu 60 % reduziert.

Die durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen den technischen Aufwand bei der Demontage von Traktionsbatteriespeichersystemen und die Herausforderungen der anschließenden Bestandsaufnahme, welche für den Reuse erforderlich sind.

5. Literaturverzeichnis

- [1] T. Kopp, U. Brand, B. Muraca, and M. Wissen, *Auf Kosten anderer?: Wie die imperiale Lebensweise ein gutes Leben für alle verhindert*. München: oekom, 2017.
- [2] Fraunhofer IWKS, *Batterierecycling in der Elektromobilität*. [Online]. Available: <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/iwks-abteilungen/Energiematerialien/Batterien-und-PV-Module/batterierecycling.html> (accessed: May 27 2025).
- [3] C. F. A. Arranz and M. F. Arroyabe, "Institutional theory and circular economy business models: The case of the European Union and the role of consumption policies," *Journal of environmental management*, vol. 340, p. 117906, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117906.
- [4] European Commission, *End-of-Life Vehicles: EU rules to make the automotive sector circular, to maximize the efficient use of resources and to protect the environment*. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en (accessed: 27.05.25).
- [5] A. Kampker and H. H. Heimes, *Elektromobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [6] S. Park *et al.*, "Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems," *J. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1526–1540, 2020, doi: 10.1007/s43236-020-00122-7.

Recycling von Batterieanbauteilen

Sandra Boekhoff¹, Harald Zetzener¹, Arno Kwade¹

¹Institut für Partikeltechnik, Technische Universität Braunschweig, Volkmaroder Straße 5, 38104 Braunschweig

Abstract. Für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft müssen nach Möglichkeit alle Bauteile aus Elektrofahrzeugen recycelt werden. In diesem Paper werden daher Batterieanbauteile aus Kunststoff-Metall-Verbunden betrachtet, bei denen die Materialien voneinander getrennt werden müssen. Untersuchungen zeigen, dass die Komplexität des Fügeverfahrens, die Materialauswahl und die Zerkleinerungstemperatur einen Einfluss auf den Erfolg der Zerkleinerung haben.

Keywords: *Recycling, Kunststoff-Metall-Verbunde, Zerkleinerung*

1. Einleitung

Im Projekt ZIRKEL geht es um die Demontage und das Recycling der Batteriesysteme und Elektromotoren aus Elektrofahrzeugen. Innerhalb dieses Projektes beschäftigt sich das Institut für Partikeltechnik mit der Zerkleinerung und anschließenden Sortierung von Anbauteilen wie Steckerleisten, Busbars und weiteren Hochvoltverbindern, die aus Metall-Kunststoff-Kompositen bestehen. Ziel ist es, Kunststoffe und Metalle soweit mechanisch zu zerkleinern, dass alle Fraktionen sortenrein voneinander getrennt werden können um anschließend neue Bauteile daraus herstellen zu können.

Fokus des mechanischen Recyclings von Batterien liegt aktuell auf den hochwertigen Zellmaterialien wie der sogenannten Schwarzmasse. In den genannten Anbauteilen sind jedoch ebenfalls wertvolle Rohstoffe verbaut, die Steckverbindungen und Hochvoltverbinder bestehen meist aus einem massiven Kupferkern und einer Ummantelung aus thermoplastischen Polymeren. Werden die Bauteile nach Art sortiert und dann zerkleinert ist es möglich, hochwertige Kupferlegierungen für neue Bauteile zu verwenden statt sie mit anderen Kupferlegierungen zusammen einschmelzen zu müssen. Thermoplastische Polymere lassen sich nach einer Zerkleinerung ebenfalls wieder einschmelzen und zu neuen Bauteilen verarbeiten, sofern sie sortenrein vorliegen. Die Zerkleinerung und Sortierung der Batterieanbauteile kann daher ein wichtiger Schritt für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft sein. Grundlegende Untersuchungen wurden in diesem Projekt an Verbundmaterial unternommen. Nach der Zerkleinerung müssen Metalle und Kunststoffe sortiert werden, dafür eignen sich Wirbelstromabscheider oder Schwimm-Sink Verfahren, bei denen die Dichteunterschiede der Materialien ausgenutzt werden.

2. Materialien und Methoden

2.1 Materialien

Für Modellversuche wurden Demonstratorbauteile mit unterschiedlichen Fügeprinzipien entwickelt und produziert (siehe folgende Abbildung) um eine Aussage über den Einfluss der Fügeverfahren auf die Zerkleinerungseigenschaften zu treffen. Verwendet wurden drei verschiedene Fügeverfahren, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. Die kraftschlüssige Verbindung ist das einfachste Fügeverfahren,

da Kunststoff und Metall nur durch Reibungskräfte verbunden sind. Als formschlüssige Verbindungen wurden zwei unterschiedliche Varianten verwendet, in der ersten Variante durch einen Hinterschnitt im Metalleinleger und bei der zweiten Variante wurde eine Bohrung in den Metalleinleger eingefügt, die Komplexität ist hier am höchsten.

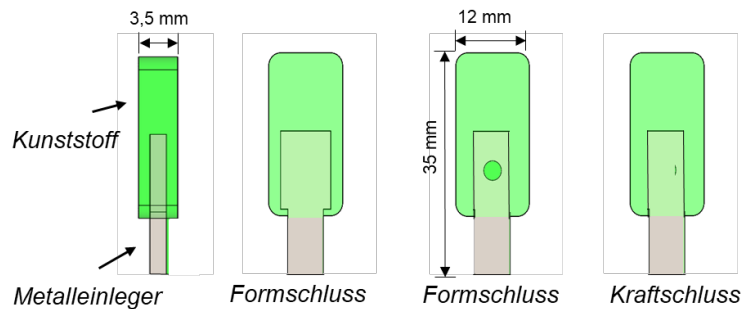


Abbildung 1: Demonstratorbauteil

Die Metalleinleger bestehen aus Stahl und als angespritzte Kunststoffe wurden jeweils unverstärktes Polypropylen und Polyamid 6 verwendet.

2.2 Methoden

Für die Zerkleinerung wurde eine Hammermühle der Firma Hazemag verwendet, wobei hierfür ein Hammerrotor und ein Prallrotor zur Verfügung standen, sodass die Beanspruchungsart verändert werden konnte. Für die Sortierung wurde ein Wirbelstromabscheider (Eigenbau) verwendet.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Zerkleinerung der Verbundbauteile

Für ein grundlegendes Verständnis über den Erfolg der Zerkleinerung wurden die Demonstratorbauteile mit den beiden verschiedenen Rotoren zerkleinert und untersucht, jeweils bei Raumtemperatur und durch Stickstoff auf -95°C abgekühlt. Folgende Abbildung zeigt den Aufschlussgrad, d.h. die prozentuale Menge des Kunststoffs, die erfolgreich vom Metall gelöst werden konnte.

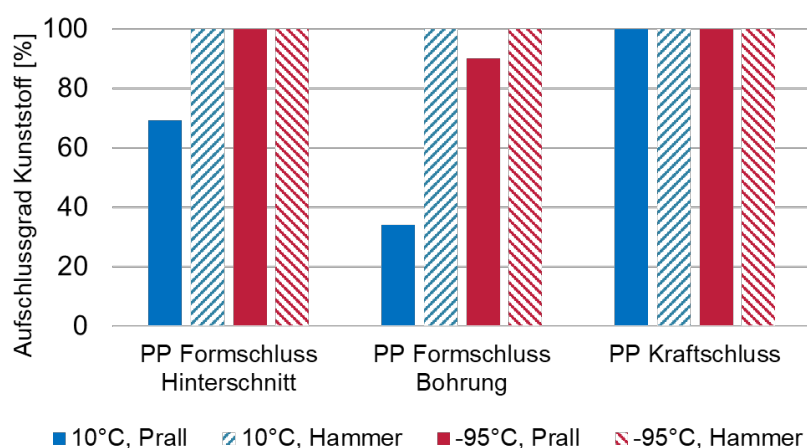


Abbildung 2: Aufschlussgrade nach Zerkleinerung mit unterschiedlichen Rotoren (Boekhoff et al., 2024b)

Es zeigt sich, dass mit dem Hammerrotor sowohl für eine Zerkleinerungstemperatur von 10°C als auch -95°C sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten, sodass 100% des Kunststoffs vom Metall gelöst werden konnte. Bei der Verwendung des Prallrotors können Unterschiede bei den verwendeten Fügeverfahren festgestellt werden, bei einer Temperatur von 10°C konnte nur die kraftschlüssige

Verbindung vollständig getrennt werden. Mit stärker werdender Komplexität des Fügeverfahrens sinkt der Anteil des abgelösten Kunststoffes, sodass für die formschlüssige Verbindung durch Hinterschnitt im Metallteil nur knapp über 30% des Kunststoffes vom Metall gelöst wurden. Dagegen ließ sich durch die Versprödung des Kunststoffes bei kalten Temperaturen der Aufschlussgrad deutlich erhöhen. Bei den mit Formschluss durch Hinterschnitt gefügten Bauteile konnten vollständig getrennt werden, wogegen beim Bauteil mit der Bohrung noch kein Aufschlussgrad von 100% vorlag, allerdings wurde das Ergebnis im Vergleich zur Raumtemperatur deutlich verbessert. Abbildung 3 zeigt, dass auch die Materialeigenschaften eine Rolle bei der Zerkleinerung spielen, die Ergebnisse für PP und PA6 werden verglichen.

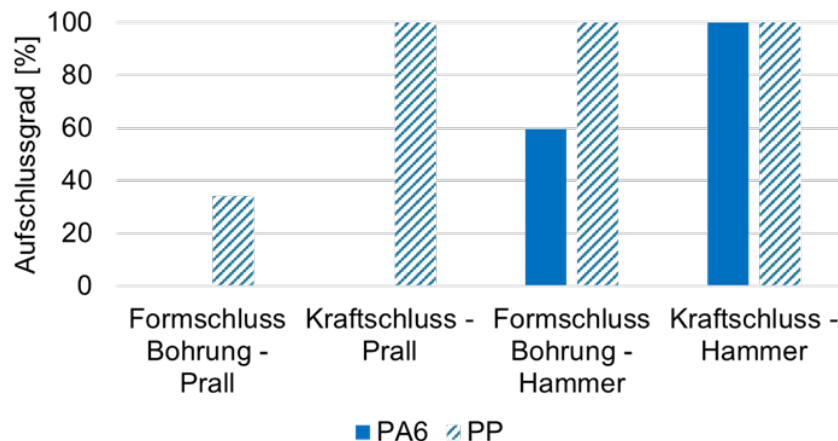


Abbildung 3: Materialvergleich zwischen PA6 und PP nach Zerkleinerung bei 10°C (Boekhoff et al., 2024b)

Es zeigt sich, dass die Bauteile, die aus PA6 gefertigt wurden, nur bei der Verwendung des Hammerrotors zerkleinert werden konnten, die Energie des Prallrotors reicht hier nicht für eine Zerkleinerung aus. Auch beim Hammerrotor zeigen sich Unterschiede in den Zerkleinerungseigenschaften. Während beim Material Polypropylen bei der Verwendung des Hammerrotors bei beiden gezeigten Fügeverfahren ein vollständiger Aufschluss von 100% erreicht werden konnte, war dies bei den Bauteilen aus Polyamid 6 nur bei der kraftschlüssigen Verbindung der Fall, beim Formschluss durch Bohrung konnte nur 60% des Kunststoffes vom Metall gelöst werden. Die Unterschiede resultieren aus den verschiedenen mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe. Während die E-Module ähnlich hoch sind, ist die Kerbschlagzähigkeit von PA6 größer als die von PP, sodass PA6 mehr Energie aufnehmen kann, bis es zu einem Bruchereignis kommt. Die Kristallinität dagegen ist beim PP größer als beim PA6, das heißt, dass sich das Material PP generell spröder verhält und daher bessere Zerkleinerungseigenschaften aufweist (Boekhoff et al., 2024a,b).

3.2 Matrix

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Untersuchungen kann eine Matrix für die Prozess-Eigenschaftsbeziehungen der Bauteile aufgestellt werden. Hier werden einige Verfahren und Beispielbauteile als Prozess aufgelistet und einige Eigenschaften wie Komplexität, Stabilität und die Notwendigkeit von flüssigem Stickstoff zur Abkühlung beurteilt. Folgende Tabelle zeigt diese Matrix:

Tabelle 1: Prozess-Eigenschaftsbeziehung dargestellt in Matrixform

	Komplexität	Ausreichende Stabilität im Betrieb?	Stickstoff für vollständigen Aufschluss notwendig?	Anzahl verschiedener Materialien	Recyclingfähigkeit
<i>Legende</i>	<i>+</i> = niedrig, <i>-</i> = hoch	<i>+</i> = ja <i>-</i> = nein	<i>+</i> = nein <i>-</i> = ja	<i>+</i> = gering <i>-</i> = hoch	<i>+</i> = gut <i>-</i> = schwer
Formschluss Hinterschnitt	+	+	+	+	+
Formschluss Bohung	-	+	-	+	-
Kraftschluss	+	-	+	+	+
Busbar	+	+	+	+	+
PHEV Stecker	-	+	+	-	-

Erkennbar ist, dass die erste Eigenschaft Komplexität einen direkten Zusammenhang zur allgemeinen Recyclingfähigkeit der Bauteile bildet. Eine hohe Komplexität führt zwar zu einer hohen Stabilität des Bauteils aber meist auch zur Notwendigkeit, flüssigen Stickstoff für den Aufschluss zu verwenden, sodass die Komplexität den größten Einflussfaktor dabei spielt, die Recyclingfähigkeit von Bauteilen zu erhöhen.

3.3 Sortiervverfahren

Nach der Zerkleinerung müssen die verschiedenen Materialien voneinander separiert werden, sodass möglichst sortenreine Fraktionen der Einzelmateriale entstehen. Um Kunststoffe und Metalle voneinander zu trennen eignen sich Wirbelstromabscheider, kombinierbar mit Magnetabscheidern. Kombiniert verwendet können am Ende drei Fraktionen entstehen: Kunststoffe, magnetische Metalle wie Stahl und nichtmagnetische Metalle wie Kupfer. Abbildung 4 zeigt grundlegende Versuche mit einem Wirbelstromabscheider, als Versuchsmaterial kamen hier zerkleinerte industrielle Bauteile zum Einsatz.

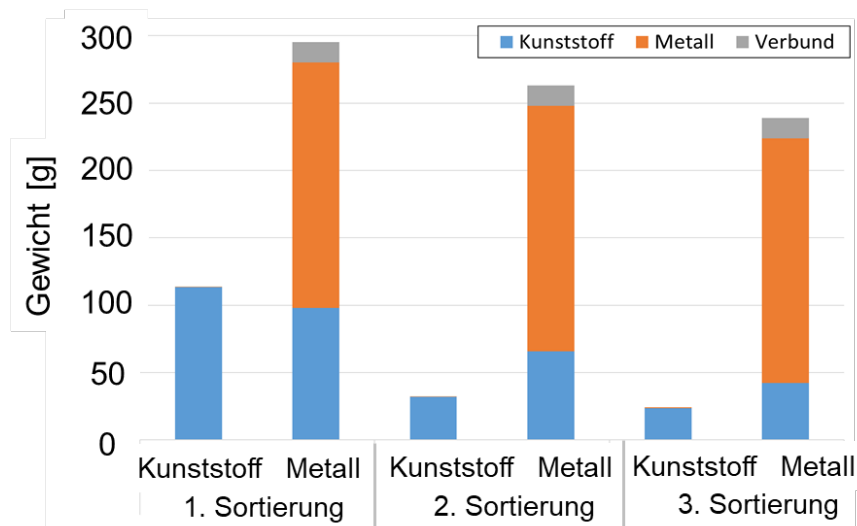


Abbildung 4: Materialausbeute nach drei Sortierschritten

Mit jedem Sortierschritt wurde weniger Kunststoff abgetrennt, jedoch verbleibt noch ein großer Kunststoffanteil in der Metallfraktion. Verbundbauteile werden der Metallfraktion zugeordnet. Grundsätzliche Erkenntnisse, die bei den Versuchen gewonnen wurden sind, dass sich der Wirbelstromabscheider gut eignet, um Metalle und Kunststoffe voneinander zu separieren. Allerdings müssen Optimierungen vorgenommen werden, es bietet sich an, die Feinfraktion vor der Sortierung abzutrennen, um weniger Verunreinigungen in den separierten Fraktionen zu erhalten.

Die anschließende Sortierung der Kunststoffe in die verschiedenen Thermoplaste kann mittels Schwimm-Sink-Verfahren erfolgen, bei dem die Dichteunterschiede der verschiedenen Kunststoffe ausgenutzt werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Laufe des Projekts wurden Untersuchungen an verschiedenen Verbundbauteilen aus Metall und Kunststoff durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Erfolg der Zerkleinerung sowohl von den mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe abhängen, von der verwendeten Beanspruchungsart, als auch vom verwendeten Fügeverfahren, durch welches Kunststoffe und Metalle miteinander verbunden werden. Eine hohe Komplexität erschwert auch das spätere Recycling der Bauteile. Für das spätere Sortieren nach der Zerkleinerung können Wirbelstromabscheider dazu verwendet werden, Kunststoffe und Metalle voneinander zu separieren.

In Zukunft sollen Energien bei der Zerkleinerung gemessen werden, um auch hier Empfehlungen für eine möglichst effiziente Recyclingstrategie zu geben, sodass sich im Folgenden auch eine vollständige Prozesskette für das Recycling der industriellen Bauteile geben lässt.

6. Literaturverzeichnis

Boekhoff, S., Zetzener, H., Kwade, A. (2024a): „Comminution of Metal-Polymer-Composites for Recycling”. Chem. Ing. Tech., 0, 1-9. DOI:10.1002/cite.202300136

Boekhoff, S. Zetzener, H., Kwade, A. (2024b): “Effect of Joining Mechanism on the Mechanical Recycling of Polymer-Metal Composite Parts”. Recycling, 9, 106.
<https://doi.org/10.3390/recycling9060106>

Verwertung von gebrauchten Förderketten aus Polyoxymethylen (POM) im Sinne einer Kreislaufwirtschaft

Jens Sumpf¹, Jan Finke¹, Markus Golder¹

¹TU Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Chemnitz, Deutschland

Abstract. Polyoxymethylen (POM) ist ein thermoplastischer Kunststoff mit ausgezeichneten mechanischen und tribologischen Eigenschaften und kommt deshalb in vielen technischen Anwendungen zum Einsatz, z. B. für Zahnräder, Rollen oder Gleitlager. In Förderanlagen ist POM der bevorzugte Werkstoff für Transportketten, wobei insbesondere das geringe Gewicht und günstige Reibwerte bei schmiermittelfreiem Betrieb einen sauberen und energieeffizienten Guttransport gewährleisten. POM-Ketten kommen in nahezu allen Industriebereichen zum Einsatz, u. a. in der Automobilproduktion in Werkermitfahrbändern oder bis zu 100 m langen Montagebändern, die mehrere Tonnen transportieren. Förderketten, wie auch andere technische Bauteile aus POM, werden oft nur wenige Jahre genutzt und anschließend in der Regel im Restmüll entsorgt und verbrannt. Das werkstoffliche Recycling der wertvollen Werkstoffe wird lediglich im Rahmen der Produktfertigung praktiziert (Post-Industrial-Recycling). Am Beispiel der Fördertechnik wird im Beitrag der neue Ansatz beschrieben, gebrauchte Transportketten aus POM im Sinne einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft zu recyceln (Post-Consumer-Recycling) und wieder zu neuen, gleichwertigen Ketten zu verarbeiten. Dabei wird auf Herausforderungen im Recyclingprozess sowie auf anwendungsrelevante Eigenschaften der Rezyklate und der gefertigten Bauteile eingegangen.

Keywords: Kunststoff, POM, Recycling, Post-Consumer-Abfälle, Förderketten

1 Einleitung

Mechanisch und tribologisch beanspruchte Funktionsbauteile werden häufig aus dem teilkristallinen, thermoplastischen Kunststoff Polyoxymethylen (POM) hergestellt. Grundlegende Eigenschaften dieses Werkstoffs, wie vergleichsweise hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit, sehr gute Reibungs- und Verschleißigenschaften, hohe Wärmeformbeständigkeit und Dimensionsstabilität, chemische Beständigkeit und physiologische Unbedenklichkeit sowie effiziente Verarbeitbarkeit durch Spitzguss, Extrusion oder Zerspanung, ermöglichen die Herstellung u. a. von Zahnrädern, Gleitlagern, Steckverbindungen, Federelementen oder Pumpenteilen, die in unterschiedlichsten Industriebereichen, z. B. im Maschinen- und Fahrzeugbau, Textilindustrie, Haushaltgeräteindustrie, Elektrotechnik, Medizintechnik oder der Präzisionstechnik, zur Anwendung kommen. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich ist die Fördertechnik, hier ist POM das bevorzugte Material für Transportketten in Stetigförderanlagen. Dabei wird neben den genannten Vorzügen vor allem ausgenutzt, dass diese Ketten im Gleitkontakt zu Stütz- und Führungselementen in der Regel ohne äußere Schmierung betrieben werden können. Dies ermöglicht sehr saubere Transportvorgänge, die auch für sensible Anwendungen in Reinräumen oder im direkten Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen sind.

Anders als bei Verpackungsmitteln findet eine Wiederaufbereitung des wertvollen technischen Kunststoffes POM praktisch nur in Form von Abfällen und Verschnitt in Verarbeitungsbetrieben (Post-Industrial-Abfälle) statt, wobei diese Abfälle in der Regel sauber und sortenrein getrennt vorliegen.

Verschlossene oder ausgesonderte Bauteile aus technischen Anwendungen werden dagegen bisher im Restmüll entsorgt, sodass lediglich eine thermische Verwertung des wertvollen Kunststoffs stattfindet.

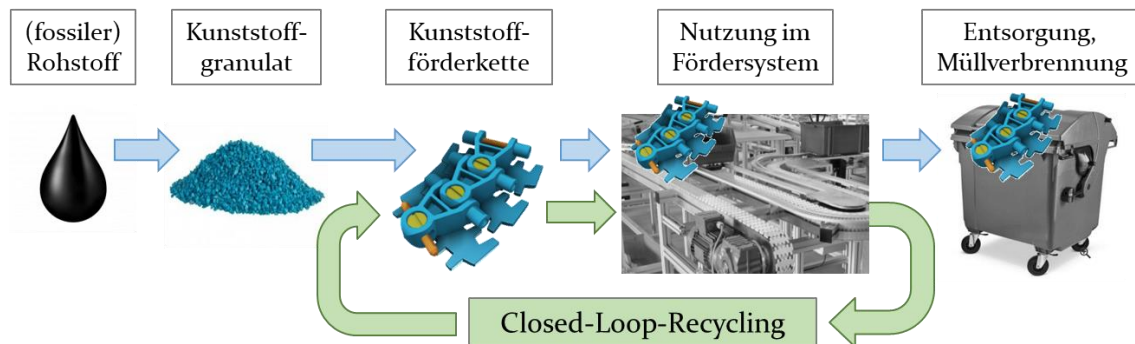


Abbildung 1: Klassischer Lebenszyklus von Kunststoffketten (blau) sowie durch Recycling geschlossener Materialkreislauf (grün) [Sum22]

Die Zielstellung mehrerer Projekte der Autoren war es, den experimentellen Nachweis zu erbringen, dass ein werkstoffliches Recycling von POM neben dem ökologischen Nutzen auch technisch und wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar sein kann. Als Demonstrationsbauteil wurde dafür eine Förderkette verwendet, die ausschließlich aus recycelten Ketten gefertigt wurde, die teilweise viele Jahre im industriellen Einsatz waren. Es wurde damit exemplarisch ein geschlossener Materialkreislaufprozess (Closed-Loop-Recycling) als Alternative zum aktuellen linearen Prozess dargestellt, der auf dem endgültigen Verbrauch von in der Regel fossilen Ressourcen basiert (vgl. Abbildung 1).

Die beschriebenen Ergebnisse basieren auf mehreren Forschungsprojekten, deren Ergebnisse ausführlich in [Sum22, Sum23, Fin24] beschrieben sind.

2 Untersuchte Werkstoffe und Rezyklate

2.1 Polyoxymethylen (POM)

Polyoxymethylen (POM) ist ein teilkristalliner, thermoplastischer Werkstoff, deren Moleküle weitestgehend aus linearen Acetalgruppen ($\sim\text{C}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}\sim$) aufgebaut sind. Grundsätzlich lassen sich dabei die aus Formaldehyd hergestellten Homopolymere (POM-H) sowie die Copolymere (POM-C) unterscheiden. Diese enthalten neben den Acetal-Gruppen auch eingebaute Methylen-Gruppen, welche insbesondere die Chemikalien- und Hydrolysebeständigkeit verbessern. Homopolymeres POM besitzt aufgrund seiner etwas kristallineren Struktur eine höhere Festigkeit und Härte. POM-C dagegen ist zäher und gekennzeichnet durch bessere Abriebfestigkeit und chemische Beständigkeit. [Cel14], [Dup15]

Für Voruntersuchungen sowie als Referenz für die Rezyklate wurden drei kommerziell erhältliche POM-Werkstoffe verwendet, welche u. a. häufig zur Herstellung von Förderketten verwendet werden:

- unmodifiziertes POM-H Delrin 511P (DuPont) [DupA23]
- POM-H Delrin FG100TL (DuPont) mit 1,5% PTFE-Mikropulver [DupB23] sowie
- unmodifiziertes POM-C Hostaform C9021 (Celanese) [Cel21].

Die Werkstoffe werden zur Vereinfachung im Folgenden entsprechend Tabelle 1 mit POM-H, POM-H+ sowie POM-C bezeichnet. Die mechanischen Eigenschaften wurden an jeweils 10 Probekörper im Zugversuch nach DIN EN ISO 527 sowie im Schlagzähigkeitsversuch nach Charpy mit ungekerbten Proben (DIN EN ISO 179) ermittelt (Tabelle 1). Erkennbar sind neben den genannten Unterschieden zwischen POM-H und POM-C auch der leichte Abfall der Festigkeit und Steifigkeit bei Zumischung des Gleitadditivs PTFE (vgl. POM-H+).

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Referenzwerkstoffe

Eigenschaft	Einheit	Delrin 511P	Delrin FG100TL	Hostaform C9021
Bezeichnung	-	POM-H	POM-H+	POM-C
Hersteller	-	DuPont	DuPont	Celanese
Zug-E-Modul	MPa	3610	3030	2870
Streckspannung	MPa	-	-	63,3
Bruchspannung	MPa	71,4	67,1	-
Streckdehnung	%	-	-	11,4
Bruchdehnung	%	6,1	13,7	35,0
Charpy Schlagzähigkeit	kJ/m ²	82,6	89,2	142,6

2.2 Kunststoffketten

Die in der Fördertechnik verwendeten Kunststoffketten sind hinsichtlich ihrer Gestaltung und Größe sehr unterschiedlich und reichen von leichten, einsträngigen Typen bis hin zu schweren, 4-5 m breiten Bändern. Wesentliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Stahlketten sind neben der großen Gestaltungsvielfalt vor allem eine geringere Kettenmasse sowie die Möglichkeit des schmierungsfreien Betriebs. Kunststoffketten für Transportaufgaben und Maschinenverkettung finden sich deshalb in nahezu allen Industriebereichen, u. a. auch in der Automobilfertigung für Werkermitfahr- und Montagebänder, die bis zu 100 m Länge erreichen und mehreren Tonnen transportieren können (vgl. Abbildung 2). Je nach Anwendung sind die Ketten etwa 2-10 Jahre in Betrieb, gelegentlich auch mehr als 20 Jahre. Ein Austausch erfolgt meist aufgrund von Verschleiß, z. B. bei funktionsgefährdendem Abrieb oder starker Kettenlängung, sowie bei Bruch der Kette bzw. einzelner Kettenteile. Häufig werden jedoch auch bei Änderung der Förderaufgabe oder des Förderlayouts neue Ketten verwendet.

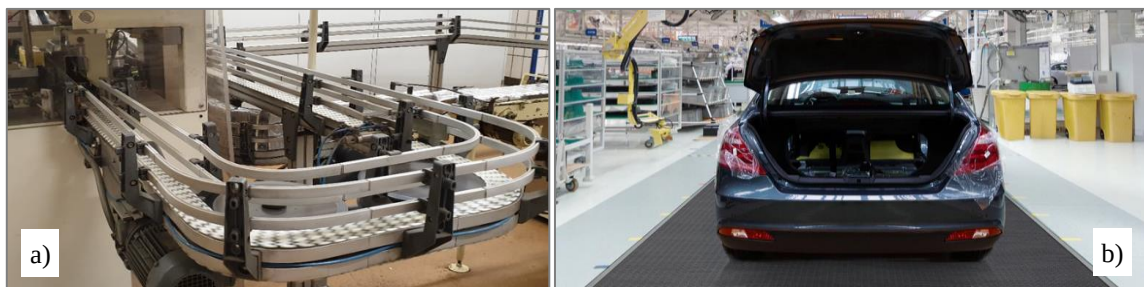


Abbildung 2: Kunststoffketten a) in einer Verpackungsmaschine und b) in der Automobilproduktion [Bildquelle b: www.minda.com]

Aufgrund der in der Regel unnötigen äußeren Schmierung und der Anwendung in „sauberen“ Umgebungen sind verschlissene Ketten häufig kaum verunreinigt (vgl. Abbildung 3 links). Nach mehrjährigem Betrieb können jedoch auch massive Verunreinigungen durch Umgebungseinflüsse oder Fördergüter vorliegen. Diese reichen von leicht lösbaren Verstaubungen bis hin zu klebrigen oder fettigen, stark anhaftenden Belägen, die äußerlich schwer zugänglich sind (Abbildung 3 rechts). Im gezeigten Beispiel ließ sich der Kaffeestaub mittels Trockeneis sowie auch in einem Ultraschallbad mit Wasser relativ einfach entfernen. Perspektivisch muss jedoch geprüft werden, inwiefern sich stärkere Verschmutzungen wirtschaftlich reinigen lassen.

Für die Untersuchungen standen unterschiedliche Kettenabschnitte aus industriellen Anwendungen sowie aus bis zu 15 Jahre alten Lagerbeständen zur Verfügung. Letztere werden von Ketten- und Fördertechnikherstellern aus Gründen der Verfügbarkeit, aber auch von Anwendern zum schnellen Austausch im Havariefall bereitgehalten. Die Ketten wurden zunächst demontiert, einer werkstofflichen Analyse unterzogen und Fremdmaterialien aussortiert. Die POM-Typen lassen sich dabei anhand der Schmelztemperatur sowie der Schmelzenthalpie (Kristallinität) unterscheiden.



Abbildung 3: Förderketten nach mehrjähriger Anwendung in a) einem Pharmaunternehmen sowie b) einer Kaffeerösterei (rechts)

Für die weitere Verarbeitung wurde eine Reinigung der Ketten im Allgemeinen als nicht erforderlich angesehen, da zumeist nur sehr leichte Verschmutzungen sowie ggf. geringer pulverförmiger Verschleißabrieb anhafteten und die Reinigung in der Praxis aus ökologischen und ökonomischen Gründen auch möglichst vermieden werden sollte. Bei der in Abbildung 3 (rechts) gezeigten Gebraucht-kette aus der Kaffeerösterei wurde der staubige Belag mittels Trockeneisbestrahlung entfernt, sodass ebenfalls nur geringe Schutzreste haften blieben.

2.3 Rezyklatmischungen

Für die Herstellung der Rezyklatmischungen wurden insgesamt 10 Gebraucht-ketten entsprechend Abbildung 4 ausgewählt. Die Analysen kennzeichneten die Varianten 0, 1, 11 und 12 als POM-C (Rest POM-H), zudem wurde bei den Varianten 1 und 11 ein Glasfaseranteil von 25% ermittelt. Die Kettenbauteile wurden gemahlen und in den in Abbildung 5 aufgeführten Mengenverhältnissen zu 4 Mischungen zusammengestellt.



Abbildung 4: Für die Rezyklatmischungen verwendete Förderketten incl. Bezeichnung

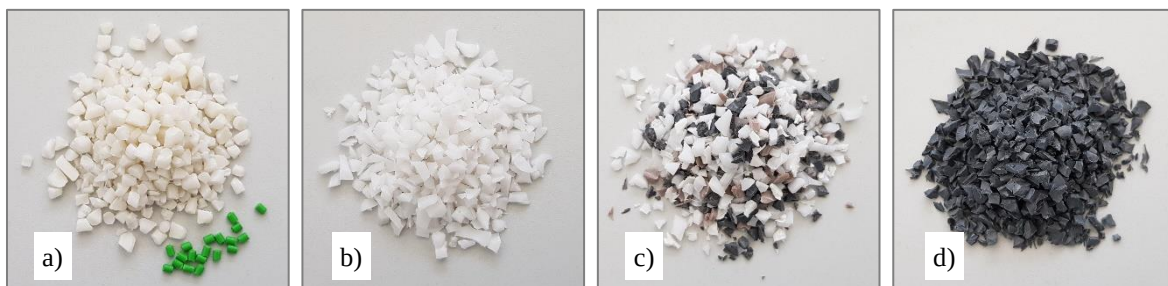


Abbildung 5: Mahlgut der Mischungen und Mischungsverhältnis POM-H zu POM-C zu Glasfaser; a) Rec1, 1:1 + 2% Farbbatch grün, b) Rec2, 1:0, c) Rec3, 2:1:0,2, d) Rec4, 0:1

Das Mahlgut wurde ohne weitere Vorbehandlung (ohne Sieben oder Trocknen) sowie ohne Beimischung von Neuware im Spritzgussverfahren zu Zugstäben sowie zu Kettengliedern verarbeitet (Abbildung 6).

Als Referenz wurden diese Teile jeweils auch aus Neumaterial Delrin 511P (POM-H), Delrin FG100TL (POM-H+) sowie Hostaform C9021 (POM-C) hergestellt (bei den Ketten ohne Delrin 511P).

Die Verarbeitung war trotz der Vermischung der Ausgangswerkstoffe unproblematisch und an den Teilen konnten keine erkennbaren Verunreinigungen sowie insgesamt eine gute Oberflächenqualität festgestellt werden. Die Oberfläche der Proben aus Rec3 ist infolge des Glasfaseranteils von ca. 8 % leicht aufgeraut. Auffällig sind vor allem die leichte Vergrauung des ursprünglich weißen Kettenmaterials (bei Rec1 z. B. durch Kaffeepulverreste) sowie die äußerst starke Färbewirkung der dunklen Anteile. Eine Einfärbung des Materials erscheint somit sinnvoll, eine zufriedenstellende Wirkung kann allerdings voraussichtlich nur bei einheitlich sehr hellem Ausgangsmaterial gewährleistet werden.

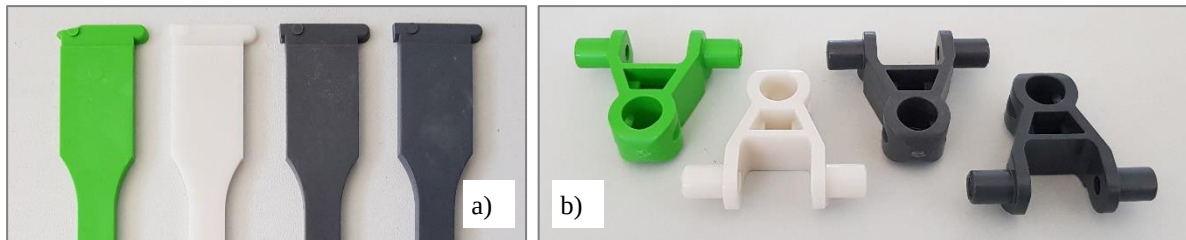


Abbildung 6: a) Zugstäbe und b) Kettenglieder aus Rec1 bis Rec4 (v.l.n.r.)

Die aus den Mischungen hergestellten Probekörper wurden zunächst thermisch analysiert. Es war festzustellen, dass eine typenreine Verarbeitung des POM kaum zu Veränderungen der Schmelztemperatur sowie der Schmelzenthalpie (Kristallinität) führt. Eine Vermischung von POM-H und POM-C verursacht dagegen eine Annäherung dieser Eigenschaften, weshalb aus der Analyse nicht mehr eindeutig feststellbar war, um welchen POM-Typ es sich handelt bzw. in welchen Mengenverhältnissen die Typen enthalten sind. In Anbetracht der hohen Wahrscheinlichkeit, dass die Materialien zukünftig auch mehrfach recycelt werden, ist es deshalb sehr wichtig, dass die Mischbarkeit der Typen hinsichtlich Verarbeitung und Gebrauchseigenschaften nachgewiesen wird.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden 4 weitere Mischungen hergestellt, um u. a. mögliche Unterschiede zwischen Neuware und gebrauchtem Post-Consumer-Material bei gleicher Materialspezifikation festzustellen. Die Ergebnisse sind in [Fin24] dokumentiert.

3 Eigenschaften der Mischungen

3.1 Mehrfachverarbeitung von POM

Mit dem angestrebten Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist die mehrfache Verarbeitung der thermoplastischen Werkstoffe bis zur endgültigen Entsorgung sehr wahrscheinlich. Die mechanische und thermische Beanspruchung beim Recycling führt in der Regel zu einer Verkürzung der Polymerketten und damit einer Verringerung des Molekulargewichts und der Schmelzeviskosität (= Erhöhung des Schmelzfließindexes). Die Korrelation zwischen Viskosität und mechanischen Eigenschaften von POM lässt deshalb u. a. eine geringere Schlagzähigkeit und Reißdehnung erwarten. [Bau19], [Fra16], [Ham13], [Arc01] [Lüf05], [Fau17]

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften bei Mehrfachverarbeitung erfolgte die Herstellung der erforderlichen Materialproben aus Neuware POM-H+ sowie POM-C im Spritzgießverfahren. Die Angüsse sowie ein Teil der gefertigten Probekörper wurden anschließend in einer Schneidmühle zerkleinert und wiederum verarbeitet. Dieser Prozess wurde mehrmals wiederholt, sodass letztlich Zugstäbe aus insgesamt bis zu 11 Verarbeitungszyklen zur Verfügung standen.

