

Bachelorarbeit
im Bachelorstudiengang
Wirtschaftsingenieurwesen
an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

**Wettbewerbsvorteile durch den Digitalen Produktpass:
Digitalstrategie entlang der Triple Bottom Line**

Erstkorrektor: Prof. Dr. Marlon Füller

Verfasser: Christoph Altmayer (Matrikel-Nr.: 275687)

Thema erhalten: 09.12.2024

Arbeit abgegeben: 10.04.2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Relevanz.....	1
1.2 Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit	2
2 Theoriekontext im Nachhaltigkeits- und Regulierungsrahmen	3
2.1 Grundlagen des Digitalen Produktpasses	3
2.2 Triple Bottom Line	5
2.3 Digitalstrategie	7
2.4 Europäischer Regulatorischer Rahmen	7
2.4.1 Der Europäische Grüne Deal.....	8
2.4.2 Europäische Ökodesignverordnung für nachhaltige Produktregulation ...	8
2.4.3 Europäische Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung	10
2.5 Kreislaufwirtschaft	10
2.5.1 Ökologisch- ökonomische Betrachtung	11
2.5.2 Beitrag des DPP zur Kreislaufwirtschaft.....	16
2.5.3 Messbarkeit, Kennzahlen und Frameworks zur Kreislaufwirtschaft	17
2.6 Die Batterieverordnung und erste Umsetzungsinitiativen	22
2.6.1 Batterie-Verordnung und der Batteriepass	22
2.6.2 Konzept nach CIRPASS und Ausblick auf CIRPASS-2	25
3 Technologische Grundlagen, Herausforderungen und Schlüsseltechnologien ..	27
3.1 Technische Kernkomponenten in Datensystemen.....	27
3.2 Schutz sensibler und proprietärer Daten	31
3.3 Digitale Schlüsseltechnologien als Erfolgsfaktoren.....	32
3.3.1 Internet of Things	32

3.3.2	Blockchain Technologie	33
3.3.3	Process Mining	35
4	Anwendungsbeispiel: Process Mining im Batteriepass	36
4.1	Einführung in das Anwendungsbeispiel und methodische Herangehensweise 36	
4.2	Umsetzung und Ergebnisse des PoC	43
4.3	Strategische Erkenntnisse durch die Symbiose aus DPP & PM	50
4.4	Kritische Reflektion der Methodik für die Praxis	52
5	Geschäftsmodelle und Wettbewerbsfähigkeit durch den DPP	54
5.1	Erschließung neuer digitaler Geschäftsmodelle	54
5.2	Wettbewerbsvorteile durch den DPP	59
5.3	Skalierbarkeit und Marktannahme	61
5.4	Integration und Harmonisierung von Stakeholder-Interessen	63
5.5	Change-Management bei der Implementierung neuer Technologien	64
6	Praktische Reflektion	65
6.1	Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung	65
6.1.1	Technische Erfolgsfaktoren	65
6.1.2	Organisatorisch-strategische Erfolgsfaktoren	66
6.2	Herausforderungen in der Umsetzung	67
7	Synthese, Fazit und Ausblick	70
7.1	Synthese der Ergebnisse	70
7.2	Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	71
8	Anhangsverzeichnis	73
	Literaturverzeichnis	93

Abkürzungsverzeichnis

AAS.....	Asset Administration Shell
AI.....	Artificial Intelligence
B2B.....	Business-to-Business
BattVO	Batterieverordnung
BIP.....	Bruttoinlandsprodukt
BMWK.....	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BPM	Business Process Model
°C.....	Celsius
CE.....	Circular Economy
CEAP.....	Circular Economy Action Plan
CIRPASS.....	Collaborative Initiative for a Standards-based Digital Product Passport for Stakeholder-Specific Sharing of Product Data for a Circular Economy
CO ₂	Carbon Dioxide (Karbondioxid)
C-Rate.....	Coefficient Rate = (Lade-/Entladestrom (A) / Nennkapazität (Ah))
CSDDD	Corporate Sustainability Due Diligence Directive
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive,
CTI	Circular Transition Indicators
DaaS	Data-as-a-Service
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
E-Bikes	Electric Bike
EDC.....	Eclipse Data Space Connector
EMS.....	Execution Management System
EoL.....	End of (first) Life
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
EU.....	Europäische Union
EV.....	Electronic Vehicles
E-Warranty	Electronic Warranty
IDSA.....	International Data Spaces Association
IHK.....	Industrie- und Handelskammer
IoT	Internet of Things

IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnologie
KI.....	Künstliche Intelligenz
KMU.....	Kleine und mittelständische Unternehmen
KPI	Key Performance Indicators
kWh.....	Kilowattstunden
mA.....	Milliampere
MCI.....	Material Circularity Indicator Framework
OEM	Original Equipment Manufacturer
OLAP	Online Analytical Process
PaaS.....	Product-as-a-Service
PM.....	Process Mining
PoC	Proof of Concept
PQL	Process Query Language
QR	Quick Response
RFID.....	Radio-Frequency-Identification
SCIP	Substances of Concern in Products
SoH.....	State of Health
SQL	Structured Query Language
STaR.....	Student Thesis and Research
TBL	Triple Bottom Line
US.....	United States
WBCSD.....	World Business Council for Sustainable Development
Wh.....	Wattstunden

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Informationsflüsse der verschiedenen Akteure des Lebenszyklus innerhalb des DPP	4
Abbildung 2: Dimensionen der TBL.....	6
Abbildung 3: Funktionsmechanismus der Kreislaufwirtschaft.....	12
Abbildung 4: Butterfly Diagramm zur Kreislaufwirtschaft nach Ellen MacArthur	13
Abbildung 5: Die 5 zirkulären Geschäftsmodelle nach Accenture	15
Abbildung 6: Butterfly Diagramm der Kreislaufwirtschaft nach Ellen MacArthur in Bezug auf die Anwendungsbereiche des DPP	16
Abbildung 7: Zirkuläre Metriken entlang des Lebenszyklus	18
Abbildung 8: Summierung assoziierter Materialflüsse gemäß des MCI	19
Abbildung 9: Darstellung zirkulärer und linearer Materialflüsse	20
Abbildung 10: Zirkuläre Metriken und deren Bezugsverteilung nach Zirkularitätsreife	21
Abbildung 11: Kreislauf von Batterien im Kontext der Kreislaufwirtschaft	23
Abbildung 12: Beispielhafter Batteriepass	24
Abbildung 13: Relevanter Bezugsrahmen der Wertschöpfungskette für das CIRPASS-Projekt	25
Abbildung 14: Datenaustauschkonzept des CIRPASS-DPPs	26
Abbildung 15: Datenökosystem, Datenräume und Use Cases der Akteure im Mobilitätskontext	28
Abbildung 16: Datenökosysteme in Wechselwirkung: IDSA (oben) und GAIA-X (unten)	29
Abbildung 17: Mögliches Need-to-Know Zugriffsmodell.....	32
Abbildung 18: Materialfluss entlang der Blockchain im DPP	34
Abbildung 19: BPM-Referenzmodell des Batterie-Eventlogs	37
Abbildung 20: Dashboard Overview: Prozessabbild und KPIs	39
Abbildung 21: Erkannte Prozessabweichungen durch Process AI.....	40
Abbildung 22: Aktivitäten im Bubblediagramm in der Prozessübersicht.....	41
Abbildung 23: Unterschiedliche Prozessvarianten im Variant Explorer.....	42
Abbildung 24: PM Dashboard.....	43
Abbildung 25: Scatterplot Diagramm für die Korrelation von Schnelladevorgängen & SoH Abfall.....	44

Abbildung 26: SoH Tracker und Übersicht über Schnelladevorgänge pro Batterieeinheit	44
Abbildung 27: Liniendiagramm zur Korrelation zwischen Schnelladevorgängen und den durchschnittlichen SoH-Verlauf	45
Abbildung 28: Bubble Plot zur Korrelation zwischen des durchschnittlichen initialen Referenzstroms und Anzahl an Temperaturüberlastungen über 45°C.....	45
Abbildung 29: Bubble Plot zur Korrelation zwischen des durchschnittlichen initialen Referenzstroms und der Anzahl an C-Faktor Überläufen	46
Abbildung 30: Box-Whisker-Plot Grafik in Bezug auf die SoH-Messtationen Integration, SoH Kontrolle 1-3 und End of Life Prüfung.....	47
Abbildung 31: Kosten und CO ₂ -Emmissionen pro Transportlänge	48
Abbildung 32: Balkendiagramm zur Darstellung verschiedener Transportweglängen und dessen Häufigkeit im Eventlog	49
Abbildung 33: Bubble Plot für die Werk-Händler-Transportwege und dessen Verteilung	49
Abbildung 34: Strategische Positionierung durch PM auf DPP-Datenbasis.....	52
Abbildung 35: Zirkuläres Wirtschaftsmodell von Batterien	55
Abbildung 36: Wiederaufbereitungsprozess von gebrauchten EV-Batterien zur Verwendung als Energiespeicher.....	56
Abbildung 37: Beispiel für einen Second-Life Energiespeicher aus alten EV-Batterien	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reifephasen von zirkulären Metriken	21
Tabelle 2: Beispielkennzahlen entlang der TBL bezüglich der zirkulären Reifephase ...	22
Tabelle 3: Transportmatrix zur Darstellung der anfallenden CO ₂ -Emissionen, Transportwege und anfallenden Kosten pro vorgefallener Transportweg	48

1 Einleitung

Im Jahre 1999 entwarf Kevin Ashton das Konzept des „Internet der Dinge“ (IoT) und formulierte damit eine Vision, die bis heute nicht an Relevanz verloren hat:

“If we had computers that knew everything there was to know about things—using data they gathered without any help from us—we would be able to track and count everything, and greatly reduce waste, loss and cost. We would know when things needed replacing, repairing or recalling, and whether they were fresh or past their best” (Ashton 2009).

Mehr als zwei Jahrzehnte später stehen wir weiterhin vor zentralen Herausforderungen hinsichtlich der Erfassung, Nutzung und Weitergabe produktbezogener Daten. Mit der aktuellen Entwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen in der Europäischen Union, insbesondere im Zuge der Einführung des Europäischen Grünen Deals ergibt sich nun die Chance, Ashtons Vision im Sinne eines DPPs in die Praxis zu überführen. DPPs schaffen die Grundlage für den strukturierten Austausch von Produktlebenszyklusdaten und könnten dadurch zu einem zentralen Instrument der Kreislaufwirtschaft werden – mit dem Potenzial, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in industriellen Wertschöpfungsketten messbar zu steigern (Circularise 2025).

1.1 Hintergrund und Relevanz

Nachhaltigkeit und Digitalisierung zählen zu prägenden Treibern für Politik und Unternehmen im 21. Jahrhundert. Im Rahmen des Europäischen Grünen Deals strebt die Europäische Union an, bis zum Jahr 2050 die Klimaneutralität zu erreichen und dabei ein Wirtschaftsmodell zu etablieren, das wirtschaftliches Wachstum unabhängig vom Ressourcenverbrauch ermöglicht (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 2). Unternehmen sind daher gefordert, ökologische und soziale Verantwortung mit ökonomischem Erfolg zu vereinen – ein Ansatz, der auch als Triple Bottom Line (TBL) bezeichnet wird (Elkington 1994, S. 90–100). In diesem Kontext gewinnt der DPP an Bedeutung. Als digitaler Identitätsausweis eines Produkts speichert er relevante Informationen über dessen Zusammensetzung, Herkunft und Lebenszyklus und macht sie elektronisch abrufbar. Dadurch könnten zirkuläre Geschäftspraktiken gefördert werden, die CO₂-Emissionen reduzieren und die Materialeffizienz maximieren (Vlachos/Damvakeraki 2024, S. 6–7). Der DPP wurde erstmals 2019 im Europäischen Grünen Deal als Instrument erwähnt (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 8) und 2022 im Entwurf der Europäischen Ökodesign-Verordnung konkretisiert (Europäische Kommission, S. 38–43). Der DPP

verspricht, Transparenz über die gesamte Wertschöpfungskette zu schaffen und somit nachhaltige Entscheidungen zu fördern. Behörden, Hersteller, Händler, Verbraucher und Recycler könnten dadurch leichter Informationen etwa zu Materialien, CO₂-Fußabdruck, Reparierbarkeit oder Entsorgung eines Produktes einsehen. Dies ist nicht nur für die Erreichung ökologischer Ziele relevant, sondern birgt auch ökonomische Chancen: Durch bessere Daten über Produkte können Kreislaufwirtschafts-Strategien umgesetzt, Wettbewerbsvorteile geschaffen und neue Geschäftsmodelle entwickelt werden. Gleichzeitig steht die Industrie vor Herausforderungen – etwa beim Datenschutz, der Standardisierung oder der Integration in bestehende Prozesse (Neligan et al., S. 6–7). Vorreiterunternehmen, die diese Herausforderungen meistern, könnten strategische Wettbewerbsvorteile gegenüber linear ausgerichteter Unternehmen erlangen, indem sie nachhaltiger agieren und sich frühzeitig auf kommende Regulierungen einstellen (Neligan et al., S. 27).

1.2 Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit die zentrale Forschungsfrage: *Wie können digitale Produktpässe als Teil einer Digitalstrategie entlang der Triple Bottom Line dazu beitragen, strategische Wettbewerbsvorteile für Unternehmen zu generieren?*

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden zunächst die konzeptionellen, strategischen und regulatorischen Grundlagen des DPP im Kontext der TBL, der europäischen Nachhaltigkeitspolitik sowie der Kreislaufwirtschaft erarbeitet. Darauf aufbauend werden zentrale technologische Voraussetzungen, Datenarchitekturen sowie Schlüsseltechnologien wie IoT, Blockchain und Process Mining als Befähiger eines wirksamen DPP analysiert. Aufgrund der praktischen Relevanz wurde in Teilen der Arbeit ein Fokus auf den Batterie-DPP gesetzt. Dazu wurde eine praxisorientierte Fallstudie durchgeführt, welche die strategische Nutzbarkeit von DPP-Daten anhand eines Proof-of-Concepts (PoC) für datengetriebenes PM demonstriert. Im Anschluss werden geschäftsstrategische Potenziale, insbesondere im Hinblick auf neue Geschäftsmodelle, Wettbewerbsvorteile und Marktannahme, systematisch beleuchtet und durch organisationsbezogene Faktoren wie Stakeholder Integration und Change-Management ergänzt. Die Arbeit schließt mit einer praxisnahen Reflektion zentraler Umsetzungshürden, einer Synthese der Ergebnisse sowie einem integrativen Fazit und Ausblick auf zukünftige Entwicklungspfade des DPP als strategisches Instrument nachhaltiger Wertschöpfung.

2 Theoriekontext im Nachhaltigkeits- und Regulierungsrahmen

Im Folgenden werden die konzeptionellen, strategischen und regulatorischen Grundlagen des DPP dargelegt. Es erläutert dessen Funktion im Kontext der TBL, gibt einen strategischen Bezugsrahmen und beschreibt die Rolle zentraler EU-Regulierungen sowie der Kreislaufwirtschaft als struktureller Rahmen und gibt einen praktischen Bezug aktueller Initiativen.

2.1 Grundlagen des Digitalen Produktpasses

Ein DPP ist eine strukturierte Sammlung produktbezogener Daten mit einem vordefinierten Umfang sowie abgestimmten Regeln zu Datenmanagement und Zugriffsrechten. Die Informationen werden einem physischen Produkt über einen eindeutigen Identifikator zugeordnet, sind über elektronische Datenträger zugänglich und bilden alle relevanten Nachhaltigkeitsinformationen entlang des gesamten Produktlebenszyklus ab (CIRPASS 2022). Hierbei werden Daten aus allen Phasen (Entwurf, Herstellung, Nutzung, Entsorgung und Wiederaufbereitung) gesammelt und für unterschiedliche Zwecke entlang dieser Phasen bereitgestellt (Götz, S. 9). Dabei betont die politisch geförderte Umsetzungsinitiative CIRPASS dazu explizit, dass der DPP nicht als rein digitale Datensammlung zu verstehen ist, sondern vielmehr als ein Instrument zur gezielten und strukturierten Bereitstellung nachhaltigkeitsrelevanter Produktinformationen dient – als Informationssystem für die Kreislaufwirtschaft (Bernier 2023, S. 8–9). Der Zugriff auf die Daten des DPP soll über maschinenlesbare Identifikatoren wie QR-Codes (Quick Response Codes) anderen Datenträgern, die direkt mit dem physischen Produkt verknüpft sind eine eindeutige Referenzierung ermöglichen (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 10). Nach aktuellem Stand wird vermutet, dass der DPP produktbezogene Informationen zu Materialzusammensetzungen, Informationen über gefährliche Stoffe, Anleitungen zur Demontage und Recyclingfähigkeit, Details zu Ersatzteilen sowie den CO₂-Fußabdruck und weitere Auswirkungen der TBL-Dimensionen beinhalten soll – diese finalen Inhalte für produktgruppenspezifische Konkretisierungen sind jedoch aktuell noch nicht final festgelegt und werden in weiteren delegierten Rechtsakten festgelegt (vgl. Art. 4 ESPR), wie beispielsweise der Batterieverordnung (BattVO) (Stretton 2024).

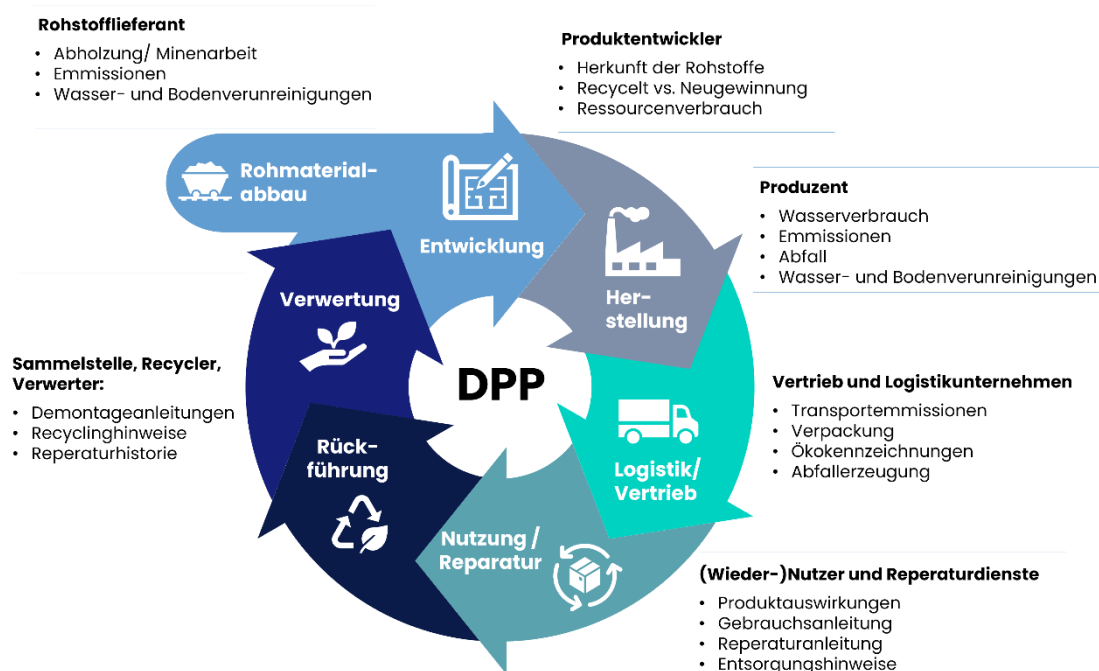


Abbildung 1: Informationsflüsse der verschiedenen Akteure des Lebenszyklus innerhalb des DPP (eigene Abbildung nach Sales (2025))

Die Daten, die im DPP hinterlegt werden, stammen aus verschiedensten Quellen entlang der Wertschöpfungskette (Barwasser et al., S. 10). Zu den aktiven Akteuren zählen Materiallieferanten, Hersteller von Komponenten und Produkten, Handelspartner, Endverbraucher sowie Recycler und Wiederaufbereiter (Jensen et al. 2023, S. 243–245). Diese Akteure tragen nicht nur relevante Daten bei, sondern greifen im Verlauf der Produktlebenszyklen auch auf diese Daten zurück, wodurch ein wechselwirkender Informationsfluss entsteht (Jensen et al. 2023, S. 247). Gemäß dem DPP-Datenökosystemanbieter Catena-X soll der DPP mindestens zwei grundlegende Funktionen erfüllen: Die klare Identifikation und Beschreibung von Produkten und deren ökologisch relevanten Eigenschaften, sowie die standardisierte Verwaltung von Produktdaten entlang der gesamten Wertschöpfungskette für Unternehmen und Verbraucher (Massoth, S. 14). Durch die strukturierte Bereitstellung verlässlicher Daten zu produktspezifischen Nachhaltigkeitsmerkmalen verfolgt der DPP nach Angaben der Europäische Kommission (30.03.2022) vier übergeordnete Zielsetzungen:

- (1) Die Verbesserung der Transparenz über ökologische Auswirkungen im Lebenszyklus
- (2) Die Förderung nachhaltiger Konsum- und Kaufentscheidungen
- (3) Die Unterstützung von nachhaltigem Produktdesign, Wiederverwendung, Reparatur und Recycling

(4) Die Ermöglichung einer effizienteren regulatorischen Überwachung durch öffentliche Stellen

Die Potenziale des DPP liegen vor allem in der Steigerung der ökologischen Transparenz entlang der Lieferkette, der Erhöhung von Recyclingquoten und der Verlängerung der Produktlebensdauer und besserer Verfügbarkeit der Informationen (Barwasser et al., S. 22). Somit fungiert der DPP als wichtiger Hebel für die Kreislaufwirtschaft, indem er dadurch die Umsetzung von Kreislaufstrategien wie Wiederverwendung, Aufarbeitung und Recycling entscheidend erleichtert (Götz et al. 2022, S. 11–12). Während der Produktentwicklung und der gesamten Lebensdauer lassen sich gezielte Maßnahmen ergreifen, um die Recyclingfähigkeit, Reparierbarkeit und den effizienten Einsatz von Ressourcen zu optimieren. Zudem profitieren Recyclingunternehmen von detaillierten Materialdaten, die eine zielgerichtete Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe ermöglichen. Verbraucher wiederum erhalten durch einfache Zugänge zu nachhaltigkeitsrelevanten Produktmerkmalen, wodurch bewusstere Kaufentscheidungen möglich werden (Zhang/Seuring 2024, S. 2515–2516). Zudem könnte der DPP die Erfüllung regulatorischer Vorgaben unterstützen und erleichtern, wie beispielsweise die Berichterstattung nach der Verordnung zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, indem er den direkten Zugriff auf umwelt- und produktspezifische Informationen ermöglicht, welche dort gefordert werden (Europäische Kommission 25.02.2025, S. 11). Neben ökologischen und regulatorischen Vorteilen könnte der DPP auch potenzielle strategische Potenziale bieten. Unternehmen können die genannten Potenziale zu ihren Gunsten einsetzen und durch systematische Nutzung und Analyse der DPP-Daten signifikante Wettbewerbsvorteile generieren, indem sie denkbar dessen Produktqualität verbessern, Kundentransparenz erhöhen und sich aktiv an der Gestaltung nachhaltiger Märkte beteiligen. Diese strategischen Potenziale werden im Verlauf dieser Arbeit weitergehend reflektiert und praxisnah dargestellt.