Wie Abbildung 7 zeigt, ist bei den wichtigen mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit kein merklicher Zusammenhang mit den Verarbeitungszyklen erkennbar. Bei der Reißdehnung wurde bei POM-H+ ebenfalls kein signifikanter Unterschied deutlich, dagegen fiel der

Wert bei POM-C merklich ab, wobei innerhalb der Versuchsreihen erhebliche Schwankungen (=hohe Standardabweichung) auftraten.

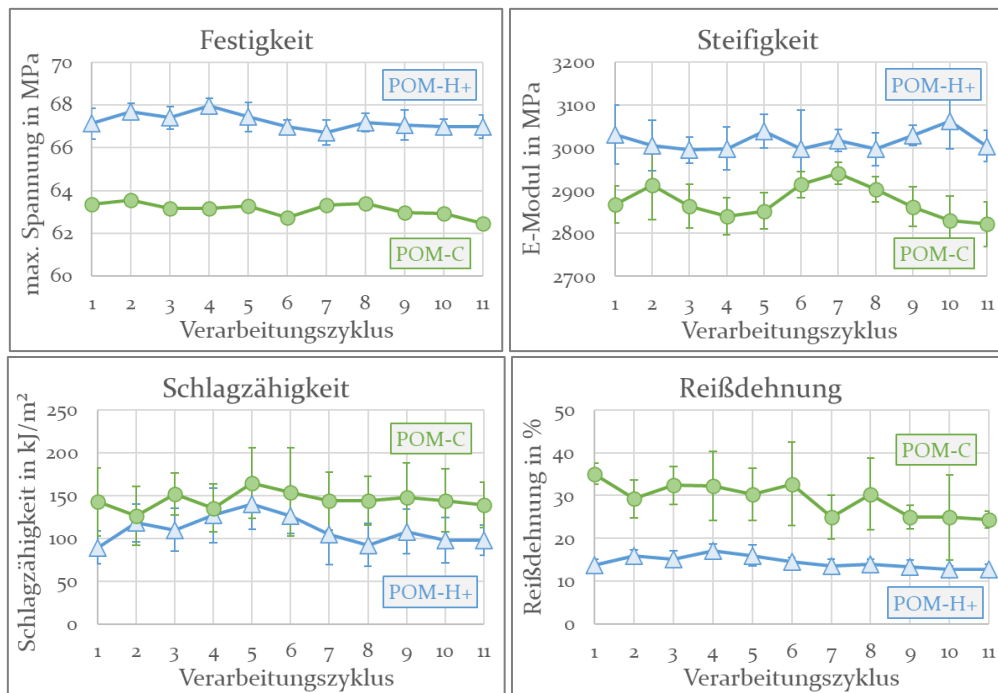


Abbildung 7: Mechanische Eigenschaften bei Mehrfachverarbeitung von POM-C und POM-H+

3.2 Vermischung von homo- und copolymerem POM

Die Untersuchung der Mischbarkeit erfolgte durch Zusammenstellung der beiden Referenzmaterialien in den Gewichtsanteilen 3:1, 1:1 und 1:3. Bei der Verarbeitung im Spritzgussprozess war festzustellen, dass es dabei keine Auffälligkeiten gab und die Oberflächen der Probekörper eine gute Qualität aufwiesen.

Der Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Ausgangsmaterialien sowie der Blends in Abbildung 8 zeigt in den mechanischen Eigenschaften einen dem Mischungsverhältnis entsprechenden Übergang vom eher spröden POM-H+ zum duktileren POM-C. Die in Abbildung 9 dargestellten mechanischen Kennwerte bestätigen diese Aussage mit einer in Richtung POM-C leicht abfallender Festigkeit und deutlich steigender Zähigkeit.

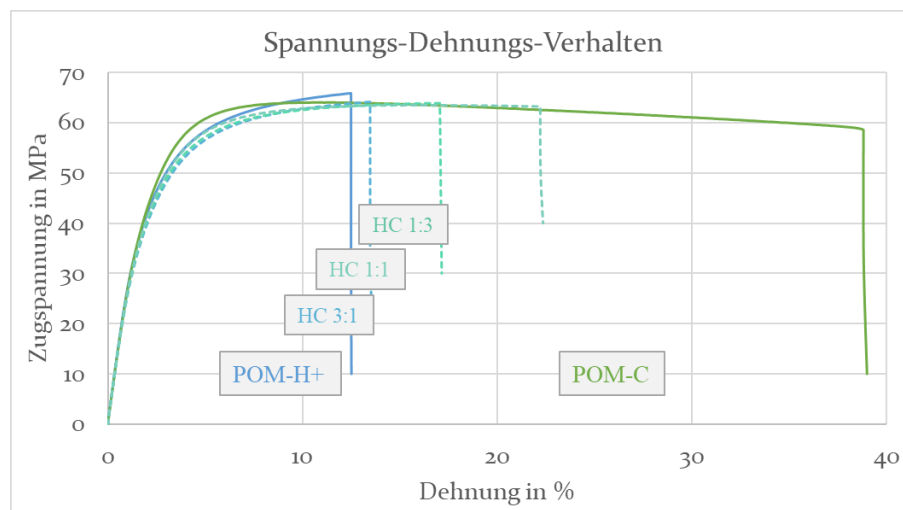


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Blends aus POM-H+ und POM-C

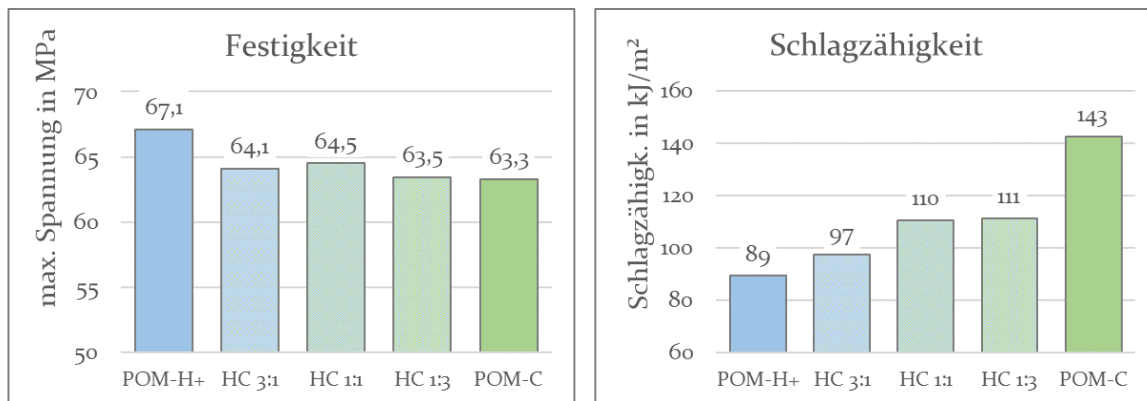


Abbildung 9: Mechanische Eigenschaften der Blends aus POM-H+ und POM-C

3.3 Mechanische Material- und Bauteileigenschaften der Rezyklate

Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe wurden an jeweils 10 Probekörper im Zugversuch nach DIN EN ISO 527 sowie im Schlagzähigkeitsversuch nach Charpy mit ungekerbten Proben (DIN EN ISO 179) ermittelt (Abbildung 10). Bei den Neumaterialien bestätigen sich dabei die höhere Festigkeit und Steifigkeit des POM-H sowie die bessere Schlagzähigkeit und Duktilität des POM-C. Bei den Rezyklaten ist ein direkter Vergleich mit den neuen Materialien schwierig, weil die gebrauchten Ketten hinsichtlich der genauen Inhaltsstoffe und der Vorschädigung nicht exakt charakterisiert werden konnten. Trotzdem ist festzustellen, dass die Rezyklate Rec2 und Rec3 im Bereich des mittleren Festigkeitswertes der neuen Materialien liegen, während bei Rec1 und Rec4 ca. 80% davon erreichen. Bei der Steifigkeit sind ebenfalls etwas geringere Werte zu verzeichnen. Eine Ausnahme bildet Rec3 mit dem aufgrund des Glasfasergehalts deutlich höchsten E-Modul, jedoch auch mit einer sichtbaren Versprödung, durch die neben der Duktilität vor allem die Schlagzähigkeit negativ beeinflusst wird. Die Zähigkeit ist insbesondere für dynamisch beanspruchte Anwendungen eine sehr wichtige Eigenschaft. Deshalb wird auch die durchschnittlich leichte Reduktion der Festigkeit und Steifigkeit von Rec1, Rec2 und Rec4 relativiert, weil deren Zähigkeit oberhalb der beiden homopolymeren POM-Vergleichswerkstoffe liegt.

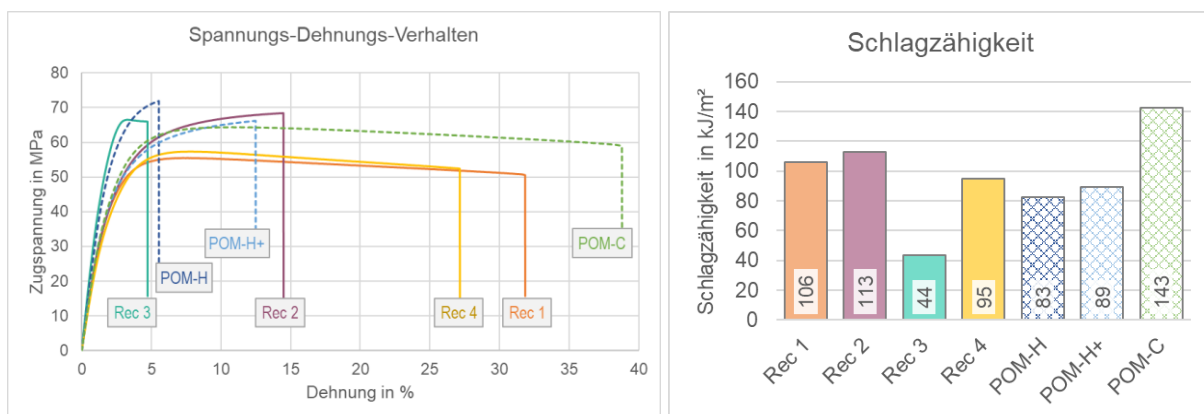


Abbildung 10: Mechanische Eigenschaften der Rezyklate im Vergleich zu den Neumaterialien

Die statischen Zugversuche mit den Ketten wurden mit kurzen, aus jeweils 5 Gliedern bestehenden Abschnitten an einer Festigkeitsprüfmaschine bis zum Bruch durchgeführt. Die maximal zulässige Zugkraft der betrachteten Kettengröße wird herstellerunabhängig mit 1.250 N angegeben. Um diesen späteren Arbeitsbereich voll abzudecken, wurde die Steifigkeit der Ketten (in N/mm) aus den aufgezeichneten Kraft-Verformungs-Kurven als Sekante zwischen 500 und 1.500 N Zugkraft ermittelt. In diesem Kraftbereich verlaufen die Kurven weitestgehend linear.

Beim Vergleich der gefertigten Förderketten korrelieren die Ergebnisse grundsätzlich mit den mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe. Bei Rec2 (100% POM-H) liegt die Festigkeit auf dem Niveau der Neuware, während bei den anderen Rezyklaten Festigkeitsverluste von ca. 20% im Vergleich zum Mittelwert der beiden Neumaterialien zu verzeichnen sind (Abbildung 11). Bezüglich der Steifigkeit sind die Unterschiede deutlich geringer als bei Zugstab, was an der überlagerten Strukturdehnung der Ketten liegt. Die geringe Bruchdehnung von Rec1 und Rec3 deutet auf ein relativ sprödes Materialverhalten. Grund dafür dürfte bei Rec3 der Glasfaseranteil sein. Bei Rec1 könnte sich die sehr lange Einsatzdauer der Kette in der Kaffeerösterei bemerkbar machen, die nach Angaben des Anwenders mehr als 30 Jahre betrug. Neben Last- und Umgebungseinflüssen kann insbesondere die UV-Empfindlichkeit des POM maßgeblich zur Versprödung solcher Werkstoffe beitragen.

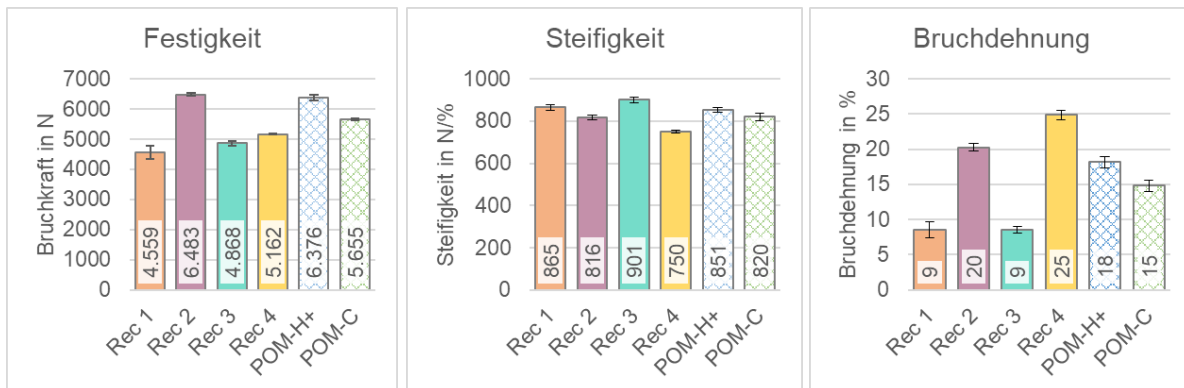


Abbildung 11: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Ketten

3.4 Tribologische Eigenschaften

Für bewegte Konstruktionselemente ist neben den mechanischen Eigenschaften das Reibungs- und Verschleißverhalten von großer Bedeutung. Hierbei sind in der Regel geringe Reibwerte und eine hohe Verschleißfestigkeit erwünscht, um Antriebsenergie zu vermindern sowie Funktionsstörungen und kurze Austauschintervalle zu vermeiden. Die Reibungs- und Verschleißuntersuchungen wurden am Prüfsystem Platte-Platte mit oszillierender Bewegung bei einer mittleren Gleitgeschwindigkeit von 0,25 m/s über 24 bzw. 168 Stunden durchgeführt. Als Gegenkörper zu den POM-Varianten kamen für die Fördertechnik typische Gleitschienenmaterialien aus ultrahochmolekularem Polyethylen (PE-UHMW) sowie Edelstahl zum Einsatz.

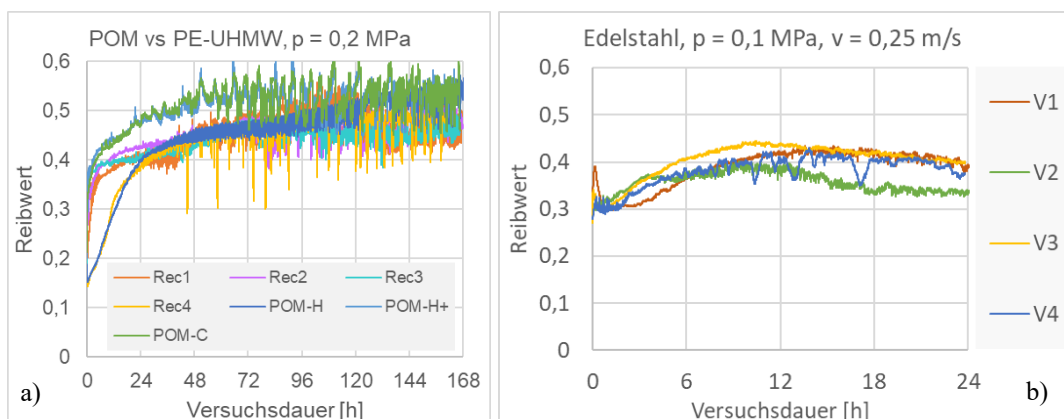


Abbildung 12: Charakteristische Reibwertverläufe der POM-Varianten bei Langzeitbelastung a) gegen PE-UHMW (168 h bzw. ca. 151 km) und b) gegen Edelstahl¹ (24 h bzw. ca. 22 km)

¹ Die Ergebnisse stammen aus einer zweiten Versuchsreihe, die in [Fin24] ausführlich dokumentiert ist.

Die in Abbildung 12 dargestellten Reibwertverläufe zeigen gegen PE-UHMW ein materialtypisches Einlaufverhalten mit einem gegenüber dem Anfangswert sehr stark ansteigenden Reibwert, der sich im Lauf der Belastungsdauer mehr als verdoppeln kann, sowie teils starken Schwankungen des Reibwertes sowie infolgedessen der Kontaktflächentemperatur. Die Werte gegen Edelstahl pendeln sich relativ schnell auf ein stabiles Niveau unterhalb des PE-UHMW ein, dafür wurde hier deutlich mehr Verschleißabrieb des Kunststoffkörpers beobachtet. Das Einlaufverhalten lässt sich mit der Bildung von unterschiedlich ausgeprägten Transferschichten im Kontaktbereich begründen. Interessant ist jedoch, dass in den Tests sowohl bei den Reibwerten als auch dem Verschleiß keine signifikanten Unterschiede zwischen den POM-Varianten zu verzeichnen waren.

3.5 Bauteiltests im Fördersystem

Um die Belastungen im realen Einsatz zu simulieren, wurden mehrere Kettenabschnitte der zweiten Versuchsreihe in einem Testförderer nach Abbildung 13a einem Langzeitversuch unterzogen. Der definierte Lasteintrag erfolgte durch eine Magnetpulverbremse an der Umlenkung mit der eine definierte Kettenzugkraft am Antrieb von $F = 500\text{ N}$ eingestellt wurde (vgl. [Fin24]).

Der erste Kettenbruch ereignete sich nach ca. 1.430 h bzw. 433.000 Umläufen an der Kettenvariante V3 aus Neumaterial. Nach dieser Langzeitbelastung wurde die Restzugkraft von allen Kettenabschnitten ermittelt und mit den Bruchkräften der unbeanspruchten Ketten verglichen. Dabei war festzustellen, dass die gelaufenen Ketten deutlich geringere Bruchkräfte als die Neuware aufwiesen. Es war jedoch hinsichtlich des Abfalls kein Unterschied zwischen der Kette V3 aus Neumaterial und der Recyclingvariante V2 aus dem mehrere Jahre im Betrieb befindlichen Material der gleichen Spezifikation (POM-H, DuPont Delrin 500MP) festzustellen (Abbildung 13b). Der geringste Abfall war bei der Variante V4 zu beobachten, die aus je 50% gebrauchtem und neuem POM-H, allerdings aus unterschiedlichen Materialvarianten, bestand. Hierzu sind weitere Versuche nötig.

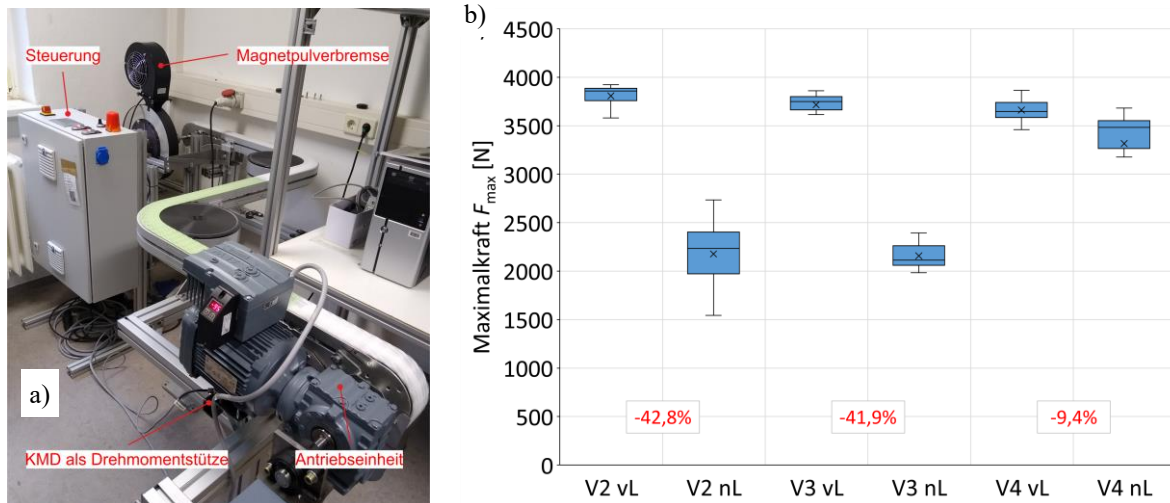


Abbildung 13: Versuchsförderer für Langzeitversuche (a) sowie b) Vergleich der Maximalkraft F_{max} vor (vL) und nach (nL) dem Langzeitversuch

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen zeigen auf, dass Verarbeitungsabfälle und gebrauchte Bauteile aus POM grundsätzlich sehr gut für ein werkstoffliches Recycling geeignet sind. Hinsichtlich des Recyclingprozesses ist eine wesentliche Erkenntnis, dass die homo- bzw. copolymeren POM-Grundtypen ohne erkennbare Einschränkungen vermischt und verarbeitet werden können und damit eine aufwendige Analyse des entsprechenden POM-Typs entfallen kann. Die mechanischen Eigenschaften der Blends, z. B. Festigkeit, Steifigkeit oder Schlagzähigkeit, verändern sich dabei entsprechend der Mischungsanteile beider Typen. Außerdem interessant ist die Tatsache, dass die

Mehrfachverarbeitung von POM im Spritzguss kaum negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat.

Die Versuche wurden mit teilweise mehrere Jahre im Einsatz befindlichen Förderketten und Altlagerbeständen durchgeführt. Die Bauteile wurden dabei bewusst nicht gereinigt, sondern direkt vermahlen und das Mahlgut ebenso direkt mittels Spritzguss weiterverarbeitet. Diesem Vorgehen kommt zugute, dass auch tribologisch beanspruchte Bauteile aus POM in der Regel im Trockenlauf betrieben werden und damit meist keine widerstandsfähigen, schwer zu entfernende Verschmutzungen aufweisen. Für die Praxis bedeutet das, dass aufwendige und teilweise umweltbelastende Prozessschritte wie Reinigung oder Compoundierung (bzw. Granulieren) prinzipiell entfallen könnten und auch die derzeit übliche Beimischung von Neumaterial nicht erforderlich ist. Somit könnte der Herstellungsprozess auch sehr wirtschaftlich gestaltet werden.

Die in den verfügbaren POM-Bauteilen enthaltenen Additive wurden nicht näher analysiert. Es ist aber davon auszugehen, dass die Bauteile in der Regel verarbeitungs- und/ oder anwendungsrelevante Zusatzstoffe wie Gleitmittel, UV-Absorber, Thermostabilisatoren, Verstärkungsstoffe, Leitadditive, Flammenschutzmittel usw. enthalten, die sich anteilig in den Rezyklatmischungen wiederfinden. Die Anwendung der Rezyklate in sensiblen Bereichen (z. B. Lebensmittelkontakt) ist deshalb eingeschränkt und die Mischungen sind nicht direkt mit der Neuware vergleichbar. Unter Berücksichtigung dieses Aspekts zeigen jedoch die Untersuchungsergebnisse, dass sich die mechanischen und tribologischen Eigenschaften der Rezyklate mit nur geringen Abstrichen für die Herstellung von funktionellen Bauteilen eignen und dadurch die Nutzungsdauer der fossilen Rohstoffe wesentlich erhöht werden kann.

Nach ersten Pilotanwendungen kann als Ausblick die aktuell laufende Einführung einer Rezyklatkette durch einen Fördertechnikhersteller genannt werden. Der Hersteller organisiert dabei die Rückführung gebrauchter Ketten von Endanwendern und gewährt diesen dafür Kostenvorteile bei der Abnahme der Rezyklatketten [Mod25].

Literaturverzeichnis

- [Arc01] Archodoulaki, Vasiliki-Maria; Seidler, Sabine; Sczerba, Tejy; Zelenka, Rudolf: Abbauverhalten von Polyoxymethylen (POM): Auswirkung der Mehrfachverarbeitung. In: KU Additive 91 (2001), Nr. 5, S. 82–85.
- [Bau19] Baur, Erwin; Harsch, Günther; Moneke, Martin.: Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. 11. Aufl.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2019, E-Book-ISBN: 978-3-446-46067-6
- [Cel14] Celanese: Hostaform® POM – Product Manual. Celanese, 2014
- [Cel21] Celanese: CAMPUSplastics: Datenblatt HOSTAFORM® C 9021. URL <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/HOSTAFORM%C2%AE+C+9021/Celanese/163/651a61bb>. Abruf: 12.10.2021
- [Dup15] DuPont: Delrin® Acetal Homopolymer, White Paper. DuPont, 2015.
- [DupA23] DuPont: CAMPUSplastics: Datenblatt Delrin® 511DP NC010. URL <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Delrin%C2%AE+511DP+NC010/DuPont/52/b10ad436/SI?pos=45>, Abruf: 15.09.2023.
- [DupB23] DuPont: CAMPUSplastics: Datenblatt Delrin® FG100TL NC010. URL <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Delrin%C2%AE+FG100TL+NC010/DuPont/52/58b72752>. Abruf: 15.09.2023.
- [Fau17] Faust, K.; Bergmann, A.; Sumpf, J.: Influence of the Melt Flow Rate on the mechanical properties of Polyoxymethylene (POM). International Symposium Plastic-Slide-Chains and Tribology in Conveyor Systems: Proceedings, Vol. 3, Chemnitz, April 2017, ISBN 978-3-945479-08-7, URN urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-231703.
- [Fin24] Finke, Jan; Sumpf, Jens; Dallinger, Niels; Golder, Markus: Mechanische Eigenschaften von Polyoxymethylen (POM) aus recycelten Post-Consumer-Abfällen. InnoTRAC-Journal, Vol. 3, Nr. 1, S. 135-151, TU Chemnitz, Chemnitz, Dezember 2024, ISSN 2701-3693, DOI 10.14464/innotracs.v3i1.809
- [Fra16] Francis, R.: Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications: Wiley, 2016

- [Ham13] Hamad, K.; Kaseem, N.; Deri, F.: Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. In: Polymer Degradation and Stability 98 (2013) S. 2801-2812.
- [Lüf05] Lüftl, Sigrid: Thermische Analyse von Polyoxymethylen (POM) zur Untersuchung der Auswirkungen des stofflichen Recyclings. Diss. TU Wien, URL <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/10144>, 2005
- [Mod25] modular automation GmbH: Homepage moduflex ReChain. <https://www.modular-automation.de/unternehmen/nachhaltigkeit/recycling-kette>, Abruf 10.06.2025.
- [Sum22] Sumpf, J., Golder, M.: Closed-Loop-Recycling von Förderketten aus Kunststoff. innoTRAC Journal. 2, 1 (Dec. 2022), 1–24. DOI: <https://doi.org/10.14464/innotracs.v2i1.523>.
- [Sum23] Sumpf, J., Golder, M.: Eignung von POM-Rezyklat aus gemischten Post-Consumer-Abfällen für technische Funktionsbauteile. Technomer 2023: 28. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, Chemnitz, November 2023, ISBN 978-3-939382-16-4

Kontakt

Dr.-Ing. Jens Sumpf
Gruppenleiter Kunststoffkomponenten und Tribologie

Technische Universität Chemnitz
Professur Förder- und Materialflusstechnik
Reichenhainer Str. 70
09126 Chemnitz

Tel. 0371/531-32853
jens.sumpf@mb.tu-chemnitz.de

Remanufacturing durch datenbasierte Entscheidungsfindung und intelligente Prozessplanung

Jonas Zielinski¹, Deborah Rogiers¹, Jorge E. Tapia-Cabrera², Laura Zinnel², Felix Riegger², Tobias Kamps³, Henrik Gerdes³, Alexander Dranov³, Fabian Schansker⁴, Tobias Hertrampf⁴, Julian Meißner⁵, Lucas Hille⁶, Martin Kronthaler⁷, Lucas Giering⁷, Michael F. Zäh²

¹ModuleWorks GmbH, Aachen

²Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München, Garching b. München

³Siemens AG, München

⁴KÖNIG METALL GmbH & Co. K, Gaggenau

⁵roeren GmbH, Landshut

⁶Aperion Analytics GmbH, München

⁷Spanflug Technologies GmbH, München

Abstract. Remanufacturing ist ein anspruchsvoller industrieller Prozess, bei dem ein Alt-Bauteil durch eine hybride Fertigungskette in einen, bezüglich Qualität und Performance, neuwertigen Zustand versetzt wird. Der Erfolg von Remanufacturing in konventionellen Fertigungsumgebungen hängt von der Identifikation geeigneter Anwendungsfälle, der Anpassung bestehender Prozessketten an hybride Fertigungsanforderungen und einer optimierten Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung ab.

Keywords: CAM, Additive Fertigung, Flexible Fertigungssysteme, Re-Manufacturing/-pair

Dieser Beitrag ist in Kurzfassung in der Online Ausgabe des VDI-Z:

<https://doi.org/10.37544/0042-1766-2025-05> und in Gesamtlänge im wt-Werkstatttechnik

Magazin: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/bmbf-produktionsforschung/datenbasiertes-remanufacturing/> verfügbar.

1 Einleitung: Remanufacturing und das Projekt EREP

Die Kreislaufwirtschaft ist eine Alternative zur linearen Wirtschaft und setzt auf Wiederverwendung (engl.: Reuse), Wiederaufbereitung (engl.: Remanufacturing) und Recycling statt Entsorgung. Der Begriff entstand in den 1990er Jahren und beschreibt die Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfällen. In der wissenschaftlichen Literatur wird oftmals das 4R-Modell verwendet, das auf vier Strategien basiert: Reduzierung, Reuse, Recycling und Rückgewinnung. Die ersten drei Strategien des Modells stimmen mit der EU-Abfallrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) überein, während die vierte Strategie, Rückgewinnung, eine wissenschaftliche Ergänzung ist. Remanufacturing ist eine Mischung aus Reuse und Rückgewinnung [1, 2] und bezeichnet die Umwandlung gebrauchter und abgenutzter Komponenten in wiederverwendbare Bauteile.

Mit dem zunehmenden Bedarf an Ressourceneffizienz steigt auch das Interesse an Remanufacturing [3, 4]. In der Industrie ist diese Strategie jedoch noch nicht etabliert. Um das zu ändern, haben sich akademische und industrielle Partner im Rahmen des Projektes „Erfolgreiches Remanufacturing durch datenbasierte Entscheidungsfindung und intelligente Prozessplanung“ (EREP) zusammengeschlossen.

Das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt EREP untersucht daten basiertes Remanufacturing mit Fokus auf der Altteil-Begutachtung und automatisierten Prozessplanung. Ziel des Projekts ist die Befähigung zur präzisen Entscheidungsfindung, ob Altteile für das Remanufacturing geeignet sind. Zudem wird erforscht, inwieweit der Planungsprozess automatisiert werden kann, um die Effizienz und die Umsetzbarkeit zu steigern. Gussbauteile sind in vielen Industriezweigen verbreitet. Daher ist ihre Remanufacturing-Eignung entscheidend. Eine hybride Prozesskette aus draht- und lichtbogenbasierter additiver Fertigung (engl.: wire arc additive manufacturing, kurz: WAAM) und Zerspanung ermöglicht ihre Aufbereitung. Untersuchungen zeigten, dass der Gusswerkstoff EN-GJS-400-15 trotz eines erhöhten Kohlenstoffgehalts durch das WAAM riss- und porenfrei verarbeitet werden kann. Für die Umsetzung der zirkulären Wertschöpfungskette wird ein Einsparungspotenzial von 80 bis 90 % an Primärmaterial und Energie prognostiziert [5]. Dieser Artikel beleuchtet die erarbeiteten Projektschritte für die aus WAAM und Zerspanung bestehende hybride Prozesskette von der Komponentenevaluierung über die Prozessplanung und -optimierung bis hin zur Prozessüberwachung.

2 Evaluierung geeigneter Komponenten für das Remanufacturing

Das *Landshuter Ebenen-Modell des Remanufacturings* (engl.: Landshut Level Model of Remanufacturing, kurz: LEMOR) bewertet umfassend die Eignung von Bauteilen für das Remanufacturing aus technischer, wirtschaftlicher und strategischer Sicht. Dies reicht von der grundsätzlichen technischen Eignungsprüfung bis hin zur Einflussanalyse individueller Schadensbilder. Die Bewertung erfolgt in einem generischen und in einem bauteilspezifischen Spektrum. Die generische Bewertung basiert auf definierten Bauteileigenschaften, die in der Bauteil-Eignungsbeurteilung erhoben werden. Dies ermöglicht die Integration unterschiedlicher Fertigungsverfahren (insbesondere der Kombination additiver Fertigungsverfahren und subtraktiver Verfahren), um hochwertige und komplexe Remanufacturing-Prozesse zu realisieren und zu erweitern. Ein Software-Tool unterstützt die automatisierte und benutzerfreundliche Erfassung von Bauteileigenschaften sowie deren Abgleich mit den Anforderungen für die Wiederaufarbeitung.

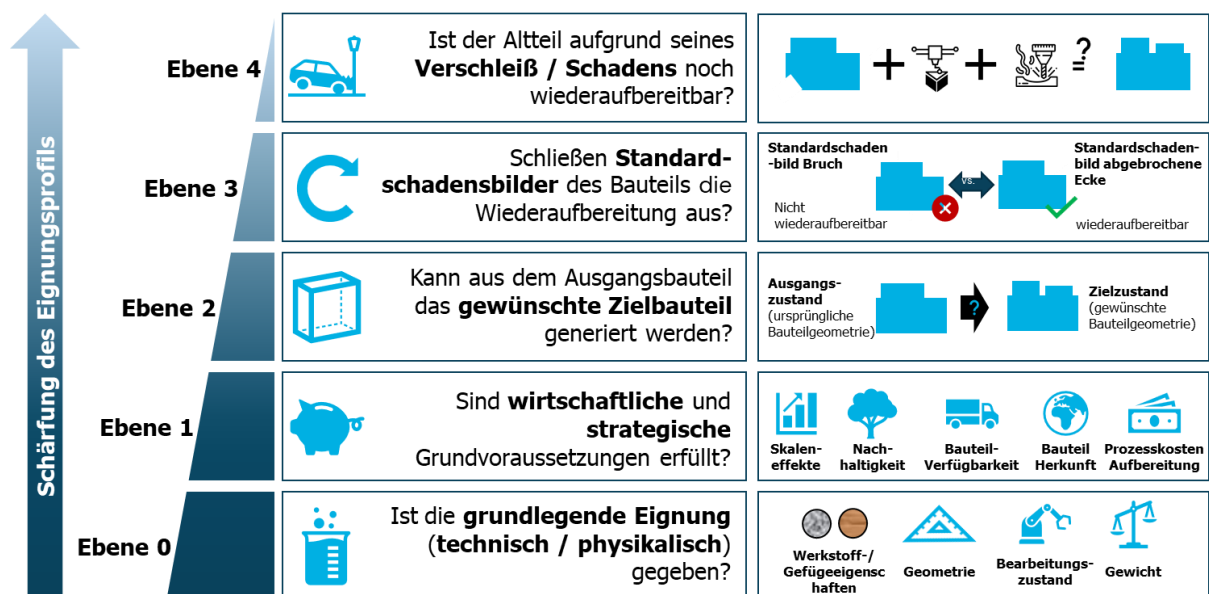


Abbildung 1. Visualisierung des Landshuter Ebenen-Modells des Remanufacturings; Grafik: roeren

Das Modell (s. Bild 1) beginnt mit Ebene 0, in der die technische Machbarkeit eines Bauteils für das

Remanufacturing im generischen Bereich bewertet wird. Dabei wird der Fokus auf grundlegende physikalische Eigenschaften wie Geometrie, Masse und Werkstoff gelegt. In Ebene 1 werden wirtschaftliche und strategische Aspekte wie Stückzahlen, Prozesskosten und Rohstoffverfügbarkeiten berücksichtigt. In Ebene 2 wird die bauteilspezifische Geometrie bewertet. In Ebene 3 werden Standardschäden analysiert, um die Eignung zur Wiederaufbereitung zu prüfen. In Stufe 4 wird das einzelne Bauteil hinsichtlich spezifischer Schäden überprüft. Ist das Bauteil für das Remanufacturing ungeeignet, entfällt eine weitergehende Analyse.

Basierend auf den spezifischen Eigenschaften des potenziellen Bauteils wird eine detaillierte Analyse der Remanufacturing-Eignung unter Berücksichtigung geeigneter Fertigungsprozesse durchgeführt. Zur Bewertung der Eignung eines Bauteils für die Bearbeitung mit WAAM und spanenden Verfahren wird das folgende Scoring-System verwendet:

1. Nicht geeignet (K-O-Kriterium)
2. Weniger gut geeignet
3. Mäßig geeignet
4. Gut geeignet
5. Sehr gut geeignet

Sobald eine Produkteigenschaft (z. B. der Werkstoff) für das WAAM oder die spanenden Verfahren mit „1“ bewertet wird, ist das Bauteil für die Wiederaufbereitung in der hybriden Prozesskette nicht geeignet. Aus den Bewertungen der einzelnen Bauteileigenschaften wird die Remanufacturing-Eignung eines konkreten Bauteils automatisiert bestimmt. Für das Beispiel-Bauteil werden dabei drei Scores als Ergebnis ausgegeben:

- Score für die technische Umsetzbarkeit
- Score für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit
- Score für die strategische Umsetzbarkeit (Nachhaltigkeit)

Zur effizienten und übersichtlichen Ermittlung dieser Scores hat die Aperion Analytics GmbH ein Web-Tool entwickelt, das eine strukturierte Eingabe der relevanten Bauteileigenschaften ermöglicht. Basierend auf den eingegebenen Daten erfolgt eine automatisierte Bewertung der Remanufacturing-Eignung, die den Anwendenden eine klare, visuell aufbereitete Entscheidungsgrundlage bietet.

3 Anpassungen der digitalen Prozesskette (Überarbeitung durch Remanufacturing)

Die Prozessplanung für hybride Fertigungsverfahren ist komplexer als die für konventionelle Prozesse, da abgenutzte Teile unebene und nicht definierte Flächen aufweisen. Eine Bearbeitung ist daher aktuell mit einem hohen manuellen Bearbeitungsaufwand verbunden.

Deswegen muss die Prozesskette erweitert werden. Zuerst wird das Bauteil eingescannt und mit der Zielgeometrie abgeglichen. Zwei Algorithmen ermöglichen den Abgleich, und das zu bearbeitende Volumen, die Differenzgeometrie, wird berechnet. Anschließend werden die Werkzeugwege für alle Prozessschritte größtenteils automatisiert geplant, gefolgt von einer Prozesssimulation.

Abweichungen zwischen den simulativ ermittelten Zielwerten und den realen Daten können Prozessungenauigkeiten und Fehler zu indizieren helfen. Darauf basierend können Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Zuerst erfolgt eine Fräsbearbeitung zur Vorbereitung des additiven Prozesses, gefolgt von einem Materialauftrag und abschließend einem subtraktiven Prozessschritt zur Fehlerkorrektur.

In der praktischen Umsetzung erfolgt zuerst eine Fräsbearbeitung, um eine geeignete Oberfläche für den WAAM-Prozess zu schaffen. Danach kann der Materialauftrag erfolgen. Da hier aufgrund thermischer Ungenauigkeiten im Prozess kleine Fehler auftreten können, ist am Ende nochmals ein subtraktiver Prozessschritt vorgesehen.

Neben der digitalen Prozessplanung wird auch eine Kosten- und Ressourcenabschätzung des Remanufacturings als Entscheidungshilfe hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte durchgeführt. Kommt es zur Umsetzung, wird der Fertigungsprozess digital modelliert und die realen Größen werden mit den berechneten Größen verglichen.

Die digitale Kosten- und Ressourcenberechnung kann bereits auf Ebene 2 des LEMORs erfolgen und ermöglicht so eine frühe Abschätzung der Erfolgsaussichten ohne experimentellen Aufwand. Als Ausgangsbasis werden die 3D-Modelle des Bauteils verwendet. Die Zielgeometrie wird als CAD-Modell benötigt, wohingegen die wiederaufzubereitende Ausgangsgeometrie als Scan oder CAD-Modell vorliegen kann.

Die von der Firma Spanflug bereitgestellte vollautomatisierte Bauteilanalyse berechnet basierend auf Zwischengeometrien jeden Fertigungsschritt der dreigeteilten Prozesskette (Bauteilvorbereitung mittels Fräsen, WAAM, Bauteilnachbearbeitung mittels Fräsen). Für jeden dieser Schritte werden die zu bearbeitenden Volumina und Flächen ermittelt und daraus die Fertigungszeiten, die Kosten und der CO₂-Fußabdruck abgeleitet. Dies ermöglicht eine datenbasierte Entscheidungsfindung bereits in einer frühen Phase des Projekts. Zusätzlich zur bauteilspezifischen Analyse kann die Bewertung auch auf der Ebene 4 erfolgen, wodurch eine individuelle Beurteilung jedes einzelnen Bauteils hinsichtlich seiner Remanufacturing-Eignung ermöglicht wird.

4 Prozessoptimierung für das Remanufacturing von Gusseisenkomponenten (Additive Fertigung)

Im Rahmen von EREP wird das Remanufacturing mittels WAAM von Gusseisenkomponenten mit Kugelgraphit Gusswerkstoff (EN-GJS-400-15) unter Verwendung eines Nickel-Eisen-Schweißdrahts (UTP A 8051 Ti) mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm untersucht. Dabei werden die Auftragsstrategien, einschließlich Linear- und Zickzack-Bahnen, optimiert und deren Einfluss auf die Wandstärke sowie die Wärmeeinflusszone (WEZ) analysiert. Für die Linear- und Zickzack-Auftragsstrategien wurde die Drahtvorschubgeschwindigkeit, wie in Tabelle 1 dargestellt, variiert. Die Schweißgeschwindigkeit wurde konstant bei 45 cm/min gehalten. Mit den Strategien wurden Wandstrukturen mit jeweils vier Lagen aufgebaut.

Tabelle 1. Untersuchte Prozessparameter des WAAM-Verfahrens

Drahtvorschub- geschwindigkeit in m/min	Strom in A	Spannung in V
4,0	106	11,4
5,0	127	12,2
6,0	150	14,0
7,0	175	14,4

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit in beiden Auftragsstrategien zu dickeren Wänden führt, wobei Zickzack-Bahnen aufgrund der zusätzlichen Bewegung quer zur Schweißrichtung in einer größeren Wandstärke resultieren (s. Bild 2). Die Schweißqualität war über alle Parameter hinweg konstant hoch, ohne erkennbare Defekte wie Risse oder Poren. Die Zickzack-Bahnen führen zu einer höheren Einschweißtiefe und einer höheren Härte in der WEZ im Vergleich zur linearen Bahn. Zudem blieben die maximal gemessenen WEZ-Härtewerte (s. Tabelle 2) deutlich unter den beispielsweise von Ferraresi et al. [6] gemessenen Werten.

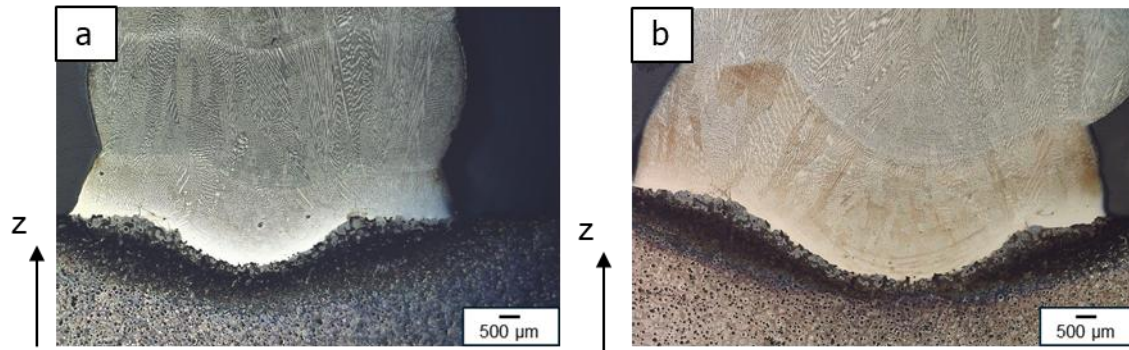


Abbildung 2. Lichtmikroskopische Aufnahmen geätzter Querschnitte von mittels WAAM bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 7 m/min hergestellten Wänden: a) lineare Bahn und b) Zickzack-Bahn; z: Aufbaurichtung; Bilder: TUM

Tabelle 2. Maximale Härtewerte in der Härteverlaufsmessung

Drahtvorschub- geschwindigkeit in m/min	Maximale Härte in HV1	
	lineare Bahn	Zickzack-Bahn
4,0	300	321
5,0	259	323
6,0	279	315
7,0	391	339

Die Studie zeigte zudem, dass die geringe Härte in der WEZ die Möglichkeit eröffnet, die Drahtvorschubgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, um die Produktionszeit zu verkürzen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind entscheidend für die Anpassung der Prozessparameter zur Optimierung der Schweißgeometrie und der mechanischen Eigenschaften und tragen so zur Weiterentwicklung des WAAM-Verfahrens für das Remanufacturing von Gusseisenkomponenten mit Kugelgraphit bei.

5 Prozessüberwachung und -abgleich sowie Dokumentation (digitaler Zwilling)

Prozessüberwachung der Fertigungsoperationen am Beispiel WAAM

Nach erfolgreich abgeschlossener Planung der Fertigungsoperationen und ihrer Validierung durch Simulationen wird das Programm auf die Maschine übertragen. Für das EREP-Projekt wird eine Roboterzelle mit einem 6-Achs-Schwerlastroboter und einem Drehkipptisch für das Auftragschweißen verwendet (s. Bild 3). Einen integralen Bestandteil der digitalen Werkzeugkette bildet die Prozessüberwachung der Fertigung. Im Allgemeinen werden damit zwei Ideen verfolgt: einerseits die

rechtzeitige Erkennung von Anomalien im Fertigungsprozess und andererseits die Gütebeurteilung des individuellen Teils anhand der im Fertigungsprozess aufgezeichneten Größen [7]. Dies ist besonders wichtig, um Deformationen und Formfehler im WAAM-Verfahren zu erkennen und zu minimieren und Kollisionen sowie hohe Kräfte in der spanenden Nachbearbeitung zu vermeiden [8].

Für das WAAM-Verfahren stellten Reisch et al. ein Prozessüberwachungs-Framework vor, das verschiedene Sensoren kombiniert, um Erkenntnisse und Indikatoren für die Güte zu gewinnen [9]. In der vorhandenen roboterbasierten Pilotlinie (s. Kapitel 7) werden ein Mikrofon und eine Wärmebildkamera zur Beobachtung des Schweißverfahrens eingesetzt. Für eine quantitative Datenanalyse werden die Daten der Schweißstromquelle aufgezeichnet. Durch eine Verfolgung des Werkzeugmittelpunktes (engl.: Tool Center Point, kurz: TCP) wird eine räumliche Zuordnung von Anomalien zu tatsächlichen Fehlern am Bauteil ermöglicht. Für ein Demonstratorbauteil aus dem Mobilitätssektor (s. Bild 4) führt das EREP-Projekt das Zusammenspiel aus realen und simulierten Messungen exemplarisch vor. Mittels der digitalen Prozessplanung wird für das verschlissene Bauteil durch Auftragen weniger Schichten eine Wiederverwendung ermöglicht. In der Rundung führt ein erhöhter Wärmeeintrag zu ungleichmäßigen Schweißnahthöhen. Ebenso gut erkennbar sind die Anlauffarben, die Aufschluss über die WEZ geben.

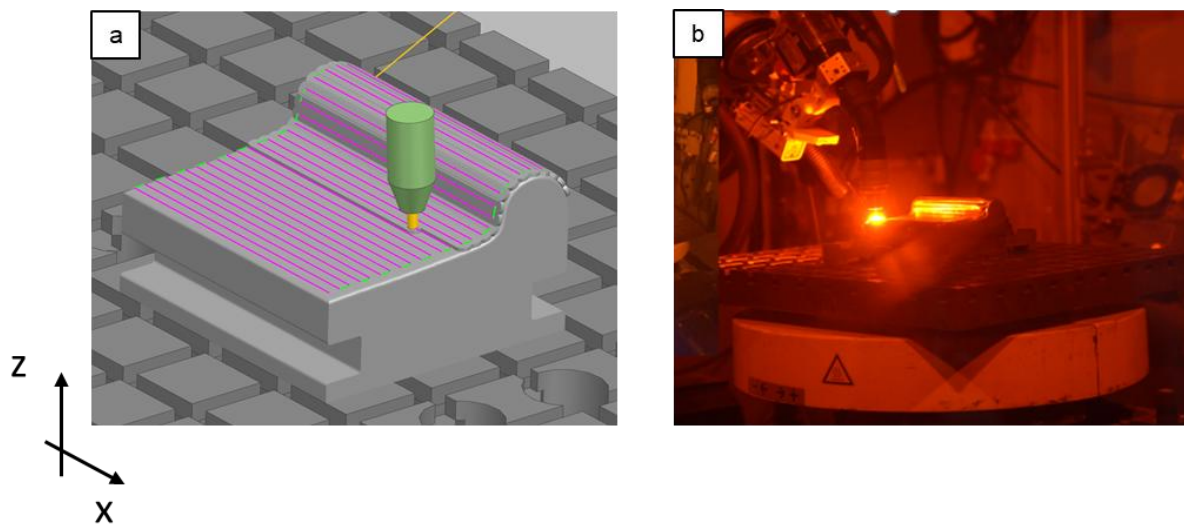


Abbildung 3. Bauteilfertigung: a) Planung der aufzutragenden Schichten im sog. linearen bidirektionalen Muster, b) Auftragschweißen am realen Bauteil mittels WAAM; z: Aufbaurichtung; x: Schweißrichtung; Bilder: Siemens



Abbildung 4. Demonstratorbauteil mit einem Auftrag von zwei Lagen; Bild: Siemens

Jedem Koordinatenpunkt können zentrale Kenngrößen des WAAM-Verfahrens zugeordnet werden. Zum Beispiel ist die Schweißleistung (s. Bild 5) eine zentrale Größe, die sich unmittelbar in der Bauteiltemperatur niederschlägt. Die erfassten Leistungsdaten werden gezielt den jeweiligen Bauteilbereichen zugeordnet, sodass Prozessparameter präzise analysiert und deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften orts aufgelöst bewertet werden können. Die unterschiedlichen Punktfarben in Bild 5 zeigen beispielsweise deutlich, dass die Kenngröße in der Rundung des Bauteils von ihren Normalwerten abweicht.

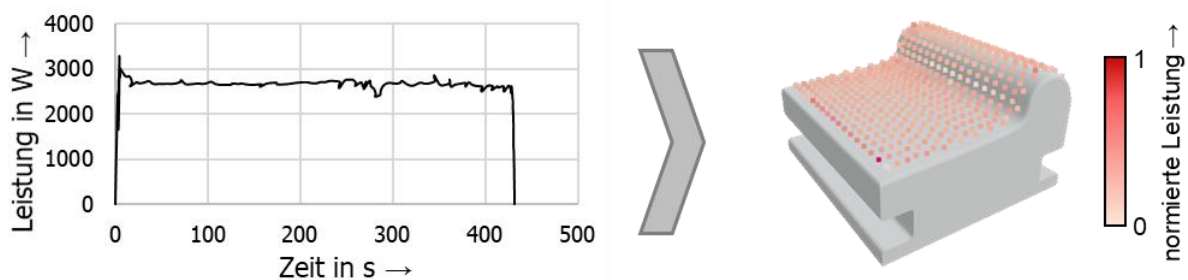


Abbildung 5. Überführung einer Leistungsmessung auf das Bauteil durch Zuordnung der erfassten Leistungsdaten zu spezifischen Bauteilbereichen; Grafik: Siemens

Abgleich von Soll- und Ist-Daten: Ein Ausblick

Der Abgleich von Soll- und Ist-Daten gibt Aufschluss über Prozessabweichungen vom gewünschten Bauteilzustand. Mithilfe des maschinellen Lernens sollen im Verlauf dieses Projekts Diskrepanzen erkennbar und bewertbar gemacht werden. Grundlage hierfür ist ein Training basierend auf synthetischen und realen Daten.

Berechnung und Dokumentation der ökologischen Nachhaltigkeit

Im Rahmen des EU-Lieferkettengesetzes [10] muss die Transparenz der Lieferkette in Bezug auf die Herkunft der Teile sowie deren Umweltauswirkungen geschaffen werden. Daher sollen die zuvor ermittelten Energie- und Materialverbräuche mittels einer Bewertung der Umweltauswirkungen im Lebenszyklus (engl.: Life Cycle Impact Assessment, kurz: LCIA) berücksichtigt und im digitalen Produktpass [11] hinterlegt werden.

Durch die aufgezeichneten Energie- und Stoffströme kann jeweils ein LCIA für den WAAM- und den Fräsprozess durchgeführt werden, um die ökologische Nachhaltigkeit zu beziffern. Dies ist erforderlich, um den Nachweis über die Herkunft und Umweltauswirkungen der verwendeten Rohmaterialien, Hilfsmaterialien, wie Gas und Schmierstoffe, sowie Energieverbräuche zu erbringen. Im Bild 6 ist exemplarisch das Treibhausgaspotenzial (THP) für den Auftrag einer Lage mittels WAAM dargestellt.

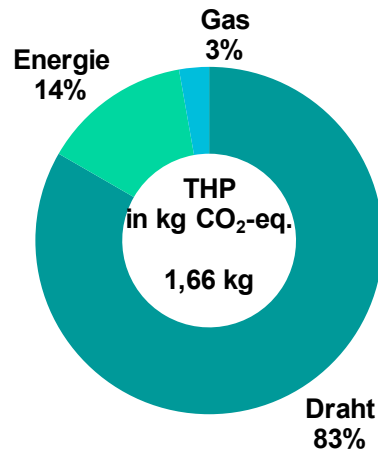


Abbildung 6. Zusammensetzung des Treibhausgaspotenzials einer Lage; Grafik: Siemens

Das EREP-Projekt orientiert sich an den Standards von Catena-X [12] und der Industrial Digital Twin Association (IDTA). Ökosysteme, wie das Catena-X-Netzwerk, bieten die Infrastruktur, um Daten auszutauschen und dabei die Datensouveränität zu gewährleisten. Mithilfe des digitalen Produktpasses können in Submodulen verschiedene Aspekte des Produktes hinterlegt werden. Die IDTA hat Standards zur Dokumentation und zur Analyse des Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes und der eingesetzten industriellen Betriebsmittel veröffentlicht [13]. Über die Sensordaten und Materialdaten werden die entsprechenden Daten für den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß nach einer durchgeführten LCIA hinterlegt.

6 Demonstrator

Den Abschluss des Projekts bildet ein vollständiger Durchlauf der Prozesskette anhand eines Demonstrator-Bauteils. Dazu wird seitens KÖNIG METALL ein Bauteil nach den folgenden Kriterien ausgewählt:

1. Das Bauteil ist gemäß LEMOR-Bewertung (Ebene 0 bis 3) grundsätzlich geeignet für das Remanufacturing.
2. Es liegen CAD-Daten des Bauteils vor.
3. Es liegen Erfahrungswerte für das manuelle Remanufacturing vor.
4. Es stehen ein oder mehrere Exemplare des Bauteils zur Verfügung, deren Schadensbild gemäß LEMOR-Bewertung (Ebene 4) das Remanufacturing zulässt.

Für die ökonomische und ökologische Analyse werden zunächst die Kosten und der Ressourcenverbrauch der Neufertigung als Alternative zum Remanufacturing untersucht.

Im Rahmen der digitalen Prozesskette werden, wie beschrieben, die benötigten Ressourcen vorab berechnet (Material, Prozesszeiten, Energieverbrauch) sowie die Bahnplanung durchgeführt. Hierzu wird ein Scan des beschädigten Bauteils mit dem CAD-Modell der Soll-Geometrie abgeglichen.

Für die physische Prozesskette stehen mehrere Pilotlinien zur Verfügung, die die Verfahrensschritte „Scan – subtraktive Fertigung – additive Fertigung – Scan – subtraktive Fertigung“ in verschiedenen Anlagen (s. Bilder 7, 8 und 9) abbilden können.

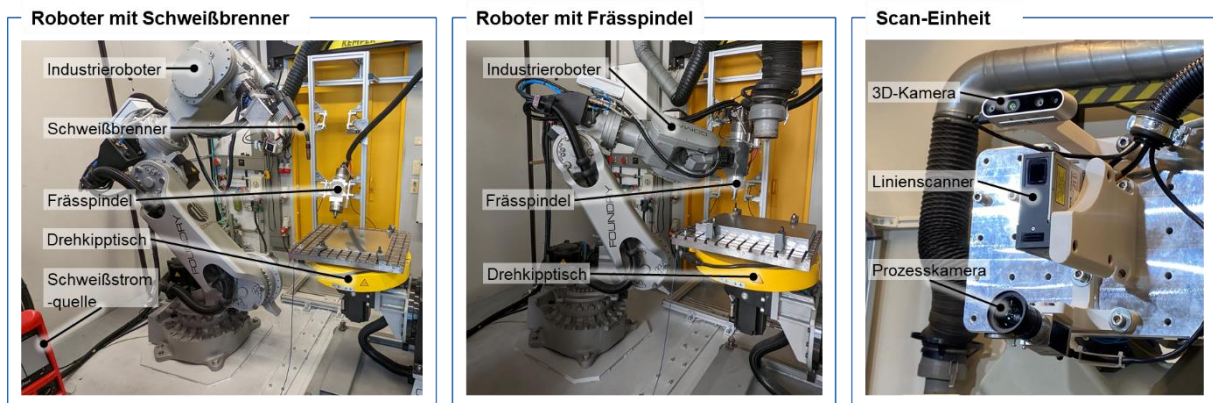


Abbildung 7. Pilotlinie der Firma Siemens; Bilder: Siemens

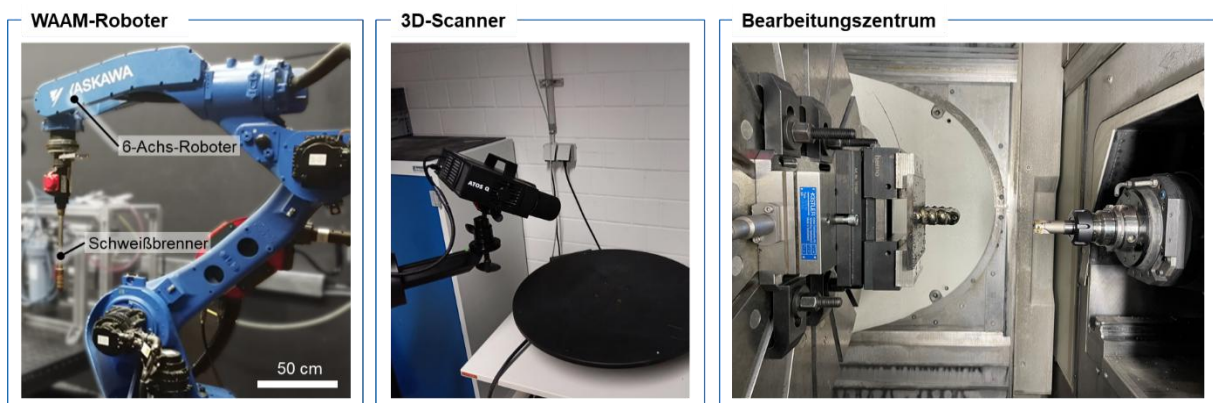


Bild 8. Pilotlinie des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb); Bilder: TUM

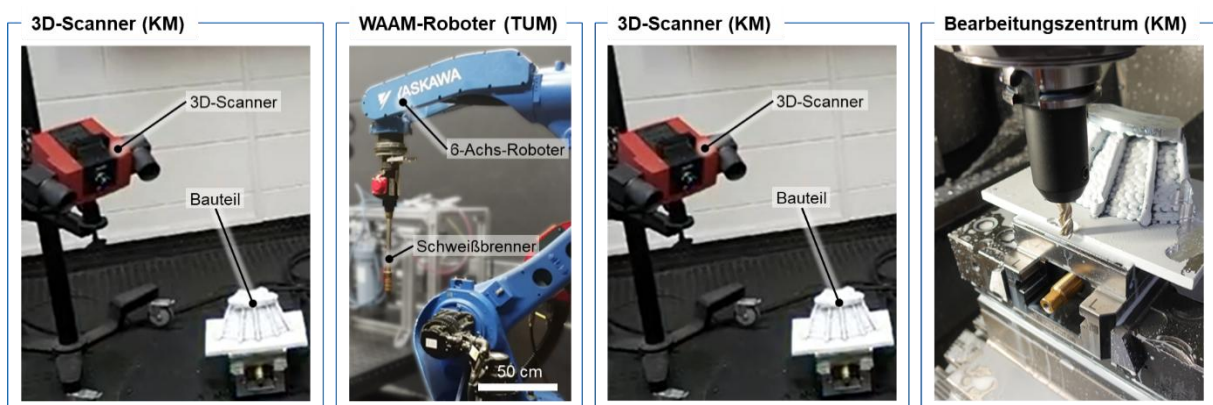


Abbildung 9. Unternehmensübergreifende Pilotlinie der Firma KÖNIG METALL (KM) und des iwB; Bilder: KM

Im Fall der Firma KÖNIG METALL ist die Pilotlinie auf zwei Standorte verteilt, da bei KÖNIG METALL kein WAAM-Roboter für das Projekt zur Verfügung steht. Dies bietet die Möglichkeit, den Transfer von Daten und den Transport des Bauteils in die Betrachtung mit aufzunehmen, verbunden mit der Aussage, unter welchen Bedingungen eine solche aufgeteilte Prozesskette sinnvoll ist.

7 Ausblick

Ziel der Demonstratoren und des Projekts ist es, das Modell zu validieren, und zwar sowohl in seinen Einzelschritten als auch in deren Verkettung. Langfristig soll das Projekt einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Industriestandards für die Kreislaufwirtschaft und die Klimaneutralität in Deutschland leisten.

Obwohl die Projektergebnisse vielversprechend sind, muss der Übertrag auf andere Industriezweige im Nachgang erfolgen und die tatsächliche Wirtschaftlichkeit im Laufe der nächsten Jahre erst noch unter Beweis gestellt werden.

Die Vision dieses BMBF-geförderten Projekts ist gemeinsam mit anderen seiner Art den Wandel von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft in Deutschland und Europa voranzutreiben, so dass ein nachhaltiges Leben und Wirtschaften ermöglicht wird.

8 Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm [„Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“](#) (Förderkennzeichen 02J21E110 bis 02J21E116) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

9 Danksagung

Das Forschungsprojekt EREP (Erfolgreiches Remanufacturing durch datenbasierte Entscheidungsfindung und intelligente Prozessplanung) wird durch das Bundesministerium für -Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert. Die Projektpartner bedanken sich herzlich beim Förderer und dem Projektträger.

Ebenfalls gedankt sei dem Projektbevollmächtigten, der stets mit Rat und Tat unterstützend zur Seite steht.

Die Automobilbranche im Kontext der Kreislaufwirtschaft - Stakeholder-Befragung zu Implikationen im Projekt EKODA

Jonathan Gaier¹ und Lily Hinkers¹

¹Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, Deutschland

Abstract. Die Automobilindustrie steht durch Klimawandel und Ressourcenknappheit vor tiefgreifenden Veränderungen. Im Projekt EKODA wird daher untersucht, wie sich kreislauforientierte Demontage- und Wiederaufbereitungsprozesse automatisieren lassen, um Produkte länger im Wertschöpfungskreislauf zu halten. Dazu wurde eine qualitative Studie mit Stakeholdern verschiedener Bereiche – von Kfz-Herstellern über Versicherungen bis hin zu Carsharing-Anbietern – durchgeführt, die semi-strukturierte Interviews umfasste und nach der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet wurde. Die Ergebnisse geben einen Einblick in spezifische Aktivitäten und Herausforderungen der Befragten und zeigen, dass fehlende Standardisierungen, technische Hürden und divergierende Geschäftsinteressen die Umsetzung einer konsequenten Kreislaufwirtschaft erschweren. Gleichzeitig verdeutlichen sie das Potenzial von digitalen Kennwert- und Handelssystemen, einheitlichen Qualitätsstandards für Gebrauchteile sowie gezielter politischer Förderung. Ein strukturierter, kooperativer Ansatz aller beteiligten Akteure ist nötig, um hochwertige Kreislaufstrategien in der Branche zu etablieren. Eine erfolgreiche Implementierung erfordert neben technischer Innovation vor allem eine enge Abstimmung zwischen Wirtschaft, Politik und Forschung, um Synergien zu nutzen und Akzeptanz zu fördern.

Keywords: Circular Economy, Stakeholder, Interview, Automobil, Akzeptanz

1 Einleitung

Die Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) stellt einen systemischen Ansatz zur wirtschaftlichen Entwicklung dar, der darauf abzielt, Abfall und Verschmutzung zu vermeiden, Produkte und Materialien im Kreislauf zu halten und natürliche Systeme zu regenerieren (Ellen MacArthur Foundation, 2025; Kirchherr et al., 2017). Im Gegensatz zur traditionellen linearen Wirtschaft mit ihrem "Take-Make-Dispose"-Modell verfolgt die Kreislaufwirtschaft einen regenerativen Ansatz, bei dem Ressourceninputs und Abfälle, Emissionen sowie Energieverluste durch Verlangsamung, Schließung, Intensivierung und Regenerierung von Material- und Energiekreisläufen minimiert werden (Konietzko et al., 2020).

Die Automobilindustrie steht vor mehreren grundlegenden Transformationen: Der Übergang zu alternativen Antriebstechnologien, steigende Nachhaltigkeitsanforderungen und verschärfte regulatorische Rahmenbedingungen erfordern ein Umdenken entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Das Ziel der deutschen Automobilindustrie ist das Erreichen einer vollständig klimaneutralen Mobilität bis spätestens 2050, im Einklang mit dem Pariser Klimaschutzabkommen. (Verband der Automobilindustrie e.V., 2023)

Mit der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte verschieben sich die CO₂-Hotspots signifikant. Während bei konventionellen Fahrzeugen die Nutzungsphase den größten Teil der Emissionen verursacht, gewinnen bei Elektrofahrzeugen die Emissionen aus der Herstellungsphase an Bedeutung (Bieber, 2021; Helmers et al., 2020). Vor dem Hintergrund globaler Lieferketten, geopolitischer Unsicherheiten und steigender Umweltauflagen verlangen Stakeholder – darunter Politik, Endnutzer, NGOs und Partnerunternehmen

– zunehmend ressourceneffiziente, stabile und nachhaltige Produkt- und Servicekonzepte (Lechler et al., 2020).

Während Recycling bereits einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz leistet, zeigt sich, dass höherwertige Kreislaufstrategien wie Reuse (Wiederverwendung), Repair (Reparatur) und Remanufacturing (Wiederaufbereitung) oft ökologisch und ökonomisch vorteilhafter sind (Jørgensen et al., 2018; Landgrebe et al., 2015). Durch diese Strategien können Produkte und Komponenten längere Zeit auf einem hohen Wertniveau im Kreislauf gehalten werden, bevor sie recycelt werden müssen (Achterberg et al., 2016). Eine Herausforderung sind die Anforderungen an die Demontage, die im Gegensatz zur zerstörenden Demontage (Schreddern) für das Recycling, zerstörungsarm oder -frei erfolgen muss, um Komponenten und Baugruppen für die Wiederverwendung zu erhalten.

An dieser Stelle setzt das Projekt EKODA (Effiziente und wirtschaftliche, kreislaforientierte Demontage und Aufbereitung) an. Das Projekt zielt darauf ab, hochwertige Kreislaufstrategien durch die Automatisierung von Demontageprozessen zu erschließen. Im Fokus stehen dabei die Zustandserfassung, automatisierte Demontage und hochwertige Verwertung gebrauchter Automobilkomponenten. (Hemmerle, 2023)

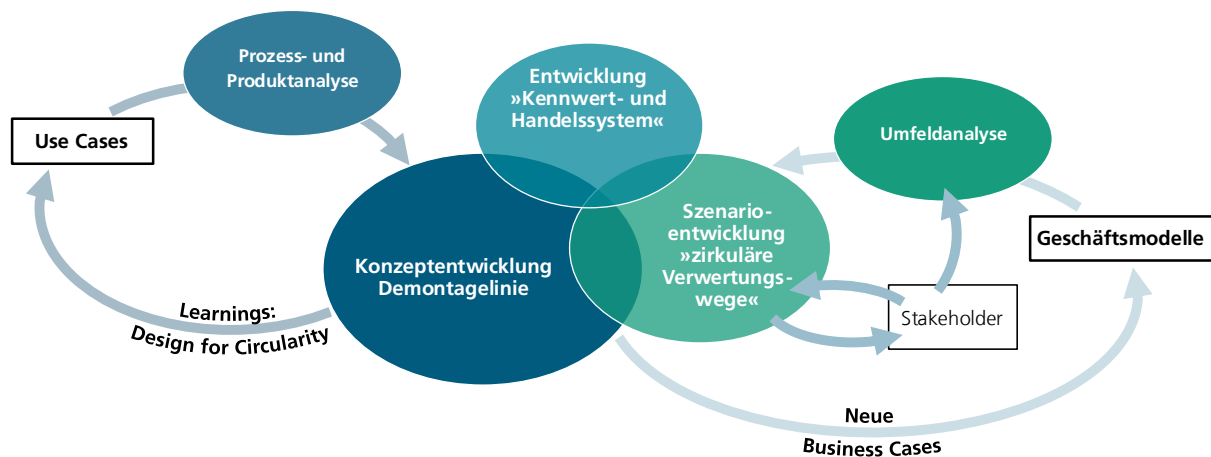


Abbildung 1 Kerntätigkeiten (runde Felder) und Beziehungen (Pfeile) zum Obersystem (eckige Felder) im Projekt EKODA

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass der aktuelle Demontageprozess noch stark handwerklich geprägt ist. Das übergeordnete Ziel des Projekts besteht darin, hochwertige Kreislaufstrategien in der Branche zu etablieren, indem Demontageprozesse teil- oder vollautomatisiert werden und damit gebrauchtes Material effizient für Weiterverwendungen verfügbar gemacht wird. Dieser Ansatz stärkt die Resilienz der Automobilwirtschaft, da Abhängigkeiten von Primärrohstoffen verringert werden, und fördert die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die Umwelt- und Wirtschaftsziele miteinander verbinden. (Hemmerle, 2023)

Um praktikable Lösungen zu entwickeln und den Transfer in die betriebliche Praxis zu gewährleisten, setzt das Projekt EKODA auf eine enge Stakeholdereinbindung (siehe Abbildung 1). Hierzu zählen Unternehmen aus unterschiedlichen Bereichen der Wertschöpfungskette, wie Fahrzeughersteller, Teilehersteller, Demontagebetriebe sowie Versicherungen und Carsharing-Anbieter. Die gemeinsame Zusammenarbeit ermöglicht es, technische, organisatorische und regulatorische Hindernisse beim Ausbau der CE frühzeitig zu identifizieren und anzugehen.

Die zentrale Forschungsfrage lautet: Was würde die Erreichung des Ziels in EKODA (Automatisierung und damit gesteigerte Wirtschaftlichkeit) für die einzelnen Akteure in der bestehenden Wertschöpfungskette bedeuten?

Daraus ergeben sich relevante Unterfragen:

- UF1: Welche Rolle spielt Kreislaufwirtschaft im Geschäft der einzelnen Akteure der Automobilbranche?
- UF2: Welche Herausforderungen sieht die Automobilbranche beim Wandel zur Kreislaufwirtschaft?
- UF3: Was oder wer könnten potenzielle Wegbereiter für eine erfolgreiche Implementierung von Kreislaufwirtschaftsstrategien, Demontage und Remanufacturing sein?
- UF4: Wie ist die Akzeptanz für aufbereitete Kfz-Komponenten, kreislaufgerechtes Design und Kennwertsysteme in der Anwendung und was sind Einflussgrößen?

2 Methodik

Für die vorliegende Studie wurde ein systematischer Ansatz zur Identifizierung relevanter Stakeholder in der Automobilbranche gewählt. Die typische Wertschöpfungskette für Automobile wurde anhand des Value Hill Konzepts (Achterberg et al., 2016) analysiert. Die Inhalte des Projekts EKODA wurden im Value Hill verortet (siehe Abbildung 2), und verschiedene Stakeholder wurden den entsprechenden Tätigkeiten in der Wertschöpfungskette zugeordnet. Insgesamt wurden 14 Stakeholder-Gruppen identifiziert, die mittelbar oder unmittelbar von den Ergebnissen des Projekts EKODA beeinflusst werden oder diese beeinflussen können.

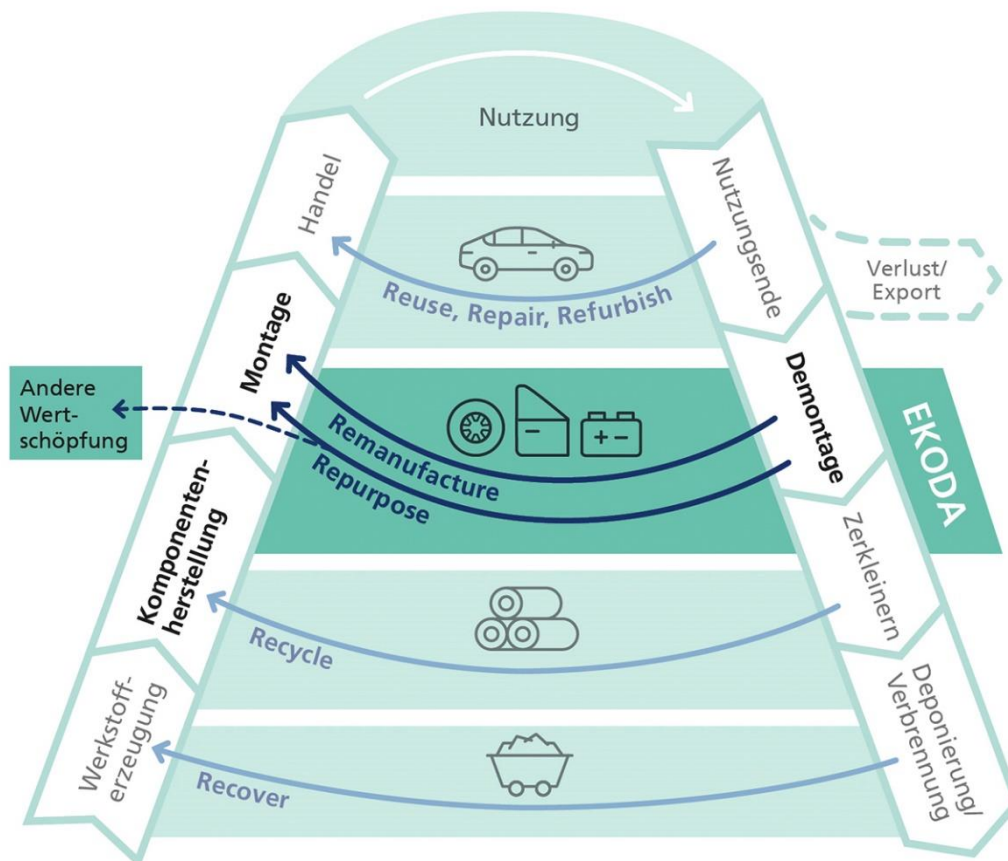


Abbildung 2 Vereinfachte Darstellung der Stakeholder-Identifikation in der automobilen Wertschöpfungskette anhand des Value Hill Konzepts

Insgesamt 14 Stakeholder wurden als besonders relevant eingestuft. Auf dieser Basis wurden über Desktop-Recherchen und Projektkontakte insgesamt 50 potenzielle Firmen ermittelt. Dabei lagen die Schwerpunkte auf einer möglichst großen Abdeckung unterschiedlicher Geschäftsmodelle sowie einem

breiten Spektrum an Betriebsgrößen. In einem weiteren Schritt wurden 60 Ansprechpartner in diesen Unternehmen (etwa auf den jeweiligen Webseiten oder auf LinkedIn) recherchiert. Schließlich kontaktierte das Forschungsteam 40 Personen, um sie zur Teilnahme an Interviews einzuladen.