2.2 Triple Bottom Line

Die TBL ist ein erweitertes wirtschaftliches Bewertungsmodell, das über die traditionelle finanzielle Ergebnisrechnung hinausgeht und unternehmerische Leistungen anhand dreier Dimensionen beurteilt: Ökonomisch (Profit), ökologisch (Planet) und sozial (People), was in Abbildung 2 genauer dargestellt wird.

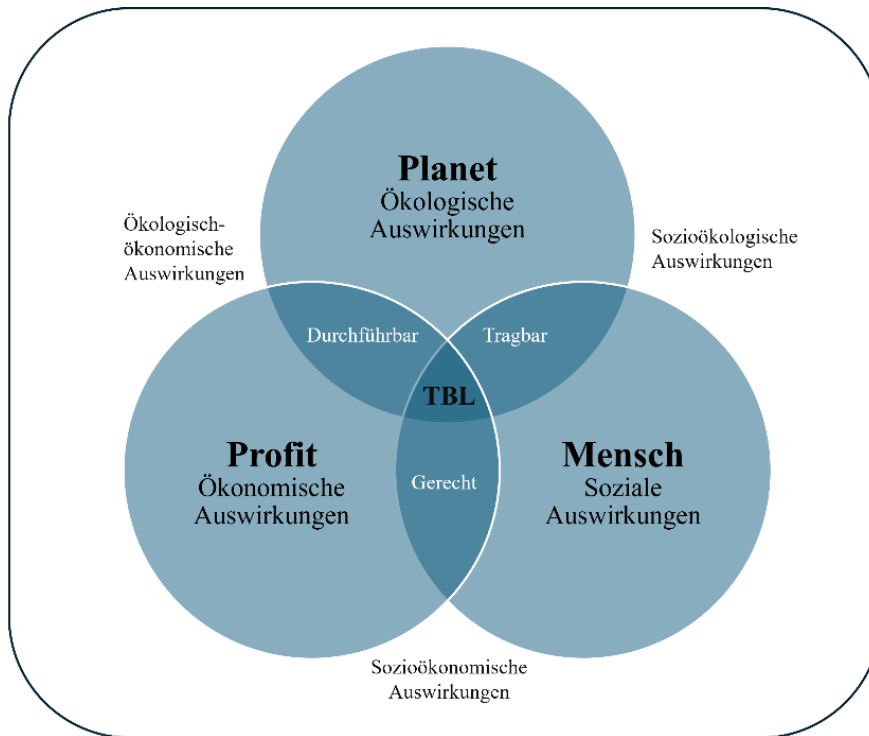


Abbildung 2: Dimensionen der TBL (eigene Darstellung nach Jociute (2024))

Dieses Konzept wurde ursprünglich in den 1990er-Jahren von John Elkington entwickelt, um unternehmerische Nachhaltigkeit messbar zu machen und Unternehmen zu befähigen, ihre ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen systematisch zu erfassen und ganzheitlich zu steuern (Elkington 1994, S. 90–100). Andrew Savitz beschreibt die TBL zudem als Instrument, welches „die Auswirkungen der Aktivitäten einer Organisation auf die Welt misst – einschließlich ihrer Rentabilität sowie ihres sozialen und ökologischen Kapitals“. Dabei ergeben sich aus jeweils einer Schnittstelle zweier Komponenten zusätzliche Erfolgsbedingungen. Insgesamt soll die TBL damit durchführbar, tragbar und gerecht sein (Savitz 2013, S. 5). Während die TBL ursprünglich primär als analytisches Bewertungsinstrument konzipiert wurde, hat sie sich mittlerweile sowohl in Wirtschaft als auch Wissenschaft gleichermaßen zu einem normativen Leitbild weiterentwickelt. Heute dient sie nicht nur der Bewertung, sondern zunehmend als Strukturierungshilfe und strategisches Orientierungsmodell zur Integration nachhaltigkeitsorientierter Zielgrößen in die Unternehmensstrategie. Aufgrund dieser Flexibilität lässt sich die TBL gleichermaßen auf private Unternehmen, Non-Profit-Organisationen und öffentliche Institutionen anwenden (Slaper 2011, S. 4–7). In der vorliegenden Arbeit bildet die TBL das übergreifende Orientierungsmodell für die Analyse, wie der DPP als strategisches Instrument zur gleichzeitigen Steigerung von ökonomischem Erfolg, ökologischer

Ressourceneffizienz und sozialer Transparenz beitragen kann. Des Weiteren bietet sie die Bewertungsgrundlage für die Operationalisierung von Nachhaltigkeitsframeworks.

2.3 Digitalstrategie

Eine Digitalstrategie beschreibt die ganzheitliche, strategisch ausgerichtete Steuerung unternehmerischer Digitalisierungsaktivitäten mit dem Ziel, den digitalen Wandel proaktiv zu antizipieren und mitzugestalten. Eine Digitalstrategie verfolgt das übergeordnete Ziel, durch Digitalisierung Wettbewerbsvorteile zu sichern, neu zu schaffen oder neue Potenziale durch digitale Geschäftsmodelle zu erschließen (Bharadwaj et al. 2013, S. 471–475). Die Entwicklung einer Digitalstrategie erfolgt auf Basis eines systematischen Vorgehensmodells, das die Anwendung digitaler Technologien und Methoden auf Produkte, Prozesse und Geschäftsmodelle umfasst. Dabei zielt sie auf die Erhöhung des digitalen Reifegrads einer Organisation und die Schaffung nachhaltiger Wertbeiträge (Schallmo/Williams/Lohse 2019, S. 14–16). Kernbestandteile einer Digitalstrategie umfassen eine übergeordnete digitale Zielvorstellung, eine darauf abgestimmte Mission, konkrete strategische Zielsetzungen, wesentliche Erfolgsfaktoren sowie normative Leitwerte, aus denen spezifische Initiativen und Handlungsschritte abgeleitet werden. Diese Elemente werden konsistent im Kontext der digitalen Transformation betrachtet und in die übergeordnete strategische Unternehmensausrichtung integriert (Schallmo/Williams/Lohse 2019, S. 4–5). Die Ausgestaltung einer digitalen Geschäftsstrategie umfasst die Entwicklung datengetriebener Produkte und Dienstleistungen, deren Interoperabilität mit komplementären Plattformen sowie deren marktgerechte Bereitstellung durch die gezielte Nutzung digitaler Ressourcen (Bharadwaj et al. 2013, S. 474). Der DPP ist in diesem Zusammenhang als Bestandteil und Instrument einer Digitalstrategie zu verstehen, durch dessen Einsatz neue Wertschöpfungspotenziale erschließt und gleichzeitig regulatorische Sicherheit bietet. Er ermöglicht es Unternehmen, ihre Geschäftsmodelle datenbasiert und zirkulär weiterzuentwickeln und konkrete Vorteile aus einzelnen Maßnahmen abzuleiten (Barwasser et al., S. 21). Besonders wertvoll ist hier die strategische Rolle des DPPs in der Lieferkette – dort können damit gezielt Datenlücken geschlossen werden, um Risiken zu minimieren, Prozesse zu optimieren und Vertrauen gegenüber Kunden aufzubauen, was elementare strategische Aspekte vieler Unternehmen sind (Arorian 2024).

2.4 Europäischer Regulatorischer Rahmen

Der Aufbau des DPP ist eng mit Regulationen und Strategien auf EU-Ebene verknüpft, die auf eine nachhaltige Transformation von Wirtschaft und Konsum abzielen. Im

Folgenden werden die wichtigsten Initiativen vorgestellt, die den größten Einfluss auf die Gestaltung und Relevanz für den DPP haben.

2.4.1 Der Europäische Grüne Deal

Der Europäische Grüne Deal (EU Green Deal) bildet seit Ende 2019 den übergeordneten Fahrplan der EU für eine nachhaltige Wirtschaft und ist der Beitrag auf EU-Ebene zum Pariser Klimaabkommen. Durch das Ziel, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, definiert der EU Green Deal Leitlinien für eine moderne, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft. Der EU Green Deal zielt auf eine vollständige Reduktion von Netto-Treibhausgasemissionen, der Entkoppelung von Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch sowie der Sicherstellung eines sozial ausgewogenen Wandels, bei dem alle gesellschaftlichen Gruppen mitgenommen werden („Niemanden zurücklassen“) (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 1–4). Ein Kernbestandteil des Green Deals ist die Transition von einer linearen Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Dabei ist die Förderung des Übergangs von linearen Wertschöpfungsketten auf zirkuläre (Teil)modelle geplant, welche nachhaltige Produkte zur Norm zu machen soll und Produktinformationen besser zugänglich macht, um informierte Entscheidungen für Konsumenten und Wirtschaftsakteuren zu ermöglichen (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 6–7). Hier wurde der DPP erstmals offiziell als mögliche Lösung benannt, um die Digitalisierung von Produktinformationen für nachhaltige Produkte zu nutzen (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 8). Der Green Deal gilt damit als politischer Impulsgeber des DPP, der schließlich zur Entwicklung konkreter Rechtsvorschriften wie der Ökodesign-Verordnung mit DPP-Pflicht führte (Europäische Kommission 2025). Diese strukturellen Grundpfeiler wurden im Circular Economy Action Plan (CEAP) der Europäischen Union, welcher aus dem EU Green Deal abgeleitet wurde, weiter konkretisiert und beschrieben (Europäische Kommission 28.02.2025).

2.4.2 Europäische Ökodesignverordnung für nachhaltige Produktregulation

Das Vorhaben der Europäische Ökodesignrichtlinie für nachhaltige Produktregulation, auch Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) genannt, ist ein zentrales regulatorisches Vorhaben aus dem Green Deal, das nachhaltige Produkte EU-weit zum Standard machen soll und wurde am 18. Juli 2024 veröffentlicht (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 1). Die ESPR wurde von einer für EU-Länder nicht verpflichtenden Richtlinie zu einer Verordnung novelliert und in Hinblick auf die Zirkularität und Umfang der Produktgruppen erweitert. Sie erweitert die bisherige Ökodesign-Richtlinie

(2009/125/EC), die nur energieverbrauchsrelevante Produkte erfasste, auf langfristig nahezu alle physischen Produkte. Die ESPR schafft einen Rahmen, um mittels delegierter Rechtsakte produktspezifische Ökodesign-Anforderungen festzulegen und inkludiert damit Attribute der Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit bis Recyclingfähigkeit und Rezyklatanteil. Neben solchen Leistungsanforderungen wurden auch Informationspflichten eingeführt (Neligan et al., S. 6). Angestrebt wird eine Etablierung nachhaltiger Produkte als Standard, indem Transparenz über Nachhaltigkeitsaspekte entlang der gesamten Lieferkette geschaffen wird. Ergänzend sollen gezielte Anreize zur Entwicklung ressourcenschonender Produkt- und Geschäftsmodelle die Langlebigkeit und Zirkularität fördern (Neligan et al., S. 6–7). Die ESPR sieht als erste Verordnung explizit die Einführung eines DPP vor, um Nachhaltigkeitsinformationen für Produkte bereitzustellen. Produkte dürfen somit erst dann in den Markt eingeführt oder genutzt werden, wenn ein zugehöriger DPP vorliegt, der die geforderten Informationen bereitstellt. Dabei soll der DPP innerhalb eines realistisch-durchführbaren EU-weiten Produktpass-Registers geführt werden und über die gesamte Lieferkette abrufbar sein (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 10–11). Folgende Kernanforderungen an das Datenprofil eines DPPs sind im Artikel 10 „Anforderungen an den digitalen Produktpass“ in der ESPR (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 39–40) in Verbindung mit Anhang III (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 82) festgelegt:

- Eindeutiger Produkt-Identifikator
- Übereinstimmung mit globalen Datenstandards
- Strukturierte, maschinenlesbare Daten
- Umfassende, transparente Produktinformationen
- Kontrollierter Zugang zu Informationen
- Offene, interoperable Datenübertragung
- Datenschutz: Keine Speicherung personenbezogener Daten ohne Einwilligung
- Verpflichtung zur Bereitstellung an Händler und Plattformen
- Pflicht zur Sicherungskopie bei unabhängigen DPP-Dienstleistern

Diese Anforderungen setzen einen ersten grundlegenden Rahmen für die konkrete Ausgestaltung des DPPs, welches Unternehmen dabei helfen kann, sich auf die vorbereitenden Maßnahmen einzustellen, solange keine spezifischen Bedarfe an den Datenumfang konkretisiert wurden.

2.4.3 Europäische Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung

Die Europäische Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, auch Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) genannt, ergänzt den regulatorischen Kontext, indem sie Nachhaltigkeitsanforderungen auf Unternehmensebene definiert. Seit 2022 in Kraft, verpflichtet sie ab dem Geschäftsjahr 2024 rund 50.000 Unternehmen EU-weit, ihre ökologischen und sozialen Auswirkungen entlang der Lieferkette transparent offenzulegen (Schmidt/Farbstein 2025). Die erweiterten Berichtspflichten umfassen unter anderem Treibhausgas-Emissionen, Energie- und Ressourcenverbrauch sowie soziale Kriterien wie Arbeitsbedingungen und Menschenrechtsstandards (Europäische Kommission 12/2022, S. 37–39). Die CSRD erwähnt zudem eine standardisierte Messung gemäß der Richtlinie 2013/34/EU, wodurch Unternehmen verstärkt auf konsistente, qualitativ hochwertige Daten entlang ihrer Wertschöpfungsketten angewiesen sind, was die Vergleichbarkeit und Interoperabilität erhöht (Europäische Kommission 12/2022, S. 18).

Zwar wird der DPP in der CSRD nicht explizit erwähnt und liefert Daten auf Produkt- und nicht Unternehmensebene innerhalb anderer Systemgrenzen, bietet jedoch eine operative Lösung, um die geforderte Transparenz, Rückverfolgbarkeit und regulatorische Konformität effizient sicherzustellen, indem der DPP als konsolidierbare Datengrundlage für eine gesamtheitliche Unternehmensberichterstattung produzierender Unternehmen darstellen kann. Ergänzend zu der CSRD ist die Europäische Lieferkettenrichtlinie, auch Corporate Sustainability Due Diligence Directive (CSDDD) in den Kontext des DPP mit der CSRD relevant. Während die CSRD auf die transparente Berichterstattung über Nachhaltigkeitsaspekte abzielt, verpflichtet die CSDDD Unternehmen zur aktiven Umsetzung dieser Aspekte in Bezug auf menschenrechtliche und umweltbezogene Sorgfaltspflichten entlang ihrer gesamten Wertschöpfungskette (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMUV) 2025). Der DPP kann somit als strategisches Instrument dienen, das Unternehmen dabei unterstützt, regulatorische Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig nachhaltigkeitsbezogene Risiken und Chancen systematisch zu identifizieren und zu managen (Picopublish 2025).

2.5 Kreislaufwirtschaft

Seit Jahrzehnten überschreitet die Menschheit fortlaufend mehrere planetare Belastungsgrenzen und verstärkt damit Jahr für Jahr die ökologischen Risiken für das Erdsystem. Jüngste Analysen zeigen, dass bereits fünf von neun definierten Umweltgrenzwerten dauerhaft und teils irreversibel überschritten worden sind, darunter die Stabilität des Klimas,

der Verlust biologischer Vielfalt und die Störung globaler Stoffkreisläufe (Richardson et al. 2023, 4) und erfordert damit neue Ansätze, um dieser Problematik entgegenzuwirken. Nachfolgend wird die Kreislaufwirtschaft aus ökonomischer und ökologischer Perspektive betrachtet, die Rolle des DPP zur Ressourceneffizienz erläutert und einen Überblick über die Messbarkeit von Zirkularität gegeben.

2.5.1 Ökologisch- ökonomische Betrachtung

Die Idee der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) hat seit den späten 1970er Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Bereits 1966 charakterisierte Kenneth E. Boulding in seiner Veröffentlichung zur Forschung alternativer Ansätze zur linearen Wirtschaft „The Economics of the Coming Spaceship Earth“ die Erde als ein geschlossenes, zirkuläres System mit begrenzter Assimilationsfähigkeit. Dieses System agiert wie ein isoliertes Raumschiff mit begrenzten Ressourcen, sowohl für die Entnahme von Rohstoffen als auch für die Aufnahme von Schadstoffen. Daraus leitete er die Notwendigkeit ab, über zirkuläre Wirtschaftsformen wirtschaftliches Handeln stärker in den Einklang mit ökologischen Dimensionen zu bringen (Boulding/Jarrett, S. 3–5). Die Kreislaufwirtschaft wird nach aktuell gängigster Definition der Ellen MacArthur Foundation als eine industrielle Wirtschaft betrachtet, die von ihrer Absicht und Gestaltung her restaurativ oder regenerativ ist (MacArthur 2013, S. 7–8). Dieses Modell basiert auf der Schließung von Stoffkreisläufen und eine regenerative Nutzung von Ressourcen. Im Gegensatz zur linearen Wirtschaft, bei der Rohstoffe entnommen, in Produkte umgewandelt und nach Gebrauch entsorgt werden, strebt die Kreislaufwirtschaft an, Produkte, Komponenten und Materialien so lange wie möglich im Nutzungskreislauf zu halten. Dies wird durch Maßnahmen wie die Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Reparatur und Recycling realisiert. Angestrebt wird eine deutliche Senkung des Materialverbrauchs und der Abfallentstehung, sowie eine Reduktion der Abhängigkeit von kritischen Primärrohstoffen (MacArthur 2013, S. 22). Eine grundsätzliche und vereinfachte Abbildung der Kreislaufwirtschaft visualisiert, wie diese als geschlossenes System nicht nur die Lücke für wiederverwendbare Rohstoffe schließt („Use again“), sondern bereits in der Produktgestaltung und Nutzung ansetzt, um den Rohstoffeinsatz zu minimieren („Use less“) und die Produktlebensdauer zu erweitern („Use longer“) (The Circle Economy 2025, S. 20).

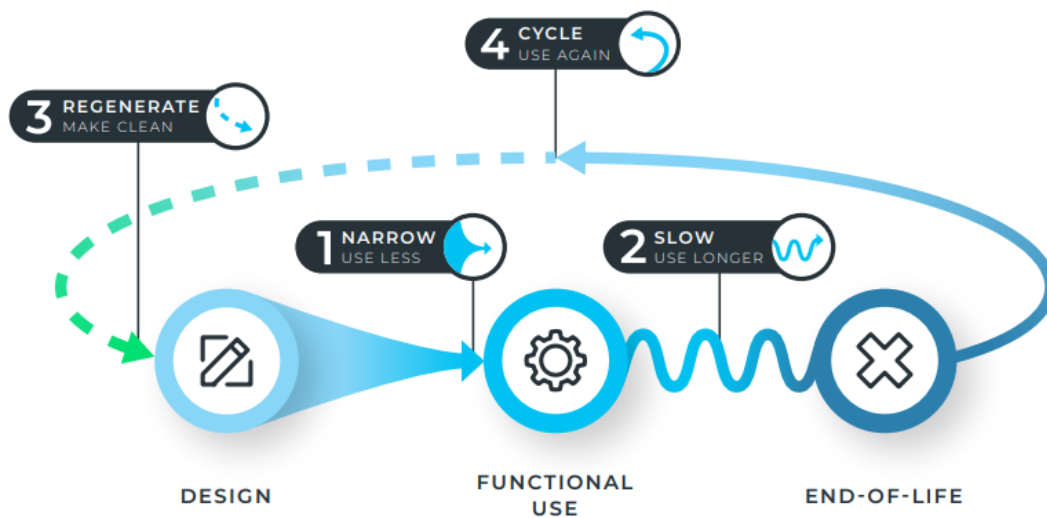


Abbildung 3: Funktionsmechanismus der Kreislaufwirtschaft (The Circle Economy 2025, S. 20)

Die aktuell anhaltende Übernutzung natürlicher Lebensgrundlagen macht eine fundamentale Neuausrichtung wirtschaftlicher Systeme im Sinne der Kreislaufwirtschaft unausweichlich. Obwohl die Kreislaufwirtschaft in den letzten fünf Jahren eine Verfünfachung an globalem Diskussionsvolumen erfahren und damit an Relevanz gewonnen hat, ist die globale wirtschaftliche Zirkularität in diesem Zeitraum von 9,1% auf 7,3% gesunken. Gleichzeitig entfielen auf diesen Zeitraum 28 % des gesamten Konsumgüterverbrauchs seit dem Jahr 1900 (The Circle Economy 2025, S. 8). Die Europäische Union betont in ihrem CEAP als wesentlicher Bestandteil des EU Green Deals, dass eine höhere Zirkularität wesentlich für den Klimaschutz ist und zugleich die Umweltbelastungen durch Abfälle verringert und sollte sich bemühen, den Anteil an zirkulären Materialien in den nächsten zehn Jahren (seit 2020) zu verdoppeln (Europäische Kommission 28.02.2025, S. 2). Der gegenwärtige Status Quo zeigt auch in der EU weitere Verbesserungspotentiale: Im Jahr 2021 lag der Anteil der wiederverwendeten bzw. recycelten Materialien am Gesamtmaterialeinsatz in der EU bei rund 12% (Deutschland 13%) (Neligan et al., S. 5).

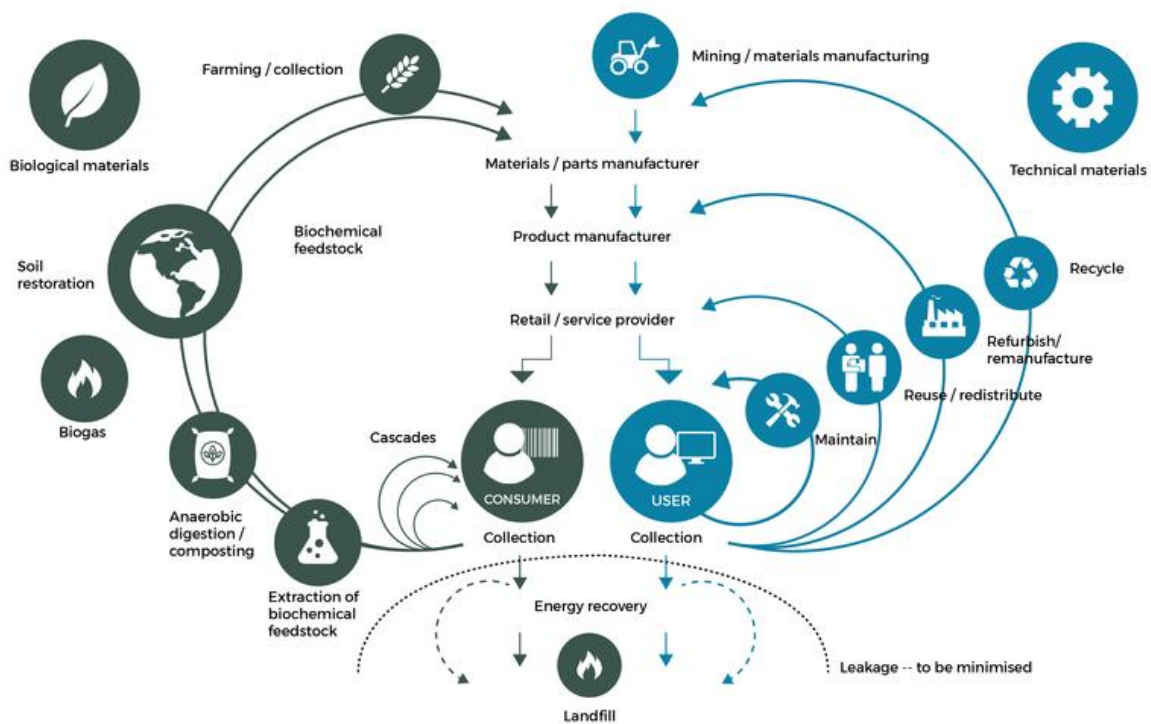


Abbildung 4: Butterfly Diagramm zur Kreislaufwirtschaft nach Ellen MacArthur (MacArthur 2013, S. 25)

Ausführlicher visualisiert wird die Kreislaufwirtschaft etwa im Butterfly Diagramm der Ellen MacArthur Foundation, welches die möglichen Materialkreisläufe darstellt und zeigt, wie Materialien und Produkte in einer zirkulären Wirtschaft rückgeführt werden können. Die Abbildung unterscheidet dabei zwischen biologischen Kreisläufen auf der linken Seite und technischen Kreisläufen auf der rechten Seite. Letztere umfassen Strategien wie Wiederverwendung, Reparatur und Remanufacturing, während erstere auf Rückführung in natürliche Systeme abzielen (MacArthur 2013, S. 25).

Neben den Umweltaspekten birgt die Kreislaufwirtschaft auch wirtschaftliche Chancen und Potentiale mit sich, die in Harmonie mit umweltschützenden Zielen sind. Durch effizientere Ressourcennutzung können Unternehmen Kosten sparen. Damit sind Einsparung von Rohmaterialkosten durch Einsatz von Rezyklaten oder durch längere Nutzungsdauer von Produkten denkbar. Die Integration kreislaforientierter Prinzipien in Forschung und Entwicklung könnte somit langlebigere und qualitativ hochwertigere Produkte fördern. Studien der Europäischen Umweltagentur zeigen, dass Maßnahmen in den Bereichen Recycling, Ökodesign und Abfallvermeidung das physische Materialvolumen in der EU aktuell um 6 % bis 12 % reduzieren könnte (Reichel/Schoenmakere/Gillabel 2016, S. 12). Dies ließe sich bis 2030 auf bis zu 24% erhöhen, sofern innovative Technologien und Verbesserungen im zirkulären Ressourcenmanagement genutzt werden

(Meyer 2011, S. 79). Demgegenüber verdeutlichen globale Analysen, dass zirkuläre Wirtschaftsmodelle in langlebigen Güterbranchen jährliche Materialkosteneinsparungen zwischen 340 und 630 Milliarden US-Dollar ermöglichen könnten. Diese monetären Einsparungen entsprechen einer Reduktion der aktuellen globalen Rohstoffausgaben um etwa 12–23 % (MacArthur 2013, S. 9). Gleichzeitig können neue Märkte und Geschäftsmodelle entstehen. Reparaturdienstleistungen, Refurbishing von Produkten, Rückkauf-Systeme oder Sharing- und Leasingmodelle sind Wachstumsfelder in einer zirkulären Wirtschaft und reflektieren das wirtschaftliche Potential. Schätzungen aus 2015 zufolge könnte die Umstellung auf eine zirkuläre Wirtschaft bis 2030 einen zusätzlichen wirtschaftlichen Nutzen von 4,5 Billionen US-Dollar generieren (Lacey/Rutqvist 2015) und das europäische BIP-Wachstum bis 2030 um 7% sowie das verfügbare Einkommen um 11% erhöhen könnten (MacArthur, S. 14). Eine aktuelle Studie aus 2021 zeigt zudem auf, dass 12 Milliarden Euro pro Jahr an Bruttowertschöpfung bis 2030 durch zirkuläre Wirtschaftspraktiken im Hinblick auf Ressourceneffizienz erreicht werden können (Deloitte 2025). Eine systematische Kategorisierung zirkulärer Geschäftsmodelle der IT-Beratung Accenture erläutert die fünf übergeordneten zirkulären Wertschöpfungspfade von Zirkulären Wertschöpfungsketten, der Aufarbeitung & Recycling, Produktlebensdauererlängerung, Sharing-Plattformen und Product-as-a-Service-Modelle (Lacey/Rutqvist 2015). Die folgende Abbildung 5 verdeutlicht diese Ansätze entlang des Produktlebenszyklus.

The five circular business models

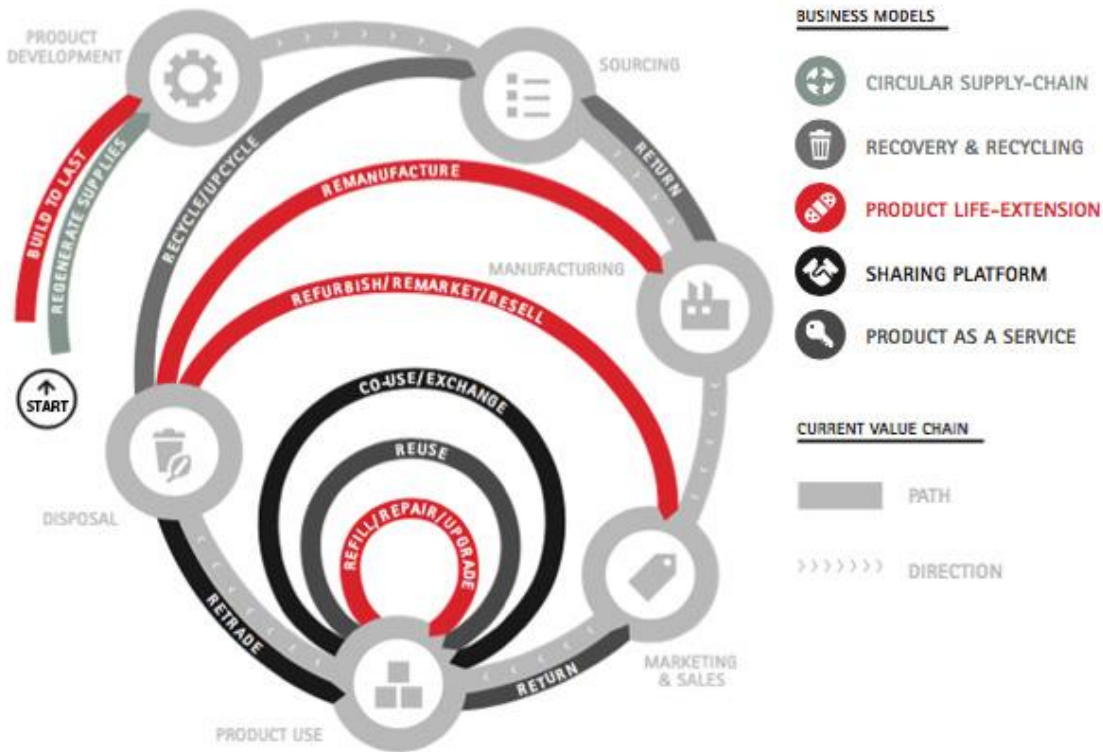


Abbildung 5: Die 5 zirkulären Geschäftsmodelle nach Accenture (Lacey/Rutqvist 2015)

Die EU argumentiert, dass die Kreislaufwirtschaft die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft steigert, indem sie sowohl Materialkosten durch Ressourceneffizienz senkt als auch die Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten reduziert. Besonders in politisch unsicheren Situationen mit instabilen Lieferketten in Europa und einer hohen externen Abhängigkeit im Bezug auf Primärrohstoffvorkommen können Unternehmen mit hohen Recyclingquoten oder geschlossenen Materialschleifen ihre unternehmerische Resilienz stärken und sich damit kompetitiv aufstellen (Europäische Kommission 28.02.2025, S. 2). Der EU Green Deal formuliert hierbei explizit ein Leitbild einer Wirtschaft, die wettbewerbsfähig ist und zugleich nachhaltig mit Ressourcen umgeht und somit ökologische und ökonomische Dimensionen im Sinne der Kreislaufwirtschaft vereint (Europäische Kommission 11.12.2019, S. 2–3). Um die Potenziale der Kreislaufwirtschaft effektiv zu nutzen, kommt durch digitale Technologien wie Blockchain, IoT, QR, RFID (Radio-Frequency-Identification) und Künstliche Intelligenz (KI) sowie zuletzt der DPP selbst eine zentrale Ermöglichungsfunktion zu. Diese könnten entscheidend dazu beitragen, Materialflüsse in Echtzeit transparenter darzustellen und Kreislaufprozesse messbar und steuerbar zu machen und werden als Befähiger der Kreislaufwirtschaft bezeichnet (Voulgaridis et al. 2024, S. 12–14).

2.5.2 Beitrag des DPP zur Kreislaufwirtschaft

Ein zentrales Versprechen von DPPs ist die Erhöhung der Ressourceneffizienz. Diese soll grundlegend durch einen sparsamen und wirksamen Materialeinsatz im Produktlebenszyklus einschließlich der Rückgewinnung am Lebensende erreicht werden. In Bezug auf den DPP gelingt dies zunächst durch umfassende Transparenz über verwendete Materialien (Götz et al. 2022, S. 12). So dokumentiert etwa der Batteriepass präzise Inhaltsstoffe wie kritische Rohstoffe, was Recyclingunternehmen ermöglicht, Verfahren gezielt auszuwählen und wertvolle Ressourcen effizient zurückzugewinnen (Wautelet/Ayed 2024a, S. 29–32). Dabei findet der DPP in beinahe allen Phasen der Kreislaufwirtschaft Anwendung.

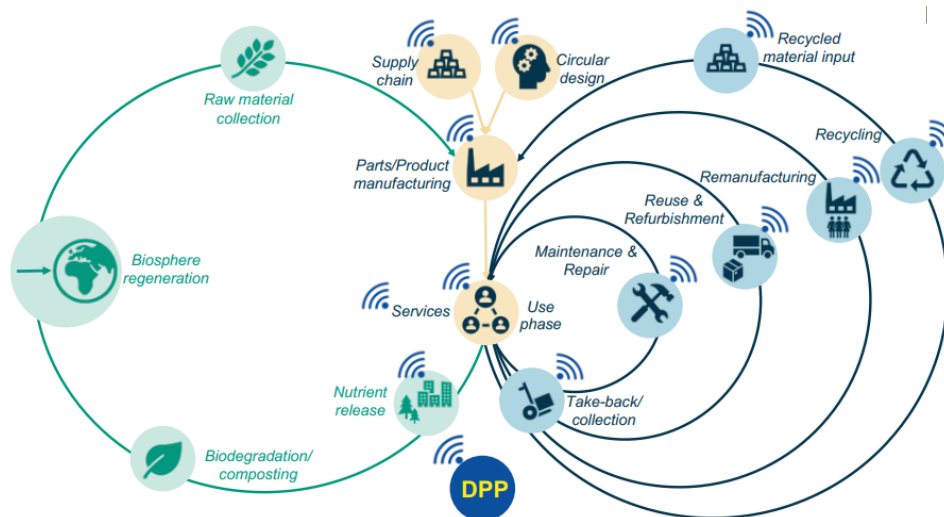


Abbildung 6: Butterfly Diagramm der Kreislaufwirtschaft nach Ellen MacArthur in Bezug auf die Anwendungsbe- reiche des DPP (Alcayaga, S. 15)

Ferner unterstützt der DPP eine Verlängerung der Produktlebensdauer, indem er Zu- standsdaten wie den Gesundheitszustand („State of Health“, SoH) und Ladezyklen er- fasst. Diese Informationen erlauben, gebrauchte Batterien für eine Zweitnutzung („Se- cond Life“) als stationäre Speicher gezielt auszuwählen und weiterzuverwenden (Ber- ger/Schöggel/Baumgartner 2022, S. 8) und führt damit zu einer verringerten Nutzung neuer Ressourcen (Berger/Schöggel/Baumgartner 2022, S. 7). Schließlich kann der DPP durch hohe Datenqualität und -verfügbarkeit Fehlallokationen und Materialverschwen- dung verringern. Mithilfe von Nutzungsdaten können Hersteller ihre Prozesse und Pro- duktionsmengen optimieren, rechtzeitig Rücknahme- und Recyclingkapazitäten planen und die unkontrollierte Entsorgung von Produkten vermeiden (Massoth, S. 13). Die Um- setzung und der Beitrag zur Wertschöpfung in der Praxis sind dennoch mit Bedenken geprägt. Ein in prägnantes Negativbeispiel für eine fehlgeschlagene datenbasierte

Ressourceneffizienzsteigerung nach ähnlichem Ansatz zu dem DPP zeigt sich in der bereits eingeführten SCIP-Datenbank („Substances of Concern in Products“) der Europäischen Chemikalienagentur. Die Datenbank sammelt verpflichtend Informationen zu besonders besorgniserregenden Stoffen in Produkten und macht Daten während des gesamten Produktlebenszyklus verfügbar, um gefährliche Stoffe in Abfällen zu reduzieren, wiederzuverwenden und damit die Kreislaufwirtschaft zu stärken (SCIP 2025). Dennoch berichten Akteure der Kreislaufwirtschaft, dass die Daten in der Praxis aufgrund hoher Heterogenität kaum verwertbar sind und somit ein nur sehr geringer Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden kann. Laut Bewertung der IHK sei die SCIP zudem eine „Riesen-Bürokratie ohne nennenswerten Nutzen“ (IHK 2021). Grund hierfür sei unter anderem, dass reine Stoffinformationen ohne Bezug zu praktischen Sortier-, Rücknahme- und Verwertungsprozessen sowie anwendungsorientierte, qualitative Datenstruktur kaum zur Ressourceneffizienz beitragen kann und im operativen Kreislaufmanagement weitgehend wirkungslos bleibt (Kummer 2025).

2.5.3 Messbarkeit, Kennzahlen und Frameworks zur Kreislaufwirtschaft

Die Messbarkeit von Nachhaltigkeit stellt nach aktuellen Umfragen des Weltwirtschaftsrats für nachhaltige Entwicklung (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) eine essenzielle Grundlage für strategische Entscheidungen im Kontext der Kreislaufwirtschaft dar, da Unternehmen quantifizierbare Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators, KPI) benötigen, um Strategie und Performanz voranzutreiben, Risiken zu minimieren und ihren zirkulären Erfolg zu messen und nach außen zu kommunizieren (WBCSD 2018, S. 2). Für eine praktikable Integration in den Unternehmensalltag sollten Nachhaltigkeitskennzahlen bestimmte Kriterien erfüllen: Sie sollten relevant für die spezifischen Nachhaltigkeitsziele sein, messbare und zuverlässig erfassbare Daten umfassen, eine zeitliche und branchenbezogene Vergleichbarkeit ermöglichen und zugleich praktikabel im Sinne eines akzeptablen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses sein (Hermes 2025, S. 2). Im Kontext der Kreislaufwirtschaft sollten KPIs ganzheitlich und lebenszyklusübergreifend gestaltet sein, um eine vollständige ökologische und ökonomische Bewertung zu ermöglichen. Es reicht nicht aus, punktuelle Aspekte isoliert zu betrachten, da beispielsweise natürliche Ressourcen auch indirekte Auswirkungen verursachen. Zudem sollte nicht direkt die Zirkularität selbst, sondern dessen Auswirkungen auf die umwelttechnischen, sozialen und finanziellen Auswirkungen davon erfassen (WBCSD 2018, S. 25–26). Eine Untersuchung zeigt, dass derzeit rund 48 % der verwendeten

zirkulären Metriken hauptsächlich interne Prozesse wie Energie- und Ressourceneffizienz abdecken, während nur 22 % den Rohstoffverbrauch und 20 % das Lebensende eines Produktes adressieren (WBCSD 2018, S. 11–12). Diese fragmentierte Sichtweise könnte dazu führen, dass wesentliche Nachhaltigkeitspotenziale entlang der Wertschöpfungskette ungenutzt bleiben. Eine holistische Betrachtung aller Lebenszyklusphasen, insbesondere durch standardisierte und umfassende Nachhaltigkeitsmetriken, kann damit besonders wertvoll sein.