2.1 Interviewpartner

Von den kontaktierten Personen gaben drei eine direkte Absage, 30 reagierten auch auf Nachfrage nicht, und sieben erklärten sich zu einem Interview bereit. Somit umfasste die finale Stichprobe sieben Unternehmen aus verschiedenen Gliedern der automobilen Wertschöpfungskette:

- Kfz-Teilehersteller (1)
- Kfz-Hersteller / OEM (1)
- Kfz-Demontagebetrieb (1)
- Kfz-Teileaufbereiter (1)
- Car Sharing Anbieter (1)
- Kfz-Versicherer (2)

2.2 Datenerhebung und -auswertung

Basierend auf den Forschungsfragen wurde ein Interviewleitfaden mit bis zu 18 Fragen für semi-strukturierte Interviews entwickelt. Dieser Ansatz wurde gewählt, um einerseits eine Vergleichbarkeit zwischen den Interviews zu gewährleisten und andererseits genügend Flexibilität für die spezifischen Perspektiven der verschiedenen Stakeholder zu bieten.

Von den insgesamt 7 Interviews fanden 6 per Videocall statt, während 1 Interview persönlich vor Ort durchgeführt wurde. Alle Interviews wurden zwischen Januar und Februar 2024 aufgezeichnet und anschließend transkribiert, um eine detaillierte Analyse zu ermöglichen. Die Auswertung der Daten erfolgte mittels Qualitativer Inhaltsanalyse nach Kuckartz & Rädiker (2023). Für die vorliegende Studie wurde ein kombinierter Ansatz gewählt, der sowohl deduktive als auch induktive Elemente enthält. Als Ausgangspunkt diente ein deduktives Codesystem, das auf dem Interviewleitfaden basierte. Während der Analyse wurde dieses durch induktiv erzeugte Codes ergänzt, um neue Erkenntnisse und Themen zu erfassen, die im ursprünglichen Codesystem nicht enthalten waren. Auf diese Weise ließen sich sowohl die projektrelevanten Forschungsschwerpunkte gezielt untersuchen als auch unvorhergesehene Aspekte identifizieren (Kuckartz & Rädiker, 2023).

Die Datenanalyse erfolgte in mehreren Schritten:

- a) Erstkodierung: Ordnung der Transkriptpassagen nach den deduktiv vorgegebenen Kategorien.
- b) Feinkodierung: Ausarbeitung von Subkategorien aus dem Textmaterial, sofern neue Themenkomplexe oder Schwerpunkte erkannt wurden.
- c) Zusammenführung: Verdichtung der Codes in Oberthemen, die Aufschluss über Trends, Herausforderungen und mögliche Lösungswege im Kontext der CE in der Automobilbranche geben.
- d) Interpretation: Ableitung zentraler Erkenntnisse hinsichtlich der Forschungsfragen.

Dieses Vorgehen gewährleistet eine systematische Strukturierung sowie eine wissenschaftlich fundierte Auswertung der Interviewdaten. (Kuckartz & Rädiker, 2023)

3 Ergebnisse

3.1 Aktuelle Tätigkeit der Stakeholder

Das im Rahmen der Studie befragte Unternehmen in der Kfz-Herstellung hat die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft fest in seine Unternehmensstrategie integriert und konkrete Kennzahlen definiert und überträgt diese bis auf die Ebene der Entwickler und Einkäufer. Diese beinhalten den Einsatz von

Sekundärmaterialien, sowie die Verbesserung der Recyclingfähigkeit. Schulungsmaßnahmen werden für das notwendige Wissen und Bewusstsein der Mitarbeiter durchgeführt.

Die Kfz-Teile-Hersteller konzentrieren sich auf Recyclingstrategien, gehen jedoch auch über das reine Recycling hinaus und verfolgen Möglichkeiten der Digitalisierung und Branchenkooperation. Nach eigenen Aussagen sind sie in Verbänden aktiv, in welchen sie gemeinsam mit anderen Unternehmen Positionen und Zielbilder zur Kreislaufwirtschaft erarbeiten. Digitale Prozesse werden unter anderem zur Dokumentation von Verwertungsnachweisen und zur Demontage der Bauteile erarbeitet. So arbeitet das akteurübergreifende Projekt „Catena-X“ mit virtuellen Produktzwillingen, welche in Richtung Demontage, Sekundärrouten und Ersatzteiltrouten verlängert werden. In diesem Zusammenhang betonen die Kfz-Teile-Hersteller, dass bereits hohe Recycling- und Verwertungsquoten erreicht werden, jedoch noch Potenzial für eine hochwertigere Verwertung existiert.

Die befragten Kfz-Versicherungsunternehmen erkennen den Wert gebrauchter oder aufbereiteter Teile bei Reparaturen und sehen darin ökologische wie auch ökonomische Vorteile. Ihr Engagement zielt darauf ab, die Wiederverwendung von Komponenten zu fördern, um zwar auch Ressourcen zu schonen, vor allem aber Kosten in der Schadenregulierung zu reduzieren. In der praktischen Umsetzung werden interne Leitlinien diskutiert, die den verstärkten Einsatz solcher Teile unterstützen. Zudem unterstreichen die Versicherungen ihre Kooperationen mit wissenschaftlichen Einrichtungen, um neue Entwicklungen im Bereich Kreislaufwirtschaft frühzeitig zu erkennen und zu integrieren.

Unternehmen im Bereich Carsharing und Fahrzeugvermietung adressieren zwar die Kreislaufwirtschaft, haben jedoch neben ihrem Grundkonzept des Fahrzeugteilens (Reuse-Aspekt) bislang erst vereinzelt zusätzliche Maßnahmen implementiert.

Die Hauptaktivität des befragten Kfz-Demontagebetriebs besteht in der Demontage von Altfahrzeugen und der anschließenden Materialtrennung, um diese gezielt in andere Wertschöpfungsketten zu überführen. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Wiederverwendung intakter Komponenten, um diese in einen zweiten Lebenszyklus zu bringen. Die etablierte Expertise und eingespielten Prozesse verschaffen dem Demontagebetrieb nach eigener Einschätzung einen Wettbewerbsvorteil. Gleichzeitig stellt das Unternehmen klar, dass sie sich durch neue kreislaforientierte Entwicklungen nicht bedroht fühlen, sondern sich eher bestätigt sehen, weil ihre Erfahrungen mit Recycling und Aufbereitung genau den anvisierten CE-Zielen entsprechen.

Bereits seit den 1960er Jahren arbeitet das befragte Unternehmen im Bereich Teile-Aufbereitung nach CE-Prinzipien: Gebrauchte Teile werden systematisch gesammelt, überholt und erneut in den Markt gebracht. Das Hauptziel liegt in der Rohstoffunabhängigkeit und in Kosteneinsparungen, die laut Interviewten die höheren Lohnkosten in Deutschland kompensieren können.

3.2 Herausforderungen für Stakeholder

Ein zentrales Thema ist die Notwendigkeit besserer Kollaboration entlang der Wertschöpfungskette. Insbesondere bei der Rückgewinnung und Wiederaufbereitung von Bauteilen bestehen oft unübersichtliche Strukturen, die eine reibungslose Übergabe der Komponenten erschweren. Ein Automobilteile-Hersteller betont in diesem Zusammenhang, dass es an harmonisierten Prozessen und klar definierten Schnittstellen fehle. Zwar existieren bereits vereinzelt Systeme zur Rückführung ausgedienter Teile, doch sind diese laut Stakeholder häufig entweder technisch veraltet oder in der Praxis kaum standardisiert.

Weiterhin wird ein „Henne-Ei-Problem“ deutlich, das besonders die Kfz-Hersteller betrifft: Für eine effektive Verwertungsinfrastruktur müssten sie Anlagen und Verfahren zur automatisierten Demontage und Sortierung frühzeitig entwickeln. Solange aber die Menge an rücklaufenden Altfahrzeugen – beispielsweise Elektrofahrzeuge mit spezifischen Komponenten – noch verhältnismäßig gering ist, lohnen sich solche Investitionen kaum. Eine gemeinsame Anstrengung mehrerer Unternehmen wäre

sinnvoll, stößt jedoch auf Zielkonflikte in Bezug auf den Erhalt von Wettbewerbsvorteilen und die Hoheit über spezifische Technologiestandards.

Dies resultiert in einer mangelnden Verfügbarkeit qualitativ geprüfter Gebrauchtteile, die für weitere Befragte ein Hindernis in der Adoption zirkulärer Strategien darstellt. Besonders Kfz-Versicherungen weisen darauf hin, dass reparierte oder aufbereitete Komponenten nur dann vermehrt in Schadenfällen eingesetzt werden können, wenn a) die Teile in ausreichender Anzahl vorhanden sind und b) diese eine gleichbleibende Qualität aufweisen. Solange dies nicht gewährleistet sei, bestehe ein hohes Haftungsrisiko. Zugleich sind Anpassungen in Versicherungsverträgen nötig, um den Einsatz von Gebrauchtteilen rechtssicher zu gestalten. Damit eng verbunden ist die Kundenakzeptanz: Einige Versicherte erwarten explizit Neuteile, selbst wenn gebrauchte oder aufgearbeitete Teile wirtschaftlich und ökologisch sinnvoller wären.

Ein weiteres Spannungsfeld betrifft die Arbeitskosten in Deutschland, die Reparaturen bisweilen so teuer machen, dass sich der Einbau von Gebrauchtteilen kaum noch rechnet. Aus Sicht eines Automobilherstellers sind ältere Fahrzeuge auf Komponentenebene zudem schwieriger zu verwerten, weil sich technische Standards im Laufe der Zeit rasant verändern. Sicherheitsrelevante Komponenten – insbesondere in elektronischen Systemen – lassen sich häufig nicht ohne Weiteres wiederverwenden, wenn sie obsolet geworden sind oder strenge Zertifizierungsvorgaben erfüllen müssen.

Einige Anbieter im Carsharing- und Vermietungssektor äußern, dass die kurzfristige Nutzung und der teils sorglose Umgang seitens der Kunden zu einem schnellen Verschleiß führen. Eine intensive Nutzung setzt die Fahrzeuge besonders stark unter Belastung, sodass Reparaturen häufiger anfallen. Dadurch steigt der Bedarf an Ersatzteilen, während gleichzeitig ein zweiter Lebenszyklus durch vermehrte Schäden erschwert wird. Spezielle Überwachungstechnologien sollen hier Abhilfe schaffen, um entsprechende Nutzerpraktiken zu erfassen und Fehlverhalten zu minimieren. Dies löst allerdings nur bedingt das Grundproblem des hohen Ressourcenverbrauchs.

Für Demontagebetriebe ist die geringe und schwer planbare Menge an Altfahrzeugen eine der größten Barrieren. Viele Fahrzeuge tauchen nicht in den offiziell registrierten Verwertungswegen auf und werden beispielsweise exportiert, bevor sie hierzulande recycelt werden könnten. Dies verhindert eine verlässliche Prozessplanung und unterbindet die Etablierung effizienter Strukturen. Zudem fehlen oft genaue Datensätze über den Zustand der eingehenden Fahrzeuge und Bauteile, was eine systematische Sortierung und Wiederverwendung erschwert.

3.3 Stakeholder-Akzeptanz

Die Akzeptanz gebrauchter Fahrzeugkomponenten variiert je nach Anwendungsfall. Bei älteren Fahrzeugen besteht laut Vertretenden der Kfz-Teile- und Fahrzeugherstellung eine Nachfrage nach kostengünstigen Ersatzteilen, was die Bereitschaft zur Nutzung gebrauchter Teile erhöht. Gleichzeitig bestehen Bedenken hinsichtlich Qualität, Sicherheit sowie Garantie- und Haftungsfragen. Kfz-Versicherungen berichten zudem von Kunden, die gezielt Neuteile bevorzugen. Aufbereitete Komponenten stoßen auf größere Akzeptanz, insbesondere wenn ihre Qualität dem Niveau von Neuteilen entspricht. Generalüberholte Getriebe und Motoren gelten als etabliert, speziell bei älteren Fahrzeugen (zeitwertgerechte Reparatur). Während in bestimmten Märkten Aufgeschlossenheit gegenüber solchen Komponenten besteht, bleiben im Premiumsegment sowie bei sicherheitskritischen Teilen und laut Kfz-Teile-Herstellern insbesondere im asiatischen Raum Vorbehalte bestehen.

Auch die Akzeptanz von Circular Design ist differenziert. Fahrzeughersteller beobachten, dass Maßnahmen über gesetzliche Vorgaben hinaus nur dann intern unterstützt werden, wenn ein konkreter Mehrwert erkennbar ist. Während im Premiumsegment hohe Anforderungen an Funktion und Ästhetik bestehen, reichen bestimmten Nutzergruppen im Sharing-Sektor robuste und funktionale Fahrzeuge aus, was die Umsetzung von Circular Design begünstigt. Demontagebetriebe erwarten eine zunehmende Akzeptanz infolge des allgemein wachsenden Umweltbewusstseins und regulatorischen Drucks.

Vertrauen und Transparenz gelten als zentrale Voraussetzungen zur Erhöhung der Akzeptanz gebrauchter und aufbereiteter Fahrzeugkomponenten. Kfz-Versicherungen und Kfz-Sharing betonen die Notwendigkeit von Zertifizierungen und offenen Kriterien, um Vertrauen zu schaffen. Ein unabhängiges Gütesiegel wird hierbei als positiv angesehen, während potenzielle Eigenlösungen von bspw. OEMs eher kritisch betrachtet werden.

3.4 Enabler für Circular Economy

Mehrere Interviewpartnerinnen und Interviewpartner verweisen auf Digitalisierung als einen zentralen, technologischen Hebel, um kreislauforientierte Konzepte in der Praxis effizient umzusetzen. In diesem Kontext heben die befragten Akteure den Aufbau eines Kennwert- und Handelssystems (KHS) hervor, das dazu beitragen soll, gebrauchte Bauteile klar zu bewerten und zu handeln. Damit verbunden ist die Idee, sowohl den Zustand (z. B. Laufleistung, Unfallhistorie, Funktionsprüfung) als auch die Eignung einzelner Teile für eine weitere Verwendung verlässlich zu dokumentieren.

Kfz-Versicherungen würden von einer solchen Systematik profitieren, wenn sie im Schadenfall planbar auf eine Datenbank mit aufbereiteten Teilen zurückgreifen könnten. Kfz-Demontagebetriebe begrüßen die Möglichkeit, Bauteile über standardisierte Kanäle zu vermarkten, anstatt auf zahlreiche fragmentierte Marktplätze angewiesen zu sein. Das wiederum setzt voraus, dass das KHS reibungslos mit bestehenden IT-Strukturen kompatibel ist und sich durch Zertifizierungen oder Transparenzstandards das nötige Vertrauen bei Kundschaft, Versicherern und Werkstattnetzwerken aufbauen lässt. Gleichzeitig äußern mehrere Interviewte, dass ein solches System in der Branche nur zögerlich übernommen wird, wenn Verwaltungsaufwand und technische Hürden zu hoch ausfallen. Eine enge Kooperation zwischen den Beteiligten – von Herstellern über Teile-Aufbereiter bis hin zu Versicherungen – scheint daher essenziell, um einheitliche Bewertungsmaßstäbe und Datenschnittstellen zu etablieren.

Projektbeispiele wie „Catena-X“, welches das Ziel hat ein durchgängiges Datenökosystem für die Automobilbranche zu bieten, weisen den Weg zu einer breit angelegten Dateninfrastruktur, in der sowohl Materialeigenschaften als auch Produktlebensläufe transparent dokumentiert werden können. Demontagebetriebe und Teile-Aufbereiter erwarten sich davon eine verlässlichere Planungsgrundlage, um den Wert gebrauchter Komponenten realistisch einzuschätzen und diese zügig auf dem Markt anzubieten.

Als zweites Schlüsselement wird die Automatisierung von Demontageprozessen, die jedoch vor erheblichen Herausforderungen steht, hervorgehoben. So wird einerseits ein hoher finanzieller und technischer Aufwand für die Anschaffung entsprechender Anlagen betont, andererseits erschweren die unterschiedlichen Fahrzeugtypen und variablen Zustände der Alteile eine Standardisierung. Nach Überzeugung mehrerer Branchenvertreter wird sich jedoch zumindest eine Teilautomatisierung etablieren, sofern die Menge an rücklaufenden Fahrzeugen steigt und sich dadurch Investitionen amortisieren lassen.

Als drittes Feld identifizieren die befragten Stakeholder politische Maßnahmen und Regulierungen als wichtigen Enabler, der entweder Anreize für kreislauforientiertes Handeln schaffen oder aber durch Vorschriften und Verbote Hemmnisse abbauen kann. Ein wiederkehrendes Thema ist die Notwendigkeit steuerlicher und regulatorischer Anreize, etwa durch reduzierte Mehrwertsteuersätze für gebrauchtes Material oder durch die Festlegung verbindlicher Recyclingquoten. Mehrere Unternehmen, darunter Kfz-Teile-Hersteller und Kfz-Hersteller, befürworten eine Ausrichtung an übergeordneten Umweltzielen (z. B. CO₂-Reduktion), anstatt kleinteiliger Einzelvorgaben. Somit würden Innovationen gefördert und die Unternehmen hätten ausreichend Spielraum, um passgenaue Lösungen zu entwickeln. Für Versicherungen spielt darüber hinaus eine Rolle, dass bestimmte Reparaturmethoden politisch stärker gefördert oder zumindest legalisiert werden (z.B. Aufbereitung von Scheinwerfern).

Neben finanziellen und technischen Maßnahmen wird schließlich auch die Sensibilisierung der Öffentlichkeit durch politische Programme hervorgehoben. Sharing-Anbieter und Demontagebetriebe

weisen darauf hin, dass sich vor allem dann breites Vertrauen und ein entsprechendes Nachfrageverhalten für Gebrauchtteile entwickeln, wenn Aufklärungskampagnen und Austauschformate zwischen Politik und Wirtschaft stattfinden.

4 Diskussion

Im Zentrum der unterschiedlichen Perspektiven, Interessenlagen und Widersprüchen, die bei der Umsetzung kreislauforientierter Konzepte in der Automobilbranche auftreten, stehen die Spannungsfelder, die sich zwischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Zielen sowie den jeweiligen Geschäftsmodellen ergeben.

Die Befragten betonen wiederholt, dass ein finanzieller Vorteil häufig die entscheidende Voraussetzung für eine großflächige Etablierung kreislauforientierter Maßnahmen darstellt. So kann etwa die Aufbereitung gebrauchter Bauteile nur dann attraktiv werden, wenn die Materialkosteneinsparungen die zum Teil erheblichen Arbeitskosten ausgleichen. Das zeigen auch Beispiele aus der Praxis, wonach in Teilen der Branche ökologische Entscheidungen im operativen Alltag häufig den Kostenoptimierungen untergeordnet bleiben.

Dieses Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zeigt sich bei Investitionen in Demontage- und Recyclingprozesse: Erst hohe Rücklaufmengen an Fahrzeugen oder Batterien rechtfertigen den Aufbau automatisierter Anlagen. Doch solange das Volumen gering bleibt, zögern Unternehmen, finanziell in Vorleistung zu gehen.

Zudem treten Interessenkonflikte zwischen den einzelnen Akteuren hervor. So erhoffen sich Kfz-Versicherungen durch den verstärkten Einsatz von aufbereiteten Teilen bei Schadenfällen Kosteneinsparungen, während Kfz-Hersteller zum Teil höhere Erlöse mit Neuteilen erzielen. Auch wird aus Herstellerperspektive argumentiert, dass ältere Ersatzteile nicht immer kompatibel sind und sicherheitsrelevante Bauteile teilweise einer gesonderten Zertifizierung bedürfen, was die Wiederverwendung erschwert.

Einige Akteure machen auf technische Zielkonflikte aufmerksam, etwa wenn das Kleben von Bauteilen einerseits die Fahrzeugmasse reduziert und damit die Effizienz in der Herstellungs- und Nutzungsphase erhöht, andererseits die Demontage erschweren kann. Auch die hohe Variantenvielfalt bei Fahrzeugplattformen, Materialien und Baugruppen wirkt sich negativ auf die Skalierbarkeit kreislauforientierter Lösungen aus. Hier sehen sowohl Kfz-Hersteller als auch Kfz-Teile-Hersteller einen gemeinsamen Bedarf an Standardisierungen, um Wieder- bzw. Weiterverwendung in größerem Umfang zu ermöglichen.

Ein wiederkehrendes Thema ist die Lückenhaftigkeit bei Daten über zurücklaufende Altfahrzeuge. Stakeholder im Demontagebereich kritisieren, dass viele Fahrzeuge ins Ausland exportiert werden, bevor sie recycelt werden könnten. Außerdem existieren noch zu wenige verlässliche Informationssysteme, um Zustand, Laufleistung oder Unfallhistorie von Bauteilen ganzheitlich nachzuverfolgen. Dies erschwert die Qualitätssicherung und verhindert einen reibungslosen Handel mit gebrauchten Komponenten. In diesem Kontext wurden die Einführung eines Kennwert- und Handelssystems (KHS) sowie Digitalisierungsinitiativen wie „Catena X“ von Teilen der Befragten ausdrücklich begrüßt. Gleichzeitig äußerten gerade kleinere und mittlere Unternehmen Skepsis bezüglich der hohen Implementierungskosten und der Frage, inwiefern ein solches System verpflichtend oder freiwillig gestaltet werden soll.

4.1 Implikationen für Forschung und Praxis

Automatisierte Demontageprozesse lassen sich nur rentabel gestalten, wenn gemeinsame Normen, Bauteil-Designs und Standards für Wiederaufbereitung und Qualitätssicherung etabliert sind. Eine enge Kooperation zwischen Akteuren der Wertschöpfungskette ist dafür essenziell. Förderprogramme können

dabei helfen, komplexe Fragestellungen wie Design for Circularity oder eine standardisierte Teilebewertung gemeinsam zu bearbeiten. Daten- und Informationsmanagement sind zentrale Voraussetzungen für effiziente Aufbereitungsprozesse und ein verlässliches Teileangebot. Fördergeber sollten Projekte unterstützen, die auf Automatisierung, digitale Fahrzeugpässe und offiziell anerkannte Gütesiegel setzen. Entscheidend ist die Skalierbarkeit solcher Lösungen, damit Unternehmen jeder Größe davon profitieren.

Eine bessere Demontierbarkeit und Modularisierung von Fahrzeugkomponenten erleichtert den Einstieg in die Kreislaufwirtschaft. Herstellende Betriebe können Erfahrungen aus Reparatur- und Aufbereitungsprozessen nutzen, um Bauteile so zu gestalten, dass sie mit möglichst geringem Aufwand austausch- und wiederverwendbar sind. Dabei sollten Aspekte wie Leichtbau, Sicherheit und Reparaturfreundlichkeit frühzeitig abgewogen werden. Der Aufbau eines effektiven Teilekreislaufs erfordert verbindliche Qualitätsvorgaben und geregelte Zulassungsprozesse für Gebraucht- und Refurbished-Komponenten, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Bauteilen. Gemeinsame Standards, etwa über Branchenverbände, steigern Markttransparenz und Vertrauen in mehrfach nutzbare Teile.

Politische Barrieren lassen sich verringern, indem etwa die Mehrwertsteuer auf aufbereitete Teile gesenkt oder Recyclingquoten gesetzlich festgelegt werden. Eine Harmonisierung der Zulassungs- und Qualitätsstandards auf europäischer Ebene sowie die konsequente Durchsetzung bestehender Vorschriften (z. B. Verwertungsnachweise) schaffen einheitliche Prozesse und unterstützen eine kreislaufforientierte Wirtschaft. Zertifizierungsverfahren und Gütesiegel erhöhen das Vertrauen in gebrauchte oder aufbereitete Bauteile. Informationskampagnen und Aufklärungsinitiativen können gegenüber Verbrauchenden verdeutlichen, dass solche Komponenten zuverlässig und sicher sind – vorausgesetzt, anerkannte Normen und Standards werden eingehalten.

Aufgrund der Heterogenität der Stakeholder sind Forschungsarbeiten erforderlich, die spezifische Geschäftsmodelle, Wertschöpfungsketten und technische Lösungen stärker kontextbezogen betrachten. Zukunftsstudien können sich beispielsweise auf die Analyse unterschiedlicher Fahrzeugsegmente (Elektroantriebe, konventionelle Antriebe, Nutzfahrzeuge) konzentrieren und die Anpassungsfähigkeit kreislaufwirtschaftlicher Konzepte in diesen Teilmärkten erforschen. Ebenso besteht Bedarf an detaillierteren Untersuchungen zu Geschäfts- und Finanzierungsmodellen, die vor allem KMU den Einstieg in ressourceneffiziente Demontage- und Aufbereitungsprozesse erleichtern.

5 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht die vielfältigen Chancen und Herausforderungen, die mit dem Wandel hin zu einer konsequenten Kreislaufwirtschaft in der Automobilbranche einhergehen. Im Zentrum steht das Spannungsverhältnis zwischen ökonomischen und ökologischen Zielen, das in vielen Bereichen nur durch entsprechende Anreize und Rahmenbedingungen aufgelöst werden kann. Im Rahmen der Interviewstudie konnten die initialen Forschungsfragen zusammenfassend wie folgt beantwortet werden:

- UF1: **Rolle der Kreislaufwirtschaft:** Die verschiedenen Akteure der Automobilbranche – von Kfz-Herstellern und Teileherstellern über Versicherungen und Carsharing-Anbieter bis hin zu Demontagebetrieben – binden die Kreislaufwirtschaft in unterschiedlichem Ausmaß in ihr Geschäft ein. Kfz-Hersteller und Teilehersteller verfolgen gezielt Strategien wie den Einsatz von Sekundärmaterialien oder Design-for-Circularity. Versicherungen entdecken aufbereitete Teile vor allem zur Kostenreduktion in Reparaturprozessen, während Carsharing-Unternehmen die Ressourcenschonung durch gemeinsames Fahrzeugnutzen betonen. Demontagebetriebe und Aufbereiter agieren eng am Kern der Kreislaufwirtschaft, indem sie Altfahrzeuge zerlegen und deren Komponenten für eine zweite Nutzung aufbereiten.
- UF2: **Herausforderungen:** Hauptbarrieren beim Wandel zur Kreislaufwirtschaft sind fehlende Standardisierungen (z.B. für Demontage- und Qualitätsprozesse), divergierende

Geschäftsinteressen (Wettbewerb vs. Kooperation) und wirtschaftliche Unsicherheiten beim Aufbau automatisierter Anlagen. Auch die noch relativ niedrigen Rücklaufmengen erschweren Investitionen. Haftungsfragen, erhöhte Arbeitskosten und die teilweise geringe Verfügbarkeit qualitativ geprüfter Gebrauchtteile wirken ebenfalls bremsend. Die rasante Entwicklung neuer Fahrzeugarchitekturen (z. B. Elektromobilität) kürzt die Phase, in der alte Bauteile sinnvoll wiederverwendbar sind.

- UF3: **Potenzielle Wegbereiter:** Als Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Implementierung gelten technologische Innovation (etwa automatisierte Demontage- und Prüfsysteme), digitale Lösungen für Datentransparenz (z.B. Kennwert- und Handelssysteme), politische Anreize (verbindliche Recyclingquoten, steuerliche Erleichterungen) und Kooperationen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.
- UF4: **Akzeptanz für zirkuläre Aspekte:** Die Akzeptanz gebrauchter oder aufbereiteter Fahrzeugteile ist bei älteren Fahrzeugsystemen und kostenbewussten Kunden relativ hoch; im Premiumsegment oder bei sicherheitskritischen Komponenten bestehen eher Vorbehalte. Wesentliche Einflussgrößen sind Zertifizierungen, Garantien und einheitliche Qualitätsstandards, die Vertrauen schaffen. Digital gestützte Nachverfolgung (z.B. Zustandserfassung über Fahrzeugpässe) und transparente Informationen zur Teilehistorie erhöhen zusätzlich die Akzeptanz sowohl bei Endkundschaft als auch bei Versicherern und Werkstätten.

Aufgrund des Aufbaus der Studie ergeben sich mögliche Limitationen, die die Ergebnisse beeinflusst haben könnten und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Mit sieben Interviewten aus unterschiedlichen Bereichen bietet die Untersuchung Einblicke, die jedoch aufgrund der kleinen Stichprobengröße nicht alle Unternehmenstypen und Stakeholder im vollen Umfang repräsentieren. Durch das eingesetzte Verfahren der qualitativen Inhaltsanalyse konnten zwar tiefergehende Erkenntnisse gewonnen werden, die Übertragbarkeit auf andere Branchenzweige oder Regionen muss jedoch weiter validiert werden. Eine Quantifizierung der Einflussgrößen konnten dabei nicht realisiert werden. Die rasanten Veränderungen in der Automobilindustrie (z.B. durch E-Mobilität) beeinflussen Rücklaufmengen und technische Anforderungen. Die Studienergebnisse bilden lediglich eine Momentaufnahme, die sich künftig durch veränderte Politik- und Marktbedingungen weiterentwickeln könnte. Kleinere Demontagebetriebe, Zulieferbetriebe oder Betriebe außerhalb des europäischen Raums wurden nicht im gleichen Umfang erfasst, sodass hier tiefergehende Untersuchungen sinnvoll erscheinen.

Die im Projekt EKODA angestrebte Automatisierung von Demontageprozessen und die damit verknüpfte höhere Wirtschaftlichkeit werden als potenzieller Katalysator für hochwertige Kreislaufstrategien gesehen. Ohne aufwändige Handarbeit steigert eine automatisierte Demontage die Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit gebrauchter Fahrzeugteile. Für Kfz-Hersteller und -Teilehersteller eröffnet dies neue Geschäftsmodelle (z.B. durch planbare Rücklaufmengen), Versicherungen können Kostenvorteile bei Reparaturen erzielen, und Demontagebetriebe profitieren von schnelleren, besser planbaren Prozessen.

Insgesamt dokumentiert die Arbeit, dass ein wirtschaftlich tragfähiger Ansatz zur Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor eng mit der Einbindung relevanter Stakeholder, der Bereitstellung entsprechender rechtlicher und finanzieller Anreize sowie mit verlässlich verfügbaren Dateninfrastrukturen verknüpft ist. Gelingt es, die skizzierten Konflikte in Kooperationen zu transformieren und Standardisierungen zu fördern, könnte die Automobilindustrie einen signifikanten Beitrag zur Ressourcenwende leisten. Gleichzeitig offenbart sich die Notwendigkeit, technische Innovationen eng mit gesellschaftlichen und politischen Prozessen zu verzahnen, um langfristig den Wandel von linearen Produktions- und Nutzungsstrukturen hin zu einem geschlossenen Kreislaufsystem zu realisieren.

6 Danksagung

Die Studie wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Effiziente und wirtschaftliche, kreislaforientierte Demontage und Aufarbeitung“ (Kurztitel: „EKODA“, Förderkennzeichen 02J21E150) durchgeführt. Das BMBF hatte keinen Einfluss auf Planung, Durchführung und Auswertung der Studie.

7 Quellenverzeichnis

- Achterberg, E., Hinfelaar, J. & Bocken, N. (2016) *Master Circular Business with the Value Hill* [Online]. Verfügbar unter <https://hetgroenebrein.nl/wp-content/uploads/2017/08/finance-white-paper-20160923.pdf> (Abgerufen am 7 März 2022).
- Bieker, G. (2021) *A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars*.
- Ellen MacArthur Foundation (Hg.) (2025) *What is a circular economy?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (Abgerufen am 11 Juni 2025).
- Helmers, E., Dietz, J. & Weiss, M. (2020) “Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions”, *Sustainability*, Vol. 12, No. 3, S. 1241.
- Hemmerle, A. (2023) *Ein zweites Leben für Batterie, Getriebe und Zahnräder* [Online]. Verfügbar unter <https://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/PM-2023-ein-zweites-leben-fuer-batterie-getriebe-und-zahnraeder.html>.
- Jørgensen, M. S., Remmen, A., Guldmann, E., Brodersen, S. & Pedersen, S. (2018) “Slowing and narrowing resource flows as part of circular economy business strategies”, *Third International Conference of the Sustainable Consumption Research and Action Initiative (SCORAI)*. Copenhagen, Denmark.
- Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017) “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 127, S. 221–232.
- Konietzko, J., Bocken, N. & Hultink, E. J. (2020) “Circular ecosystem innovation: An initial set of principles”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 253, S. 119942.
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2023) *Qualitative content analysis: Methods, practice and software*, 2. Aufl., Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, Melbourne, SAGE.
- Landgrebe, D., Bergmann, M., Kräusel, V., Rautenstrauch, A., Werner, M. & Laue, R. (2015) „Ressourcenschonende Produktion“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 110, No. 11, S. 690–693.
- Lechler, S., Canzaniello, A., Wetzstein, A. & Hartmann, E. (2020) “Influence of different stakeholders on first-tier suppliers’ sustainable supplier selection: insights from a multiple case study in the automotive first-tier industry”, *Business Research*, Vol. 13, No. 2, S. 425–454.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (2023) *Zukunft der automobilen Kreislaufwirtschaft: Klimaneutrale Mobilität bis spätestens 2050*.

8 Biografien

Jonathan Gaier ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut UMSICHT und hat einen Master-Abschluss in Maschinenbau. Mit sieben Jahren Berufserfahrung in den Bereichen Forschung und Entwicklung, Fertigung, Konstruktion, Vertriebsingenieurwesen und After-Sales verfügt er über ein umfassendes Verständnis von technischen und geschäftlichen Prozessen. Bei Fraunhofer UMSICHT begleitet Jonathan Unternehmen bei ihrer Transformation hin zu Circular Economy und Nachhaltigkeit. Seine Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung innovativer Methoden und Werkzeuge, die eine zirkuläre Produktentwicklung unterstützen und nachhaltige Geschäftsmodelle ermöglichen. jonathan.gaier@umsicht.fraunhofer.de

Lily Hinkers ist wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer-Institut UMSICHT und studiert im Masterstudiengang Umweltingenieurwesen. Zuvor absolvierte sie ihren Bachelor im Technischen Umweltschutz an der TU Berlin. Sie bringt zwei Jahre Erfahrung im Bereich der Lebenszyklusanalyse mit und hat sich in diesem Kontext intensiv mit der Bilanzierung zirkulärer Produktsysteme und Rebound-Effekten auseinandergesetzt. An der Schnittstelle von Technik und Nachhaltigkeitsbewertung unterstützt sie bei der Entwicklung von Methoden für Produktdesign nach Prinzipien der Circular Economy. lily.hinkers@umsicht.fraunhofer.de

Kooperation gestalten in der Circular Economy: Formate für Austausch und Zusammenarbeit im Reallabor OHLF

Hannah Büchner^{1*}, Marie Ritter^{1*}, Freya Grimme¹, Maischa Weber¹, Stefan Schmitt² und Simone Kauffeld¹

*Autorinnen haben gleichermaßen zum Paper beigetragen

¹Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

²Open Hybrid LabFactory e.V., Wolfsburg, Deutschland

Abstract. Die Circular Economy (CE) erfordert neue Formen der sektorübergreifenden Zusammenarbeit – insbesondere in komplexen Public-Private-Partnerships (PPP). Das Projekt conCERT – Cooperation in Circular Economy: Accelerating Research Transfer entwickelt praxisnahe Formate, um Kooperation in solchen Partnerschaften gezielt zu gestalten. Im Zentrum stehen dabei Maßnahmen zu Wissenstransfer, Meetings, Diversität, Führung und regionaler Einbindung. Am Forschungscampus Open Hybrid LabFactory (OHLF) in Wolfsburg werden diese Formate im Sinne eines Reallabors gemeinsam mit Akteur*innen aus Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung entwickelt, erprobt und evaluiert. Ein Beispiel ist die partizipativ erarbeitete Meetingarchitektur, die formelle und informelle Austauschformate systematisch verbindet. Das eingeführte, niedrigschwellige Format „Campusrunde“ stärkt den informellen Wissenstransfer und die Vernetzung. Die Evaluation der Campusrunde auf Basis des KANO-Modells zeigt, auf welche Merkmale das Format besonders Wert legen sollte. Die Publikation zeigt anhand konkreter Beispiele, wie Kooperation in Public-Private-Partnerships gestaltet und Formate anhand wissenschaftlicher Kriterien partizipativ weiterentwickelt werden können.

Keywords: *Circular Economy, Public-Private-Partnerships, Meetingarchitektur, Informeller Wissensaustausch*

1 Kooperation in der Circular Economy

Die Circular Economy (CE) verfolgt das Ziel, Materialien möglichst lange im Kreislauf zu halten, Abfälle zu vermeiden und Emissionen zu senken. Damit das gelingt, müssen verschiedene Akteur*innen eng zusammenarbeiten – Unternehmen, Wissenschaft und öffentliche Institutionen. Vor allem in Branchen wie der Automobilindustrie, die stark vernetzt und technologiegetrieben sind, lassen sich zirkuläre Lösungen nur gemeinsam entwickeln (Ritter *et al.*, 2024).

Ein geeignetes Format für diese Zusammenarbeit sind Public-Private-Partnerships (PPP; Warsen *et al.*, 2018). Sie bieten Raum für den Austausch von Wissen und ermöglichen es, neue Ideen gemeinsam in die Praxis zu bringen. Damit das funktioniert, braucht es jedoch mehr als gute Absichten: Es kommt auf klare Strukturen, passende Formate und verbindliche Prozesse an. Genau hier setzt das Projekt *conCERT* an. Es untersucht, wie Kooperation in PPPs konkret gelingen kann und entwickelt Lösungen in und für die Praxis – zum Beispiel durch gut gestaltete Meetings, vielfältige Teams, eine passende Führungskultur und eine starke regionale Vernetzung.

2 Zielstellung des Projektes conCERT

Das Projekt conCERT (Cooperation in Circular Economy: Accelerating Research Transfer) hat das Ziel, Zusammenarbeit in Public-Private-Partnerships (PPP) wirksam zu gestalten und langfristig zu verankern. Im Mittelpunkt steht dabei nicht nur die Analyse bestehender Strukturen, sondern vor allem die gemeinsame Entwicklung, Erprobung und Weiterentwicklung praxistauglicher Formate.

Ausgangspunkt ist die Annahme, dass erfolgreiche Kooperation nicht selbstverständlich gelingt – unterschiedliche Arbeitskulturen, Zielsetzungen und Verständigungsformen machen die Zusammenarbeit in PPPs oft herausfordernd (De Vruet, de Vlieger and Crommelin, 2019; Saukko, Aaltonen and Haapasalo, 2020). Um diese Hürden zu überwinden, setzt conCERT gezielt an den Stellen an, an denen Kooperation konkret gestaltet wird.