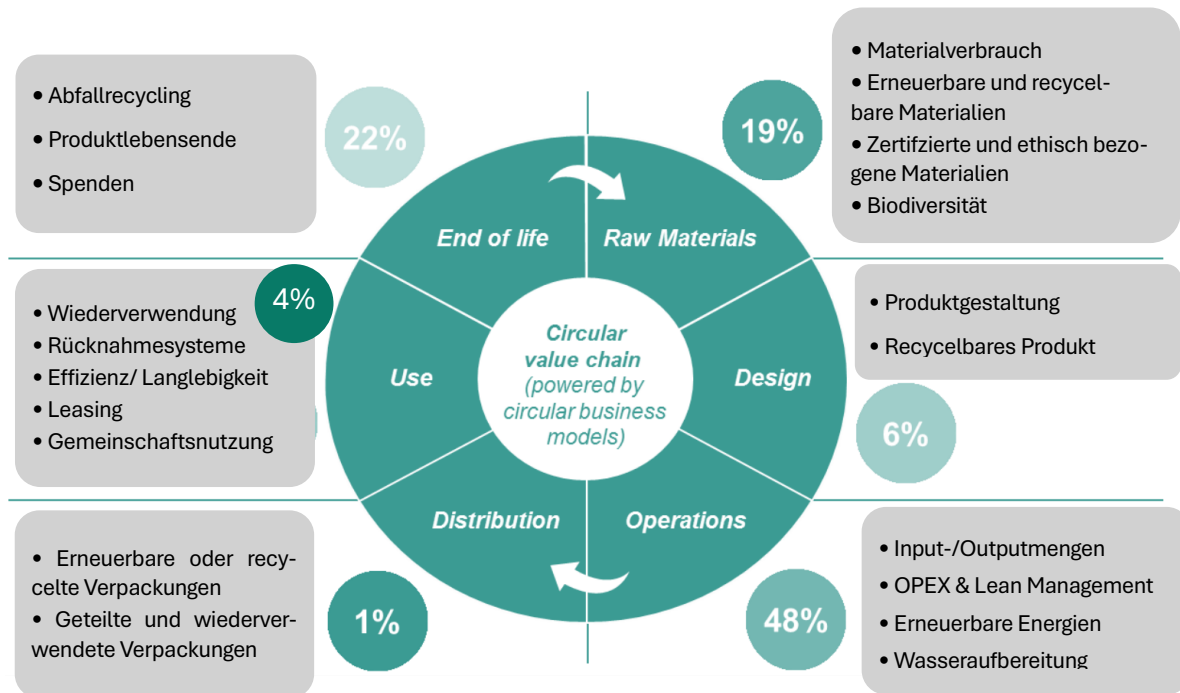


Abbildung 7: Zirkuläre Metriken entlang des Lebenszyklus (WBCSD 2018, S. 12)

Ein normativer Bezugsrahmen zur Integration von Nachhaltigkeitszielen ist die TBL (Elkington 1994). Zur operativen Umsetzung steht eine Vielzahl standardisierter Frameworks zur Verfügung, die es ermöglichen, Zirkularität präzise und transparent messbar zu machen. Es ist zu erwähnen, dass 74% einer umfassenden Befragung des WBCSD angaben, eigen entwickelte Frameworks zur Messung von Zirkularität nutzen (WBCSD 2018, S. 6). Um dennoch wesentliche Kernaspekte zu erfassen, eignen sich zwei Frameworks als repräsentative Orientierung, da sie in Kombination die Zirkularität und dessen Auswirkung auf Produkt- und Unternehmensebene abdecken. Das Material Circularity Indicator Framework (MCI) der Ellen MacArthur Foundation verfolgt dabei einen grundsätzlich produktzentrierten Ansatz auf Mikroebene. Es bewertet Aspekte wie den Anteil recycelter Materialien, die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit einzelner Produkte und bietet damit eine klare quantitative Grundlage zur Identifikation von

Optimierungspotenzialen (Goddin et al., 4, 22-23). Die Informationen werden bewertet auf die Quantität und Intensität der Zirkularität und erlauben eine Vergleichbarkeit der Performanz mit dem Industriestandard (WBCSD 2018, S. 17).

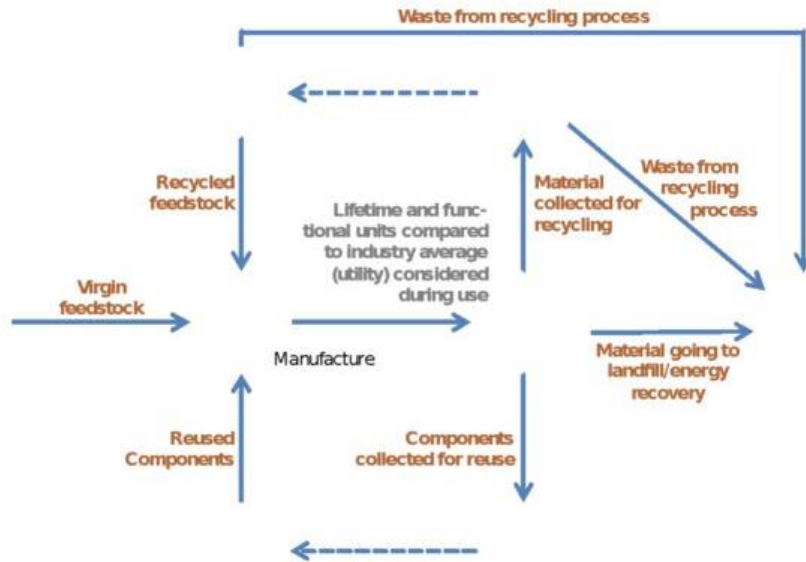


Abbildung 8: Summierung assoziierter Materialflüsse gemäß des MCI (Goddin et al., S. 22)

Auf der strategischen Makroebene wiederum ermöglichen die Circular Transition Indicators (CTI), entwickelt vom WBCSD, eine unternehmensweite Messung und Überwachung der Zirkularitätsleistung. Dieses Framework bewertet Ressourcenflüsse über die gesamte Organisation hinweg und unterstützt damit die Identifikation strategischer Verbesserungsfelder und Innovationspotenziale innerhalb der Kreislaufwirtschaft (WBCSD, S. 9–12). Des Weiteren lässt sich daraus die Fähigkeit und Ambition der Ressourceneffizienz im Sinne der Zirkularität ableiten und orientiert sich dabei an den drei Interventionspunkten Materialzufluss, Materialabfluss mit Rückführungspotential und Materialabflussanteil mit tatsächlicher Rückführung der Rohstoffe (WBCSD, S. 14).

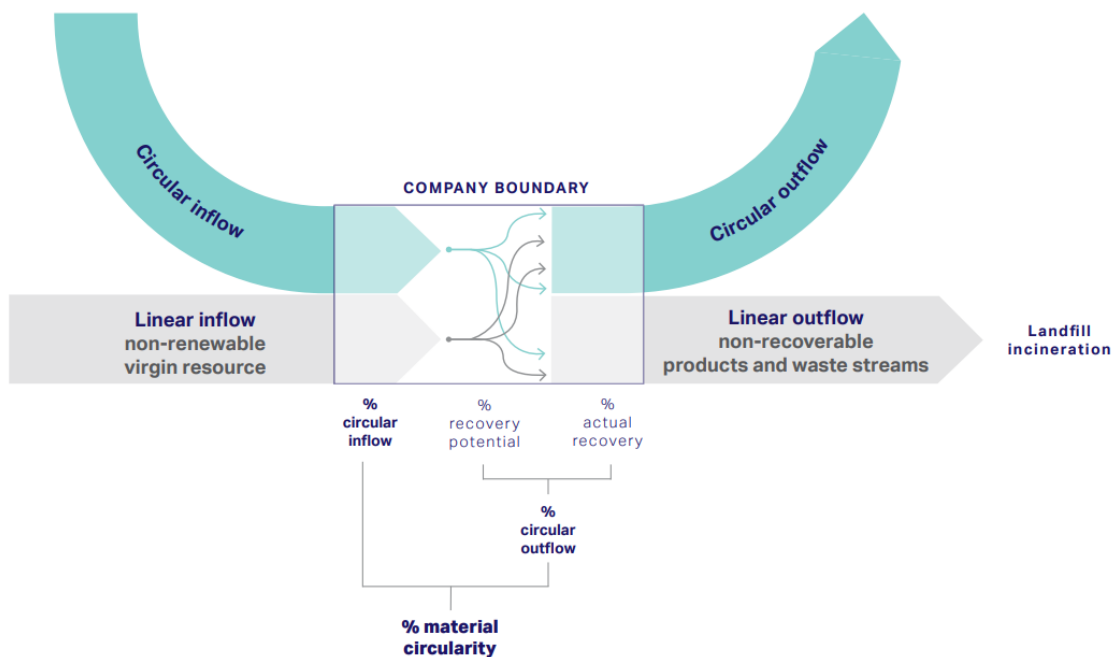


Abbildung 9: Darstellung zirkulärer und linearer Materialflüsse (WBCSD, S. 14)

Aufbauend auf diesen Frameworks stellt sich die Frage, wie Unternehmen ihre strategischen Ambitionen zur Zirkularität auf operativer Ebene konkret sichtbar machen können. Da Unternehmen sich in sehr unterschiedlichen Reifephasen der Zirkularität befinden können, ist eine phasenbezogene Strategieentwicklung notwendig. Hierbei lässt sich die Integrität der Nachhaltigkeit in die Unternehmensstrategie als erster Bezugsfaktor bewerten. Der WBCSD unterscheidet hierzu in einem praxisorientierten Reifegradmodell drei Reifestufen, die jeweils unterschiedliche Zielsetzungen und Kennzahlensysteme abbilden, abhängig von der strategischen Verankerung zirkulärer Prinzipien (vgl. Abb. 1). Während zirkuläre Bestrebungen in der Einstiegsphase („Einsteiger“) kaum formalisiert sind und sich auf operative Effizienz fokussieren, integrieren fortgeschrittene Unternehmen auf „Expertenniveau“ die Zirkularität als festes Element ihrer übergeordneten Unternehmensstrategie mit Kennzahlen, welche darlegen wie das Unternehmen durch den Fokus auf Zirkularität neue Wertschöpfung generiert. Der aktuelle Status Quo vieler Unternehmen befindet sich hierbei in der Mittelphase („Fortgeschritten“) welche hauptsächlich die umwelttechnischen und sozialen Auswirkungen der Firmenaktivitäten bewerten und das Konzept der Zirkularität als Teil der Nachhaltigkeitsstrategie integrieren (WBCSD 2018, S. 13–15).

	Einsteiger	Fortgeschritten	Expertenniveau
Ambition der Kreislaufstrategie	Zirkularität nicht formell verankert	Zirkularität integriert in Nachhaltigkeitsstrategie	Zirkularität integriert in Unternehmensstrategie
Zirkuläre Kennzahlen	Operative Effizienz	Nachhaltigkeitsperformance	Zirkuläre Wertschöpfung

Tabelle 1: Reifephasen von zirkulären Metriken (eigene Abbildung nach WBCSD (2018, S. 13))

Die Abbildung 10 verdeutlicht diesen Wandel der Metriktypen entlang wachsender Reifegrade der Zirkularität. Je stärker der strategische Anspruch auf Wertschöpfung durch Zirkularität ausgerichtet ist, desto zentraler wird die Messung produktbezogener Wirkgrößen, wo bei einer fortgeschrittenen, wertschöpfenden Zirkularitätsambition („Value Creation“) bis zu 65% der Metriken sich auf das Produkt selbst beziehen können.

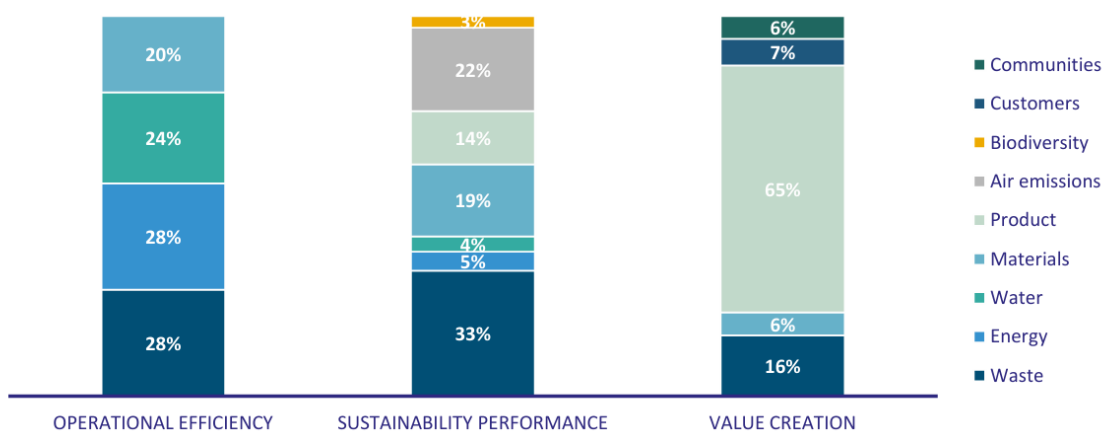


Abbildung 10: Zirkuläre Metriken und deren Bezugsverteilung nach Zirkularitätsreife (WBCSD 2018, S. 14)

Der Vorteil eines produktzentrierten Bewertungsansatzes liegt insbesondere in seiner hohen Anwendungsnahe und Steuerbarkeit. Es ermöglicht die gezielte Optimierung von Designentscheidungen, Materialwahl und Nutzungsmodellen entlang zirkulärer Prinzipien. Studien zeigen, dass gerade Metriken auf Produktebene ein besonders hohes Potenzial bieten, um zirkuläre Geschäftsmodelle messbar, skalierbar und innovationsorientiert zu gestalten (Goddin et al., S. 10). Da der DPP primär aus produktbezogenen Kennzahlen besteht, erweist sich dieser Bezugswechsel von KPIs auf eine produktzentrierte Betrachtungsweise in Hinblick auf die Effektivität des DPPs auf die Kreislaufwirtschaft als besonders hilfreich. In der folgenden Tabelle werden beispielhafte KPIs in Bezug auf die jeweilige strategische Zirkularitätsreifephase dargestellt.

Aspekt	Operationale Effizienz	Nachhaltigkeitsperformance	Zirkuläre Wertschöpfung
Umwelt	Energieeffizienz	Recyclinganteil	Wertschöpfung aus Reststoffen
	Wassereffizienz	Zirkuläre Projekte	Erhaltener Wert
	Materialeffizienz	Abfallvermeidung (Deponie)	EP&L-Intensität
Sozial	Arbeitsstunden pro Einheit	Einbindung lokaler Interessengruppen	Geschaffene Arbeitsplätze (direkt/indirekt)
	Produktivitätsniveau	Erreichte Kundenzahl	Gegründete Sozialunternehmen
	Transparenz der Lieferkette	Anzahl Unfälle / Vorfälle	Gesamtwirtschaftlicher Beitrag
Finanziell	Energiekosten pro Einheit	CO ₂ -Zertifikate	Umsatz durch Zirkularität
	Preis pro Ressourceneinheit	Zirkuläre Beschaffung	Zirkularitätsanteil im Portfolio
	Deponiegebühren	Ressourcenkosteneinsparungen	Verkauf wiederaufbereiteter Güter

Tabelle 2: Beispielkennzahlen entlang der TBL bezüglich der zirkulären Reifephase (eigene Darstellung nach WBCSD (2018, S. 15))

Diese Indikatorensysteme erleichtern nicht nur die Integration in etablierte Frameworks, sondern erlauben eine strategisch fundierte Steuerung zirkulärer Transformationsprozesse. Unternehmen, die zirkuläre Metriken frühzeitig in ihre strategischen Zielsysteme integrieren, können dadurch die Grundlage für einen neuen Ansatz von Wertschöpfung und belastbare Nachhaltigkeitsberichte schaffen.

2.6 Die Batterieverordnung und erste Umsetzungsinitiativen

Parallel zur regulatorischen Entwicklung haben verschiedene Forschungs- und Pilotprojekte in den letzten Jahren maßgeblich dazu beigetragen, die Umsetzung von DPP praxisnah vorzubereiten und zu incentivieren. Die Grundlage dazu bietet die BattVO, welche zunächst grundlegend beschrieben wird, bevor auf die praktische Umsetzung des DPP durch die CIRPASS-Initiativen eingegangen wird.

2.6.1 Batterie-Verordnung und der Batteriepass

Einen ersten konkreten Anwendungsfall des DPP schafft die neue EU-Batterie-Verordnung. Die im Juli 2023 eingeführte Verordnung ersetzt die bisherige Batterierichtlinie (2006/66/EG) und definiert umfassende Anforderungen an das gesamte Lebenszyklusmanagement von Batterien. Die Verordnung verfolgt insbesondere das Ziel, dessen Transparenz entlang der Liefer- und Wertschöpfungsketten – von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling – erheblich zu steigern, um Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Batteriebereich voranzutreiben (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 1–4). Ein zentrales Element dieser regulatorischen Neuerung ist die verpflichtende Einführung eines digitalen Batteriepasses (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 72–74). Gemäß Artikel 77 der Verordnung müssen ab dem 1. Januar 2026 alle Industrie- und Elektrofahrzeug-Batterien mit einer Kapazität über 2 kWh, die in der EU in Verkehr gebracht werden, mit einem individuellen DPP ausgestattet sein. Für Batterien leichter Transportmittel, beispielsweise in E-Bikes oder E-Scootern, tritt diese Regelung 2027 in Kraft, während

kleinere Batterien von der Regelung zunächst ausgenommen sind (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 72–73).

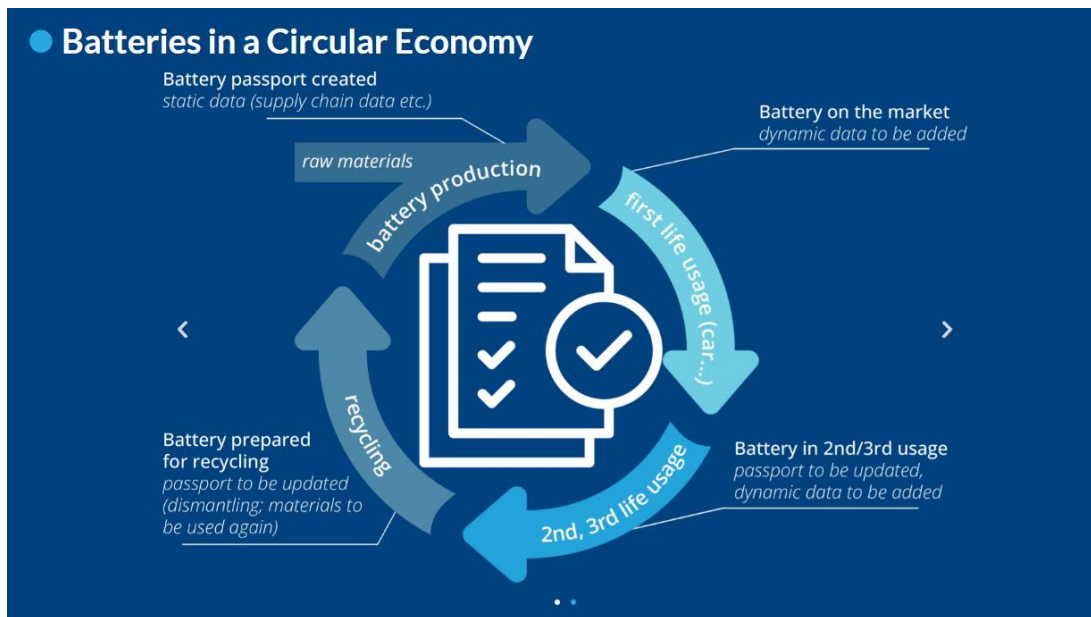


Abbildung 11: Kreislauf von Batterien im Kontext der Kreislaufwirtschaft (Krummenacher 2024)

Die Regelungen der EU-Kommission sehen bezüglich des Batteriepasses eine Differenzierung zwischen allgemein zugänglichen Informationen und solchen vor, die ausschließlich autorisierten Interessensgruppen sowie der Kommission selbst vorbehalten sind. In diesem Rahmen definieren insbesondere vier wesentliche Informationskategorien für den Batteriepass: (1) öffentlich zugängliche Produktinformationen, darunter die stoffliche Zusammensetzung, CO₂-Fußabdruck, Bemessungs- und Leistungsdaten sowie Angaben zur Lebensdauer und Recyclingfähigkeit; (2) technische Detailinformationen zum Batteriemodell – etwa Demontageanleitungen, Explosionsdiagramme oder Ersatzteilnummern – die ausschließlich autorisierten Fachakteuren zugänglich gemacht werden; (3) sicherheitsrelevante Prüfberichte, die nur von notifizierten Stellen und Marktaufsichtsbehörden eingesehen werden dürfen; sowie (4) einsatzspezifische Daten auf Ebene einzelner Batterien, darunter Ladezyklen, Temperaturverläufe, Alterungszustand und Statusinformationen, welche im Betrieb kontinuierlich erfasst und für berechnigte Stakeholder verfügbar gemacht werden müssen (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 108–109). Um eine vollständige Datengrundlage zu gewährleisten, erfordert der Batteriepass ein abgestimmtes Mitwirken mehrerer Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Hierzu zählen Zell- und Modulhersteller, Batterieproduzenten, Hersteller (Original Equipment Manufacturer, OEM), sowie spezialisierte Unternehmen für Service, Reparatur und Wiederverwendung von Batterien (Stretton/Daphne/Ramkumar 2025). Ein essenzieller Beitrag

des Batteriepasses liegt in seiner Rolle zur Überprüfung gesetzlich vorgeschriebener Nachhaltigkeitsziele. So verlangt die Verordnung, dass ab 2031 spezifische Höchstwerte für CO₂-Höchstwerte sowie Mindestquoten für Rezyklatanteile von Kobalt, Lithium, Nickel und Blei in Batterien eingehalten und dokumentiert werden. Der Pass dokumentiert diese Anteile und ermöglicht damit die Nachverfolgung dieser Materialströme (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 32–33). Zudem sieht sie verpflichtende Due-Diligence-Verfahren vor, welche die Einhaltung internationaler Standards, wie etwa die Prinzipien des Global Compact der Vereinten Nationen oder des Pariser Klimaabkommens, sicherstellen (Europäische Kommission 28.07.2023, S. 103–104). Ein anschauliches Beispiel für eine mögliche praktische Umsetzung des Batteriepasses bietet ein Entwurf des Schweizer Unternehmens BloqSens, welches in Abbildung 14 exemplarisch eine mögliche Benutzeroberfläche illustriert. Diese demonstriert, wie relevante Akteure intuitiv auf zentrale Informationen zugreifen können, wodurch Transparenz und Informationsverfügbarkeit nachhaltig verbessert werden können.