In fünf zentralen Themenfeldern werden Bedarfe aus der Praxis aufgenommen und gemeinsam mit den Beteiligten passgenaue Formate entwickelt. Diese werden im Alltag erprobt, wissenschaftlich begleitet und auf Basis der Rückmeldungen kontinuierlich und iterativ weiterentwickelt. Der Wissenstransfer zwischen beteiligten Organisationen wird gezielt gefördert, um bestehendes Know-how zugänglich und anschlussfähig zu machen. Meetings werden als zentrale Orte der Verständigung in den Blick genommen und hinsichtlich Struktur, Ablauf und Wirkung analysiert und verbessert. Ein weiterer Fokus liegt auf Diversität, insbesondere auf der Teilhabe von Frauen in technischen Kontexten, um unterschiedliche Perspektiven systematisch einzubinden. Ergänzend werden Ansätze zur Entwicklung eines kooperationsfähigen Führungskräftenachwuchses erarbeitet und in pilotierten Formaten erprobt. Schließlich wird die regionale Einbindung externer Stakeholder gestärkt, um Wirkung über den Forschungscampus hinaus zu entfalten. Die in diesen Bereichen entwickelten Maßnahmen fließen in ein integriertes Best-Practice-Modell für Kooperation in der Circular Economy ein, das übertragbare und praxisnahe Lösungsansätze für andere PPP-Kontexte bereitstellt.

3 Reallabor der Open Hybrid LabFactory

Die *Open Hybrid LabFactory* (OHLF) in Wolfsburg ist als vom Bundesministerium für Forschung, Technik und Raumfahrt geförderter Forschungscampus ein Paradebeispiel für eine institutionalisierte Public-Private-Partnership. Sie bringt Akteur*innen aus Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung unter einem Dach zusammen, um gemeinsam an technologischen und organisatorischen Innovationen für eine nachhaltige Mobilität und Produktion zu arbeiten. Dabei ist die OHLF nicht nur ein physischer Ort, sondern auch ein kooperativer Experimentierraum – eng eingebettet in die regionale Struktur. Als solches Reallabor ermöglicht sie Austausch, Kooperation und praxisnahe Entwicklung entlang realer Bedarfe. Die Integration unterschiedlicher Perspektiven, Ressourcen und Kompetenzen ist dabei kein Selbstzweck, sondern eine notwendige Voraussetzung, um den komplexen Anforderungen der Circular Economy gerecht zu werden.

In der dritten Förderphase hat sich die OHLF das Ziel gesetzt, ein Best-Practice-Modell für Kooperationen innerhalb von PPPs zu werden. Dabei stehen nicht nur technologische Entwicklungen im Mittelpunkt, sondern auch die strukturelle und kulturelle Weiterentwicklung der Zusammenarbeit. Das Projekt conCERT zahlt direkt auf dieses Ziel ein, indem es systematisch untersucht, welche Strukturen, Formate und Führungspraktiken Kooperation fördern – und welche Barrieren überwunden werden müssen. Die OHLF fungiert dabei als Reallabor, in dem neue Kooperationsformate erprobt, evaluiert und weiterentwickelt werden. Die enge Zusammenarbeit mit der Stadt Wolfsburg ermöglicht darüber hinaus, die entwickelten Ansätze über den Campus hinaus zu übertragen – ein entscheidender Faktor für die gesellschaftliche Umsetzung der Circular Economy (Rybníček, Plakolm and Baumgartner, 2020; Diefenbach and Roth, 2022).

4 Kooperation gestalten: Meetingarchitektur und Campusrunde in der Praxis

Eine der ersten Maßnahmen, die im Rahmen von conCErt umgesetzt wurden, war die gemeinsame Entwicklung einer strukturierten *Meetingarchitektur*. In einem Projekt, das auf sektorübergreifende Kooperation setzt, kommt Meetings eine besondere Bedeutung zu: Sie sind zentrale Schnittstellen für Verständigung, Entscheidungsfindung und Wissensaustausch – und damit ein entscheidender Hebel für erfolgreiche Zusammenarbeit (Kauffeld and Lehmann-Willenbrock, 2012).

Meetings stehen jedoch nicht für sich allein. Sie entfalten ihre Wirkung nur dann, wenn sie aufeinander abgestimmt sind, unterschiedlichen Zwecken gerecht werden und gemeinsam zur Steuerung komplexer Informationsflüsse beitragen (Kauffeld and Sauer, 2021) – besonders in Public-Private-Partnerships (PPPs), in denen viele Akteur*innen mit verschiedenen Rollen und Perspektiven zusammenarbeiten. Die Meetingarchitektur soll Verbindlichkeit, Transparenz und Anschlussfähigkeit zwischen Gremien, Arbeitsgruppen und informellen Formaten schaffen und bildet damit den zentralen Verbindungspunkt zwischen den in conCErt bearbeiteten Handlungsfeldern „Kooperation und Wissenstransfer“ und „Meetings“.

Ausgangspunkt für die gemeinsame Erarbeitung der Meetingarchitektur war die Erkenntnis, dass die bestehenden Strukturen in ihrer Entwicklung nicht gezielt auf die Anforderungen einer wachsenden Public-Private-Partnership ausgerichtet waren. Um die Zusammenarbeit weiter zu verbessern, wurden die vorhandenen Austauschformate der OHLF systematisch erfasst, analysiert und gemeinsam mit den Beteiligten weiterentwickelt – unter anderem auf Basis von Expertenrunden, Netzwerkanalysen und begleitenden Befragungen. Die daraus entstandene Handreichung zur Meetingarchitektur dokumentiert die Gremienlandschaft, definiert Funktionen und Schnittstellen transparent und gibt praxisnahe Empfehlungen zur Ausgestaltung von Agenden, Rollen und Entscheidungswegen (s. auch Tartler, Ritter and Kauffeld, 2025). Sie unterstützt nicht nur die effektive Steuerung, sondern fördert auch Transparenz, Repräsentation und den kontinuierlichen Austausch – über Hierarchie- und Institutionsgrenzen hinweg.

Ein wichtiges Prinzip der entwickelten Meetingarchitektur ist dabei das Zusammenspiel von formellen und informellen Austauschformaten. Neben strukturierten Gremien braucht es offene Räume für spontane Begegnungen, informelle Diskussionen und interdisziplinären Austausch (Brennecke *et al.*, 2025). Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen von conCErt die sogenannte *Campusrunde* eingeführt – ein niedrigschwelliges Austauschformat, das alle interessierten Akteur*innen der OHLF regelmäßig zusammenbringt. Unabhängig von Projekt- oder Institutionszugehörigkeit bietet die Campusrunde Raum für strategische Diskussionen, Ideenaustausch und Vernetzung. Inhaltlich stehen aktuelle Forschungsvorhaben, Kooperationsbedarfe und Transferprojekte im Mittelpunkt. Ergänzt wird dies durch themenspezifische Impulse und moderierte Diskussionsrunden.

4.1 Evaluation der Campusrunde

An der Befragung zur Evaluation der Campusrunde nahmen 43 Personen teil (67.4% Männer und 27.9% Frauen). Die Teilnehmenden waren im Durchschnitt 33,6 Jahre alt ($SD = 8.1$) und kamen aus verschiedenen Organisationen des Forschungscampus (u.a. Universität, Hochschule, Forschungseinrichtung, sowie Industrie). Viele der Befragten sind seit mehreren Jahren an der OHLF aktiv (durchschnittlich 3.14 Jahre).

Grundlage der Evaluation war das KANO-Modell (Kano *et al.*, 1984), das dabei hilft, die Wirkung von Angeboten differenziert zu verstehen. Eine schematische Abbildung des Modells ist in Abb 1 zu sehen. Es unterscheidet, wie bestimmte Eigenschaften eines Formats wahrgenommen werden: *Basismerkmale* gelten als selbstverständlich – ihr Fehlen führt zu Unzufriedenheit, ihr Vorhandensein wird kaum bewusst wahrgenommen. *Leistungsmerkmale* wirken direkt auf die Bewertung – je stärker sie ausgeprägt sind, desto positiver wird das Angebot bewertet. *Begeisterungsmerkmale* überraschen im positiven Sinn – sie werden nicht erwartet, steigern aber die Zufriedenheit deutlich, wenn sie vorhanden sind. Ergänzt wird diese Unterscheidung durch *indifferente Merkmale*, die von den Teilnehmenden weder als besonders positiv noch als negativ wahrgenommen werden und somit keine relevante Wirkung auf die Bewertung entfalten.

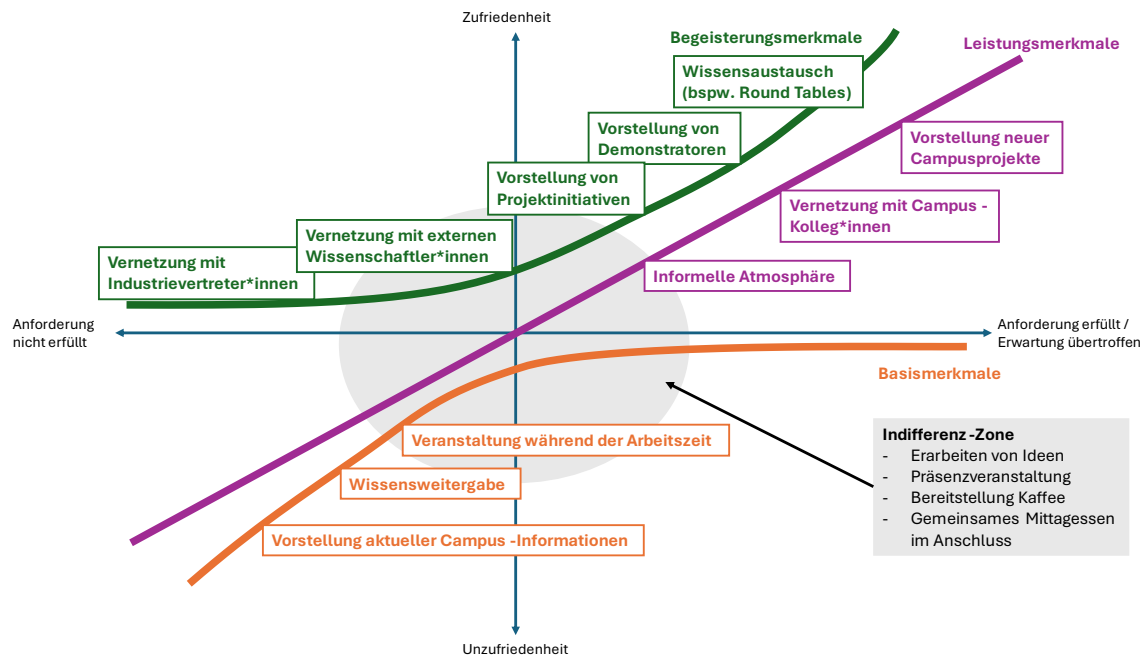


Abbildung 1: Übersicht KANO-Modell und eingeordnete Merkmale der Campusrunde.

In der Befragung zur Campusrunde wurden Teilnehmende gebeten, das Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein von den Merkmalen auf folgender Skala zu bewerten: „Das würde mich sehr freuen“, „Das setze ich voraus“, „Das ist mir egal“, „Das könnte ich akzeptieren“, oder „Das würde mich sehr stören“. Die Antworten wurden in einer Kreuztabelle kombiniert, auf deren Basis jedem Merkmal eine Kategorie (Basis-, Leistungs-, Begeisterungs- oder Indifferenzmerkmal) zugewiesen wurde. Beispielsweise antworteten die Mehrheit der Befragten, dass das Vorhandensein von „Wissensaustausch“ sie sehr freuen würde, sie das Nicht-Vorhandensein jedoch akzeptieren könnten bzw. es ihnen egal wäre. Aus diesem Grund wurde das Merkmal „Wissensaustausch“ als Begeisterungsmerkmal eingeordnet. Weiterhin sollten Teilnehmende angeben, welche Formalität sie für die Campusrunde wünschen (Likert-Skala von -5 – sehr formell, bis 5 – sehr informell).

Die Einordnung der Merkmale nach dem KANO-Modell (s. Abb 1) zeigt, dass die wichtigsten Aspekte eines informellen Austauschs auf Campusebene die Vorstellung neuer Forschungsprojekte am Campus, die Vernetzung mit Kolleg*innen am Campus sowie eine ungezwungene, informelle Atmosphäre sind. Dies spiegelt sich auch in der Bewertung der gewünschten Informalität ($M = 2.1$, $SD = 2.10$) wieder. Statt formellen Präsentationsabfolgen oder „Hochglanz-Veranstaltungen“ sollten also Räume geschaffen werden, bei dem Wissen schnell und unkompliziert an möglichst viele Kolleg*innen weitergegeben wird und die Teilnehmenden sich vernetzen können.

Dabei darf nicht vergessen werden, die Basismerkmale, also Wissensweitergabe, Vorstellung von Campusaktivitäten (bspw. aktuelle Weiterbildungen, kommende Termine) und die Durchführung während der Arbeitszeit, zu erfüllen. Dass die Durchführung während der Arbeitszeit als Basismerkmal bewertet wurde, ist eine wichtige Erkenntnis. Häufig werden informelle Vernetzungsveranstaltungen an den Rand der Arbeitszeit (bspw. Nachmittag, Abend) gelegt. Dies kann jedoch auch Teilnehmende abschrecken kann, wie die Evaluation der OHLF-Campusrunde zeigt. Diese wird in der Regel vor dem Mittagessen an einem Dienstag veranstaltet, sodass sie den Anforderungen der Teilnehmenden entspricht.

Letztlich liefert die Betrachtung der Begeisterungsmerkmale Stellschrauben, die den Mehrwert der Campusrunde besonders unterstreichen und Teilnehmende binden können. Die gelegentliche Einbindung von Demonstratoren, neuer Projektinitiativen (bspw. geplanter Drittmittelanträge und Vernetzung potentieller Konsortialpartner) oder der Möglichkeit sich mit externen Kolleg*innen aus

Wissenschaft und Industrie zu vernetzen. Diese Merkmale müssen nicht bei jedem Termin vorhanden sein, können aber, beispielsweise durch gezielte Einladung von Gastvorträgen, gelegentlich eingestreut werden. Interessanterweise scheint die Durchführung in Präsenz nicht maßgeblich die Zufriedenheit der Teilnehmenden zu beeinflussen (Indifferenzmerkmale). Allerdings ist zu beachten, dass eine Online-Durchführung möglicherweise negative Auswirkungen auf andere Leistungs- oder Begeisterungsmerkmale hätte (bspw. informelle Atmosphäre, ungezwungener Austausch, Zeigen von Demonstratoren, etc.). Daher scheint die Durchführung in Präsenz die bessere Option zu sein.

Insgesamt zeigt die Evaluation, dass die Campusrunde ein wirkungsvolles Instrument zur Förderung des informellen Austauschs am Forschungscampus darstellt. Sie erfüllt zentrale Erwartungen an inhaltliche Relevanz, Verständlichkeit und Anschlussfähigkeit und bietet gleichzeitig überraschende Mehrwerte durch ihre offene, niedrigschwellige Gestaltung. Die Kombination aus strukturiertem Ablauf, inhaltlicher Offenheit und persönlicher Begegnung macht sie zu einem Format, das nicht nur den Austausch fördert, sondern auch Vertrauen und Identifikation mit dem Campus stärkt. Als Teil der Meetingarchitektur von conCerte leistet die Campusrunde damit einen wichtigen Beitrag zur Verstärkung von Kooperation und Wissensvernetzung in Public-Private-Partnerships – mit Potenzial zur Übertragung auf andere Kontexte.

5 Fazit: Kooperation in der CE in die Praxis bringen

Die Transformation zur Circular Economy verlangt neue Formen der Zusammenarbeit – insbesondere in hochkomplexen, institutionell vielfältigen Konstellationen wie Public-Private-Partnerships wie der Open Hybrid LabFactory. Das Projekt conCerte zeigt, dass gelingende Kooperation nicht dem Zufall überlassen werden sollte, sondern gezielt gestaltet werden muss: durch strukturierte Austauschformate, transparente Entscheidungsprozesse und Räume für informellen Dialog.

Mit der Entwicklung einer gemeinsam getragenen Meetingarchitektur und der Einführung der Campusrunde als niedrigschwelligem Austauschformat konnten am Forschungscampus OHLF erste wirkungsvolle Impulse gesetzt werden. Sie fördern nicht nur den Wissensaustausch innerhalb der OHLF, sondern stärken auch die Anschlussfähigkeit über institutionelle Grenzen hinweg. Zugleich machen die Erfahrungen im Reallabor OHLF deutlich, dass es für Kooperation keine Patentrezepte gibt. Was zählt, ist die Bereitschaft, bestehende Strukturen gemeinsam weiterzuentwickeln – iterativ, beteiligungsorientiert und praxisnah. Genau darin liegt die Stärke von conCerte: im Zusammenspiel von wissenschaftlicher Fundierung und anwendungsorientierter Entwicklung. Die dabei entstehenden Formate bieten ein hohes Übertragungspotenzial – für andere PPPs, aber auch für kooperative Innovationsräume weit darüber hinaus.

6 Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird/wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFT) „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (FKZ: 02P24Q940) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

7 Literaturverzeichnis

- Brennecke, J. *et al.* (2025) ‘Invisible Iterations: How Formal and Informal Organization Shape Knowledge Networks for Coordination’, *Journal of Management Studies*, 62(2), pp. 706–747.
- De Vroeh, R., de Vlieger, J. and Crommelin, D. (2019) ‘Public-Private Partnerships as Drivers of Innovation in Healthcare’, *Frontiers in Medicine*, 6, p. 114. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00114>.
- Diefenbach, N. and Roth, P. (2022) ‘Nähe als Bedingung – Die Formation von Konsortien interorganisationaler Kollaborationsprojekte zwischen Wissenschaft & Wirtschaft’, in V. Nitsch et

- al. (eds) *Digitalisierung der Arbeitswelt im Mittelstand 2: Ergebnisse und Best Practice des BMBF-Forschungsschwerpunkts 'Zukunft der Arbeit: Mittelstand – innovativ und sozial'*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 1–30. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-662-65858-1_1.
- Kano, N. et al. (1984) 'Attractive quality and must-be quality', *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 14(2).
- Kauffeld, S. and Lehmann-Willenbrock, N. (2012) 'Meetings Matter: Effects of Team Meetings on Team and Organizational Success', *Small Group Research*, 43(2), pp. 130–158. Available at: <https://doi.org/10.1177/1046496411429599>.
- Kauffeld, S. and Sauer, N.C. (2021) *Meetings: Grundlagen und Empfehlungen für eine effiziente Gestaltung*. Kohlhammer Verlag.
- Ritter, M. et al. (2024) 'Towards achieving the sustainable development goals: a collaborative action plan leveraging the circular economy potentials', *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)*, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11612-024-00733-9>.
- Rybníček, R., Plakolm, J. and Baumgartner, L. (2020) 'Risks in public–private partnerships: A systematic literature review of risk factors, their impact and risk mitigation strategies', *Public Performance & Management Review*, 43(5), pp. 1174–1208. Available at: <https://doi.org/10.1080/15309576.2020.1741406>.
- Saukko, L., Aaltonen, K. and Haapasalo, H. (2020) 'Inter-organizational collaboration challenges and preconditions in industrial engineering projects', *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(5), pp. 999–1023. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJMPB-10-2019-0250>.
- Tartler, D., Ritter, M. and Kauffeld, S. (2025) 'Short on time—big on impact: MeetingHacks as a digital intervention to enhance virtual meeting collaboration', *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11612-025-00790-8>.
- Warsen, R. et al. (2018) 'What makes public-private partnerships work? Survey research into the outcomes and the quality of cooperation in PPPs', *Public Management Review*, 20(8), pp. 1165–1185. Available at: <https://doi.org/10.1080/14719037.2018.1428415>.

8 Biografien

Hannah Büchner ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU Braunschweig und Mitarbeiterin des Projektes conCERT. Ihre E-Mail ist hannah-marlena.buechner@tu-braunschweig.de.

Dr. Marie Ritter ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU Braunschweig und Forschungskordinatorin des Projektes conCERT. Ihre E-Mail ist marie.ritter@tu-braunschweig.de.

Freya Grimme ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU Braunschweig und Mitarbeiterin des Projektes conCERT. Ihre E-Mail ist freya.grimme@tu-braunschweig.de.

Maischa Weber ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU Braunschweig und Mitarbeiterin des Projektes conCERT. Ihre E-Mail ist maischa.weber@tu-braunschweig.de.

Dr. Stefan Schmitt ist Geschäftsführer des Open Hybrid LabFactory e.V. und betreut in dieser Rolle das Projekt conCERT. Seine E-Mail ist stefan.schmitt@open-hybrid-labfactory.de.

Prof. Dr. Simone Kauffeld ist Inhaberin des Lehrstuhl für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU Braunschweig und Projektleitung des Projektes conCERT. Ihre E-Mail ist s.kauffeld@tu-braunschweig.de.

Automatisierte Demontage von elektrischen Antriebsaggregaten

Sven Birkenfeld¹, Oliver Wisser¹

¹Technische Universität Clausthal, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum
Leibnizstr. 23, 38678 Clausthal-Zellerfeld, www.cutec.de

Abstract. Die automatisierte Demontage hochwertiger Produkte kann einen wichtigen Beitrag zur Etablierung einer ökonomisch effizienten Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie liefern. Ein bereits bestehendes Technikum zur robotergestützten Demontage elektrischer Antriebsaggregate wurde im Rahmen des Projektes ZirkulEA dahingehend erweitert, dass neue Prozessschritte entwickelt und bestehende Prozessschritte hin zu einem höheren Flexibilisierungsgrad optimiert wurden. Dies ermöglicht den Gesamtprozess durch relativ geringen Aufwand an neue Produktvarianten anzupassen. Damit steht das Technikum am Standort CUTEC für einen hinsichtlich Demonetagetiefe für E-Aggregate einmaligen Demonstrator, welcher vielfältige technische Lösungen für automatisierte Prozesse in sich vereint. Ein weiterer Schwerpunkt besteht darin den Automatisierungsgrad einzelner Demontageschritte zu bewerten. Es zeigt sich, dass die Hälfte der Prozessschritte (50%) unkritisch, 36% mit erhöhtem Aufwand und lediglich etwa 14% schwer automatisierbar sind. Die automatisierte Demontage hochwertiger Produkte kann somit ein wichtiger Baustein auf dem Weg zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft sein.

Keywords: Automatisierte Demontage, Elektrisches Antriebsaggregat, Automatisierungsgrad, Robotik, Robot Vision, Kreislaufwirtschaft

1 Einleitung

Die Transformation hin zur Elektromobilität hat sich in den letzten Jahren enorm beschleunigt. So lag laut Statista 2024 die Zahl der Neuzulassungen in der EU für Elektro- und Hybrid-Pkw (5,5 Mio.) erstmals über der von Pkw mit reinem Verbrennungsmotor (4,81 Mio.). Gängige Verwertungswege, um die in Zukunft steigende Menge an Altfahrzeugen zu behandeln, sind allerdings unzureichend auf die E-Mobilität vorbereitet. Die Altfahrzeugverordnung in Deutschland schreibt, neben der Entnahme von Schad- und Störstoffen, die Demontage von Bauteilen wie Katalysatoren, Reifen, große Kunststoffbauteile sowie kupfer-, aluminium- oder magnesiumhaltige Bauteile vor, deren Materialien beim oder nach dem Schreddern für eine stoffliche Verwertung nicht ausreichend getrennt werden (BMUV 2025). Elektrische Antriebsaggregate (EAA) weisen aufgrund ihres hohen Integrationsgrades eine große Materialvielfalt auf, was deren Ausbau und die Zerlegung in Bauteilgruppen, wodurch eine höhere Materialreinheit erreicht wird, zukünftig zwingend erforderlich macht. Zwar werden EAA im Hochpreissegment bereits manuell demontiert, um die Bauteile wiederaufzubereiten, dies ist sich jedoch bei günstigeren Großserienaggregaten aufgrund hoher Lohnkosten unwirtschaftlich. Hier bietet die automatisierte und zerstörungsfreie Demontage eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Lösung. Diese Lösung wurde am CUTEC Forschungszentrum in den vergangenen Jahren in Form eines Technikums für EAA realisiert. Im Projekt ZirkulEA wurden Prozessschritte weiter und neuentwickelt und darauf basierend eine Abschätzung des Automatisierungsgrades einzelner Prozessschritte vorgenommen.

Im Folgenden werden die zur Umsetzung der robotergestützten Demontageprozesse durchgeführten Arbeiten vorgestellt. Dazu werden Prozessschritte vorgestellt, anhand derer die Herausforderungen der Konstruktion und Herstellung benötigter Werkzeuge, kameragestützte Bahnplanung sowie der

Ablageprozess dargestellt werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung einer universellen Entschraublösung, die durch Minimierung des konventionellen Teach-Ins der Roboter zu einer deutlich reduzierten Entwicklungszeit für die bei der Demontage anfallenden Entschraubprozesse und damit auch zu reduzierten Umrüstzeiten der Demontageanlage für neue Produktvarianten führt. Für die Ablage entnommener Bauteile erfordern einige Prozessschritte spezialisierte Lösungen, wenn die Bauteilablage prozessbedingt nicht durch das Öffnen eines Greifwerkzeugs über dem Förderband realisiert werden kann. Hierfür wurden verschiedene Abstreifsysteme inkl. sensorischer Erfolgskontrolle entwickelt. Abschließend werden anhand eines Vorrangdiagramms (*Precedence Graph*) Empfehlungen für die Automatisierbarkeit der einzelnen Prozessschritte, welche aus den manuellen und automatisierten Demontageversuchen abgeleitet wurden, aufgezeigt.

2 Methodik

Im Folgenden werden ausgewählte Prozesse beschrieben, da die Gesamtheit aller automatisierten Prozesse den Rahmen dieses Beitrages überschreiten würde. Die Auswahl wurde getroffen, um besondere Herausforderungen und deren technische Lösungen sowie innovative Ansätze darzustellen. Alle Arbeiten fanden am CUTEC Forschungszentrum der TU Clausthal in einem bereits bestehenden Technikum statt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Technikum zur zerstörungsfreien automatisierten Demontage am CUTEC Forschungszentrum.

2.1 Lösen und Entfernen des Sicherungsbleches vom Rotorzahnkranz

Um das auf dem Rotorzahnkranz vor einem Sicherungsring liegende Sicherungsblech entnehmen zu können, müssen zunächst sechs Laschen nach außen aufgebogen werden, welche das Blech in einer Nut des Zahnkranzes fixieren (Abbildung 2).

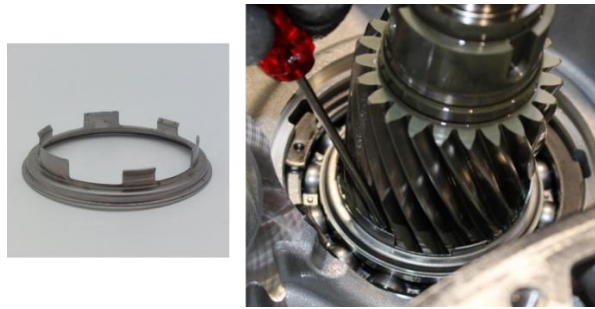


Abbildung 2: Zu lösendes Sicherungsblech (links) auf der Rotorwelle (rechts).

Das für diesen Prozessschritt verwendete Werkzeug wurde mittels FDM-Verfahren additiv aus PLA gefertigt und besteht aus einem an die Zahnkranzgeometrie angepassten Hohlzylinder. Dieser ist drehend gelagert, um ohne roboterseitige Nachführung auf der schrägverzahnten Welle verfahren werden zu können. Das konische Ende des inneren Teils fädelt dabei hinter den Laschen des Sicherungsblechs ein und biegt diese beim weiteren Vorschub auf, wobei sie dann durch den aufgesetzten Mitnehmer gehalten werden (Abbildung 3). Dadurch kann das Blech beim Zurückfahren ohne zusätzliche Greiftechnik entnommen werden. Damit das Werkzeug beim Anfahren an die Rotorwelle korrekt in die Verzahnung einfädelt und nicht durch Kollision zerstört wird, findet im Vorfeld eine Drehwinkelbestimmung des Rotors durch ein robotergeführtes Kamera-System statt, so dass das Werkzeug im Moment des Einfädels entsprechend nachgeführt werden kann. Dieser Schritt gilt als schwer automatisierbar.



Abbildung 3: Werkzeug zum Lösen und Entfernen des Sicherungsbleches (links), Vorgang des Aufbiegens der Laschen durch das Werkzeug, dargestellt ohne äußeren Mitnehmer (rechts).

2.2 Öffnen und Entfernen des Sicherungsringes auf der Rotorwelle

Um den Rotor austreiben und entnehmen zu können, muss zunächst ein Sicherungsring aus Federstahl entfernt werden, welcher in einer Nut auf der schrägverzahnten Rotorwelle sitzt (Abbildung 4). Dadurch, dass Sicherungsringe auch manuell nur schwer zu entfernen sind, die Lage der Ringöffnung nicht definiert ist und der Ring durch den begrenzten Bauraum nur eingeschränkt zugänglich ist, gilt dieser Prozessschritt als sehr schwer automatisierbar.



Abbildung 4: Sicherungsring auf der Rotorwelle (links) und einzeln dargestellt (rechts).

Für den Prozessschritt kommen zwei Werkzeuge zum Einsatz (Abbildung 5 links). Das zum Lösen und zur Aufnahme des Sicherungsrings eingesetzte Werkzeug besteht aus einer durch einen Parallelgreifer betätigten Zange und einer Kunststoffführung. Diese wird über die Rotorwelle gefahren und anschließend durch Öffnen der Zange der Sicherungsrings formschlüssig in eine Nut gepresst, damit er beim Abtransport in einer definierten Lage bleibt, nicht kippt und damit bei der Rückfahrt nicht an der Verzahnung hängen bleibt.



Abbildung 5: Werkzeug zum Lösen und Entfernen des Sicherungsrings (links), Hilfswerkzeug zum Drehen des Rotors (mittig) und Sicherungsring im Werkzeug (rechts).

Bedingt durch den beengten Bauraum und die Werkzeuggeometrie muss sich die Öffnung des Sicherungsrings vor dem Prozessschritt in einer bestimmten Position befinden. Hierzu dient das Hilfswerkzeug (Abbildung 5), welches von einem zweiten Roboter auf der Rückseite des Rotors in dessen Hohlwelle eingeführt wird und so einen Kraftschluss erzeugt. Während durch dieses Werkzeug der Rotor gedreht wird, kontrolliert eine RobotVision-Kamera des ersten Roboters auf der gegenüberliegenden Seite die Öffnung des Sicherungsrings. Bei korrekter Lage des Sicherungsrings (Toleranz $0,05^\circ$) kann das Werkzeug mit geschlossener Zange in die Öffnung gefahren werden, um diesen zu entnehmen (Abbildung 5 rechts).

2.3 Abziehen von Drehzahlgeberrad und Lager von der Rotorwelle

Für diesen Prozessschritt wurde ein Werkzeug entwickelt, das eine Schraubeinheit (Luftmotor mit Gewindestange) mit einem Parallelgreifer sowie einem handelsüblichen Lagerabzieher kombiniert (Abbildung 6). Das Werkzeug wurde so konstruiert, dass seitens des Roboters keine ausgleichende Bewegung notwendig ist. Für den Vorgang wird der Abzieher hinter dem Geberrad bzw. dem Lager eingefädelt und durch Schließen des Greifers positioniert, wobei das Ende der Gewindestange mit einem Passstück auf dem Ende der Rotorwelle aufliegt. Durch Ansteuerung der Schraubeinheit werden Greifer und Abzieher auf einer Linearführung nach hinten verfahren und dadurch das Bauteil von der Welle gezogen. Um zu vermeiden, dass ein zu fest auf der Welle sitzendes Bauteil beim Versuch des Abtransportes zu Schäden am Werkzeug oder am Roboter führt, erfolgt eine Prozesskontrolle mittels einer über dem Arbeitsbereich platzierten Kamera.

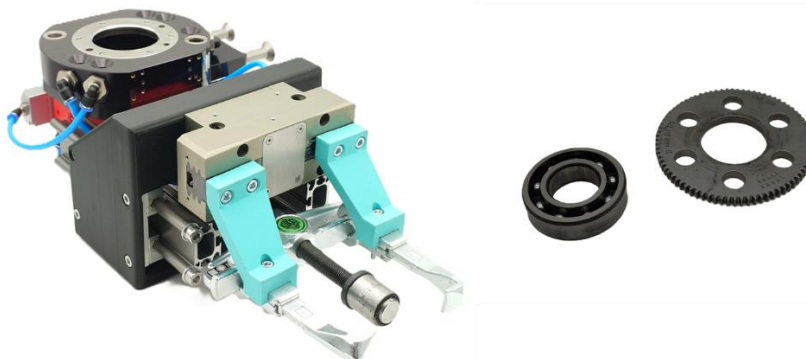


Abbildung 6: Abziehwerkzeug (links), Lager und Drehzahlgeberrad (rechts)

2.4 Entnahme des Schrägkugellagers unter der Zwischenwelle

Das unter der Zwischenwelle liegende Schrägkugellager wird mittels eines Zentrischgreifers mit additiv gefertigten Greiferfingern entnommen (Abbildung 7). Die korrekte Positionierung der Finger zwischen den Kugeln wird wiederum durch eine Lagebestimmung per RobotVision Kamera realisiert. Durch eine Kippbewegung des Werkzeugs wird das Lager aus der Lagerschale gelöst. Die Lagerschale selbst wird daraufhin durch ein weiteres Werkzeug entnommen (siehe Kapitel 2.7).

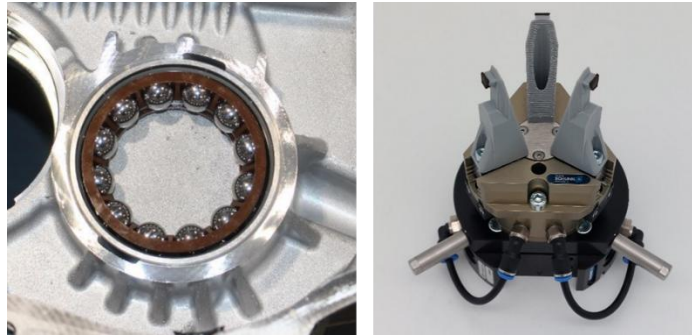


Abbildung 7: Schrägkugellager und Lagerschale in Einbauposition (links), Zentrischgreifer zur Entnahme der Bauteile (rechts).

2.5 Austreiben des Rotors

Sobald der Sicherungsring (Kapitel 2.2) entfernt ist, kann als nächstes der Rotor entnommen werden. Aufgrund der hohen benötigten Kräfte geschieht dies auf einem separaten Austreibetisch (Abbildung 8). Daher wird das Aggregat zunächst durch einen Roboter automatisch vom 2-Achs-Positionierer auf den Austreibetisch verbracht und dort mit einem Schnellwechseladapter angekoppelt. Eine zusätzliche Fixierung auf dem Austreibetisch wird durch drei pneumatische Schwenk-Hub-Zylinder gewährleistet.



Abbildung 8: Austreibetisch mit Hub- und Vibrationseinheit (links) zur Entnahme von Rotor (mittig) und Stator. Rechts: Führungs- und Greifwerkzeug für den Rotor, Verriegelungseinheit geschlossen und geöffnet (rechts außen).

Zum Austreiben des Rotors kommt eine Kombination eines pneumatischen Zylinders (max. Kraft ca. 2000N) mit einem Vibrationsschlagwerk zum Einsatz, welche unter der Tischplatte montiert sind und den Rotor aus dem entsprechenden Wälzlager treiben. Die Form des Schlagstutzens ist dabei an die Form der Rotorwelle angepasst, um deren Verformung zu vermeiden. Während des Austreibevorgangs wird die hohle Rotorwelle über den Schaft des Greifwerkzeuges (Abbildung 8) geführt und dadurch ein Verkippen des Rotors am Ende des Austreibevorgangs verhindert.

2.6 Entnahme des Stators

Die Entnahme des Stators (Abbildung 9) wird ebenfalls auf dem Austreibetisch durchgeführt. Hierfür kommt ein Werkzeug zum Einsatz, welches aus zwei hintereinander gelagerten Zentrischgreifern

besteht, welche in den Stator hineinfahren und diesen gegen den Widerstand mehrerer Dichtungsringe nach oben aus dem Gehäuse ziehen können. Die insgesamt sechs Kontaktflächen sind mit Gummi beschichtet, um einerseits den Kraftschluss zwischen Stator und Werkzeug zu maximieren und andererseits mögliche Beschädigungen an der Innenseite des Stators zu vermeiden. Abbildung 9 zeigt das Werkzeug sowie den gehaltenen Stator beim Abtransport zum Förderband.

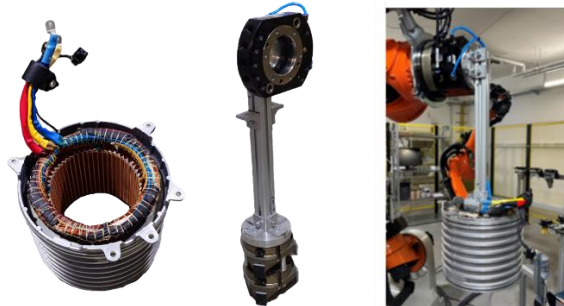


Abbildung 9: Stator (links) und Werkzeug (Mitte) zur Entnahme und Abtransport (rechts).

2.7 Entnahme von Lagerschalen und Einstellscheiben

Für die Entnahme verschiedener Lagerschalen kommen aus PLA gefertigte Werkzeuge zum Einsatz, welche durch ringförmig angeordnete Magnete formschlüssig halten können. Abbildung 10 zeigt exemplarisch das Werkzeug für die Lagerschale des Kegelrollenlagers am Differential. Dieses Werkzeug ist innen hohl, damit es beim Anfahren an die Lagerschale über eine zu diesem Zeitpunkt noch nicht entnommene Abtriebswelle gelangen kann.



Abbildung 10: Werkzeug (links) zur Entnahme der Lagerschale (Mitte) und Einstellscheibe (rechts)

2.8 Universelle Entschraublösung

Die Entwicklung von Demontage-Prozessschritten wie der Entschraubung ist mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. So muss die robotergeführte Kamera senkrecht durch ein manuelles Teach-In Verfahren über eine Schraubposition ausgerichtet werden. Für die Berechnung der Werkzeugkoordinaten durch das RobotVision-System wird ein Basiskoordinatensystem aus drei Koordinatenpunkten aufgespannt (Abbildung 11). Im Demontageprozess kann die Kamera dann die exakte Schraubenposition über einen integrierten Bilderkennungs-Algorithmus an die Robotersteuerung kommunizieren.