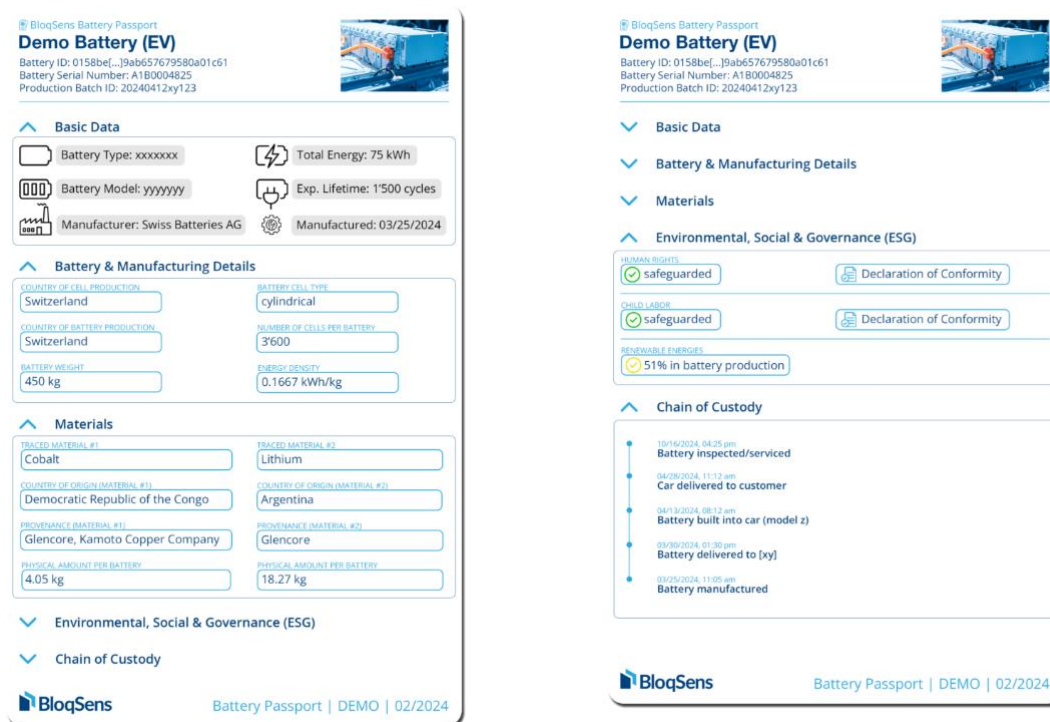


Abbildung 12: Beispielhafter Batteriepass (Krummenacher 2024)

Am 01.04.2025 wurden die finalen Projektergebnisse der erfolgreichen Konzeption für Digitale Batteriepässe als wegweisendes Pilotprojekt für DPPs, auf der Hannovermesse an das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) übergeben. Damit wurde ein Fundament für die praktische Umsetzung des Batteriepasses gelegt

und stellt Unternehmen eine Zusammenfassung von Handlungsempfehlungen, Werkzeugen und Frameworks zur erfolgreichen Implementierung bereit (The Battery Pass 2025).

2.6.2 Konzept nach CIRPASS und Ausblick auf CIRPASS-2

Ein zentrales europäisches Projekt war CIRPASS, das von 2022 bis März 2024 durchgeführt wurde und aus einem Konsortium aus 31 Partnern aus Industrie, Wissenschaft und Normung bestand (CIRPASS 2025). Ziel des Projekts war es, grundlegende Voraussetzungen für die erfolgreiche Einführung und Nutzung von DPPs in den Schlüsselbranchen Elektronik, Batterien und Textilien zu schaffen, wobei aufgrund der regulatorischen Dringlichkeit der Fokus zunächst verstärkt auf Batterien lag (Neligan et al., S. 7).

CIRPASS erzielte mehrere zentrale Ergebnisse, die essenziell für die praktische und branchenübergreifende Etablierung von DPPs sind: Dazu zählen eine einheitliche Definition und Beschreibung des DPP sowie die Entwicklung eines universellen, aber dennoch skalierbaren Produkt-Datenmodells. Weiterhin wurden Anforderungen zur eindeutigen Produktidentifikation definiert und ein offenes Datenaustauschprotokoll vorgeschlagen, das den effizienten und sicheren Datentransfer zwischen unterschiedlichen Akteuren der Lieferkette ermöglicht. Zusätzlich etablierte CIRPASS eine Konsensbasis unter Stakeholdern bezüglich der zentralen Datenattribute zur Unterstützung zirkulärer Prozesse und formulierte konkrete Use Cases und Roadmaps, die den geschäftlichen Mehrwert des DPP aufzeigen und die Pilotierung praktisch unterstützen (Bernier 2023).

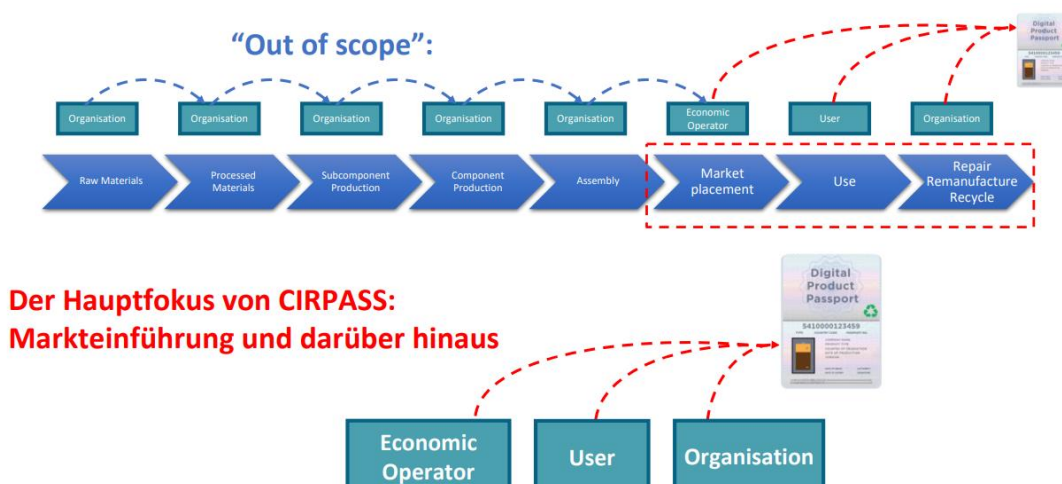


Abbildung 13: Relevanter Bezugsrahmen der Wertschöpfungskette für das CIRPASS-Projekt (Bernier 2023)

Das von CIRPASS entwickelte Konzept verfolgt das übergeordnete Ziel des DPP, neben dem physischen Produktfluss einen digitalen Datenfluss aufzubauen, der zentrale Nachhaltigkeitsinformationen über die gesamte Nutzungs- und Nachnutzungsphase eines

Produkts hinweg verfügbar macht. Dies soll einen ersten konkreten Entwurf eines möglichen DPP-Konzepts darstellen und konzentriert sich zunächst auf die letzten 3 Phasen eines Lebenszyklus. Ab dem Zeitpunkt der Markteinführung werden relevante Daten kontinuierlich ergänzt und aktualisiert, beispielsweise durch OEMs, Endnutzer oder Akteure im Reparatur- und Recyclingprozess. Der Datenaustausch erfolgt über speziell eingerichtete, cloudbasierte Datenräume, die über eindeutige Produktkennungen, digitale Datenträger und standardisierte Schnittstellen mit dem physischen Produkt verknüpft sind (Wautelet/Ayed 2024b). Unterschiedliche Stakeholder entlang des Lebenszyklus erhalten dabei ausschließlich Zugriff auf jene Informationen, für die entsprechende Zugriffsrechte bestehen, um eine transparente, sichere und nachvollziehbare Datennutzung zu gewährleisten (Barwasser et al., S. 10–11).

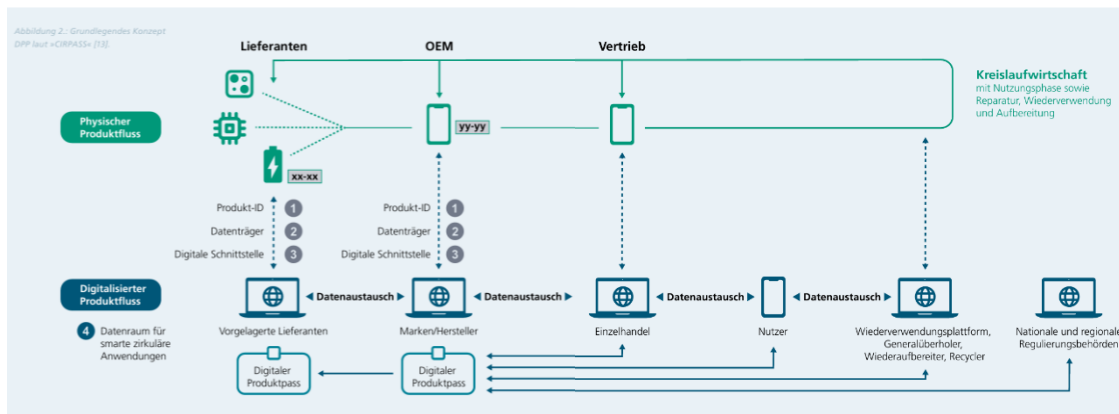


Abbildung 14: Datenaustauschkonzept des CIRPASS-DPPs (Barwasser et al., S. 11)

Darauf aufbauend startete 2024 das Folgeprojekt CIRPASS-2, das eine Laufzeit bis 2027 hat und die konzeptionellen Grundlagen von CIRPASS in die praktische Umsetzung überführt (CIRPASS-2 2025b). CIRPASS-2 umfasst ein erweitertes Konsortium mit 49 Partnern und konzentriert sich auf insgesamt 13 Pilotprojekte in vier Wertschöpfungsketten: Textilien, Elektro- und Elektronikgeräte, Reifen und Bauprodukte (CIRPASS-2 2025a). Das Ziel ist hierbei, funktionierende digitale Produktpässe wie den Batteriepass im industriellen Maßstab zu implementieren und deren Mehrwerte empirisch nachzuweisen. Neben der Validierung und Weiterentwicklung der CIRPASS-Ergebnisse unterstützt CIRPASS-2 insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) bei der Einführung der Technologie (Barwasser et al., S. 14). Darüber hinaus sollen die Skalierbarkeit und Machbarkeit in größeren Dimensionen sowie die Entwicklung kreislauffähiger Geschäftsmodelle basierend auf DPP-Daten demonstriert werden. Des Weiteren soll die

technische sowie organisatorische Interoperabilität zwischen den einzelnen Akteuren konzeptionell sichergestellt werden (CIRPASS-2 2025a).

3 Technologische Grundlagen, Herausforderungen und Schlüsseltechnologien

Die erfolgreiche Einführung eines DPP setzt neben regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen insbesondere technologische Aspekte voraus. Diese umfassen die Einrichtung sicherer, interoperabler Datensysteme sowie umfassende Maßnahmen zur Gewährleistung der Datensicherheit und -integrität. Über die technischen Rahmenbedingungen hinaus gelten technologische Innovationen als Treiber des DPP und ermöglichen die Umsetzung der Gewährleistung an technische Ansprüche.

3.1 Technische Kernkomponenten in Datensystemen

Die praktische Umsetzung und strategische Nutzbarkeit von DPPs setzt ein funktionierendes digitales Datensystem voraus, in dem Transparenz und Interoperabilität eine zentrale Rolle spielen. Interoperabilität ist die Fähigkeit unterschiedlicher IT-Systeme, unabhängig von deren jeweiligen technischen Spezifikationen miteinander zu kommunizieren, interagieren und Daten auszutauschen (Jansen et al. 2023, S. 7). Dies wird durch gemeinsame Schnittstellen und standardisierte Datenformate erreicht. Semantische Interoperabilität geht darüber hinaus und umfasst ein gemeinsames Verständnis über Bedeutung und Struktur der verwendeten Daten (Wunder 2009, S. 19–25). Standardisierte Datenmodelle und einheitliche Semantiken, wie etwa verbindliche Produktdatenschemata stellen sicher, dass Informationen aus dem DPP von allen Akteuren einheitlich interpretiert, verstanden und genutzt werden können, um eine autonome Interaktion zwischen System und Organisationen zu ermöglichen (Massoth, S. 14). Im DPP konsolidieren sich unterschiedliche Datenräume (Data Spaces) in ein übergeordnetes Datenökosystem. Datenräume stellen ein dezentrales Dateninfrastrukturkonzept dar, das den souveränen Zugriff auf Daten ohne physische Integration ermöglicht. Sie basieren auf gemeinsamen semantischen und technischen Standards zur Interoperabilität und erlauben durch verschachtelte Strukturen die gleichzeitige Beteiligung an mehreren Datenräumen (Möller et al. 2024, S. 7–8). Datenökosysteme sind soziotechnische Netzwerke aus unterschiedlichen Akteuren, die in dynamischer Wechselwirkung Daten erzeugen, teilen, analysieren und wirtschaftlich oder gesellschaftlich nutzen. Sie beruhen auf gemeinsam vereinbarten Datenregelungsmechanismen, technischen Standards und Interoperabilitätsprinzipien und integrieren dezentrale Datenräume als infrastrukturelle Basis. Ziel eines Datenökosystems ist es, durch

die koordinierte Nutzung verteilter Datenbestände eine sektorübergreifende Kooperationen auf Datenbasis ermöglichen (Schade/Gerz 2019, S. 589). Dies ermöglicht einen transparenten und nachvollziehbaren Datenfluss entlang der gesamten Wertschöpfungskette für alle relevanten Akteure eines DPP und adressiert Unsicherheiten und Risiken in Bezug auf das Teilen sensibler Daten. Voraussetzung dafür ist eine technologische Infrastruktur, die über standardisierte Datenumgebungen den kontrollierten, sicheren und vertrauenswürdigen Datenaustausch ermöglicht (Massoth, S. 7).

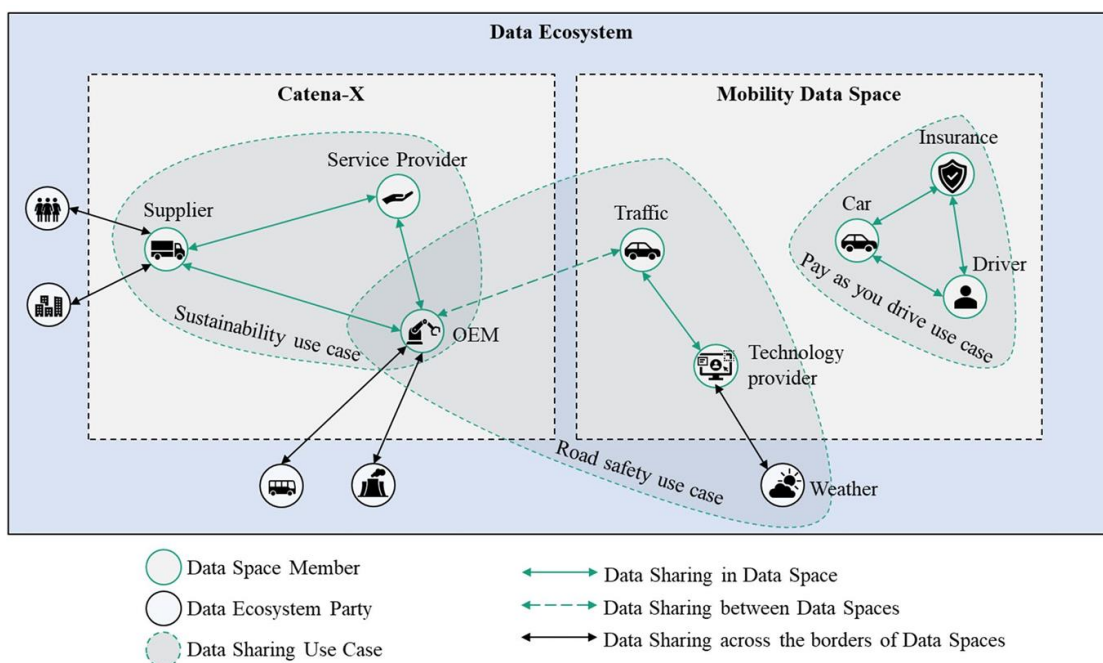


Abbildung 15: Datenökosystem, Datenräume und Use Cases der Akteure im Mobilitätskontext (Möller et al. 2024, S. 8)

Datenökosysteme basieren im Kontext des DPP auf dezentralen Referenzarchitekturen, die nach Prinzipien wie denen der International Data Spaces Association (IDSA) oder GAIA-X des Datenökosystemanbieters Catena-X funktionieren (Möller et al. 2024, S. 10). Solche Ansätze gewährleisten einerseits die Datensouveränität, indem Unternehmen jederzeit die volle Kontrolle über den Zugriff ihrer Daten behalten, andererseits schaffen sie Transparenz und Vertrauen durch klare Rollen- und Rechteverwaltungen. Gerade für sensible Nachhaltigkeits- und Produktionsdaten, die Bestandteil des DPP sein können, ist dies essenziell, um Geschäftsgeheimnisse zu schützen und gleichzeitig regulatorischen Anforderungen nachzukommen (Massoth, S. 7–8). Beide Referenzarchitekturen basieren auf einem starken Vertrauensmodell, unterscheiden sich jedoch in ihrer konzeptionellen und technischen Umsetzung. Das Architekturmodell der IDSA konzentriert sich auf Konnektoren als zentrale Schnittstellen, die den souveränen Austausch von Daten

zwischen Edge- und Cloud-Anwendungen ermöglichen. GAIA-X verfolgt hingegen einen dienst- und knotenbezogenen Ansatz, bei dem Identitäts- und Vertrauenssysteme eine zentrale Rolle spielen. Diese umfassen unter anderem Sicherheitsprofile, Statusverfolgung und Zertifizierungsansätze, die im Infrastruktur-Ökosystem verankert sind. Während bei GAIA-X zentrale „Federation Services“ die Verbindung zwischen Daten- und Infrastrukturkomponenten sicherstellen, sieht das Konzept nach IDSA keine zentrale Instanz zur Datenspeicherung vor, sondern legt den Fokus auf die Architektur und Funktionsweise internationaler Datenökosysteme. IDSA und GAIA-X können dabei gemeinsam eine komplementäre Infrastrukturgrundlage für sektorale Datenräume wie Catena-X bilden, wobei sich ihre Architekturen über gemeinsame Schnittstellen wie den EDC (Eclipse Data Space Connector) funktional integrieren lassen (Maul 2022).