Um diesen Prozess zu beschleunigen und zu flexibilisieren, wurde im Projekt eine Methode unter Verwendung der CAD-Geometriedaten des Aggregats entwickelt, bei der Punktkoordinaten aus dem CAD-Model in das Roboterkoordinatensystem transformiert werden. In einem ersten Schritt wird das auf dem Positionierer fixierte Aggregat im Roboterkoordinatensystem verortet. Dies geschieht über eine robotergeführte Messspitze, mit der einmalig verschiedene Punkte auf dem Aggregat im Roboter-Koordinatensystem bestimmt werden. Aus dieser Punktwolke und einer Punktwolke aus äquivalenten Punkten im CAD-Model werden die Transformationsparameter berechnet (Abbildung 11), ein als 7-Parameter-Problem bekanntes Verfahren, insbesondere im Bereich der Geodäsie und Photometrie

(Ruffhead 2021). Mit Hilfe der Koordinatentransformation kann jeder beliebige Punkt auf dem Aggregat über das CAD Model bestimmt werden, so auch die Koordinaten für die Schraubenbasen.

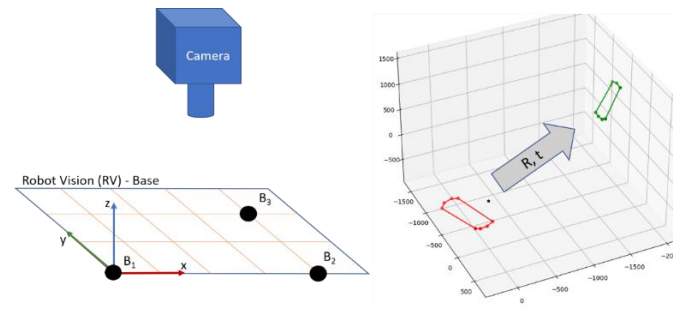


Abbildung 11: Links: Ausrichtung der Kamera zum Basiskoordinatensystem, welches durch drei Punkte aufgespannt wird. Rechts: Rigithe Transformation von zwei Punktwolken zur Berechnung von Rotation(R) und Translation (t)

In einem weiteren Schritt muss die Berechnung für die zwei Achs-Rotationsbewegungen des Positionierers, auf dem das Aggregat fixiert ist, vorgenommen werden. Dafür wurde das Aggregat bisher in verschiedenen Winkelstellungen des Positionierers mittels Messspitze vermessen. Nach Bestimmung der Rotationsparameter kann so im Anschluss jeder Punkt auf dem Aggregat in jeder beliebigen Winkelstellung des Positionierers im Roboterkoordinatensystem berechnet werden. Dazu wird die Rotationsbewegung des Aggregats auf dem Positionierer mit einem zentral darüber installierten 3D Kamerasystem erfasst. Aus fixen Orientierungspunkten am EAA in den verschiedenen Positionierer-Stellungen können dann die entsprechenden Rotationsparameter berechnet werden. Die 3D Kamera dient ebenfalls dazu, die exakte Position eines neuen Aggregats auf dem Positionierer zu bestimmen, da die Korrektur minimaler Abweichungen die Wiederholgenauigkeit der Prozessschritte erhöhen kann.

Die entwickelte Lösung zur automatischen Koordinatenberechnung führt dazu, dass für Entschraubprozesse keinerlei manuelles Teach-In der Roboter mehr nötig ist. Lediglich müssen die Länge der eingesetzten Bitnuss für den aktuellen Schraubentyp, das zugehörige RobotVision-Programm auf dem RobotVision-Controller, welches für die Mustererkennung zuständig ist sowie die Anzahl der in dem Prozess zu lösenden Schrauben definiert werden.

3 Abstreifsysteme zur Bauteilablage

Im Verlauf der Demontagesequenz fallen Bauteile an, die prozessbedingt nicht durch Öffnen oder Schließen eines Greifwerkzeugs auf dem Förderband abgelegt werden können. Dazu zählen Lagerschalen, Anlaufscheiben, Sicherungs- und Sprengringe sowie das Sicherungsblech. Um diese nach erfolgreicher Entnahme vom Werkzeug zu lösen, wurden verschiedene Abstreifsysteme konstruiert und hergestellt (Abbildung 12).



Abbildung 12: Sensorunterstütztes Abstreifsystem zur Bauteilablage

Für verschiedene Lagerschalen sowie für das Sicherungsblech von der Rotorwelle basieren diese additiv gefertigten Systeme auf halbkreisförmigen Aussparungen, in welche der Roboter das jeweilige Demontagewerkzeug einfädeln kann. Die Aussparungen sind mit einem Hinterschnitt versehen, welcher

das zu lösende Bauteil halten kann, so dass es beim Herausfahren des Werkzeugs durch eine Rückwärtsbewegung im Abstreifer verbleibt und in eine Ablage fällt (Abbildung 13). Analog zum Prozess der Lagerschalenentnahme wird das Sicherungsblech in den Abstreifer eingefädelt und kann so bei der Rückwärtsbewegung des Roboters aus dem Werkzeug entfernt werden.



Abbildung 13: Abstreifprozess für die magnetisch gehaltene Lagerschale der Zwischenwelle inkl. Einstellscheibe

Unterstützt wird das Abstreifsystem durch einen induktiven Näherungssensor, welcher bei der Hinfahrt überprüft, ob das Bauteil vom Aggregat entfernt wurde und sich wie geplant am Werkzeug befindet. Auf dem Rückweg wird der Sensor erneut angefahren, um den Erfolg des Abstreifvorgangs zu evaluieren. Ein Fehler in einem der beiden Fälle wird von der Robotersteuerung an das Prozessleitsystem kommuniziert und so der Benutzer informiert.

Der Sicherungsring der Rotorwelle (siehe 2.2) sitzt nach dem Schließen des Zangenwerkzeugs aufgrund seiner Haltekraft noch fest an den Enden der Zange. Um den Ring zu lösen, werden dessen Enden hinter zwei Zapfen gefahren (Abbildung 12, links), welche den Ring beim Zurückfahren des Werkzeugs blockieren und so von der Zange lösen.

4 Resultat

Die Reihenfolge der Prozessschritte ergibt sich aus Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen den Bauteilen des EAA, welche mit Hilfe eines *Precedence Graph* identifiziert und visualisiert wurden (Abbildung 14). Bauteile bzw. Bauteilgruppen sind darin als sogenannte Knoten, deren Abhängigkeiten als Kanten (verbindende Linien) dargestellt. Zur Definition der Knoten wurden zunächst Teilabfolgen mit der Notwendigkeit einer unterbrechungsfreien Durchführung der Demontage identifiziert. Ein Beispiel sind durch Schraubverbindungen befestigte Bauteile, welche nach Entfernen der Schrauben lose vorliegen und daher Gefahr laufen, undefinierte Zustände einzunehmen. Als Ergebnis wurde eine Demontageabfolge erstellt, welche bereits frühzeitig im Gesamtprozess die Auftrennung des EAA in die Leistungselektronik und die Motor/Getriebe-Einheit vorsieht, so dass ab dem Zeitpunkt der Trennung eine parallele Verarbeitung der erhaltenen Untereinheiten möglich ist.

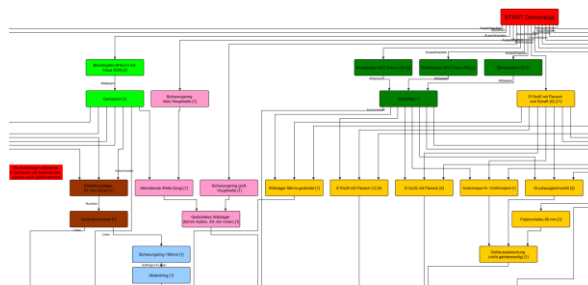


Abbildung 14: Ausschnitt aus dem Precedence Graph der Bauteile des EAA.

Die Knoten des *Precedence Graph* dienen als Ausgangsbasis für die Bewertung der Automatisierbarkeit der einzelnen Prozessschritte. Als Grundlage der Bewertung dienten dabei sowohl manuelle Demontageversuche als auch die entwickelten Lösungen im automatisierten Prozess. Die Einstufung erfolgte über qualitative Kriterien wie Kraftaufwand, Zugänglichkeit, Komplexität der Werkzeuge,

undefinierte Zustände/Positionen oder auch Mangel an Handlingschnittstellen (Greifpunkten). Nicht alle bewerteten Prozesse wurden im zeitlichen Rahmen des Projektes automatisiert, so wurden etwa initiale Prozessschritte wie die Entfernung verschiedener Stopfen, Kappen und Sensoren, die im Zuge der Betriebsmittelentfrachtung von einem Werker erledigt werden können, als für den Gesamtprozess unkritisch und damit nicht relevant eingestuft. Ebenso stand die weiterführende Zerlegung entnommener komplexer Baugruppen wie Leistungselektronik, Rotor oder Differential nicht im Fokus.

Tabelle 1 zeigt die Bewertung einzelner Demontageschritte gemäß dem erstellten *Precedence Graph*. Grün dargestellt sind die im Rahmen des Projektes vollautomatisiert realisierten Prozessschritte, rot dargestellt solche, die nicht oder zum derzeitigen Stand nicht vollständig umgesetzt wurden. Es ist zu beachten, dass die Anzahl der Prozessschritte nicht zwingend der Anzahl der Bauteile entsprechen muss. Beispielsweise wird ‚Schrauben Deckel maschinenseitig entfernen‘ als ein Prozessschritt betrachtet, da die 11 Schrauben gruppiert über eine repetitive Entschraubprozedur entnommen werden. Dies ermöglicht eine differenziertere Betrachtung des Automatisierungsgrades für das Gesamtaggregat, da ansonsten die relativ unkritischen Entschraubungsprozesse zu stark gewichtet würden.

Tabelle 1: Automatisierbarkeit der einzelnen Prozessschritte. Automatisierung wurde im Projekt realisiert (grün) oder nicht/unvollständig realisiert (rot).

Prozessschritt (Anzahl > 1)	Automatisierbarkeit		
	Unkritisch	Erhöhter Aufwand	Sehr schwer
Blindstopfen entfernen (4)	x		
Abdeckkappe Kühlmittelreservoir entfernen			x
Druckausgleichventil entfernen (2)		x	
Schrauben Drehzahlgeber entfernen (2)	x		
Drehzahlgeber entfernen (2)	x		
Schrauben Steckverbinder entfernen	x		
Steckverbinder entfernen			x
Schrauben Deckel maschinenseitig entfernen	x		
Schrauben Halterung Leistungselektronik entfernen	x		
Deckel maschinenseitig mit Kühllanze entfernen		x	
Schrauben Kabelbrücke entfernen	x		
Leistungselektronik entfernen	x		
Kabelbrücke entfernen		x	
Schrauben Deckel getriebeseitig entfernen	x		
Deckel getriebeseitig entfernen	x		
Differential (inkl. Lager und Welle) entfernen	x		
Lagerschale Differential entfernen		x	
Drehzahlgeberrad abziehen		x	
Lager von Rotorwelle abziehen		x	
Zwischenwelle entfernen	x		
Lager entfernen (2)		x	
Lagerschale entfernen (2)		x	
Einstellscheibe entfernen (2)	x		
Staubschuttscheibe lange abtreibende Welle entfernen (2)		x	
Sicherungsring lange abtreibende Welle entfernen (2)			x
Abtreibende Welle entfernen	x		
Sicherungsblech auf Rotorwelle entfernen			x
Sprengring auf Rotorwelle entfernen			x
Rotor austreiben und entfernen		x	
Schrauben Stator entfernen	x		
Stator mit Gehäuse entfernen		x	
Summe Prozessschritte	21	15	6
Anteil Prozessschritte	50,0%	35,7%	14,3%

5 Diskussion

Ein überwiegender Teil der betrachteten Prozesse kann unkritisch realisiert (50%) oder mit erhöhtem Aufwand automatisiert umgesetzt werden (35,7%). Obwohl nur ein vergleichsweise geringer Teil der Prozessschritte sehr schwer automatisierbar ist (14,3%), stehen diese einer Vollautomatisierung des Gesamtprozesses entgegen, da deren Umsetzung aufgrund der Abhängigkeiten der Prozessschritte die Voraussetzung für die Bearbeitung nachfolgender Schritte ist. So ist beispielsweise das Entfernen von Sicherungsringen oder das Lösen von Kabelsteckverbindungen notwendig, um daraufhin die gehaltenen bzw. verbundenen Bauteile entnehmen zu können. Die Empfehlung ist daher, bei den derzeit im Umlauf befindlichen EAA eine Hybridlösung anzustreben, bei der ein Werker schwer zu automatisierende Prozesse manuell oder halbautomatisiert unterstützt. Für zukünftig zu entwickelnde EAA ist die Handlungsempfehlung, das Design mehr für die automatisierte Demontage auszurichten, wie z.B. Ansatzstellen für Werkzeuge vorzusehen oder Klebeverbindungen zu vermeiden. Das Design der EAA ist derzeit noch ein limitierender Faktor, da eine kosteneffiziente Montage gegenwärtig das Leitmotiv der Entwickler von Fahrzeugkomponenten ist, wodurch aber vielfältige Herausforderungen bei der Demontage resultieren.

Insgesamt zeigt die Studie aber, dass eine vollautomatisierte Demontage eines EAA nach derzeitigem Stand der Technik realisierbar ist. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten einen höheren Flexibilisierungsgrad anstreben, wodurch die erleichterte Anpassung des Prozesses an neue Produktvarianten erfolgen kann. Weiterhin sollte eine Optimierung des zeitlichen Aufwands sowie die Steigerung der Robustheit von Prozessschritten erfolgen. Durch erhöhten Forschungsaufwand verbunden mit einer produkt- und herstellerübergreifenden Variabilität der Testaggregate kann die automatisierte Demontage nach technischen und ökonomischen Maßstäben weiter in die industrielle Reife geführt werden.

6 Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) für die Bereitstellung der Fördergelder, sowie dem Projektträger PTKA für die Bearbeitung und Unterstützung.

7 Literaturverzeichnis

BMUV Website (2025) Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/gesetz/verordnung-ueber-die-ueberlassung-ruecknahme-und-umweltvertraegliche-entsorgung-von-altfahrzeugen> (Zugriff: 21.05.2025).

Ruffhead, A. C. (2021). "Derivation of rigorously-conformal 7-parameter 3D geodetic datum transformations" *Survey Review*, 53(376), 8-15.

Statista Website (2025). Verfügbar unter: <https://statista.com/>. (Zugriff: 14.05.2025).

8 Biografien

Dipl. Inf. Sven Birkenfeld ist Leiter der Arbeitsgruppe Digitalisierung und Automatisierung der Abteilung Ressourcentechnik und -systeme. Er arbeitet an der Roboterprogrammierung, den RobotVision Systemen, der Prozessentwicklung, dem Prozessleitsystem und der IT-Infrastruktur sven.birkenfeld@tu-clausthal.de.

Dr. rer. pol. Oliver Wisser ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Digitalisierung und Automatisierung der Abteilung Ressourcentechnik und -systeme. Er arbeitet an der Prozessentwicklung, dem Prozessmonitoring, der CAD-Verarbeitung und Bildauswertung sowie an der Demontagedatenbank. oliver.wisser@tu-clausthal.de.

Mögliche zukünftige Strategie der Automobilproduktion – Potenzial der Wiederverwendung von Automobilkomponenten

Patrick Alexander Schmidt¹, Tibor Paizs¹, Frank Riedel¹, Eckart Lippmann²

¹Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz, Deutschland

²a.i.m. all in metal GmbH, Markgröningen, Deutschland

Abstract. Das Automobil ist ein signifikantes ressourcenintensives Massenprodukt, welches teilweise eine erhebliche Auswirkung auf verschiedene globale Aspekte hat. Es besteht aus tausenden Hightech-Teilen, auch aus verschiedensten Bauteilen aus hochwertigen Aluminium- und Stahllegierungen. Obwohl weltweit die Fahrzeuge auf 2 Mrd. geschätzt werden, gibt es bis heute kaum systematische Recyclingstrategien. Die metallischen Komponenten weniger Fahrzeuge werden eingeschmolzen und dann wieder energieintensiven Produktionsprozessen zugeführt, um fast gleiche Teile wieder herzustellen. Ziel dieser Arbeit ist es, das Potenzial der direkten Wiederverwendung dieser Bauteile aufzuzeigen und effiziente Fertigungskonzepte für deren Umsetzung zu entwickeln. Durch die Schließung des Materialflusskreislaufs durch direkte Wiederverwendung oder Wiederaufbereitung soll das Potenzial für die Ressourceneffizienz in der Automobilindustrie aufgezeigt werden. Wichtige Teilprozesse sind die Identifikation, die automatisierte Demontage und die Zustandsbestimmung von verbauten Bauteilen. Es wird eine universelle laserbasierte Demontagetechnologie für nahezu alle Verbindungsarten vorgestellt, die ein beschädigungsfreies Trennen und die Entnahme ausgewählter Bauteile ermöglicht.

Keywords: Automobilindustrie, Kreislaufwirtschaft, Demontage, automatisierte Demontazelle, universelle Demontage-Lasertechnologie

1 Einleitung

Die ständig steigende Produktion von Industriegütern bedingt eine globale kritische Entwicklung. Der materielle Fußabdruck pro Kopf ist von etwa 9 Tonnen im Jahr 2000 auf besorgniserregende 12 Tonnen im Jahr 2019 angestiegen. Die Ressourcen der Erde sind endlich, was zu einer globalen Überbeanspruchungskrise geführt hat. Die Auswirkungen dieser Situation betreffen mittlerweile alle Bereiche und gehen über Umweltauswirkungen hinaus und werfen sogar generelle existenzielle Fragen bezüglich unserer Spezies auf [1, 2].

Dieser Trend offenbart die besorgniserregende Tatsache, dass die Gesellschaft trotz der Versuche der Regierungen, den Ressourcenschutz zu fördern, in einem Muster ausufernden Konsums gefangen bleibt. Das Papier befasst sich mit der Herausforderung der begrenzten Lebensdauer von Industrieprodukten, die absichtlich so gestaltet ist, dass eine Kultur der Wegwerfbarkeit aufrechterhalten wird. Darüber hinaus wird die Erzeugung von Elektroschrott zwischen 2020 und 2030 voraussichtlich um 24 % steigen, was die Notwendigkeit einer Verfünfachung der Recyclingraten unterstreicht [3].

Ein vergleichsweise großes Industrieprodukt mit einem extrem hohen Ressourcenverbrauch ist das Automobil. Es beeinflusst viele Bereiche unseres Lebens so stark wie nur wenige andere Produkte. Das Automobil besteht im Durchschnitt aus bis zu 10.000 Einzelteilen [4] und innovationsgetrieben werden Hightech-Komponenten mit entsprechend hohem Ressourcenverbrauch verbaut. Im Karosseriebereich werden z.B. Bauteile aus hochwertigen Aluminium- und Stahllegierungen (Bor-Mangan, TRIP,

Dualphasenstähle) eingesetzt. Obwohl ein großer Teil der metallischen Bauteile am Ende ihres Lebenszyklus nur geringe Eigenschaftsminderungen wie Alterung oder Verschleiß aufweisen, werden diese Bauteile eingeschmolzen. In extrem aufwendigen, energie- und ressourcenintensiven Produktionsprozessen werden Hightech-Legierungen umgeschmolzen, gegossen und in zahlreichen Prozessschritten wie Wärmebehandlung, Umformen, Beschneiden, Fügen und Beschichten, um nahezu identische Bauteile herzustellen. Das ist definitiv keine fortführbare Strategie für die Zukunft. Es müssen zirkuläre Produktionskreisläufe geschaffen werden, wie beispielsweise in Abb.1. in Bezug auf die wirtschaftliche Leistung können durch die Wiederaufbereitung 20 % bis 80 % der Produktionskosten im Vergleich zur Herstellung eines neuen Produkts eingespart werden [6].



Abbildung 1: Direkte Wiederverwendung zur Umstellung der linearen Produktion auf zirkuläre Produktionskreisläufe

In diesem Beitrag soll das Potenzial der direkten Wiederverwendung von Bauteilen für das Massenprodukt Automobil und Fertigungskonzepte aufgezeigt werden, die eine effiziente Umsetzung der direkten Wiederverwendung von Bauteilen ermöglichen [5].

2 Potenzial der Wiederverwendung von Bauteilen

In der gegenwärtigen Nachhaltigkeitsbetrachtungen der Unternehmen besteht ein unbestreitbarer Bedarf an einem Paradigmenwechsel zu den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft (CE). Die Kreislaufwirtschaft, wie sie von [7] definiert wird, zielt auf die Reduzierung, der Wiederverwendung, dem Recycling und der Rückgewinnung von Materialien ab und wendet sich von dem traditionellen Konzept des "End-of-Life" ab. Es wird eine nachhaltige Entwicklung angestrebt, indem ein Gleichgewicht zwischen Umweltqualität, wirtschaftlichem Wohlstand und sozialer Gerechtigkeit zum Nutzen heutiger und künftiger Generationen entstehen soll. Angesichts der Dringlichkeit dieses Wandels werden schon heute nahezu alle Industriezweige mit den Herausforderungen der Ressourcenknappheit, der sich verändernden Marktdynamik und des globalen Wettbewerbs konfrontiert [8].

Obwohl es sich bei dem relativ großen technischen Industrieprodukt Automobil, um ein hochwertiges, ressourcenintensives Produkt mit einer sehr hohen Stückzahl handelt, werden global kaum nennenswerte Recyclingstrategien systematisch umgesetzt. Weltweit wird eine unfassbare Menge an hochwertigen Materialien in ca. 2 Mrd. Fahrzeugen, teilweise nicht mehr benutzten Fahrzeugen, gebunden. In Europa wird das Auto am Ende seines Lebenszyklus entsorgt oder exportiert. Nur von Kleinstunternehmen werden gesuchte Ersatzteile zurückgewonnen, die in unbedeutendem Umfang an einen kleinen Kreis von Bastlern abgegeben werden. Im Wesentlichen werden die Fahrzeuge entfluidisiert und zum Teil auch stofflich getrennt. Nichtmetallische Bauteile, insbesondere Kunststoffe, werden überwiegend entsorgt und verbrannt. Die metallische Fahrzeugstruktur wird verschrottet und einem Erschmelzungsprozess für neue Legierungen zugeführt. Obwohl das grundsätzlich zur Erhaltung bzw. Rückgewinnung von Rohstoffen dient, ist die Herstellung von neuen Bauteilen mit allen erforderlichen Fertigungsprozessen sehr ressourcen- und energieintensiv.

In Abb. 2. sind die heutigen Optionen zum Umgang mit der Ressource des Automobils im End-of-Life-Stadium dargestellt. Die abwärts gerichtete Pyramide zeigt, je weiter man nach unten geht, desto mehr Energie, Material und bereits geleistete Arbeit gehen verloren. Daher müssen die oberen Optionen in einem CE priorisiert werden.



Abbildung 2: Produktlebenszyklus in der Automobilindustrie, Stand der Technik und Zielsetzung

Ziel muss es sein, für die extrem große Vielfalt der weltweit im Umlauf befindlichen Automobilkomponenten systematisch Konzepte zu entwickeln und umzusetzen, die eine Wieder- bzw. Weiterverwendung von brauchbaren Komponenten ermöglichen.

Die **direkte Wiederverwendung** von Bauteilen führt zu einem maximalen Effekt für Ressourcen, Energie, Kosten und Nachhaltigkeit. Wenn eine signifikante Anzahl unbeschädigter Bauteile direkt wiederverwendet werden kann, entfallen alle für die Herstellung notwendigen Materialien, Roh- und Hilfsstoffe und insbesondere die kosten- und energieintensiven Prozessketten.

Die **Aufarbeitung von wiederverwendbaren Bauteilen** führt zu einem großen Einfluss auf Ressourcen und Nachhaltigkeitseffekte. Die Auswirkungen auf Energie und Kosten sind variabel. Wenn die Aufarbeitung von Bauteilen weniger Ressourcen erfordert als die Neuherstellung, dann hat die Wiederverwendung selbst aufgearbeiteter Bauteile eine dem Delta entsprechende Hebelwirkung, wie die direkte Wiederverwendung von Bauteilen. Derzeitige Hindernisse bei der Umsetzung von Strategien für die Wieder- oder Weiterverwendung von brauchbaren Komponenten sind:

- Die Grundstruktur von Automobilen, ob mit Verbrennungs- oder Elektroantrieb, ist relativ ähnlich, aber die weltweite Vielfalt der Marken und Modelle bedeutet, dass sich die Komponenten in den verwendeten Materialien und geometrischen Abmessungen unterscheiden.
- Gegenwärtig wächst die Vielfalt der Designs aufgrund des signifikanten Wandels des Automobils hin zu Hybrid- und Elektrofahrzeugen und es finden ständig Änderungen der Bauteile selbst innerhalb einer Marke und eines Modells aufgrund kurzer Zykluszeiten (~7 Jahre) statt.
- Aufgrund des harten Wettbewerbs in der Automobilbaubranche mangelt es an Möglichkeiten der Zusammenarbeit und der Verfügbarkeit von Informationen und Daten.

Aktuelle positive Aspekte für die Umsetzung von Strategien zur Wieder- oder Weiterverwendung von verwertbaren Komponenten sind:

- Große Global Player der Automobilbranche nutzen zunehmend Plattformkonzepte für verschiedene Modelle, was zu einem steigenden Anteil an gleichen Komponenten und Konstruktionen führt.
- In der Elektro- und Elektronikbranche werden zunehmend gleiche oder ähnliche Komponenten bereits eingesetzt.

3 Methodisches Vorgehen bei der Extraktion von Komponenten

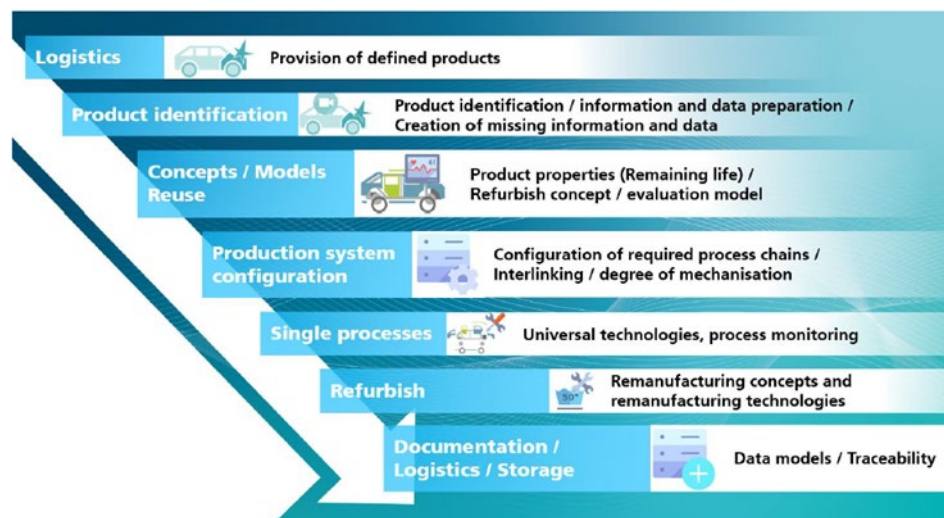


Abbildung 3: Methodische Verfahren für die Extraktion von Komponenten

Die eigentliche Entnahme von Bauteilen erfordert die Betrachtung eines komplexen Systems verschiedener Prozesse, wie in Abb. 3 dargestellt. Sind alle Randbedingungen und die Sollwerte bezüglich der Art der zu gewinnenden Teile bekannt, sind folgende Prozessschritte erforderlich:

- Produktidentifikation und digitaler Zwilling,
- universelle vollautomatische Demontagezelle,
- Ermittlung der Eigenschaften der Demontagebauteile,
- Bauteilaufbereitung für die Wiederverwendung und
- Dokumentation der Bauteildaten für die Wiederverwendung.

Dabei ist zu beachten, dass die Entwicklung auf die vollautomatische Entnahme von Bauteilen aus beliebigen Fahrzeugen abzielt. Die Vision ist eine universelle vollautomatische Demontagezelle mit den folgenden Anforderungen:

- Es müssen Technologien entwickelt und integriert werden, die eine hochautomatisierte Demontage für ein effizientes Remanufacturing ermöglichen. Es wird eine universelle automatisierte Demontagestrategie für die unbeschädigte Entnahme und Entfernung definierter Komponenten benötigt.
- Die für die hochautomatisierte Demontage und Wiederaufbereitung erforderlichen Anlagen müssen so konzipiert sein, dass sie sich flexibel an unterschiedliche Produkte anpassen lassen.

Bei der Montage eines Autos kommen rund 100 verschiedene Montage- und Fügeverfahren zum Einsatz, was den Aufbau einer Reverse-Montage-Prozesskette unmöglich macht. Die Umsetzung dieser Vielzahl von Montage- und Fügeprozessen in einer solchen universellen vollautomatischen Demontagezelle ist nicht wirtschaftlich. Die Aufgabe besteht darin, das Zielbauteil auf relativ unkonventionelle Weise zu erreichen und dieses Zielbauteil freizulegen, ohne es zu beschädigen. Dafür werden universelle Demontagetechnologien benötigt. Die Lasertechnik bietet dafür eine

Lösungsmöglichkeit, verschiedenste Verbindungen an Bauteilen zu lösen, ohne das Bauteil zu beschädigen.

4 Strategie für eine universelle vollautomatische Demontagezelle mit einer universellen Demontagetechnologie

Um eine große Anzahl von Teilen für die Wiederverwendung zu gewinnen, werden Lösungen, die ein hohes Maß an manueller Demontage erfordern, hier nicht berücksichtigt. Die Vision ist eine vollständig automatisierte Demontagezelle, in der jedes Fahrzeug erkannt und/oder digitalisiert werden kann. Daraus wird dann vollautomatisch die Demontagestrategie abgeleitet. Es wird davon ausgegangen, dass nicht das gesamte Fahrzeug in seine Einzelteile zerlegt wird, sondern nur die Teile, die in der aktuellen Situation eine signifikante Nachhaltigkeit bzw. Wertschöpfung erbringen können, verwertet werden. Das bedeutet, dass umliegende Bauteile mit minimalem Aufwand zerstörend entfernt und anschließend der stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Die für die Wiederverwendung vorgesehenen Zielkomponenten müssen möglichst beschädigungsfrei demontiert werden. Die Herausforderung dabei ist, dass bei der Herstellung von Neuwagen etwa 100 verschiedene Fügeverfahren eingesetzt werden. Allein im Karosseriebau gibt es rund 30 verschiedene Fügeverfahren im Neubau (s. Abb. 4).

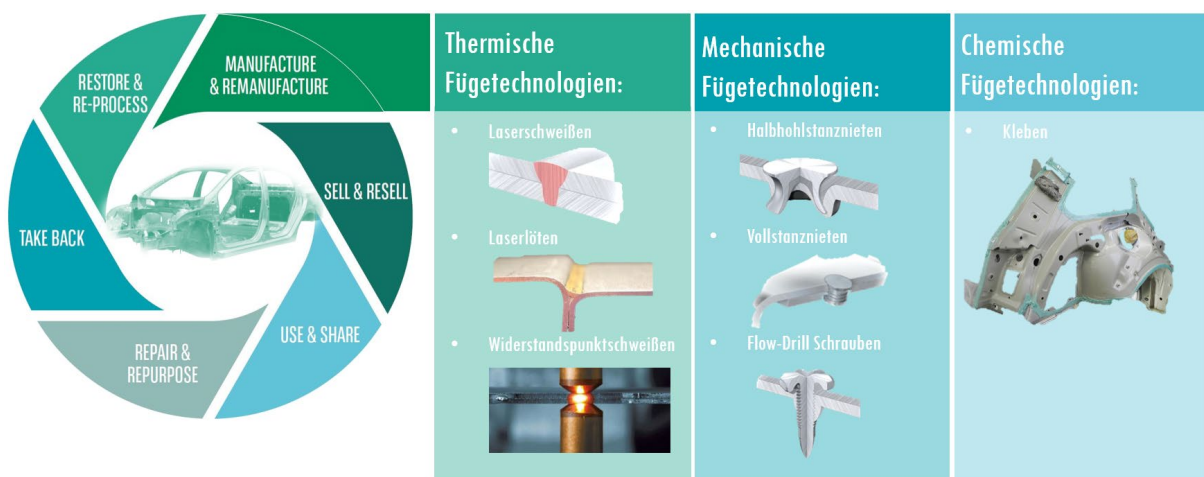


Abbildung 4: Typische Fügeverfahren im Karosseriebau

Es ist nachvollziehbar, dass die Vielfalt der Verfahren, für das Entfügen, nicht vollständig in einer universellen Demontagezelle umsetzbar sind. Ein universelles Demontagewerkzeug könnte die Lasertechnik sein, die nahezu alle Verbindungen mit minimaler Beschädigung trennen kann.

Bei thermisch gefügten Verbindungen, wie z. B. Lötverbindungen, ist es beispielsweise möglich, das Lot mit dem Laser zu schmelzen, welches eine niedrigere Schmelztemperatur (CuSi3 , $TS = 1026 \text{ }^{\circ}\text{C}$) als das gelötete Grundmaterial (DC04 , $TS = \text{ca. } 1425 \text{ }^{\circ}\text{C}$) besitzt. Die verflüssigte Lotschmelze kann abgesaugt werden. Die abgetrennten Teile bleiben dabei völlig unbeschädigt (siehe Abb. 5). Auch mechanisch gefügte Verbindungen können nach einem ähnlichen Prinzip getrennt werden, wobei nur das Verbindungselement präzise geschmolzen und die Schmelze ausgeblasen wird (siehe Abb. 6). Natürlich bleiben dabei Löcher im Bauteil zurück, die aber zum Wiederausammenfügen genutzt werden können.

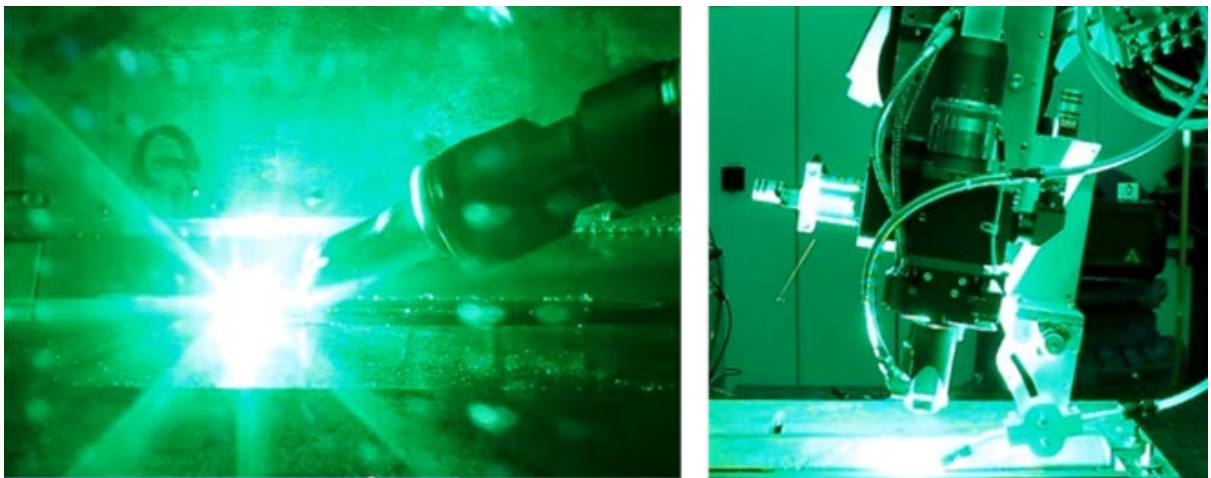
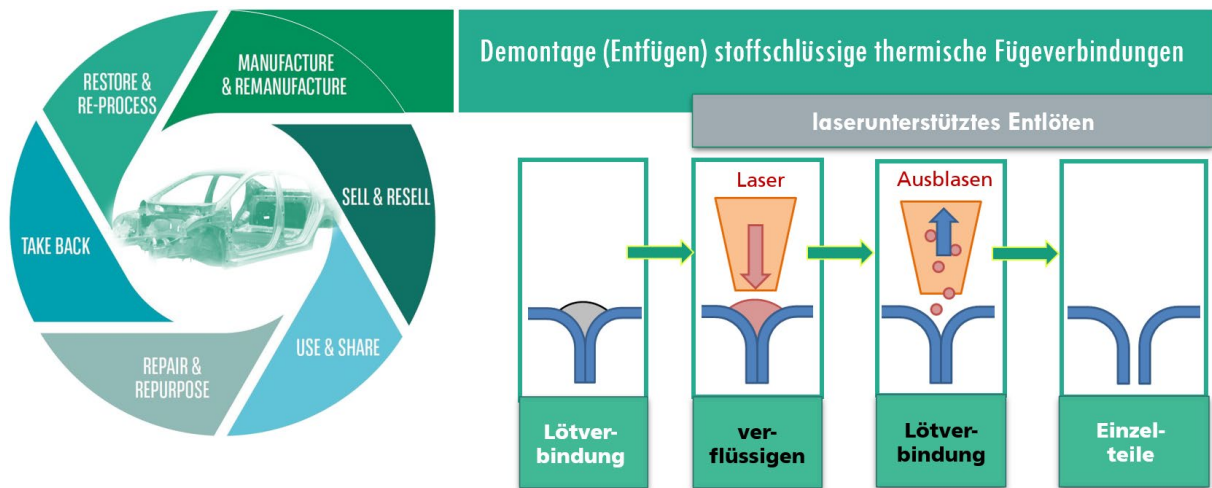


Abbildung 5: Lasergestütztes Entlöten: Oben: Prinzip; Unten: Experimenteller Nachweis des Konzepts, Stahl mit CuSi3 ($T_S = 1026^\circ\text{C}$) verlötet, entlötet mit einem 3kW grünen Laser ($\lambda = 515\text{ nm}$, $T_P < 1200^\circ\text{C}$, $v_P = 4\text{ m/min}$), Ausblasen des flüssigen Lots mit Druckluft und Absaugen

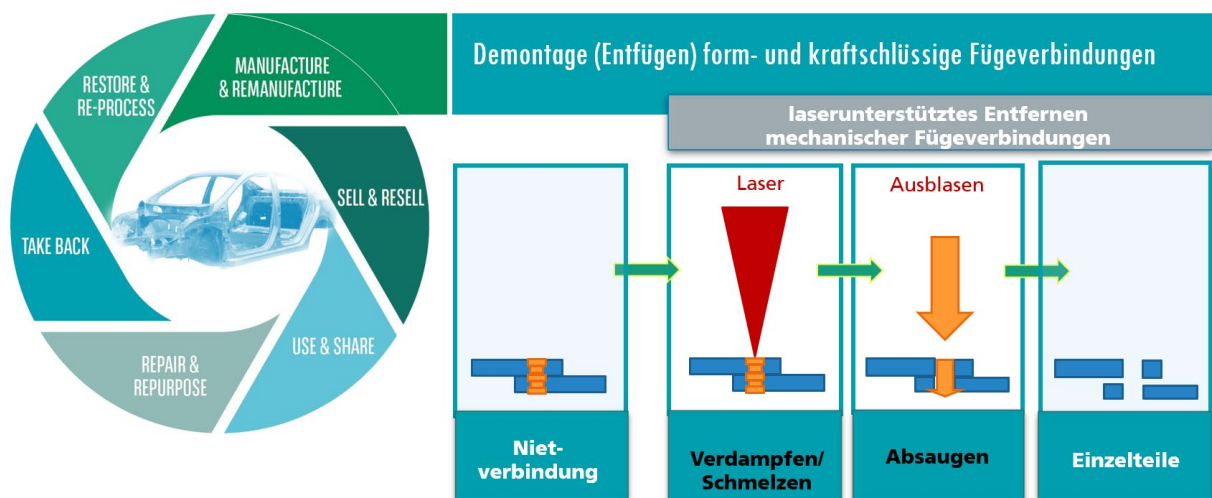


Abbildung 6: Lasergestützte Demontage (Entfügen) von form- und kraftschlüssigen mechanischen Verbindungen.