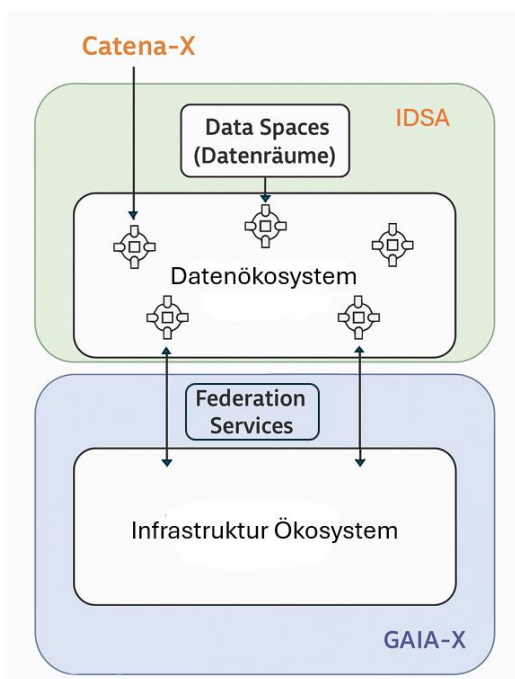


Abbildung 16: Datenökosysteme in Wechselwirkung: IDSA (oben) und GAIA-X (unten) (eigene Darstellung nach Maul (2022))

Die Effektivität solcher DPP-Datenökosysteme hängt maßgeblich von ihrer Interoperabilität ab (Massoth, S. 7). Ein technologisches Instrument, das diese Interoperabilität wirkungsvoll unterstützt, ist die sogenannte Asset Administration Shell (AAS), auch Verwaltungsschale genannt. Sie bildet die digitale Repräsentation physischer und digitaler Wertgegenstände und umfasst alle relevanten Informationen und Funktionalitäten eines Objekts, einschließlich dessen Merkmale, Zustände, Messdaten und Parameter. Durch eine klare und technologieunabhängige Strukturierung der Daten erleichtert die AAS die Interaktion zwischen verschiedenen Systemen, bietet eine Grundlage für datengetriebene

Entscheidungen und stellt damit eine Brücke zwischen physischen Produkten und digitalen Räumen dar. Der Einsatz einer AAS ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungsfeldern, welche die Effizienz und Effektivität von industriellen Vorgängen erhöhen kann (Pourjafarian et al. 2023, S. 2). Die AAS beschreibt somit digital einzelne Industrieobjekte und Datensätze, welche innerhalb von den durch IDSA und GAIA-X definierten Datenräumen ausgetauscht und genutzt werden können. Neben der technologischen Infrastruktur ist ein konsistentes organisatorisches Datenmanagement wesentliche Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit und regulatorische Konformität von DPPs. Hierbei steht im Vordergrund, Daten innerhalb und zwischen Unternehmen effizient, konsistent und qualitätsgesichert nutzbar zu machen, um regulatorische Anforderungen zu erfüllen (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 38–41). DPPs sind häufig mit sensiblen Produktinformationen verknüpft, weshalb Unternehmen neben angemessenen Sicherheitsmaßnahmen auch datenschutzrechtliche Anforderungen strikt erfüllen müssen (Neligan et al., S. 18). In diesem Zusammenhang bildet Data Governance einen wesentlichen Ordnungsrahmen, welcher Vorgaben zu Datenqualität, -integrität, -sicherheit und -schutz festlegt. Das operative Datenmanagement wiederum überträgt diese Governance-Vorgaben in konkrete Handlungsanweisungen und Prozesse. Die Umsetzung dieser Anforderungen erfordert von Unternehmen ein konsistentes Regelwerk für die Handhabung aller produktrelevanten Informationen, welche deren Erfassung, Aktualisierung, Speicherung sowie das datenschutzkonforme Löschen umfasst. Aktuelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass viele Unternehmen noch keine umfassenden Data-Governance-Strukturen etabliert haben. So gaben beispielsweise in Deutschland im Jahr 2022 nur etwa 31 Prozent der Unternehmen an, über eine entsprechende Data Governance zu verfügen (Neligan et al., S. 18–19). Dabei stellt Data Governance eine zentrale Herausforderung bei der Implementierung digitaler Produktpässe dar (Ducuing/Reich 2023, S. 1). Der DPP dient der Koordination und Bereitstellung umfangreicher Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg und unterstützt damit maßgeblich die Transformation hin zu einer kreislauforientierten Wirtschaft. Allerdings treten dabei Spannungsfelder auf, insbesondere zwischen dem angestrebten breiten Zugang zu Produktdaten und dem Schutz legitimer Interessen wie Geschäftsgeheimnissen oder geistigen Eigentums (Ducuing/Reich 2023, S. 2). Hinzu kommen Vertrauensfragen, die sich aus Unsicherheiten bezüglich der Qualität, Aktualität und Zweckbindung der geteilten Daten ergeben. Diese Faktoren verdeutlichen die Notwendigkeit eines umfassenden und klar definierten Governance-Modells,

um bestehende Konflikte aufzulösen und den Datenaustausch vertrauensvoll zu gestalten (Ducuing/Reich 2023, S. 11). Da DPPs als zentrale digitale Dateninfrastrukturen konzipiert sind, bedarf es klar definierter organisatorischer Zuständigkeiten, transparenter Zugriffsregelungen sowie robuster Mechanismen zur Gewährleistung von Datenschutz und Datensicherheit. Fehlen solche Governance-Strukturen, besteht das Risiko, dass die hohe Komplexität der Systeme deren Funktionsfähigkeit, Sicherheit und Akzeptanz beeinträchtigt und damit die angestrebten Ziele der Kreislaufwirtschaft gefährdet (Ducuing/Reich 2023, S. 16–17).

3.2 Schutz sensibler und proprietärer Daten

Die Einführung von DPPs erfordert somit einen sicheren und vertrauenswürdigen Umgang mit sensiblen Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Obwohl die gemeinsame Datennutzung systemisch nachhaltige und wettbewerbsfähige Potentiale aufweist, herrscht in der Praxis noch Zurückhaltung. Unternehmen fürchten Nachteile durch die Offenlegung vertraulicher Informationen, insbesondere wenn Unsicherheit darüber besteht, ob andere Akteure ebenfalls transparent agieren (Walden Holding 2022). Diese Problematik lässt sich auf das sozialpsychologische Modell des Gefangenendilemmas ableiten, bei dem verschiedene Akteure eine Kooperation aus gegenseitigem Misstrauen vermeiden, obwohl sie von gemeinsamer Zusammenarbeit profitieren würden. Dabei halten sie sich zurück unter der Hoffnung, durch die unterlassene Zusammenarbeit dennoch die Vorteile aus der Teilnahme anderer Akteure zu profitieren (Kollock 1998, S. 184–187). Zur erfolgreichen Umsetzung des DPP ist deshalb ein umfassendes Cybersecurity-Konzept notwendig, welches die Prinzipien der Vertraulichkeit, IP-Sicherheit und Verfügbarkeit der Daten garantiert. Ein zentrales Element dabei ist die Implementierung rollenbasierter Zugriffsrechte entlang der Wertschöpfungskette (Jansen et al. 2023, S. 6–7). Der Zugang zu Daten sollte nur auf Basis des „Need-to-Know-Prinzips“ gewährt werden. Jeder Stakeholder erhält damit ausschließlich Zugriff auf jene Informationen, die für seine jeweilige Rolle relevant sind und tatsächlich benötigt werden (Kempis 2025; Europäische Kommission, S. 41). Ein solches Zugriffskonzept ist nicht nur technisch, sondern auch regulatorisch essenziell. Die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) verlangt zudem in Artikel 25 ausdrücklich, dass personenbezogene Daten nur bei zwingender Notwendigkeit und gemäß den Prinzipien des „Privacy by Design“ verarbeitet werden dürfen (Europäische Kommission 2025; Intersoft 2024). Dies ist insbesondere relevant, da im Kontext des DPP individuelle Produktnutzungsdaten mit Rückverfolgbarkeitssystemen

kombiniert werden (Plociennik et al. 2022, S. 1489–1490). Eine exemplarische technische Ausgestaltung des Zugriffsmanagements wird in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt. Diese verdeutlicht differenzierte Datenkategorien im DPP sowie deren spezifische Zugriffsrechte für verschiedene Stakeholdergruppen, was die Notwendigkeit eines detaillierten Zugriffsmodells unterstreicht (Galotala, S. 7).

Unique product identifier Unique economic operator identifier Unique facility identifier Additional data for automatic checks by custom authorities
Circularity data accessible to consumers Circularity data accessible to other end-users (e.g. recyclers) Circularity data accessible to authorities
Sustainability data accessible to consumers Sustainability data accessible to other end-users (e.g. recyclers) Sustainability data accessible to authorities
Other product-related data accessible to consumers Other product-related data accessible to other end-users (e.g. recyclers) Other product-related data accessible to authorities
Compliance related documents accessible to consumers Compliance related documents accessible to other end-users (e.g. recyclers) Compliance related documents accessible to authorities

Abbildung 17: Mögliches Need-to-Know Zugriffsmodell (Galotala, S. 7)

3.3 Digitale Schlüsseltechnologien als Erfolgsfaktoren

Dieses Kapitel widmet sich der Einordnung ausgewählter digitaler Schlüsseltechnologien im Kontext des DPP. Ziel ist es, deren potenzielle Bedeutung für die technische und strategische Umsetzung des DPP zu ermitteln und ihre Relevanz für die Erreichung unternehmerischer Nachhaltigkeitsziele systematisch zu reflektieren.

3.3.1 Internet of Things

Das IoT stellt ein Netzwerk physischer Geräte dar, die durch Sensoren, Aktuatoren und eingebettete Software miteinander vernetzt sind, um Daten zu erfassen, auszutauschen und darauf basierend Prozesse autonom zu steuern (Gubbi et al. 2013, S. 4). Im Kern ermöglicht IoT die nahtlose Kommunikation zwischen verteilten Geräten, wodurch Echtzeitinformationen generiert und genutzt werden können. Wissenschaftliche Untersuchungen betonen, dass IoT-Anwendungen in zahlreichen Industriezweigen zur Optimierung von Betriebsabläufen beitragen, indem sie detaillierte Einblicke in physische Prozesse bieten. Die Integration standardisierter Schnittstellen und Protokolle stellt dabei sicher, dass heterogene Systeme miteinander kompatibel sind. Dadurch wird eine hohe Datenverfügbarkeit erreicht, die eine präzisere Analyse und Steuerung von Prozessen erlaubt

(Li/Da Xu/Zhao 2014, S. 6–11). Durch die Kombination von Sensortechnologie, drahtloser Kommunikation und Cloud-Computing werden sowohl Skalierbarkeit als auch Flexibilität in der Datenverarbeitung gewährleistet (Gubbi et al. 2013, S. 3–4). Die Anwendung von IoT-Technologien für den DPP kann entscheidend sein, wenn sie die kontinuierliche und automatisierte Erfassung relevanter Produktdaten und Materialflüsse entlang des gesamten Lebenszyklus ermöglichen kann (Abedi/Saari/Hakola 2024, S. 5). Im Kontext des DPP übernehmen IoT-Komponenten wie RFID-Chips, Maschinen- und Produktsensoren eine Schlüsselfunktion bei der Generierung dynamischer Daten (Abedi/Saari/Hakola 2024, S. 4). Die automatisierte Datenverarbeitung erlaubt eine datenbasierte Überwachung und Entscheidungsfindung in Echtzeit, etwa bei der Produktüberwachung, präventiven Wartung (Predictive Maintenance) oder zur Optimierung logistischer Prozesse. Durch IoT-gestützte DPPs können messbare Einblicke in Produkteigenschaften und -verhalten entstehen, was sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Perspektive vorteilhaft sein kann (Voulgaridis et al. 2024, S. 708–709).

3.3.2 Blockchain Technologie

Die Blockchain-Technologie stellt eine verteilte, dezentral organisierte Datenbank (Distributed Ledger) dar, in dem Daten in Blöcken, die kryptographisch miteinander verknüpft sind, transparent gespeichert werden. Die Generierung der Blöcke erfolgt durch Kryptografie aus den zuvor erfassten Transaktionen. Die so entstehenden Blöcke werden in einer Kette aneinandergereiht und vor- und nachgelagert miteinander verknüpft, sodass ein mehrfach legitimes Datenkonstrukt entsteht (Schacht/Lanquillon 2019, S. 14). Innerhalb dieses Prozesses nimmt die Hash-Funktion eine zentrale Rolle ein. Sie dient der Erzeugung eines eindeutigen, nicht umkehrbaren Fingerabdrucks fester Länge (Hash-Wert), welcher aus beliebigen Eingangsdaten generiert wird. Bereits geringfügige Änderungen am Input führen zu unterschiedlichen Hash-Werten. Diese Eigenschaft gewährleistet die Integrität der Daten, da jede Veränderung innerhalb eines Blocks den Hash-Wert verändert und somit nachweisbar wird (Fill/Meier 2020, S. 20–21). Diese Struktur gewährleistet, dass einmal erfasste Transaktionen nahezu unmöglich zu manipulieren sind, da jede Änderung an einem Block die nachfolgenden Blöcke unweigerlich beeinflussen würde. Im wissenschaftlichen Diskurs wird Blockchain als eine Methode betrachtet, um Vertrauen in digitalen Transaktionen zu etablieren, da sie Transparenz und Unveränderlichkeit der Daten sicherstellt. Die dezentrale Natur der Technologie eliminiert des Weiteren die Notwendigkeit einer zentralen Kontroll- und Aktionsinstanz und ermöglicht

einen direkten sicheren Datenaustausch zwischen unabhängigen Parteien (Schacht/Lanquillon 2019, S. 5–6).

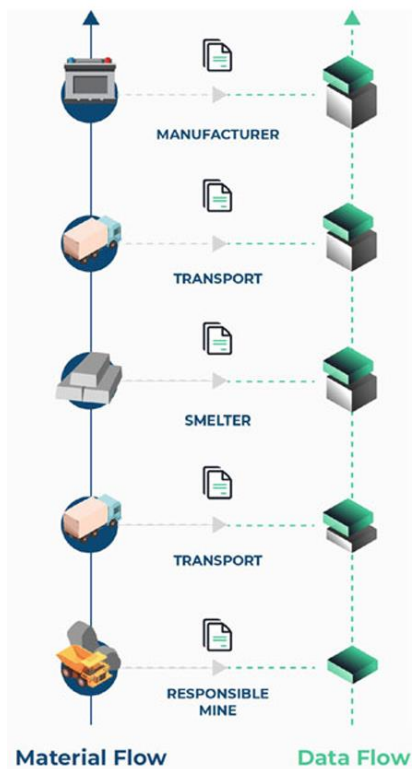


Abbildung 18: Materialfluss entlang der Blockchain im DPP (Williams 2022, S. 5)

Blockchain-basierte DPP ermöglichen somit eine dezentrale, fälschungssichere und transparente Speicherung produktspezifischer Informationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Die verteilte Datenhaltung, bei der jede teilnehmende Instanz eine vollständige Kopie des Ledgers besitzt, verringert zentrale Datenausfallrisiken und erschwert Datenmanipulationen. Durch kryptografischer Verfahren wird der Zugriff auf sensible Informationen kontrolliert, was die Integrität und Sicherheit der Daten gewährleistet (Vlachos/Damvakeraki 2024, S. 18–21). Zudem erlaubt die Blockchain-Technologie die chronologische Dokumentation aller Prozessschritte in Form von Transaktionen innerhalb der Lieferkette. Neue Informationen werden ausschließlich nach Konsens der Beteiligten in die Blockchain integriert, wodurch die Validität und Nachvollziehbarkeit der Daten sichergestellt wird. In privaten Blockchains trägt der Einsatz digitaler Zertifikate im Gegensatz zu öffentlichen Blockchains zusätzlich zur Zugriffssicherheit bei. Ferner ermöglichen intelligente Verträge („Smart Contracts“) die automatisierte, bedingungsbaasierte Ausführung von Transaktionen, wodurch Prozesse beschleunigt und der Einsatz intermediärer Instanzen reduziert werden kann. Die private Blockchain bietet somit zwar eine höhere Kontrolle und Steuerung, bietet jedoch nur einen beschränkten Zugriff,

welcher der öffentlichen Einsehbarkeit durch Endnutzer entgegensteht. Aufgrund dessen ist ein hybrider Ansatz aus einer Kombination privater und öffentlicher Blockchains sinnvoll. Dieser stellt je nach Berechtigung die relevanten Daten bereit und gewährleistet den notwendigen Datenschutz, wenn er erforderlich ist und stellt gleichzeitig die Transparenz und Dezentralität durch öffentliche Blockchainteile sicher (Abreu/Pereira/Barata 2025, S. 4–5).

3.3.3 Process Mining

Process Mining (PM) stellt ein analytisches Verfahren dar, das auf der Auswertung von Prozessdaten basiert und eine Schnittstelle zwischen klassischem Data Mining und dem Management betrieblicher Abläufe bildet. Ziel ist es, reale Geschäftsprozesse auf Basis von Ereignisprotokollen (Event Logs), die in gängigen Informationssystemen anfallen, zu analysieren, zu überwachen und zu verbessern. Geschäftsprozesse bestehen hierbei aus einer Reihe von Aktivitäten, die in einem organisatorischen und technischen Umfeld koordiniert ausgeführt werden. Diese Aktivitäten dienen gemeinsam der Verwirklichung eines unternehmerischen Ziels. Jeder Geschäftsprozess wird von einer einzelnen Organisation ausgeführt, kann jedoch mit Geschäftsprozessen anderer Organisationen in Wechselwirkung stehen (Weske 2012, S. 5). Ausgangspunkt jeder Prozessanalyse ist dabei stets ein Event Log, in dem jede Aktivität einem konkreten Fall (Case) zugeordnet ist und zusätzliche Informationen wie Zeitstempel, Ressourcen oder Kontextdaten enthalten kann (van der Aalst 2012, S. 1). Die Geschäftsprozesse werden üblicherweise über ein (erweitertes, interaktives) Geschäftsprozessmodell, auch Business Process Model (BPM) genannt, dargestellt. Dies besteht aus einer Menge von Aktivitätsmodellen sowie Ausführungsbedingungen zwischen diesen. Eine Geschäftsprozessinstanz stellt hierbei einen konkreten Fall (Case) im operativen Geschäft eines Unternehmens dar und setzt sich aus einzelnen Aktivitätsinstanzen zusammen. Dabei dient jedes Geschäftsprozessmodell als Vorlage für eine Vielzahl von Prozessinstanzen, ebenso wie jedes Aktivitätsmodell als Vorlage für mehrere Aktivitätsinstanzen dient (Weske 2012, S. 7). Drei Hauptfunktionsarten des PM lassen sich unterscheiden. Process Discovery erzeugt ohne Vorwissen ein Prozessmodell allein aus den Logdaten und zeigt dabei häufig unerwartete Abläufe auf. Conformance Checking überprüft, inwiefern ein vorhandenes Modell mit den real dokumentierten Abläufen übereinstimmt. Model Enhancement erweitert bestehende Modelle mithilfe empirischer Informationen etwa um Durchlaufzeiten oder Engpässe (van der Aalst et al. 2012, S. 7). Darüber hinaus erlaubt PM Analysen aus verschiedenen

Perspektiven: Neben dem Kontrollfluss, der die Reihenfolge der Aktivitäten beschreibt, können auch organisationale, fallbezogene oder zeitliche Aspekte wie Ressourcenverteilung, Fallcharakteristika oder Servicezeiten einbezogen werden (van der Aalst et al. 2012, S. 8). In dieser Arbeit wird der Fokus auf das PM von Celonis gelegt. Celonis ist eine aktuell führende Plattform, die sich durch patentierte Algorithmen, Echtzeitfähigkeit durch IoT-Anbindung, hohe Skalierbarkeit, Schnittstellenfähigkeit und Systemintegration aller gängigen Informationssysteme und damit einer hohen Interoperabilität hervorhebt. Die Systematik basiert auf einem objektzentrierten Ansatz sowie einer intuitiver Nutzeroberfläche und eignet sich daher insbesondere für komplexe und datenintensive Kontexte (Celonis 2025a). Dies könnte insbesondere für den DPP einen vielversprechenden Mehrwert darstellen, da sich mithilfe von PM der gesamte Lebenszyklus auf Produktebene in Echtzeit mithilfe von IoT-Daten transparent nachvollziehen lassen könnte. Die Kombination aus PM und DPP erscheint somit vielversprechend, um datenbasierte Entscheidungsgrundlagen für eine ökonomisch und ökologisch nachhaltigere Unternehmenspraxis zu schaffen.

4 Anwendungsbeispiel: Process Mining im Batteriepass

Die Anwendung von PM auf die Datengrundlage eines DPP wird im folgenden Kapitel exemplarisch anhand eines realitätsnahen Fallbeispiels demonstriert. Ziel ist es, die methodische Vorgehensweise, die gewonnenen Erkenntnisse sowie deren strategische Implikationen entlang des Batterie-Lebenszyklus zu analysieren und daraus Erkenntnisse abzuleiten. Dabei soll demonstriert werden, wie die Prozessanalyse über PM von DPP-Daten konkrete Wettbewerbsvorteile erzeugen können und welche methodischen und systemischen Limitierungen dabei zu berücksichtigen sind.

4.1 Einführung in das Anwendungsbeispiel und methodische Herangehensweise

Dieses Kapitel führt ein PoC ein, der im Rahmen dieser Arbeit durch eine PM-Prozessanalyse durchgeführt wurde. Ziel ist es, exemplarisch aufzuzeigen, wie mittels PM aus den Daten eines DPP operativ und strategisch verwertbare Erkenntnisse entlang des Batterie-Lebenszyklus gewonnen werden können. Im Zentrum steht dabei die methodisch fundierte Demonstration, dass der Einsatz eines DPP eine konsolidierte und ganzheitliche Datenbasis schafft, welche tiefergehende Analysen erst ermöglicht und strategische Wettbewerbsvorteile generieren kann. Um die generelle Machbarkeit und konzeptionelle Relevanz einer solchen Datenanalyse zu verdeutlichen, wurde ein exemplarisches Fallbeispiel erstellt, welches 20 fiktive Batterien für Elektrofahrzeuge (Electronic Vehicles, EV)

über wesentliche Stationen ihres Lebenszyklus begleitet. Diese umfassen die Prozessschritte Rohstoffeingang, Zellauslieferung, Qualitätsprüfung, Integration ins Fahrzeug, Kundennutzung inklusive periodischer SoH-Kontrollen sowie die Entscheidung, wie nach dem ersten Lebensende (End of Life, EoL: Second Life, Recycling oder Entsorgung) mit der Batterie verfahren wird, was im folgenden Prozessschaubild auf Grundlage eines BPM dargestellt wird.