Das Trennen von geklebten metallischen Bauteilen mit einem Laserwerkzeug ist bekannt und unproblematisch. Der Klebstoff wird durch die Erwärmung mit dem Laser bei einer vergleichsweise niedrigen Temperatur thermisch zersetzt, so dass die Bauteile völlig unbeschädigt getrennt werden können (s. Abb. 7). Alle Prinzipien sind in experimentellen Untersuchungen nachgewiesen worden. Derzeit wird ein Prototyp für eine universelle Demontagezelle mit universeller lasergestützter Demontage (Entfügen) entwickelt.

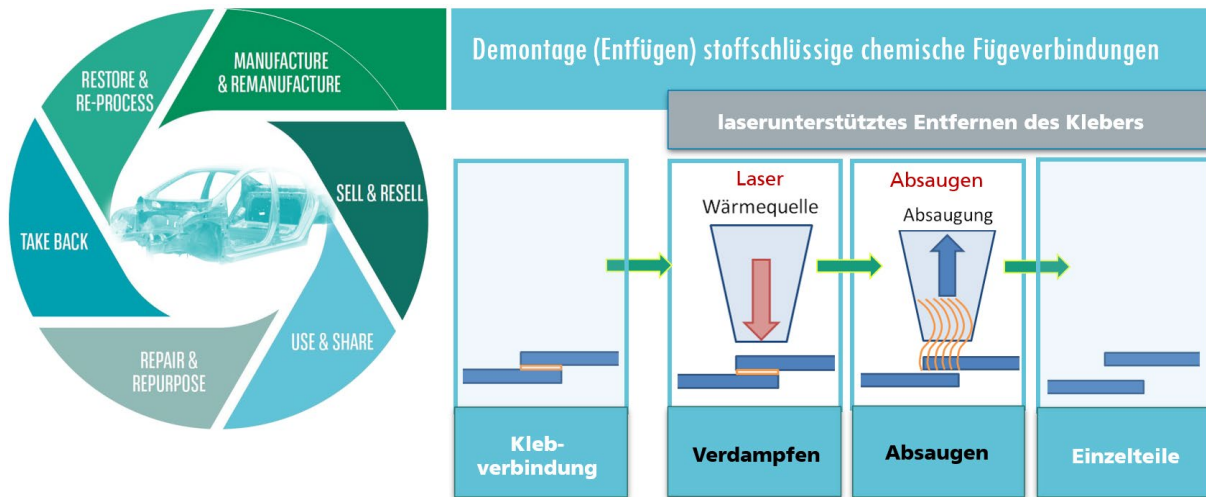


Abbildung 7: Lasergestützte Demontage (Entfügen) von chemischen Klebeverbindungen

5 Fazit

Weltweit gibt es etwa 2 Milliarden Fahrzeuge. Eine echte Kreislaufwirtschaft gibt es für diese Fahrzeuge nicht. Die derzeitige Praxis für Automobile am Ende ihres Lebenszyklus beinhaltet für einen kleinen Teil der Fahrzeuge das Einschmelzen einer meist metallischen Werkstofffraktion. Die Herstellung eines neuen Bauteils durchläuft dann noch einmal den gesamten energieintensiven Produktionsprozess. In einem Gebrauchtwagen gibt es jedoch eine große Anzahl von Bauteilen, die weder abgenutzt noch gealtert sind und direkt wiederverwendet werden könnten. In diesem Beitrag werden das Potenzial und die derzeitigen Hindernisse für die direkte Wiederverwendung von Bauteilen aufgezeigt.

Die Randbedingungen und die notwendigen Prozessschritte zur Entnahme von Bauteilen aus beliebigen Fahrzeugen bis hin zur Freigabe zur direkten Wiederverwendung werden kurz beschrieben. Der Schwerpunkt des Beitrags liegt auf der Einführung einer vollautomatischen Demontagezelle, in der Fahrzeuge erkannt bzw. digitalisiert werden und aus der die Prozessschritte zur Entnahme von Zielkomponenten mit minimalem Aufwand vollautomatisch erfolgen. Ein Lösungsvorschlag ist eine universelle laserbasierte Demontagetechnologie. Die Zielbauteile können in deren Umgebung zerstörend freigeschnitten werden. Es wird gezeigt, dass die direkten Fügeverbindungen des Zielbauteils getrennt werden können, ohne die Bereiche des Zielbauteils zu beschädigen. Experimente haben gezeigt, dass diese Trenntechnik für nahezu alle Arten von Verbindungen anwendbar ist. Ein Prototyp einer solchen universellen Demontagezelle befindet sich derzeit in der Entwicklung.

6 Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse stammen aus einem laufenden, vom BMFTR geförderten Projekt "EKODA" (Förderkennzeichen 02J21E150).

7 Literaturverzeichnis

- [1] Department of Economic and Social Affairs, World Population Prospects 2022. [Online]. Available: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900> (ac-cessed: Jan. 16 2024).
- [2] Our World in Data, Material footprint per capita, 2000 to 2019. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/material-footprint-per-capita> (accessed: Jan. 16 2024).
- [3] United Nations, Ensure sustainable consumption and production patterns: Electronic waste continues to proliferate and is not being disposed of in a re-sponsible way. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/goal-12/> (accessed: Jan. 16 2024).
- [4] Focus, Aus wie vielen Einzelteilen besteht ein Auto? [Online]. Available: https://www.focus.de/auto/ratgeber/auto-abc/auto-aus-wie-vielen-einzelteilen-besteht-ein-auto_id_3514353.html (accessed: Nov. 25 2023).
- [5] Patrick Alexander Schmidt, Ein zweites Leben für Batterie, Getriebe und Zahn-räder: Kreislaufwirtschaft statt Recycling. [Online]. Available: <https://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/PM-2023-ein-zweites-leben-fuer-batterie-getriebe-und-zahnraeder.html> (accessed: Jan. 16 2024).
- [6] Y. Zhu, D. Schwam, J. F. Wallace, and S. Birceanu, "Evaluation of soldering, washout and thermal fatigue resistance of advanced metal materials for alumi-num die-casting dies," Materials Science and Engineering: A, vol. 379, 1-2, pp. 420–431, 2004, doi: 10.1016/j.msea.2004.03.020.
- [7] J. Cantzler, F. Creutzig, E. Ayargarnchanakul, A. Javaid, L. Wong, and W. Haas, "Saving resources and the climate? A systematic review of the circular economy and its mitigation potential," Environ. Res. Lett., vol. 15, no. 12, p. 123001, 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abb7.
- [8] M. Sharma, A. Kumar, S. Luthra, S. Joshi, and A. Upadhyay, "The impact of environmental dynamism on low-carbon practices and digital supply chain networks to enhance sustainable performance: An empirical analysis," Bus Strat Env, vol. 31, no. 4, pp. 1776–1788, 2022, doi: 10.1002/bse.2983.

8 Biografien

M. Sc. Patrick Alexander Schmidt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Assistierte Planung, Konstruktion und Prozessoptimierung am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU): patrick.alexander.schmidt@iwu.fraunhofer.de

Tibor Paizs ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilungsleiter Thermische Fügetechnik am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU): tibor.paizs@iwu.fraunhofer.de

Dr.-Ing. habil. Frank Riedel ist Abteilungsleiter Thermische Fügetechnik am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU): frank.riedel@iwu.fraunhofer.de

Eckart Lippmann ist Leiter System- und Produktionstechnik in der Firma a.i.m. all in metal GmbH: eckart.lippmann@alles-in-metall.de

Wiederverwertung einer Lenkgetriebekomponente unter Anwendung einer umformtechnischen Prozesskette für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilproduktion

René Selbmann¹, Tibor Paizs¹, Patrick Alexander Schmidt¹, Moritz Hoffmann^{2,3}, Steffi Knorn²

¹Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, 09126 Chemnitz, Deutschland

²Lehrstuhl für Regelungstechnik, Institut für Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

³Robert Bosch Automotive Steering GmbH, Richard-Bullinger-Str. 77, 73527 Schwäbisch Gmünd, Bundesrepublik Deutschland

Abstract. Im vorliegenden Paper wird eine Prozesskette zur Umnutzung einer Antriebsstrangkomponente beschrieben. Dafür wurde die Komponente Zahnstange aus einem PKW-Lenkgetriebe demontiert und in Spurstangen für ein Lenkgetriebe der nächsten Generation umgearbeitet. Damit kann ein anschauliches Praxisbeispiel für die zukünftige Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilproduktion aufgezeigt werden.

Keywords: circular economy, automotive, recycling, remanufacturing, repurpose

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EKODA wurden Technologien und Geschäftsmodelle entwickelt, welche als hochwertiges Kreislaufführung von Bauteilen und Materialien im Produktionsumfeld von Kraftfahrzeugen verstanden werden. Damit soll ein Beitrag für eine deutlich höhere Ressourcennutzung und eine Erhöhung der Resilienz durch Alternativen in Lieferketten erreicht werden. Das Gesamtziel des Projektes EKODA besteht darin, Stoffkreisläufe durch effiziente und wirtschaftliche Demontage und industrielle Aufarbeitung (Remanufacturing) von Automobilkomponenten zu schließen.

Zur Demonstration der entwickelten Methoden und Technologien wurden zwei Use-Cases betrachtet, welche unterschiedliche Lösungsbausteine enthielten und durch die Partner gemeinsam realisiert wurden. Im Use-Case I erfolgte die Demontage eines Pkw-typischen Batteriespeichersystems. Hierbei konnten verschiedene Aspekte einer adaptiven, teilautomatisierten und KI-gestützten Demontageanwendung demonstriert werden. Der Use-Case II zur Bauteil-Wiederverwertung von Antriebsstrangkomponenten untersucht die gestufte Wiederverwendung von Pkw-Komponenten. Hierbei wird sowohl die direkte Wiederverwertung in analoger Leistung über eine lokale Nachbearbeitung als einfachster Manufacturing-Ansatz bis hin zu einer Umarbeitung, beispielsweise durch Überarbeitung und Verwendung als kleineres artgleiches Bauteil eines Baukastensystems, betrachtet.

Im vorliegenden Paper wird eine Prozesskette zur Umnutzung (repurpose) einer Antriebsstrangkomponente beschrieben. Diese wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens als Anwendungsfall (Use-Case II) umgesetzt.

2 Stand der Technik

Die Antriebsstrangbaugruppe Lenkgetriebe ist Bestandteil einer PKW – Lenkung und überträgt die rotatorische Lenkradbewegung in eine lineare Bewegung von Schubstangen, über welche an den Rädern des Fahrzeuges eine kontrollierte Schwenkbewegung erfolgt. Der gewählte Demonstrator in Use-Case

II betrachtet ein elektromechanisches Lenksystem, welches heutzutage in nahezu allen modernen Fahrzeugen zu finden ist. Je nach Fahrzeugtyp und erforderlicher Last wird zwischen drei verschiedenen Lenkungstypen unterschieden. Dabei handelt es sich um folgende drei electric power steering (EPS) Varianten, die sich sowohl in ihrer Tragfähigkeit, Konstruktion und Preis unterscheiden:

- EPS steering column (EPSc)
- EPS dual pinion (EPSdp)
- EPS axle parallel (EPSapa)

Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Lenkungsvarianten ist in Abbildung 1 zu finden, die diese anhand der auftretenden Zahnstangenkraft und Leistung klassifiziert sowie verschiedenen Fahrzeugsegmenten zuordnet. Während die EPSc vor allem im niedrigeren Preissegment angesiedelt ist, sind EPSdp und EPSapa in der oberen Mittelklasse verbaut. Das Luxussegment bis zum Geländewagen wird von der EPSapa adressiert, welche die höchste verfügbare Leistung und Zahnstangenkraft aufweist.

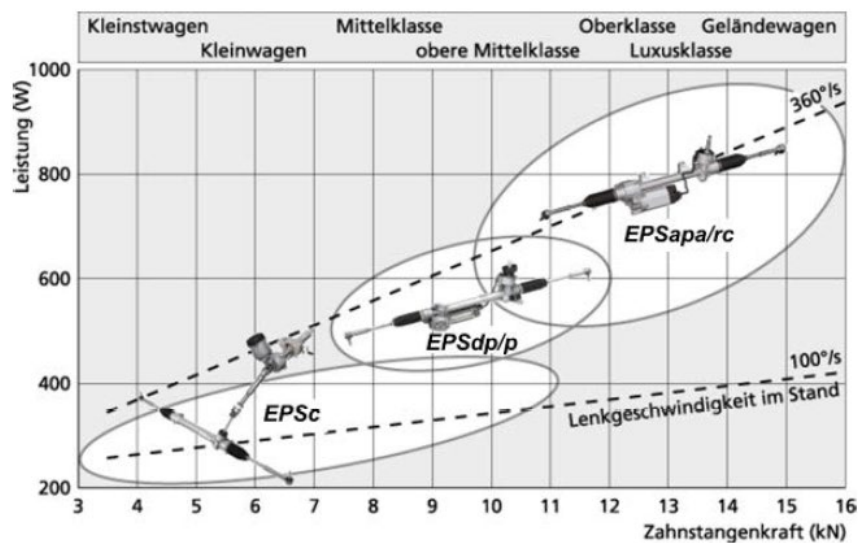


Abbildung 1: Unterteilung der Lenkungsvarianten in Tragfähigkeit und Fahrzeugsegment [1]

Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich hier i. W. in Bezug auf die Kraftübertragung mittels der elektrischen Unterstützung. Während bei der EPSc der Servomotor unmittelbar hinter dem Lenkrad ist, sind die Servoeinheiten bei den beiden anderen Varianten direkt mit dem Gehäuse der Lenksysteme verschraubt. Dies erlaubt eine deutlich bessere Übertragung der rotatorischen Unterstützung des Motors auf die Lenkachse und somit eine höhere Leistung. Wie in Abbildung 1 gezeigt bestehen alle drei Lenkungstypen aus werthaltigen Materialien (wie z. B. Aluminium und Stahl) die sich grundsätzlich für ein zweites Leben im Kontext der Kreislaufwirtschaft eignen. Aufgrund der vielfältig verbauten Komponenten sowie der sicherheitskritischen Eigenschaften, die ein elektromechanisches Lenksystem sowohl im Serienbetrieb als auch in dessen zweitem Leben leisten muss, stellt dieses Bauteil des Antriebsstrangs einen hervorragenden Demonstrator dar. Da sich der Use-case II mit der Umnutzung einer Zahnstange einer EPSapa für einen alternativen Anwendungsfall in der EPSdp beschäftigt, werden im Folgenden lediglich diese zwei Lenkungstypen berücksichtigt und näher erläutert.

EPS dual pinion (EPSdp)

Die EPSdp wurde im Jahr 2002 das erste Mal auf der VW Golf Plattform für Fahrzeuge der (oberen) Mittelklasse eingesetzt. Diese erhöhte Kraftübertragung im Vergleich zur EPSc ist auf die Anordnung der elektrischen Servoeinheit bei der dual pinion zurückzuführen. Eine Detaildarstellung des EPSdp Lenksystems sowie ein Schnittbild des Servoantriebes sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: EPSdp Lenksystem [1]

Wie der Aufbau des EPSdp in Abbildung 2 zeigt, verfügt dieser Lenkungstyp über zwei Ritzel, die die Axialbewegung an der Zahnstange einleiten und gleichzeitig eine doppelte Redundanz darstellen. Das Ritzel auf der rechten Seite ist mit dem Drehmomentsensor verstemmt und wird durch den Lenkeinschlag des Fahrers bewegt. Die Bewegung des zweiten Ritzels wird durch das Servogetriebe in Abhängigkeit des gelenkten Winkels angetrieben.

EPS axis parallel (EPSapa)

Die EPSapa, die sich durch den achsparallelen Antrieb auszeichnet, wurde das erste Mal im Jahr 2007 beim BMW 3er eingesetzt und ist fester Bestandteil bei Fahrzeugen der oberen Mittelklasse bis zum Luxus- und Geländesegment. In der nachfolgenden Abbildung 3 ist eine EPSapa Variante sowie dessen wesentliche Komponenten aufgeführt.

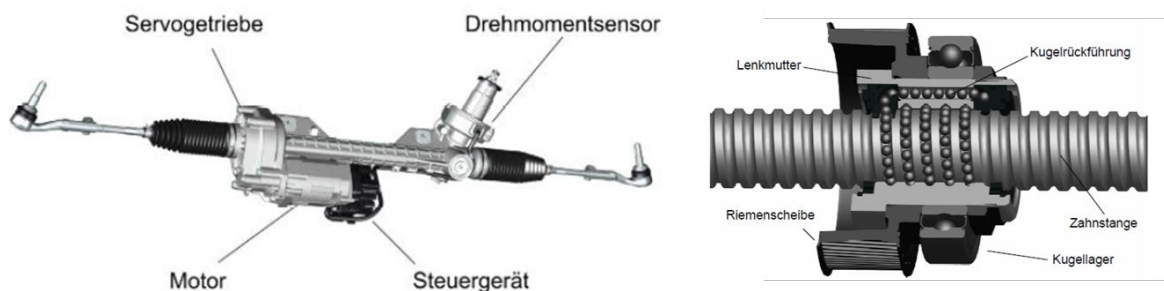


Abbildung 3: EPSapa Lenksystem [1]

Wie in Abbildung 3 dargestellt, besteht die EPSapa neben den Gehäusebaugruppen und dem Drehmomentsensor aus einem Kugelgewindetrieb (KGT), der vom elektrischen Motor angetrieben wird und somit einem anderen Funktionsprinzip als die EPSdp folgt. Hier wird die rotatorische Bewegung des Motors über einen Zahnriemen auf den KGT übertragen, bei dem die Kugelführung auf der Zahnstange die axiale Lenkbewegung ausführt. Im Gegensatz zu den anderen Lenkungsvarianten wird.

Um diese anspruchsvollen und sicherheitskritischen Funktionen auszuführen, sind sowohl in der EPSdp als auch in der EPSapa unterschiedliche hochwertige Komponenten und Sub-Komponenten verbaut. Während die Gehäusebaugruppen wie Gehäuse, Motorflansch, Getriebedeckel aus Aluminium (Al)-Druckguss bestehen, sind Ritzel, Schnecke, Zahnstange, Lenkmutter sowie Radaufhängung aus (gehärtetem) Stahl gefertigt. Je nach erforderlicher Leistung ist ein Gleichstrom- oder Asynchronmotor verbaut, der eine Komposition verschiedener Metalle und Magnete beinhaltet.

Die hochwertig eingesetzten Materialien ermöglichen für beide Lenkungstypen eine hohe Langlebigkeit. Darüber hinaus werden insb. auf Komponentenebene i.W. Schraubverbindungen eingesetzt, die den Austausch nicht funktionaler Teile ermöglichen. Lediglich die Sub-Komponenten sind nicht zerstörungsfrei demontierbar. Da die dargestellten Lenksysteme in vielen Bauvarianten Teil der Vorderachse sind und daher teilweise massiven Kräften standhalten müssen, haben die Gussbauteile eine massive Struktur. Dieser Umstand sowie die Herstellung der Zahnstange und des Motors führen zu

einem hohen CO₂-Fußabdruck. Obwohl die verschiedenen Lenksysteme von vielerlei unabhängigen Firmen, wie BORG Automotive oder Remante oder Erstaussattern, wie Bosch oder ZF aufgearbeitet wird, bestehen hier verschiedene Herausforderungen [2]. Zum einen handelt es sich bei der Lenkung um ein sicherheitskritisches Bauteil bei dem ein Versagen zu fatalen Konsequenzen führen kann. Zum anderen handelt es sich um variantenreiches Produkt bei dem weder Hauptbestandteile zwischen den verschiedenen Lenkungstypen (EPSdp und EPSapa) noch innerhalb ihrer Produktgruppe (BMW EPSapa und Mercedes EPSapa) kompatibel sind. Dies erschwert eine effiziente Planung und Steuerung der Produktion, die Lagerhaltung sowie die Auslastung der zur Verfügung stehenden Kapazität.

Aus diesem Grund wurde die Umnutzung der bestehenden Komponenten in Erwägung gezogen, um entweder das bestehende Portfolio von (unabhängigen) Aufarbeitern zu erweitern oder dies in die originäre Prozesskette von Erstaussattern zu integrieren. Im Fall von Use-Case II stellt dies einen Ansatz dar, welcher weder im derzeitigen Stand der Literatur noch in der industriellen Praxis in Erwägung gezogen wurde.

Im Rahmen von Use-Case II des EKODA Projektes wurde ein Lenkgetriebe EPSapa PL7 der Firma Robert Bosch Automotive Steering GmbH mit hohem Automatisierungsgrad demontiert.

3 Prozesskette zur Umnutzung einer Antriebsstrangkomponente

Nachdem das Lenkgetriebe automatisiert demontiert wurde erfolgte eine Bewertung der Kernkomponenten (Tabelle 1) auf ihr Verwertungspotential und Kreislauffähigkeit.

Tabelle 1: Lenkgetriebe Kernkomponenten.

Komponente	Anzahl	CO ₂ -Footprint in kg	Σ CO ₂ -Footprint in kg
Gehäuse	1	6,04	6,04
Zahnstange	1	5,00	5,00
Spurstangen	2	2,10	4,20
Ritzelwelle	1	1,30	1,30
			16,54

Die Auswahl fiel auf die Komponente Zahnstange, welche im vorliegenden Fall exemplarisch für eine Weiterverwendung qualifiziert werden sollte. Am Bauteil sollte das Schließen von Stoffkreisläufen durch Umsetzung und Integration flexibler und automatisierbarer Demontagetechnik sowie der Einsatz universeller Remanufacturing-Methoden und Technologien aufgezeigt werden. Das Beispiel erweitert die Demontage- und Remanufacturing-Strategien im Automobilsektor um eine Komponente aus dem Antriebsstrang, wobei aus dem Karosserie (Blech-) Bereich in [3] ein sehr anschauliche Methode zu Umnutzung eines Blechbauteils bereits vorgestellt wurde. Dazu wurde zunächst der Bauteilzustand ermittelt. Dies beinhaltete die Prüfung auf Verschleiß (Maßliche Abweichung), Beschädigung, Risse sowie Korrosion.

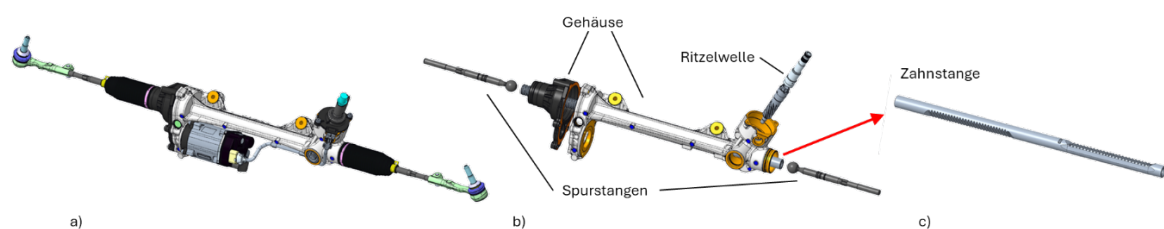


Abbildung 4: a) Lenkgetriebe, b) Lenkgetriebe Kernkomponenten, c) Zahnstange

Verwertungsstrategie

Nachdem die Komponente demontiert, ihr Zustand erfasst und die Charakterisierung des Verschleißes durchgeführt wurde stellte sich die Frage nach der anzuwendenden Verwertungsstrategie (Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle). Für die Betrachtung wurde das mögliche Einsparpotential (CO_2) einzelner Szenarien detektiert sowie für die infrage kommenden Varianten die technologischen Möglichkeiten, das wirtschaftliche Potential und der Bedarf beim Kunde (Lenkgetriebehersteller) verglichen. Dabei konnte mittels Variantenvergleich nach VDI 2225 ein Vorzugsszenario festgelegt werden. Das Ergebnis dieses Vergleichs war eine Prozesskette zur Umnutzung (Repurpose) der Zahnstangen zu zwei Spurstangen für eine Lenkung der nächsten Generation (Abb.5).

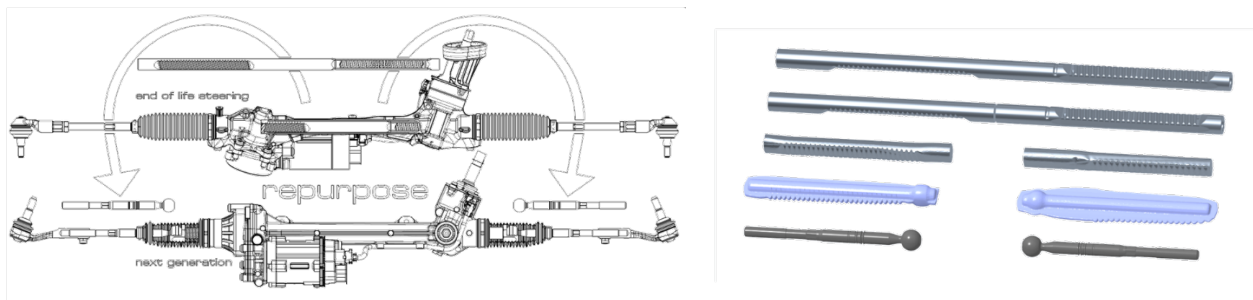


Abbildung 5: „Repurpose“ Prozesskette, Zahnstange → 2 Spurstangen

Prozesskette

Die Umnutzung (Repurpose) der Komponente sollte an einem Demonstrator aufgezeigt werden. Dabei erfolgte durch Anwendung von Umformprozessen, gefolgt von einer spanenden Nachbearbeitung die Entwicklung einer serienfähigen Prozesskette mit dem Ziel, aus einer Zahnstange zwei Spurstangen herzustellen. Bei der Auslegung wurde auf industriell etablierte Fertigungsverfahren zurückgegriffen.

Im ersten Schritt wurde vom Zielbauteil (Spurstange) ein Schmiedeteil (Fertigform) abgeleitet. Im Anschluss erfolgte die Auslegung der umformtechnischen Prozesskette für dieses Schmiedeteil. Als Zuschnitte wurden dabei jeweils Segmente, welche aus der Zahnstange herausgetrennt wurden, verwendet. Unter Anwendung der Software Simufact.Forming2024.2 konnte eine 3D-Simulation des Umformprozesses erstellt werden. Mit dieser war es möglich die Formfüllung, eine Falten-/ Fehlstellen-Analyse und den Kraftbedarf zu detektieren und einen zweistufigen (Vorformen + Fertigformen) Prozess der Warmmassivumformung (Schmieden) wie in Abbildung 6 dargestellt, auszulegen. Die Bauteiltemperatur beträgt dabei 1100°C , zwischen dem Vorform und Fertigformprozess muss das Bauteil um 90° in der Längsachse gedreht werden.

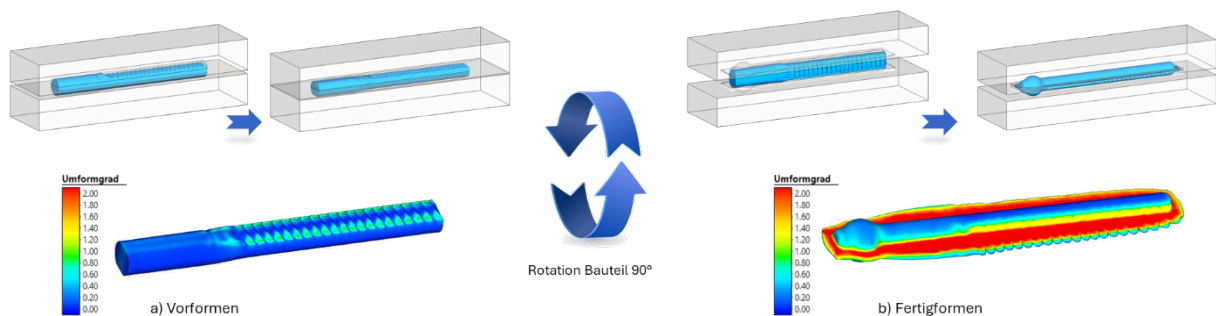


Abbildung 6: Umformtechnische Prozesskette, a) Vorformen, b) Fertigformen

Versuchsdurchführung

Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgte die Auswahl einer entsprechenden Umformmaschine (Schmiedehammer) sowie die Erstellung der Konstruktionsunterlagen zur Gestaltung der Werkzeuggravuren. Nachdem das Werkzeug hergestellt war und die Zahnstangen auf das entsprechende Maß zugesägt waren konnten die Schmiedeversuche durchgeführt werden.

Dazu wurden die Zahnstangeabschnitte in einem Drehherdofen auf 1100°C erwärmt und manuell in die Vorformgravur eingelegt. Dabei war auf eine, nach oben orientierte, Verzahnung zu achten (Abb. 7a). Nach erfolgtem Vorformhub wurde das Bauteil aus der Gravur entnommen, um 90° gedreht und in die Fertiggravur eingelegt. Es folgte die zweite Umformstufe und die Entnahme des Schmiedeteils. Im Anschluss erfolgte das Abgraten sowie die spanende Bearbeitung (Abb. 7b) der Schmiedeteile zur Herstellung der Spurstangen (Abb. 7c).

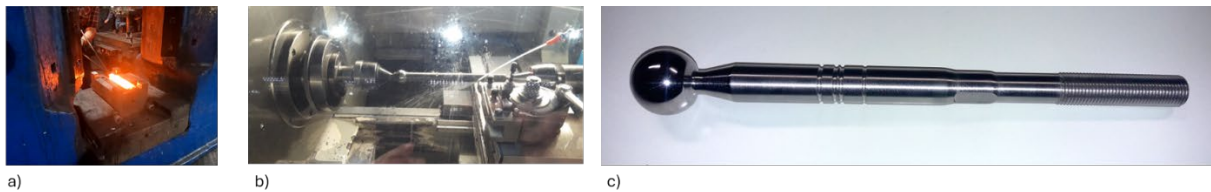


Abbildung 7: a) Schmiedeprozess, b) spanende Nachbearbeitung, c) Spurstange

4 Zusammenfassung Ausblick

An der demonstrierten Prozesskette zur Umnutzung einer Antriebsstrangkomponente konnte gezeigt werden wie in Zukunft der Produktlebenszyklus / -kreislauf geschlossen werden kann und hochwertige Teile oder Komponenten einer Baugruppe direkt bzw. nach Aufbereitung wieder zu verwenden sind. Mit diesem Ansatz kann ein Beitrag zur Lösung vieler, heutigen zentralen Probleme (Ressourcen, Verfügbarkeit, Energie, CO₂) geleistet werden. Es konnte ein Basiskonzept entwickelt werden welches beispielhaft für Massenprodukte im Automobilbau eine systematische, hochwertige Wiederverwertung generiert. Der Produktkreislauf besteht dabei in der Rückgewinnung eines Teils des Rohstoffs (Stahl), welcher nicht über die Hochofenroute recycelt wird, was eine zukünftig nicht mehr abbildbare Verschwendung der Ressourcen darstellt, sondern direkt umgenutzt werden kann. Bei der Umsetzung des Use Case II wurde darauf geachtet hochratenfähige Serienfertigung sowie etablierte Fertigungsverfahren anzuwenden.

Aktuell finden noch sehr wenige solcher Konzepte in der Serie Anwendung. Eine Ausnahme stellt beispielsweise das Forschungsprojekt „iReGear“ zur Getriebefertigung dar, welches der LKW Hersteller Scania gemeinsam mit dem KTH Royal Institute of Technology und Scandinavian Transmission Service AB realisiert hat [4]. Die generelle Ursache besteht darin, dass die Neuprodukte mit dem Fokus auf die Neufertigung entstehen und viele Lösungen für ein Wiederverwertungs- und Remanufacturingkonzept fehlen. Und genau solche Lösungen konnte mit dem Use Case II (Abbildung 8) erarbeitet werden.



Abbildung 8: Demonstrator Prozesskette

Am Beispiel der realisierten Prozesskette kann die CO₂ Bilanz der Kernkomponenten mit einer Reduzierung von 19,4 % des CO₂ Footprint bilanziert werden. Hierbei erfolgte die Berechnung zunächst nur auf Basis der eingesetzten Materialmengen und standardisierten Prozessschritten. Eine individuelle Berechnung der CO₂ Bilanz über die exakten Fertigungsschritte beim Unternehmen durch ein, nach ISO 14067 und ISO 14064-1 zertifiziertes, Berechnungstool wird zeitnah angestrebt.

Tabelle 2: Lenkgetriebe mit „repurpose“ Komponenten.

Komponente	Anzahl	CO ₂ -Footprint in kg	Σ CO ₂ -Footprint in kg
Gehäuse	1	6,04	6,04
Zahnstange	1	5,00	5,00
Spurstangen	2	0,50	1,00
Ritzelwelle	1	1,30	1,30
			13,34

An der, im EKODA Use Case II beschriebenen, Prozesskette konnte gezeigt werden das es prinzipiell möglich ist, geeignete Komponenten zu identifizieren und durch den Einsatz innovativer, modularer und flexibler Technologien wirtschaftlich zu demontieren, aufzubereiten und wieder direkt in die Wertschöpfungskette zu integrieren. Eine auf dieses Konzept angepasste Produktgestaltung würde zukünftig eine effiziente und automatisierte Demontage bestmöglich unterstützt. Das Beispiel von der Umnutzung von Zahnstangen alter verschlissener Lenkgetriebe zu Spurstangen für die Lenkgetriebe der nächsten Generation zeigt damit einen Weg zu einer künftigen hochwertigen Kreislaufführung von Bauteilen und Materialien auf.

5 Danksagung

Die Konsortialpartner des Forschungsvorhabens EKODA, im speziellen das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz, bedanken sich bei der Robert Bosch Automotive Steering GmbH Schwäbisch Gmünd, für die zur Verfügung gestellten Demonstratoren (Lenkgetriebe) sowie den informellen Austausch und Einblick in die Fertigung von PKW-Lenkgetrieben.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02J21E150 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

6 Literaturverzeichnis

[1] P. Pfeffer and M. Harrer, Eds., *Lenkungsbandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, 2., Überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

- [2] M. Hoffmann, A. Krini, A. Mueller, and S. Knorn, “Remanufacturing production planning and control: Conceptual framework for requirement definition,” *J. Remanufacturing*, Jan. 2025, doi: 10.1007/s13243-025-00149-8.
- [3] Rico Haase,*, Daniele Farioli, Rene Selbmann, Markus Werner, Verena Kräusel: *Dismantling and remanufacturing strategies in the automotive sector*, 31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024)
- [4] <https://www.scania.com/group/en/home/investors/annual-review/a-world-first-in-sustainable-truck-manufacturing.html>

Gefördert vom:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Circular Engineering: Ein Rahmenwerk zur Bewertung und Befähigung zirkulärer Produktentwicklung

Dr. Sven Winter¹, Jessica Kos¹, Dr. Alexander Christ¹, Dr. Marcus Krastel¹

¹:em engineering methods AG, Darmstadt, Deutschland

Abstract. Die Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in die Entwicklungsprozesse von Produkten ist eine Schlüsselfähigkeit in der Transformation vom linearen zum zirkulären Geschäftsmodell. Zur Umsetzung des sogenannten Circular Engineering fehlen systematische Bewertungsansätze und praxisnahe Werkzeuge. In dieser Arbeit wird daher das Konzept eines Circular Engineering Reifegradmodells vorgestellt, das Entwicklungsprozesse mehrdimensional bewertet, um den vorhandenen Ist-Zustand in Unternehmen abzubilden und diese in ein Verhältnis zu einer idealen Umsetzung in der Endstufe zu setzen. Das Reifegradmodell dient als Ausgangslage, um gezielt Maßnahmen zur Umsetzung des Circular Engineering abzuleiten. Die Maßnahmen werden durch die modulare Circular Engineering Toolbox mit Methoden, Templates und Werkzeugen zur Umsetzung von zirkulären Prinzipien bereitgestellt. Die Verknüpfung der beiden Ansätze des Reifegradmodells und der Toolbox liefert ein ganzheitliches Rahmenwerk für das Circular Engineering und unterstützt somit Unternehmen dabei, zirkuläre Strategien systematisch zu bewerten und umzusetzen.