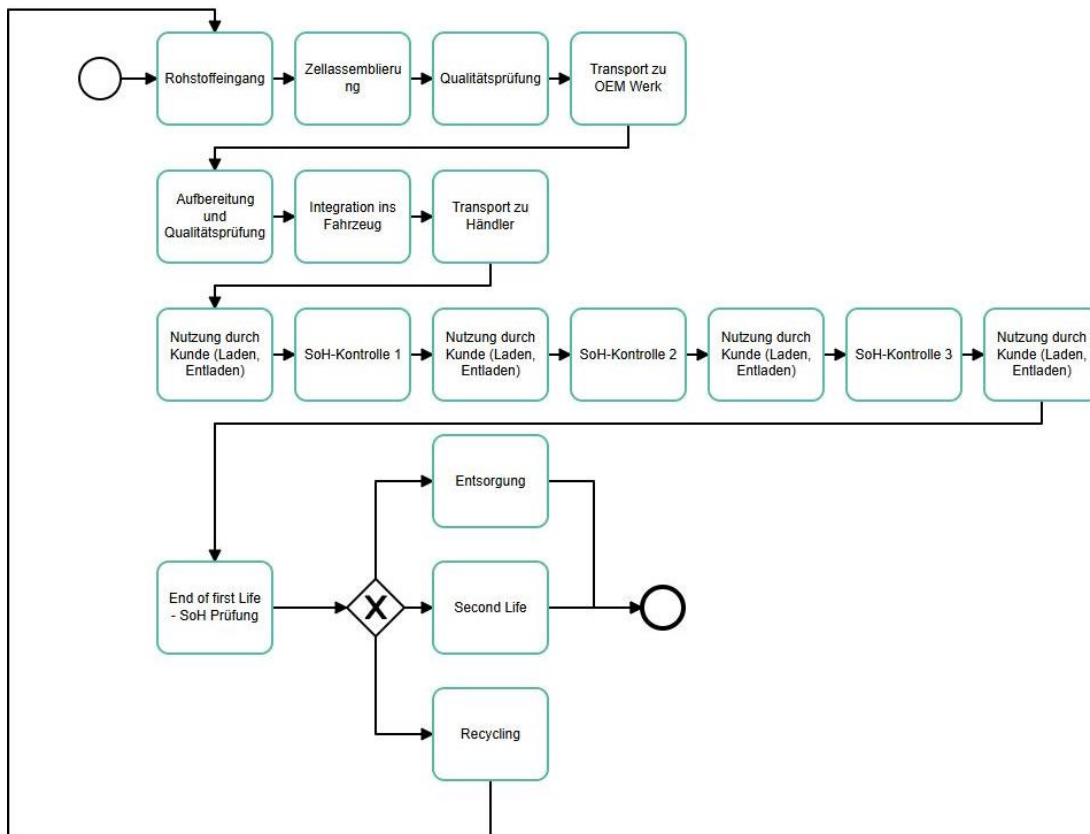


Abbildung 19: BPM-Referenzmodell des Batterie-Eventlogs (eigene Darstellung)

Dabei wurden in einem fiktiven Beispieldatensatz die Aktivitäten des Batterielebenszyklus erstellt sowie unterschiedliche Attributsdimensionen angelegt, wie beispielsweise CO₂-Emissionen oder Transport- und Montagekosten, aber auch batteriebezogene Produkt- und Montagedaten wie die initiale Stromkapazität, Abweichung vom Referenzstrom zum Zeitpunkt der Fahrzeugintegration und elektrischer Innenwiderstand. Des Weiteren wurden fiktiv-anonyme, nutzungsbezogene Daten wie die Anzahl an Schnell- und Langsamladevorgängen und Ereigniskennzahlen wie Temperaturbelastungen in den Datensatz integriert. Bei der Erstellung des Eventlogs wurden die Daten bewusst so erstellt, dass sie eine natürliche Varianz im Lebenszyklus und eine Korrelation der Werte in Abhängigkeit anderer aufweisen (s. Anhang 7). Diese Daten wurden in einem

tabellarischen Eventlog konsolidiert, welcher die Basis für diese Prozessanalyse Celonis darstellt. Der Eventlog (s. Anhang 1) sowie eine ausführliche Übersicht der Beschreibungen, Grenzwerte und Korrelationen der Attribute (s. Anhang 2) ist dem Anhang zu entnehmen und wurde strategisch erweitert durch die daraus abgeleiteten Mehrwerte für Wirtschaft, Umwelt und Regulatorik (s. Anhang 3). Der Umfang des Fallbeispiels wurde bewusst auf Kernaktivitäten reduziert und fokussiert sich auf die zentralen Akteure Batteriehersteller, OEM und Endkunde. Die betrachteten Beispieldaten wurden unter der Annahme eines sicheren und interoperablen Datenraumes verwaltet. Methodisch erfolgte die Durchführung im Rahmen des Celonis Student Thesis and Research (STaR) Programms, welches Zugriff auf ausführliche Trainingsmaterialien, wie die Rising Research Star Lernplattform und die Lizenz für die Academic Execution Management System (EMS) Software von Celonis gewährleistete. Diese akademische Version verfügt über alle Funktionen der vollständigen EMS-Lizenz, ist jedoch auf einen Eventlog von 10.000 Zeilen begrenzt (Celonis 2025e). Auf das EMS wurde über einen cloudbasierten Zugriff über den Webbrowser zugegriffen. Für die praktische Umsetzung wurden im Wesentlichen die Funktionen Business Miner Process Analysis, Conformance Check und Data Explorer eingesetzt. Die Daten wurden zunächst mithilfe des Business Miner und Data Explorers explorativ analysiert und auf Vollständigkeit sowie Eignung geprüft. Hierbei bietet der Business Miner eine vereinfachte Prozessübersicht über die Funktion „What does your process look like?“, welche, analog zur akademischen Definition zu Process Discovery, ohne technische Vorkenntnisse einen ersten Einblick in den Prozess und dessen prominentesten Varianten bietet. Somit kann ein Überblick (s. Anhang 4) geschaffen werden und Abweichungen sichtbar gemacht werden (Celonis 2025d). Anschließend lassen sich diese Prozessdaten in das Celonis Studio überführen. Dies ist der zentrale Sammelpunkt für tiefgehende Analysen (Celonis 2025g). Dort lassen sich unterschiedliche Arbeitsbereiche (Spaces) anlegen, welche initial mit einem oder mehreren Datenmodellen verknüpft werden. Innerhalb eines Space lassen sich wiederum verschiedene nutzungsbezogene Bereiche (Assets) anlegen. Dabei wurden innerhalb des PoC die Funktionen Analysis und Data Explorer verwendet. Hierbei lassen sich durch den Data Explorer erste Aggregationen und Teilmengen erstellen, um die Daten zu strukturieren und einen Überblick über Kennzahlen und Randwerte zu erlangen (s. Anhang 5). Damit konnten erste Erkenntnisse über das Verhältnis des Ladeverhaltens (s. Anhang 5.1), Prozesse mit den höchsten CO₂-Emissionen (s. Anhang 5.2), Hauptkostenträger (s. Anhang 5.3), hohe

Transportbelastungen (s. Anhang 5.4) sowie dessen Zuordnung zu Transportwegen (s. Anhang 5.5) getroffen werden. Eine Gegenüberstellung der CO₂-Emissionen und verursachten Kosten erlaubte weitere Einblicke in die Transportwegedynamik (s. Anhang 5.6). Über eine Datenaggregation können Messwertintervalle erfasst werden, wie in Anhang 5.7 exemplarisch anhand des in der Zellassemblierung erfassten Wert „initial_capacity_Wh“ dargestellt wurde. Dadurch wurden Mindest-, Maximal-, Durchschnitts- und Medianwerte aller Batterien im erstellten Zyklus ersichtlich. Die Hauptanalyse wurde schließlich im Asset Analysis durchgeführt. Hier kann der Prozess in unterschiedlichen Arbeitsfeldern (Sheets) analysiert, messbar und sichtbar gemacht werden. Diese sind jeweils mit übergeordneten Filtern versehen, um alle Prozessauswertungen auf allen Sheets aus unterschiedlichen Betrachtungsweisen einzusehen (Celonis 2025f).

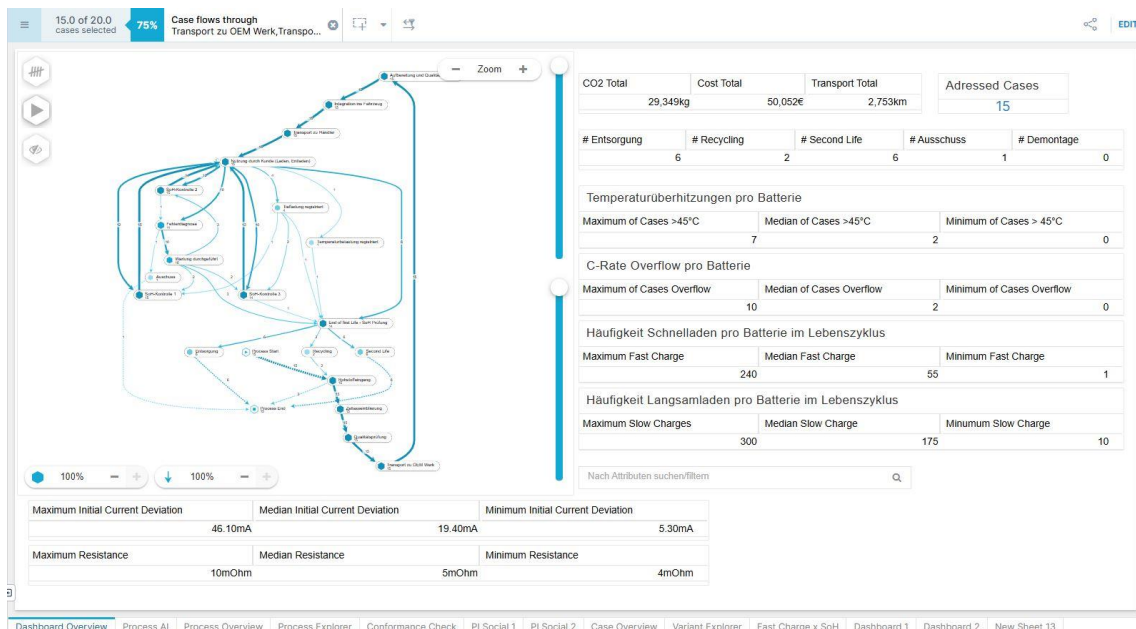


Abbildung 20: Dashboard Overview: Prozessabbild und KPIs (eigene Darstellung)

Zunächst wurde ein einführendes Dashboard angelegt, welche die wichtigsten Kennzahlen in aggregierten Online Analytical Process-Tabellen (OLAP Tables) zusammenträgt und mit der Prozessabbildsfunktion Process Explorer erweitert wurde. OLAP ist eine Technologie, die es ermöglicht, komplexe Abfragen sowie multidimensionale Analysen auf umfangreichen Datenbeständen in einem Datenraum durchzuführen (IBM 2025). Der Process Explorer bietet hierzu die Möglichkeit, nach Granularität der Aktivitäten und Verknüpfungen, als auch nach Zeitstempeln (Tag/Stunde) oder Aktivitäten, Durchlaufzeit und Häufigkeit der Cases (s. Anhang 6.1) zu filtern. Ein Case stellt hierbei den Prozess einer einzelnen Batterie dar (Celonis 2025j). Anschließend wurde das Analysis Sheet Process AI angelegt (s. Anhang 6.2). Damit lässt sich auf Basis der Häufigkeit von

Prozesspfaden ein sogenannter „Happy Path“ feststellen. Dieser stellt jene Prozessvariante dar, welche am häufigsten im Eventlog vertreten ist. An dieser Stelle ist anzumerken, dass dies nicht immer der optimale, sondern der häufigste Prozesspfad ist – in diesem Fall endete der Happy Path am häufigsten in der Entsorgung der Batterien, statt im nach Zirkularitätsbestrebungen optimalen Lebensweg der Wiederverwendung (Second Life). Des Weiteren können erste Prozessabweichungen wie beispielsweise Fehlerdiagnosen, Wartungen und Defekte erkannt werden und über eine sogenannte Root Cause Analysis die initialen Abweichungsfälle sichtbar gemacht werden (Celonis 2025i).

Violations		
55% 11 of cases	<i>Fehlerdiagnose</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 1,391 Days longer
		Effect on steps per case + 17.6 Steps per case
50% 10 of cases	<i>Wartung durchgeführt</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 1,454 Days longer
		Effect on steps per case + 18.1 Steps per case
25% 5 of cases	<i>Defekt erkannt, Dismontage</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 26 Days longer
		Effect on steps per case + 6.6 Steps per case
20% 4 of cases	<i>Tiefladung registriert</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 1,489 Days longer
		Effect on steps per case + 17.5 Steps per case
5% 1 of cases	<i>Temperaturbelastung registriert</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 1,497 Days longer
		Effect on steps per case + 18.0 Steps per case
5% 1 of cases	<i>Ausschuss</i> is an undesired activity Add to allowlist View cases in...	Effect on throughput time 755 Days longer
		Effect on steps per case + 13.0 Steps per case

Abbildung 21: Erkannte Prozessabweichungen durch Process AI (eigene Darstellung)

Anschließend können im Process Overview (Prozessübersicht) über die einzelnen Funktionen weitere Informationen sichtbar gemacht werden. So bietet die Prozessübersicht eine Erweiterung der Process AI Auswertung, wo die Funktion der Durchlaufzeitanalyse analog die Produktlebensdauer chronologisch repräsentiert, was Rückschlüsse über mögliche Zusammenhänge bieten könnte (s. Anhang 6.3). Über die Funktion „Activities“ lassen sich des Weiteren die Aktivitäten des Lebenszyklus in Betracht auf einen gesetzten Zeitrahmen nach Häufigkeit und Aktivitätsbeziehung in einem Blasendiagramm darstellen (Celonis 2025k).

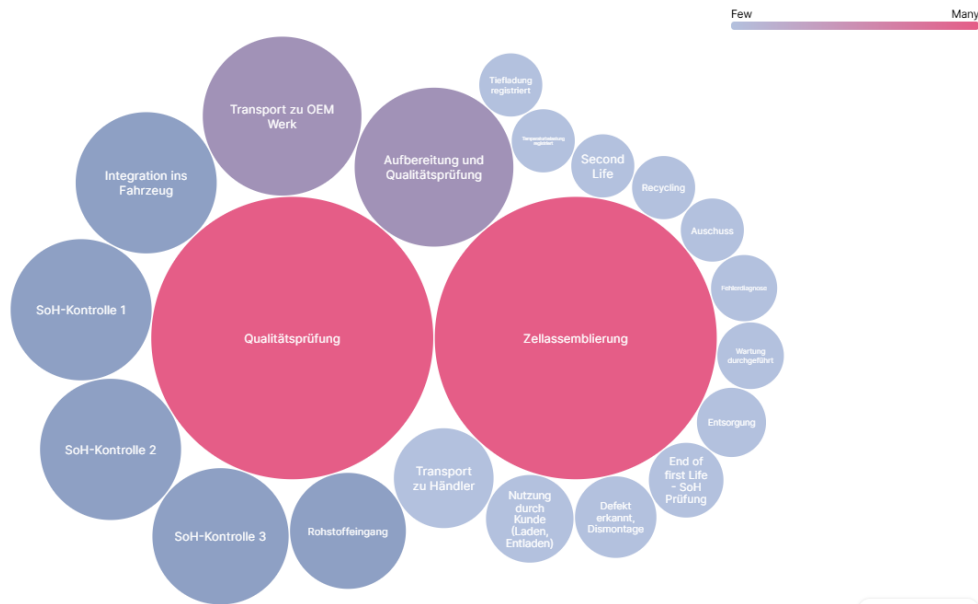


Abbildung 22: Aktivitäten im Bubblediagramm in der Prozessübersicht (eigene Darstellung)

Durch die Auswertung von Interaktionsmuster zwischen Batterieherstellern, OEMs und Kunden (s. Anhang 6.4) könnte sichtbar werden, welche Akteure besonders intensive Prozessbeteiligung erfordern. Dies bietet Potenzial zur Optimierung der Stakeholder Kommunikation durch präzisere Abstimmung und Automatisierung in Bezug auf die jeweiligen Prozessschritte der Akteure. Anschließend bietet die Analysefunktion „Conformance Check“ eine genaue Überprüfung der Prozessabweichungen von einem gewünschten Optimalprozess. Hierbei kann über ein integrierten BPM-Editor ein ideales Prozessabbild modelliert werden, welches anschließend mit dem Ist-Modell abgeglichen wird (s. Abb. 21). Durch den Abgleich mit einem Idealmodell werden so alle weiteren ungewünschte Aktivitäten (Violations) aufgedeckt (Celonis 2025c). Im „Activity and Case Table“ bietet sich eine einfache tabellarische Übersicht aller Fälle aus dem Eventlog (s. Anhang 6.5). Dies wurde dazu genutzt, um sich einen Überblick über wesentliche Kennzahlen pro Case zu verschaffen, wie beispielsweise dessen Lebensdauer und Anzahl an Aktivitäten (Celonis 2025b). Der Variantenexplorer ermöglicht anschließend eine Unterteilung in die zehn prominentesten Prozesspfade des Eventlogs und stellt diese isoliert voneinander dar.

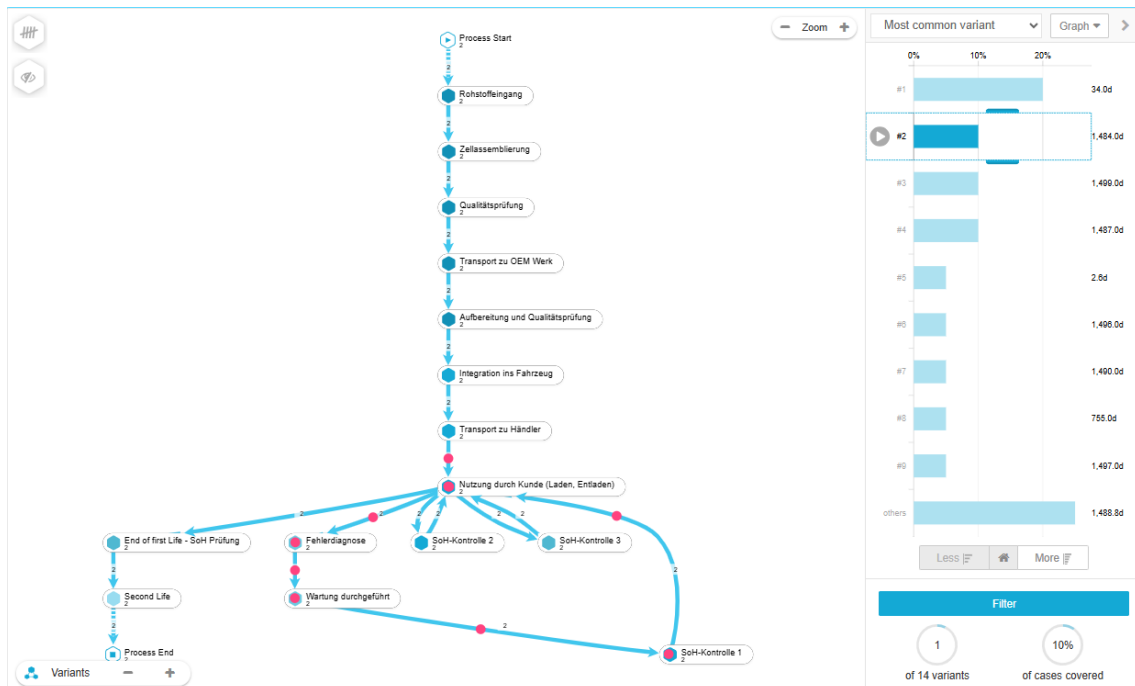


Abbildung 23: Unterschiedliche Prozessvarianten im Variant Explorer (eigene Darstellung)

Über eine Animationsfunktion lassen sich so die Prozessschritte schrittweise und detailliert nachvollziehen (Celonis 2025i). Zur Darstellung und Interpretation der Ergebnisse wurden gezielte Abfragen in Process Query Language (PQL) durchgeführt sowie Standardfunktionen (Aggregation, Verhältnisberechnung, Bucketing) angewandt. Die PQL ist eine domänenspezifische Sprache von Celonis, welche speziell auf die Prozessdatenmodellierung in professioneller Geschäftsanwendung ausgelegt ist. Die Sprache ermöglicht es, gezielte Abfragen bezüglich komplexen Geschäftsprozessen durchzuführen und orientiert sich dabei an der Syntax der Datenbanksprache SQL (Celonis 2025h). Abschließend erfolgte die Überführung aller relevanten Ergebnisse in interaktive Dashboards, welche qualitative und quantitative Analysen zusammenfassen und je nach gesetzter Fokussierung die relevanten Ergebnisse visualisiert.