Keywords: *Circular Engineering, Reifegradmodell, Toolbox*

1 Einleitung

Die Transformation von linearen zu zirkulären Geschäftsmodellen stellt Unternehmen vor komplexe Herausforderungen. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen kämpfen mit begrenzten Ressourcen, mangelnde Erfahrungen und Kompetenzen sowie fehlenden systematischen Ansätzen zur Umsetzung zirkulärer Strategien (Stiftung 2°, 2021). Die Integration der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (engl. *Circular Economy*) in bestehende Geschäftsmodelle erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch organisatorische und strategische Anpassungen. Dabei wird deutlich, dass Digitalisierungsstrategien bei der Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft unterstützen können (Büttner et al., 2024). Eine besondere Rolle kommt dabei der Produktentwicklung zu, da hier das Potential für die Befähigung der Kreislaufwirtschaft am größten ist. Die Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in Produktentwicklungsprozessen werden in diesem Kontext als *Circular Engineering* bezeichnet (Puthanpuraykal, 2024) und stehen im Fokus dieser Arbeit. Um Potenziale des Circular Engineering gezielt nutzen zu können, bedarf es einer strukturierten Bewertung der Zirkularität auf unterschiedlichen Systemebenen. Erst nach einer solchen strukturierten Bewertung kann eine gezielte Befähigung erfolgen, um die Kreislaufwirtschaft unternehmensweit zu fördern.

Zu Umsetzung einer solchen Bewertung und Befähigung wird in dieser Arbeit ein Modell vorgestellt, welches das Circular Engineering aufgrund von Reifegraden charakterisiert. Diese Einordnung bildet die Basis zur Umsetzung gezielter Maßnahmen, die durch eine Circular Engineering Toolbox bereitgestellt werden. Mit diesen beiden Werkzeugen können die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in der Produktentwicklung systematisch und stufenweise integriert werden, um die Transformation vom linearen zu zirkulären Wirtschaftsmodell voranzutreiben.

Die Entwicklung der Methodik fußt auf den Erkenntnissen des abgeschlossenen wissenschaftlichen Forschungsprojekt DiNaPro (PLCM TU Darmstadt, 2025) und thematisch angelehnten Publikationen

wie von Winter (2025) und von Winter, Quernheim, Arnemann, Bausch, et al. (2025) sowie der Erfahrung aus Industrieprojekten der IT-Beratung :em engineering methods AG (:em engineering methods AG, 2025). Ziel ist es durch die Methodik die Kreislaufwirtschaft bei neuen Industrieprojekten weiter voranzutreiben und ganzheitlich zu etablieren. Als Rahmenwerk dieser Arbeit gilt der *Circular economy action plan* der Europäischen Kommission als Teil des *European Green Deals* (European Commission, 2020), in dem unter anderen Richtlinien wie *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* publiziert werden (European Union, 2024).

Diese Arbeit ist wie folgt strukturiert: Nach der Einleitung in Kapitel 1 folgt der Stand der Technik in Kapitel 2. Die Methodik in Kapitel 3 ist unterteilt in die Kapitel zum Circular Engineering Reifegradmodell in 3.1 und zur Circular Engineering Toolbox in 3.2. Die Methodik wird exemplarisch umgesetzt anhand eines Praxisbeispiels in Kapitel 4. Abschließend wird ein Fazit in Kapitel 5 gezogen.

2 Stand der Technik

Zur Einordnung der entwickelten Methodik ist zunächst ein Überblick über bestehende Konzepte und Bewertungsansätze der Kreislaufwirtschaft erforderlich. Ein solcher strukturierter Bewertungsansatz der Zirkularität wurde von Saidani et al. (2017) entwickelt, der eine differenzierte Betrachtung auf vier Ebenen vorsieht. Die Makroebene bezieht sich auf die Bewertung auf nationaler, regionaler oder städtischer Ebene. Auf der Mesoebene erfolgt die Betrachtung von Industrieparks oder Netzwerken, in denen industrielle Symbiosen gefördert werden. Ihr untergeordnet ist die Mikroebene, die die Bewertung einzelner Organisationen hinsichtlich ihrer zirkulären Strategien und Prozesse bezeichnet. Die produktbezogene Bewertung, findet auf der Nanoebene statt. Diese Systematik ermöglicht eine gezielte Auswahl von Indikatoren und Werkzeugen basierend auf dem Anwendungskontext.

Um zirkuläre Prinzipien konkret in Produktentwicklungsprozesse zu überführen, bietet das 9-R Framework nach Potting et al. (2017) eine hierarchische Struktur: *Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose* und *Recycle*. Diese beziehen sich auf den gesamten Produktlebenszyklus. Durch die DIN-Normenrecherche zur Kreislaufwirtschaft wurden diese Strategien verschiedenen Normen zugeordnet, die die Umsetzung gezielt unterstützen können (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2024). Diese bietet Richtlinien, um gezielt das Produktdesign zu beeinflussen, die Materialauswahl zu steuern oder neue Geschäftsmodelle zu fördern.

Diese strategischen Prinzipien bilden die Grundlage für die Entwicklung zirkulärer Produkte und Geschäftsmodelle. Zur Bewertung ihrer Umsetzung und Wirkung existieren verschiedene Indikatoren, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigen. Beispielsweise ermöglichen der *Materials Circularity Indicator* und der *Linear Flow Index* eine Bewertung der Materialflüsse und deren Rückführung in den Kreislauf (Supply Chain Sustainability School, 2021). Weitere relevante Kennzahlen wie der *Circular Economy Performance Indicator*, die *Recyclability Benefit Rate* und der *Reuse Potential Indicator* bieten differenzierte Einblicke in die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Produkten (Holly et al., 2024). Ergänzend zu Zirkularitätsindikatoren erfassen der *Carbon Footprint* und der *Water Footprint* Umweltauswirkungen entlang des Produktlebenszyklus und sind daher für eine ganzheitliche Betrachtungen der Zirkularität ebenfalls relevant (Rigamonti & Mancini, 2021). Weiterhin existieren Indikatoren, die im direkten Bezug zu den R-Strategien stehen (Muñoz et al., 2024).

Vor dem Hintergrund der Vielzahl existierender Indikatoren bietet die von Saidani et al. (2019) entwickelte Taxonomie eine strukturierte Klassifikation von 55 Indikatorensets zur Zirkularität. Diese Systematisierung unterstützt bei der Auswahl geeigneter Indikatoren entsprechend ihrer Zielsetzung und Anwendungskontexte und trägt zur Transparenz und Vergleichbarkeit der Bewertung der Zirkularität bei. Während diese Indikatoren eine fundierte Grundlage zur Bewertung zirkulärer Strategien bieten, benötigen Unternehmen ebenfalls praxisnahe Orientierungshilfen, um zirkuläre Reifegrade systematisch zu erfassen und weiterentwickeln zu können. Die Nutzung von Softwaretools ist dabei kein Neuland. So kann bereits seit 2013 das *Circular Economy Toolkit* genutzt werden, um eine Bewertung der

Kreislauffähigkeit durchzuführen (University of Cambridge, 2013). MATCHe und dessen Weiterentwicklung ready2loop bieten Self-Assessment-Ansätze für produzierende Unternehmen und bewerten die Bereitschaft zur Umsetzung zirkulärer Prinzipien (Pigosso & McAloone, 2021). Einen Ansatz zur Förderung der Nachhaltigkeit in der Systementwicklung bietet das *Circular Systems Engineering* nach David et al. (2024). Es basiert auf zwei Prinzipien: *End-to-End-Sustainability* beschreibt die ganzheitliche Betrachtung von Nachhaltigkeit entlang des Produktentstehungsprozesses und über mehrere Iterationen hinweg und *BiPartite Sustainability* die zusätzlich die Nachhaltigkeit in eingesetzten Methoden und Werkzeugen berücksichtigt. Das zugehörige Reifegradmodell beschreibt die Entwicklung von traditionellen über nachhaltige bis hin zu zirkulären Entwicklungsansätzen. Ein weiteres Modell zur Bewertung von Zirkularität auf verschiedenen Ebenen ist die *C-Metric* nach Holly et al. (2024). Die vorgestellten Bewertungsmodelle durch Reifegrade oder Indikatoren fokussieren sich auf bestimmte Ebenen wie Unternehmens- oder Produktebene. Ein Modell, dass die ingenieurtechnische Sicht in der Produktentstehung abdeckt, liegt aktuell nicht vor. Weiterhin fehlt es an praxisnahen Werkzeugen, die Unternehmen systematisch bei der Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Phasen unterstützen trotz der Vielzahl an Indikatoren und Tools. Die Verbindung von Reifegradmodellen mit modularen Werkzeugkästen stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um diese Lücke zu schließen.

3 Methodik

Die vorgestellte Methodik ist in zwei Modelle unterteilt. Im ersten Modell wird der Ist-Zustand des Circular Engineering durch ein Reifegradmodell beschrieben, das in vier Kategorien und vier Reifegrade aufgebaut ist. Alle Kategorien und Reifegrade werden im ersten Teil detailliert beschrieben. Basierend darauf kann eine eigenständige Ist-Analyse durchgeführt werden. Im Anschluss folgt die Vorstellung der Circular Engineering Toolbox, die durch gezielte Methoden und Strategien ermöglicht, eine Verbesserung der Reifegrade zu durchzuführen. Beide Modelle zusammen ergeben eine Bewertung und Befähigung von Circular Engineering.

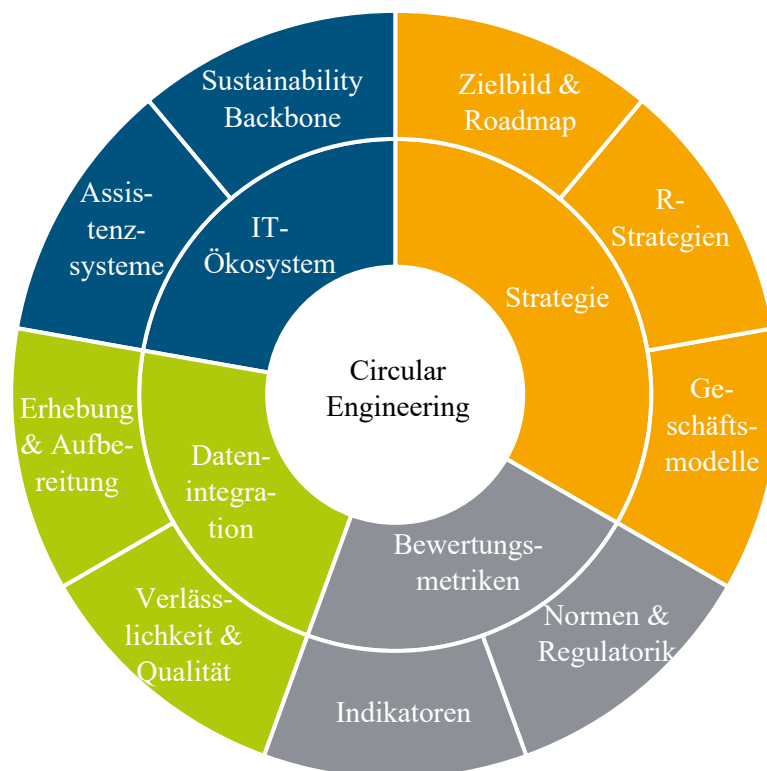


Abbildung 1: Kategorien und Subkategorien des Circular Engineernig Reifegradmodells

3.1 Circular Engineering Reifegradmodell

Das Reifegradmodell ist in die vier Kategorien Strategie, Bewertungsmetriken, Datenintegration und IT-Ökosystem unterteilt, welche in Abbildung 1 im Innenkreis durch unterschiedliche Farbzueweisung dargestellt sind. Jede Kategorie besitzt Subkategorien im Außenkreis, welche die Grundlage der Bewertung bilden. Die Bewertung erfolgt anhand von vier Stufen von null bis drei, welche die Reifegrade null (R0) – schwierig zu beurteilen / nicht existent, Reifegrad eins (R1) – Implementierung mit geringen Fähigkeiten, Reifegrad zwei (R2) – Implementierung mit mittleren Fähigkeiten und Reifegrad drei (R3) – umfangliche, ausgereifte Implementierung umfassen. Die einzelnen Subkategorien mit Reifegrad werden nachfolgend beschrieben.

Strategie

1. Zielbild & Roadmap

Definition einer langfristigen Circular Engineering Strategie mit zeitlich definierten Zielen und Meilensteinen. Vergabe von Verantwortlichkeiten und Steuerungsmechanismen zur Zielerreichung.

- R0: keine klare Strategie oder Lenkungsstruktur; Verantwortlichkeiten und Ziele sind nicht definiert oder nicht dokumentiert
- R1: initiale, vage formulierte Ziele sind vorhanden; Verantwortlichkeiten unklar und zeitliche Meilensteine nicht definiert
- R2: definierte Strategie mit zugewiesenen Rollen und messbaren Zielen
- R3: langfristige Strategie mit zugewiesenen Rollen und messbaren Zielen in Abstimmung zu einer allgemeinen Nachhaltigkeitsstrategie; regelmäßige Messung des Fortschritts

2. R-Strategien

Auswahl und Nachverfolgung geeigneter R-Strategien. Dazu zählen Refuse, Rethink, Reduce, Remanufacture, Refurbish, Repair, Reuse, Repurpose, Recycle (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2024). Je nach Wahl der R-Strategie wirken diese auf der Produkt-, Bauteil- oder Materialebene. Weiterhin können neben den eigenen Produkten auch Konkurrenzprodukte und Zukaufteile in die Strategie mit aufgenommen werden.

- R0: keine R-Strategie ausgewählt
- R1: R-Strategie für einzelne Produkte in einzelnen Produktlebensphasen exemplarisch umgesetzt (z.B. im Rahmen von Proof of Concepts, Piloten, Minimal Viable Products etc.)
- R2: R-Strategie für mehrere Produkte und verschiedenen Produktlebensphasen umgesetzt
- R3: R-Strategie für alle Produkte in allen Produktlebensphasen etabliert (Start of Design: Refuse, Reduce (by Design); Product Life: Remanufacture, Refurbish, Repair, Reuse; End-of-Life: Recycle, Repurpose)

3. Geschäftsmodelle

Integration zirkulärer Prinzipien in bestehende oder Erschließung neuer Geschäftsmodelle. Dazu zählen z. B. Product-as-a-Service, Sharing-Modelle, Rücknahme- und Wiederverkaufsprogramme sowie Modelle zur Materialrückgewinnung.

- R0: keine Berücksichtigung zirkulärer Prinzipien im Geschäftsmodell (lineares Produktions- und Konsummodell)
- R1: Pilotprojekte zu zirkulären Geschäftsmodellen; keine systematische Umsetzung oder Skalierung
- R2: Etablierung einzelner zirkulärer Geschäftsmodelle in bestimmten Produktlinien oder Märkten; Integration in Geschäftsstrategie begonnen
- R3: vollständige Integration zirkulärer Geschäftsmodelle in die Unternehmensstrategie; wirtschaftlich tragfähige Umsetzung über mehrere Produktlinien hinweg; Einbindung von Partnern und Kunden in zirkuläre Wertschöpfung

Bewertungsmetriken

4. Normen & Regulatorik

Berücksichtigung und aktive Umsetzung relevanter Normen, Standards und gesetzlicher Anforderungen zur Kreislaufwirtschaft. Dazu zählen z. B. Anforderungen aus dem EU Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020) und branchenspezifische Normen für Recyclingfähigkeit, Lebensdauerverlängerung und Sekundärrohstoffe.

- R0: keine Kenntnis oder Berücksichtigung relevanter Normen und regulatorischer Anforderungen
- R1: erste Identifikation relevanter Normen und regulatorischer Anforderungen; punktuelle Umsetzung ohne strategische Einbindung
- R2: systematische Berücksichtigung und Umsetzung relevanter Normen und regulatorischer Anforderungen in ausgewählten Bereichen; Beobachtung der Entwicklung; Verantwortlichkeit festgelegt
- R3: vollständige Integration regulatorischer Anforderungen und Normen in alle relevanten Unternehmensprozesse; aktive Mitgestaltung von Normungsprozessen und strategische Nutzung regulatorischer Entwicklungen zur Förderung zirkulärer Innovationen (z.B. aktive Beteiligung im EU Ecodesign Forum)

5. Indikatoren

Auswahl oder Entwicklung sowie Anwendung von Kennzahlen zur Bewertung zirkulärer Maßnahmen wie z.B. Materials Circularity Indicator (MCI), Linear Flow Index (LFI), Carbon Footprint, Water Footprint, Anteil Recyclingmaterial. Auch Indikatoren zur Bewertung der Kundenzufriedenheit können eine Rolle spielen.

- R0: keine Indikatoren zur Bewertung zirkulärer Maßnahmen vorhanden; zirkuläre Aktivitäten werden nicht systematisch erfasst
- R1: einzelne, nicht standardisierte Indikatoren werden punktuell verwendet; keine konsistente Datenerhebung oder Vergleichbarkeit
- R2: etablierte Indikatoren für ausgewählte zirkuläre Strategien; regelmäßige Datenerhebung und Integration in Entscheidungsprozesse
- R3: vollständiges Rahmenwerk an quantitativen und qualitativen Indikatoren zur Bewertung aller zirkulären Aktivitäten; Integration in Steuerungs- und Berichtssysteme; kontinuierliche Verbesserung durch datenbasierte Entscheidungen

Datenintegration

6. Erhebung & Aufbereitung

Systematische Erhebung und Aufbereitung relevanter Daten aus unterschiedlichen Quellen. Dies umfasst sowohl Primärdaten wie z. B. Daten aus Sensorik, Produktionsdaten und Nutzungsdaten als auch Sekundärdaten wie z. B. Simulationsdaten, Daten aus Datenbanken oder von Lieferanten, Daten aus Studien oder aus Expertenwissen.

- R0: keine Datenerhebung oder in nicht nutzbarer Form vorhanden
- R1: manuelle Erfassung einzelner, interner Daten; punktuelle Nutzung externer Datenquellen; keine systematische Aufbereitung oder Standardisierung
- R2: systematische Erfassung aus mehreren internen und externen Quellen; teilautomatisierte Aufbereitung und erste Standardisierungsansätze; Integration in zentrale Speicherung begonnen
- R3: vollständig automatisierte und standardisierte Datenerhebung und -aufbereitung; Integration in digitale Systeme; Daten sind konsistent, interoperabel und direkt nutzbar

7. Verlässlichkeit & Qualität

Beschreibung und Analyse der Güte, Konsistenz, Vertrauenswürdigkeit und Governance der erhobenen und aufbereiteten Daten. Dies umfasst Aspekte wie Datenart, -unsicherheit und -aktualität sowie Passgenauigkeit und Übertragbarkeit bei Sekundärdaten.

- R0: keine Beschreibung und Analyse vorhanden

- R1: erste Ansätze zur Prüfung der Datenqualität; vereinzelte Validierungen, aber keine systematische Beschreibung
- R2: etablierte Prozesse zur Sicherstellung von Datenqualität und Konsistenz; regelmäßige Validierung, Verifizierung und Plausibilitätsprüfung
- R3: vollständig integrierte Qualitätsmanagementprozesse für Daten; kontinuierliche Validierung, Monitoring und Verbesserung; vollständige Transparenz über Herkunft, Qualität und Aktualität der Daten

IT-Ökosystem

8. Assistenzsysteme

Digitale Assistenzsysteme in der Produktentstehung, die bei der Entscheidungsfindung Ingenieure unterstützen. Diese können stand-alone Applikationen sein oder direkt in anderer Software wie CAD integriert sein und von manueller Auswertung bis zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz reichen.

- R0: keine Assistenzsysteme im Einsatz; Entscheidungen basieren auf manueller Auswertung und Erfahrung
- R1: erste digitale Tools zur Unterstützung einzelner Prozesse; keine Integration in bestehende Systeme oder Workflows
- R2: Einsatz integrierter Assistenzsysteme in der Produktentstehung; Daten noch nicht zentral verknüpft
- R3: vollständig integrierte Assistenzsysteme in der Produktentstehung; Daten zentral verknüpft; Unterstützung der Entscheidung durch intelligente Vorschläge möglich

9. Sustainability Backbone

Technische Grundlage der IT-Architektur, die relevante Daten zentral, strukturiert und sicher speichert und bereitstellt. Dabei werden unternehmensweite Systeme (z.B. PLM- und ERP-Systeme), externer Plattformen und Datenbanken integriert.

- R0: kein Sustainability Backbone vorhanden
- R1: erste zentrale Speicher- und Verknüpfungslösungen für ausgewählte Datenarten; eingeschränkter Zugriff und geringe Integration in bestehende Systeme
- R2: etablierte zentrale Speicher- und Verknüpfungslösungen als fester Bestandteil der unternehmensweiten IT-Architektur; Integration von ausgewählten Unternehmenssystemen
- R3: vollständig integrierter, skalierbarer und sicherer Sustainability Backbone für alle relevanten Daten; rollenbasierte Berechtigungen, Interoperabilität mit externen Plattformen und Datenbanken

3.2 Circular Engineering Toolbox (Auszug)

Nach der Analyse des Ist-Zustand durch das Reifegradmodell können gezielte Verbesserungen durch die Circular Engineering Toolbox durchgeführt werden. Die Toolbox wurde nach dem Beispiel des Industrie 4.0 Werkzeugkastens erstellt und befindet sich derzeit im Aufbau (Anderl et al., 2015). Daher wird zu diesem Zeitpunkt ein Auszug anhand der Kategorie Assistenzsysteme vorgestellt. Dieser ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Circular Engineering Toolbox ist tabellarisch aufgebaut und zeigt links die Kategorie und rechts die Reifegradstufen sowie Maßnahmen zur Erreichung der nächsten Stufe. Beispielsweise kann ein Aufstieg von der Stufe *R0: Keine Nutzung* zu *R1: Tool für einzelne Prozesse* erfolgen, indem zuerst eine Prozessanalyse, dann eine Datenerhebung durchgeführt wird und anschließend die Applikationsentwicklung erfolgt. Die Reifegradstufen entsprechen dem Circular Engineering Reifegradmodell, welches im vorherigen Kapitel beschrieben ist. Ein Dreieck im Kopfbereich zeigt, dass durch Anhebung der Reifegradstufen auch Unternehmen insgesamt dem Ziel der Kreislaufwirtschaft näherkommen.

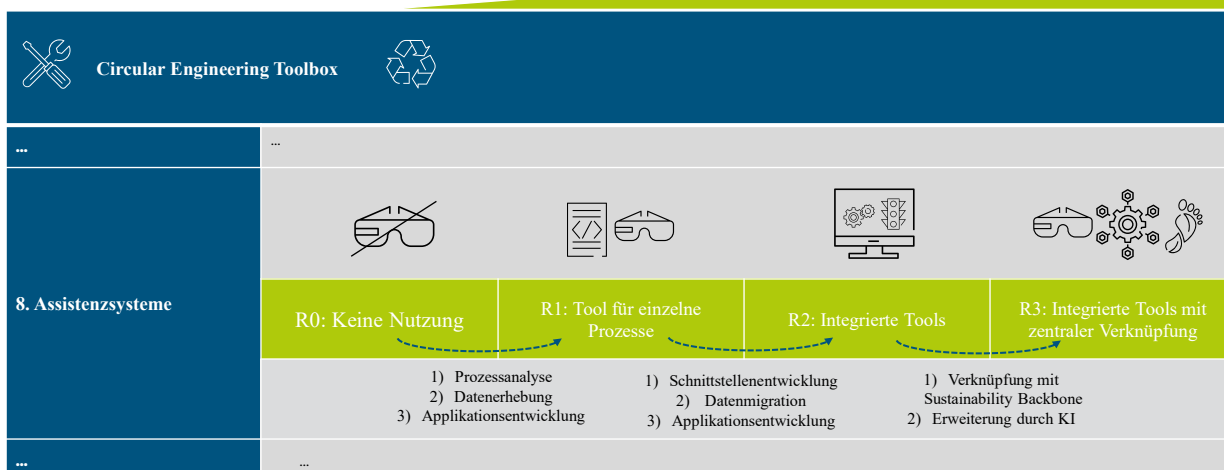


Abbildung 2: Auszug aus der Circular Engineering Toolbox

4 Exemplarische Umsetzung

In diesem Kapitel wird ein praxisnahes Beispiel vorgestellt, wie die Methodik des Circular Engineering gezielt erhöhen kann. Zunächst wird das Unternehmen hinsichtlich der neun Kategorien aus dem Reifegradmodell analysiert. Das Ergebnis ist als Ist-Analyse in der grünen Linie in Abbildung 3 zu sehen.

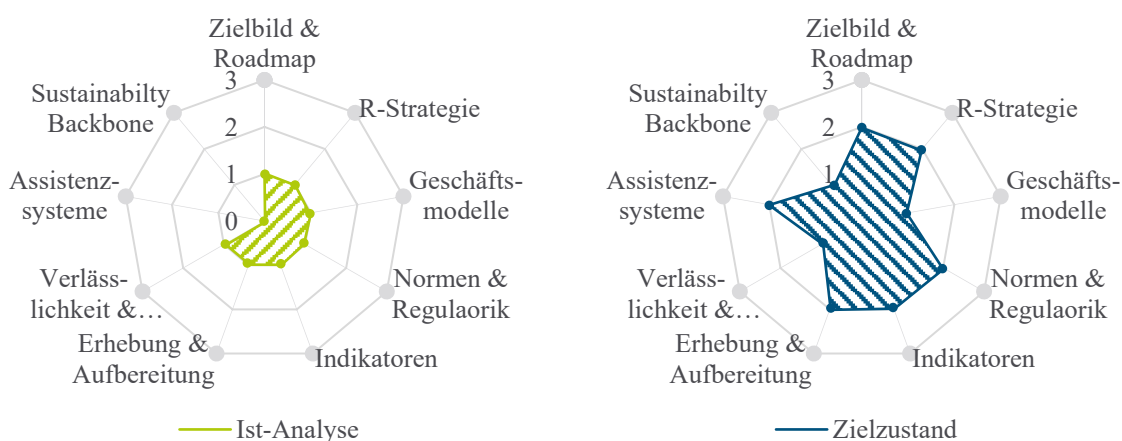


Abbildung 3: Spinnennetzdiagramm des Reifegradmodells mit Ist-Analyse (links) und Zielzustand (rechts)

Das Spinnennetzdiagramm besitzt am äußeren Rand den Reifegrad drei und im Zentrum den Reifegrad null, wie es für die Kategorie Assistenzsysteme der Fall ist. Die anderen Kategorien schneiden mit der Reifegradstufe eins ab. Nach der Ist-Analyse soll der Reifegrad der Assistenzsysteme angehoben werden, da hier das Potential am größten ist. Aus der Circular Engineering Toolbox lässt sich entnehmen, dass zunächst eine Prozessanalyse durchgeführt muss. An dieser Stelle wird exemplarisch der Prozess von Reparaturvorgängen von Extruderschweißgeräten aus dem Forschungsprojekt DiNaPro genommen, da hier eine solche Prozessanalyse stattgefunden hat und auch die Daten bereits erhoben wurden. Weitere Informationen sind dem Leitfaden des Forschungsprojekts zu entnehmen (Winter, Quernheim, Arnemann, Frick, et al., 2025). Nach der Prozessanalyse und der Datenerhebung wird eine Applikation entwickelt, die genutzt werden kann, um Reparaturprozesse übersichtlich für das

Produktentwicklungsteam darzustellen. Damit kann erreicht werden, dass Produkte gezielt optimiert werden. Die Applikation ist in Abbildung 4 zu sehen.

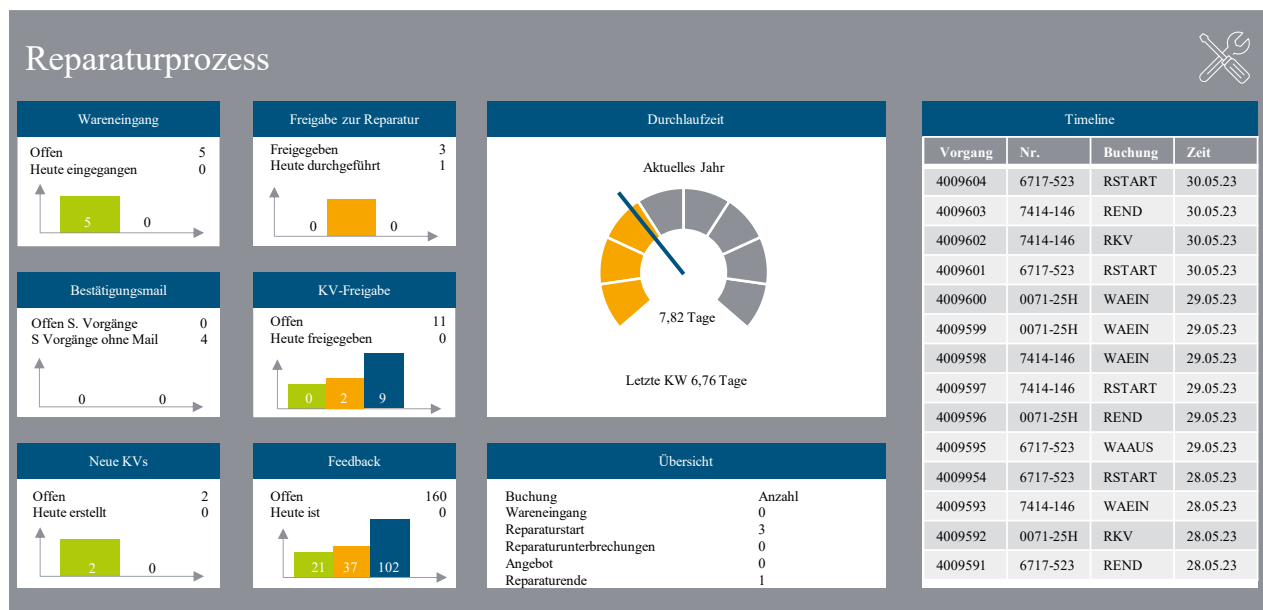


Abbildung 4: Assistenzsystem für Reparaturdaten nach Quernheim (2024)

Während der Prozessanalyse, Datenerhebung und Applikationsentwicklung werden Maßnahmen ergriffen, die den Reifegrad anderer Kategorien anheben. Im Spinnennetzdiagramm ist in der blauen Linie der Zielzustand zu sehen, welche Kategorien von der Anhebung des Reifegrads der Assistenzsysteme ebenfalls profitieren. So muss beispielsweise eine zentrale Speicher- und Verknüpfungslösung geschaffen werden, welches den Reifegrad Sustainability Backbone anhebt. Weiterhin wird der Reifegrad der R-Strategien angehoben, da hier die Strategie *Repair* für mehrere Produkte umgesetzt wird.

5 Fazit

Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung mit anschließender Befähigung von Circular Engineering, um kreislauffähige Produkte zu entwickeln und somit die Kreislaufwirtschaft in Unternehmen gezielt zu fördern. Dabei wird der Fokus auf das Engineering gelegt, da hier die Potentiale für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft am größten sind. Durch die vorgestellte Methodik des Circular Engineering Reifegradmodell kann der Ist-Zustand in vier Ober- und neun Subkategorien bewertet sowie analysiert werden. Mit dieser Grundlage lassen sich anschließend die Reifegrade gezielt durch Lösungen und Herangehensweisen heben, die in der Circular Engineering Toolbox vorhanden sind. Da sich die Toolbox im Aufbau befindet, wird exemplarisch das Beispiel der Subkategorie Assistenzsysteme vorgestellt, welche anschließend im praktischen Beispiel in Form eines Reparaturassistenten umgesetzt wird. Weitere Beispiele für Assistenzsysteme können dem Forschungsprojekt DiNaPro entnommen werden (Winter, Quernheim, Arnemann, Frick, et al., 2025). Dabei ist hervorzuheben, dass eine Prozessanalyse in jedem Fall durchgeführt werden sollte, um passgenaue Lösungen zu finden. Weitere Lösungen zur Steigerung des Reifegrads in der Oberkategorie Datenintegration (Erhebung & Aufbereitung sowie Verlässlichkeit & Qualität) können der Dissertation von Winter entnommen werden (Winter, 2025). Eine Lösung zur Steigerung des Reifegrads der Subkategorie Sustainability Backbone wird durch den Integralen Digitalen Zwilling beschrieben (Winter, Quernheim, Arnemann, Bausch, et al., 2025).

Das Reifegradmodell kann branchenweit zur Bewertung des Ist-Zustands angewendet werden. Eine Limitation liegt allerdings in der Trennschärfe der Stufen, wenn diese nicht eindeutig zugeordnet werden können. Die Weiterentwicklung des Modells umfasst weitere, tiefere Beschreibungen der Reifegrade.

Wie in der exemplarischen Umsetzung gezeigt, sind die Kategorien stark vernetzt und bedingen sich gegenseitig. Gezielte Anhebungen eines Reifegrads einer Kategorie setzt einen bestimmten Grad einer anderen Kategorie voraus. Dies betrifft vor allem die Kategorie Sustainability Backbone, da das Vorhandensein und die Abrufbarkeit von Daten eine Basis für Anwendungen wie Assistenzsystemen bilden. Insgesamt bietet die vorgestellte Methodik eine Möglichkeit, wie die Kreislaufwirtschaft stufenweise in der Produktentwicklung etabliert werden kann. Bereits vorhandene Reifegradmodelle unterscheiden zwischen einer Bewertung auf Organisationsebene (Mirco-Ebene) und auf Produktebene (Nano-Ebene). Das Circular Engineering Reifegradmodell schlägt eine Brücke zwischen den Ebenen und legt einen Schwerpunkt auf Daten und IT-Infrastruktur. Durch die Circular Engineering Toolbox werden Lösungen aufgezeigt, wie eine IT-Architektur gestaltet sein muss, um die Kreislaufwirtschaft von Produkten zu befähigen.

Im nächsten Entwicklungsschritt werden für die Circular Engineering Toolbox konkrete Maßnahmen in allen Kategorien aufgestellt und beschrieben. Im Anschluss wird das Rahmenwerk in Industrieprojekten angewendet und validiert sowie durch Iterationen optimiert. Gerne unterstützt Sie die :em AG bei Ihrem Projekt zur Umsetzung des Circular Engineering (Kontakt: sven.winter@em.ag).

6 Literaturverzeichnis

- Anderl, R., Picard, A., Wang, Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., & Bauer, J. (2015). *Leitfaden Industrie 4.0—Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. VDMA Forum Industrie 4.0. Verfügbar unter: https://www.vdma.eu/c/document_library/get_file?uuid=fd2640c9-5f0c-e3ca-7a5c-c77623967c9a&groupId=34570
- Büttner, S., Szabó-Müller, T., Wöhrmann, T., Beitz, B., & Handmann, U. (2024). *Digitalisierung als Enabler für Circular Economy in NRW Bereit für die doppelte Transformation?* (No. 03; Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung / Circular Economy News). Prosperkolleg e.V. Verfügbar unter: https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2024/08/Prospektiven_24-03_Digitalisierung-und-Circular-Economy.pdf
- David, I., Bork, D., & Kappel, G. (2024). Circular systems engineering. *Software and Systems Modeling*, 23(2), 269–283. <https://doi.org/10.1007/s10270-024-01154-4>
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2024). *CIRCULAR THINKING in Standards—Wie Normung eine Circular Economy unterstützen kann* (No. Version 3 (08/2024)). Verfügbar unter: <https://www.din.de/resource/blob/1141716/68697f6cf90d91b28c585260d730d02e/circular-thinking-in-standards-data.pdf>
- :em engineering methods AG. (2025). :em AG Website. Verfügbar unter: <https://www.em.ag/> (Zugriff: 20.08.2025)
- European Commission. (2020, März). *Circular economy action plan—European Commission*. Verfügbar unter: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products*. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>
- Holly, F., Schild, C., & Schlund, S. (2024). Development of an Assessment Model for Measuring Mechanical Engineering Companies' Circularity and Maturity Levels. *Circular Economy*, 2(1). <https://doi.org/10.55845/XUPF2540>
- Muñoz, S., Hosseini, M. R., & Crawford, R. H. (2024). Towards a holistic assessment of circular economy strategies: The 9R circularity index. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 400–412. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.015>
- Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2021). Making the transition to a Circular Economy within manufacturing companies: The development and implementation of a self-assessment readiness tool. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.05.011>
- PLCM TU Darmstadt. (2025). *DiNaPro Website*. Verfügbar unter: <https://www.dinapro.de/> (Zugriff: 20.08.2025)

- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*. PBL Publishers.
- Puthanpuraykal, K. (2024). *Circular Engineering: A New Way to Think About Engineering*. Verfügbar unter: <https://www.cigi.org/page/blogs/NDI1> (Zugriff: 20.08.2025)
- Quernheim, N. (2024). *DiNaPro: Präsentationsfolien—Digitale Assistenzsysteme zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Produktentstehung*. Verfügbar unter: <https://hub.mobilkreis.de/> (Zugriff: 21.08.2025)
- Rigamonti, L., & Mancini, E. (2021). Life cycle assessment and circularity indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10), 1937–1942. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2017). How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. *Recycling*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.3390/recycling2010006>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2018). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Stiftung 2° (with Stiftung Familienunternehmen). (2021). *Circular Economy in Familienunternehmen: Herausforderungen, Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen*. Stiftung Familienunternehmen.
- Supply Chain Sustainability School. (2021). *Circular Economy Indicators and Metrics Tool Guidance*. Verfügbar unter: <https://www.supplychainschool.co.uk/wp-content/uploads/2021/04/Circular-Economy-Indicators-and-Metrics-Tool-Guidance.pdf>
- University of Cambridge. (2013). *Circular Economy Toolkit*. Verfügbar unter: <http://www.circulareconomytoolkit.org/Toolkit.html> (Zugriff: 18.08.2025)
- Winter, S. (2025). *Integration des CO₂-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling* [Dissertation, Technische Universität Darmstadt]. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00029530>
- Winter, S., Quernheim, N., Arnemann, L., Bausch, P., Frick, N., Metternich, J., & Schleich, B. (2025). Using the Integral Digital Twin for Product Carbon Footprint calculation. *Cleaner Environmental Systems*, 16, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100258>
- Winter, S., Quernheim, N., Arnemann, L., Frick, N., Bausch, P., He, F., Sandner, S., Wendt, J., Weyand, A., Hauser, R., Frey, G., Di Giovanni, M., Wolber, J., Sobek, D., Simixhiu, A., Eisenblätter, G., Quaty, M., Henner, A., Dausenau, J., Metternich, J., Weigold, M., & Schleich, B. (2025). *Nachhaltigkeit durch Digitalisierung im Maschinenbau: Ein praxisorientierter Leitfaden* [Report]. Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00029573>