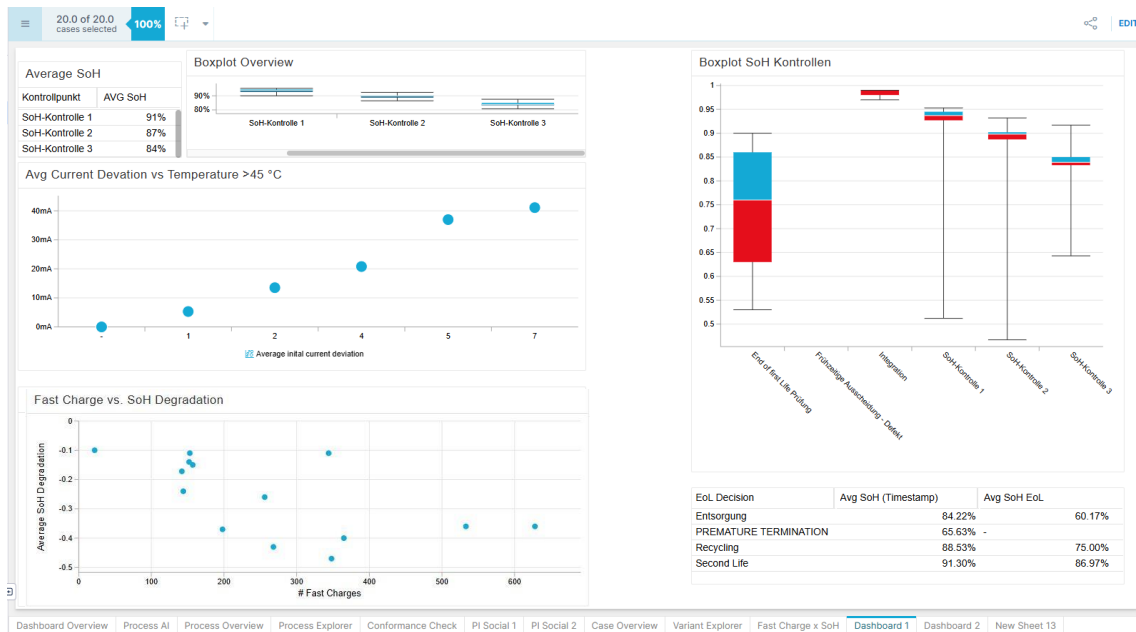


Abbildung 24: PM Dashboard (eigene Darstellung)

4.2 Umsetzung und Ergebnisse des PoC

Nun werden die konkreten Ergebnisse des durchgeführten PoC aufgezeigt, welche exemplarisch die Anwendung von PM auf die im DPP verfügbaren Daten demonstriert und dessen Mehrwert aufzeigen soll. Im Zentrum der Analyse stehen vier zentrale Erkenntnisdimensionen, deren Relevanz sich im Verlauf der datengetriebenen Auswertung bestätigt hat. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen nicht nur die operative Bedeutung einzelner Erkenntnisse, sondern liefern auch strategische Implikationen für nachhaltige Wettbewerbsvorteile entlang des gesamten Lebenszyklus einer Batterie. Ein zentraler Befund der Analyse ist die mögliche Korrelation zwischen der Anzahl der Schnellladezyklen und einer signifikant beschleunigten Degradation des Batteriezustandes (SoH). Die Auswertung auf Basis des erstellten Eventlogs zeigt, dass Batterien, die einem höheren Anteil an Schnellladevorgängen ausgesetzt waren, einen schnelleren gradualen Abfall des SoH über den betrachteten Lebenszyklus aufweisen

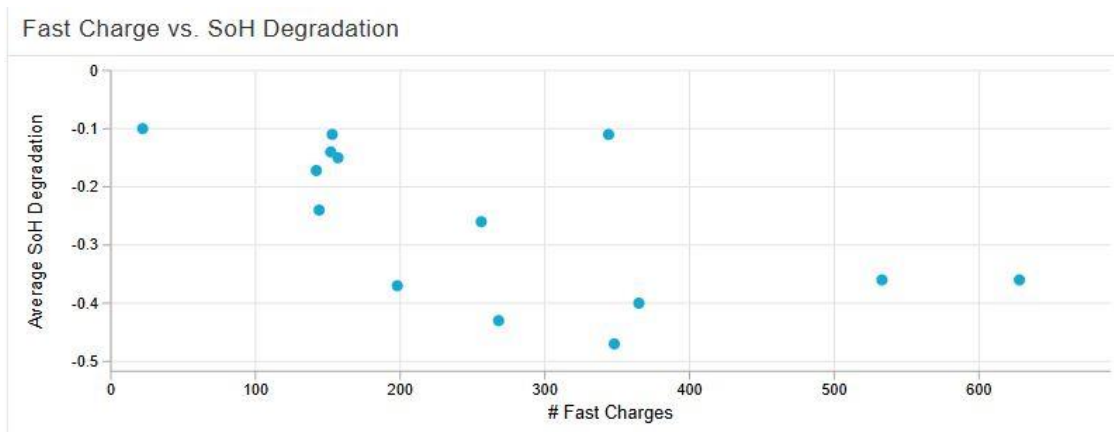


Abbildung 25: Scatterplot Diagramm für die Korrelation von Schnellladevorgängen & SoH Abfall (eigene Darstellung)

Diese Erkenntnis macht Auswirkungen konkret messbar und unterstreicht die Bedeutung eines kontrollierten Nutzungsverhaltens. Dies könnte Handlungsfelder für OEMs und Flottenbetreiber eröffnen, etwa durch intelligente Steuerungsansätze wie optimierte Ladeprofile, kundenspezifische Nutzungsberatung oder Preismodelle, die ein schonenderes Ladeverhalten incentivieren. Des Weiteren wurde in einem Dashboard eine Übersicht erstellt, welche das Verhältnis zwischen Schnellladevorgängen und dem SoH weiter vertiefen soll und zur Echtzeitüberwachung durch ggf. IoT-Schnittstellenerfassung geeignet ist, um den Lebensverlauf einer Batterie cloudbasiert und dynamisch nachzuverfolgen.

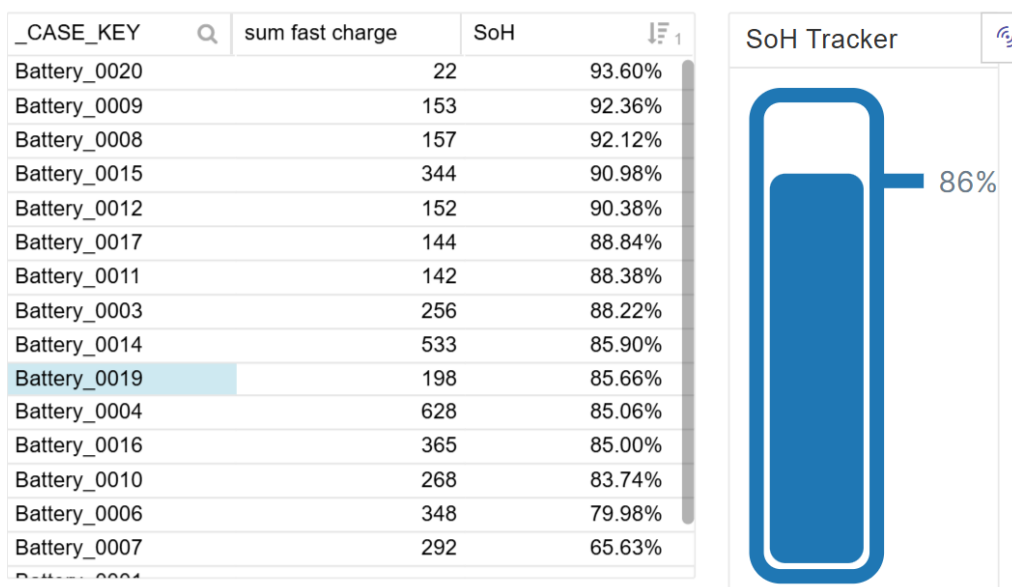


Abbildung 26: SoH Tracker und Übersicht über Schnellladevorgänge pro Batterieeinheit (eigene Darstellung)

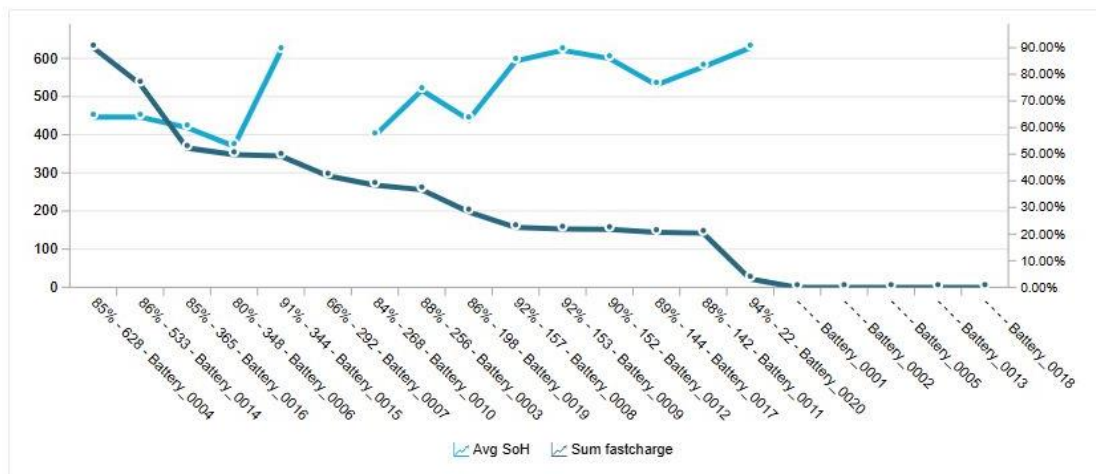


Abbildung 27: Liniendiagramm zur Korrelation zwischen Schnelladevorgängen und den durchschnittlichen SoH-Verlauf (eigene Darstellung)

Die oben beschriebenen Auswirkungen wurden anschließend durch ein Liniendiagramm visualisiert. Hier lässt sich erkennen, dass frühzeitig ausgeschiedene Batterien zu Lücken in der Grafik führen und die Aussagekraft reduzieren. Dennoch können dadurch Trends und Tendenzen sichtbar gemacht werden, da die bestehenden Daten konsistente Muster aufweisen. Eine weitere theoretische Erkenntnis ergab sich durch die Untersuchung der initialen Stromabweichung (*initial_current_deviation_mA*) im Kontext der Zellenassemblierung. Die Analyse konnte korrelativ visualisieren, dass hohe anfängliche Abweichungen eng mit später auftretenden Problemen, insbesondere Temperaturüberlastungen ($C > 45^\circ\text{C}$) und C-Rate-Überläufen zusammenhängen könnten. Die C-Rate, auch C-Koeffizient genannt, stellt hierbei die Lade- und Entladerate relativ zur maximalen Nennkapazität dar (Batterieforum 2025).

Avg Initial Current Deviation vs Temperature >45 °C

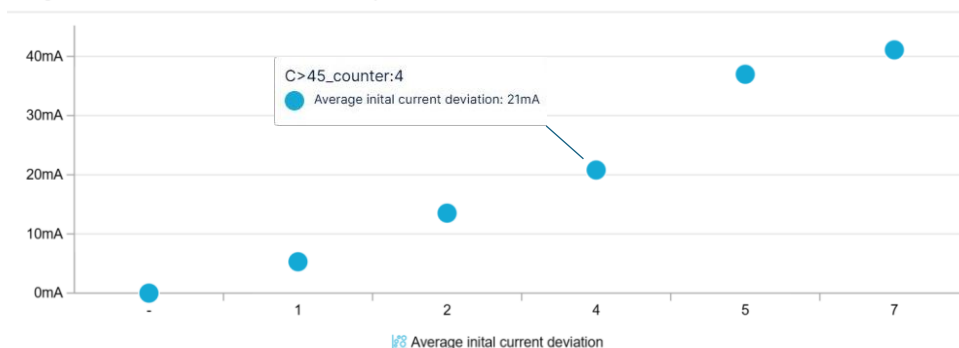


Abbildung 28: Bubble Plot zur Korrelation zwischen des durchschnittlichen initialen Referenzstroms und Anzahl an Temperaturüberlastungen über 45°C (eigene Darstellung)

Avg Initial Current Devation vs C-Rate Overflow

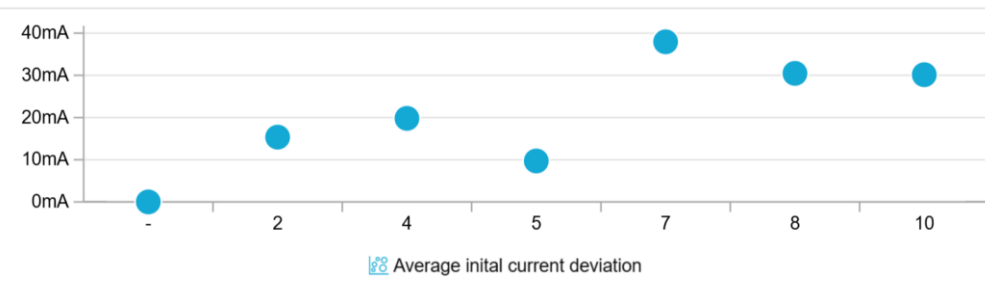
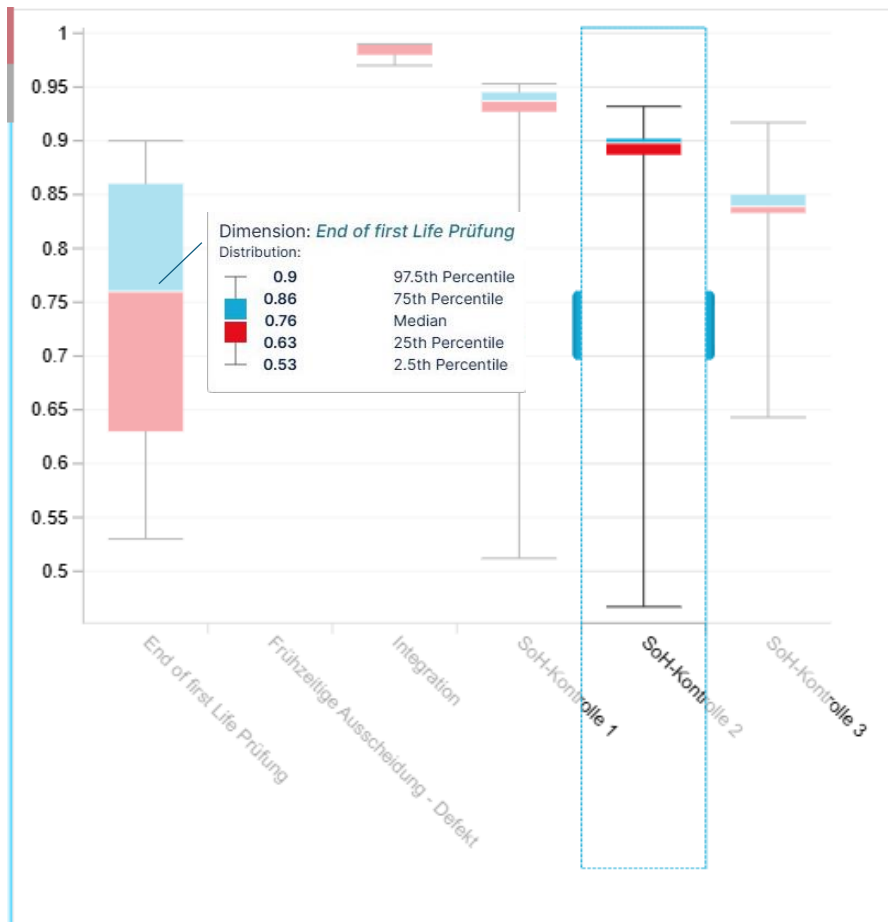


Abbildung 29: Bubble Plot zur Korrelation zwischen des durchschnittlichen initialen Referenzstroms und der Anzahl an C-Faktor Überläufen (eigene Darstellung)

Durch diese retrospektiven Indikatoren lassen sich bereits zum Zeitpunkt der Zellfertigung erste Annahmen über die langfristige Produktqualität treffen. Strategisch bietet diese Erkenntnis die Möglichkeit, frühzeitig Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu implementieren, die Risikobewertung einzelner Lieferanten zu verbessern und langfristig die Garantie- und Wartungskosten durch präventive Eingriffe zu senken. Die Analyse der regelmäßigen SoH-Kontrollen entlang des Batterie-Lebenszyklus zeigt weitere potenzielle Erkenntnisse auf. Die Auswertung zeigt, dass die SoH-Werte zu definierten Kontrollzeitpunkten erste Prognosegrößen für die spätere Verwendung der Batterie darstellen. So kann mittels eines kombinierten Box-Whisker-Plots sichtbar gemacht werden, dass Batterien, die später prozessual als Second Life Batterien eingestuft werden, im Mittel eine deutlich höhere Restkapazität aufwiesen als Batterien, die entsorgt oder recycelt wurden. Dadurch lässt sich bereits in den konsolidierten Daten, als auch der Box-Whisker-Plot-Visualisierung eine erste Differenzierung bei den SoH-Kontrollen während der Nutzung durch den Kunden erkennen. Die Grafik zeigt zudem, dass die SoH-Werte bei den Kontrollen sowie in der Integrationsphase überwiegend im hohen Bereich liegen und nur geringe Streuung aufweisen, während die EoL-Prüfung eine deutlich breitere Standardabweichung mit teils stark differenzierenden Werten aufweist, was den natürlichen, gradualem Abfall der SoH in Batterien in Wechselwirkung mit defekten Batterien aufzeigt. Zudem wird deutlich, dass bei frühzeitig ausgeschiedenen Batterien der SoH-Wert durchgängig sehr niedrig war.



EoL Decision	Avg SoH (Timestamp)	Avg SoH EoL
Entsorgung	88.95%	-
PREMATURE TERMIN...	46.70%	-
Recycling	90.05%	-
Second Life	90.43%	-

Abbildung 30: Box-Whisker-Plot Grafik in Bezug auf die SoH-Messtationen Integration, SoH Kontrolle 1-3 und End of Life Prüfung (eigene Darstellung)

Durch einen Filter im Box-Whisker-Plot Graphen wird ein zeitlicher Querschnitt der durchschnittlichen Batteriegruppen bezüglich ihres prozessualen Lebensendes sichtbar. Somit lässt sich durch einen Filter auf die SoH-Kontrolle 2 erkennen, dass Batterien, die später nachgewiesenermaßen entsorgt werden, bereits frühzeitig erste Anzeichen verringerter SoH-Werte im Vergleich zu Batterien, die in Recycling oder Second Life Prozesspfaden enden, aufweisen. Durch die Verbindung dieser SoH-Prognosewerte mit strategischen Entscheidungsprozessen könnten OEMs und Betreiber frühzeitig eine belastbare Bewertung der Batterien vornehmen und wirtschaftlich sinnvolle, nachhaltige und transparente Entscheidungen für ein Second-Life oder das Recycling treffen. Darüber hinaus erlaubt die Auswertung der Daten eine Untersuchung der Transportprozesse hinsichtlich der ökologischen und ökonomischen Performanz. Die untenstehende Transportmatrix (s.

Tabelle 3) visualisiert, dass Unterschiede in Bezug auf Kosten und CO₂-Emissionen entlang verschiedener logistischer Routen bestehen. Auch wenn Kosten oder CO₂-Emissionen unverhältnismäßig gegenüber der Transportdistanz stehen, können diese dadurch identifiziert werden und somit als ineffiziente Prozesse eliminiert werden. Die Analyse legt nahe, dass sowohl ökonomische als auch umweltbezogene Potenziale durch eine Transportwegeanalyse erschlossen werden könnten. OEMs und Batteriehersteller könnten auf Basis dieser Erkenntnisse ihre Supply-Chain-Prozesse nachhaltiger und effizienter gestalten, beispielsweise durch gezielte Auswahl emissionsarmer Transportrouten oder optimierte Netzwerke zwischen Produktionsstandorten und Händlern.

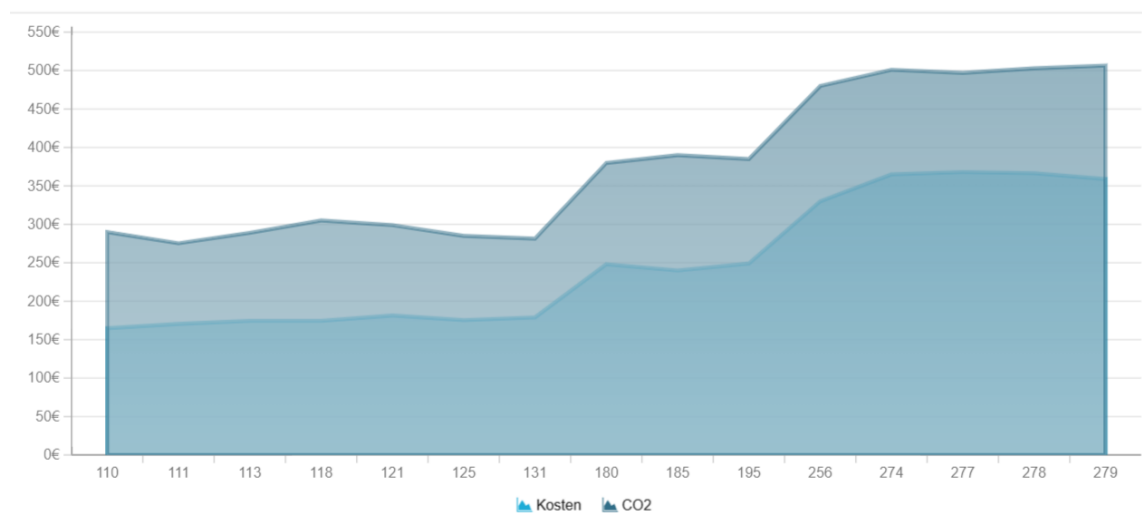


Abbildung 31: Kosten und CO₂-Emissionen pro Transportlänge (eigene Darstellung)

OEM-Werk-Händler-Transportmatrix				
Werk-Händler	Transportweg	CO2 Emissionen	Kosten	
-	-	203kg	563€	
Werk A - Händler 1	57km	207kg	366€	
Werk A - Händler 2	64km	194kg	366€	
Werk A - Händler 3	61km	197kg	353€	
Werk B	83km	209kg	462€	
Werk B - Händler 2	93km	237kg	391€	
Werk C	121km	226kg	491€	
Werk C - Händler 1	128km	269kg	433€	
Werk C - Händler 3	139km	248kg	406€	

Tabelle 3: Transportmatrix zur Darstellung der anfallenden CO₂-Emissionen, Transportwege und anfallenden Kosten pro vorgefallener Transportweg (eigene Darstellung)

Des Weiteren lässt sich durch eine Analyse der Verteilung von Transportwegen der einzelnen Routen zwischen Händler und OEM-Werken eine Tendenz sichtbar machen, die Erkenntnisse über die Transporteffizienz eines Unternehmens geben könnte.

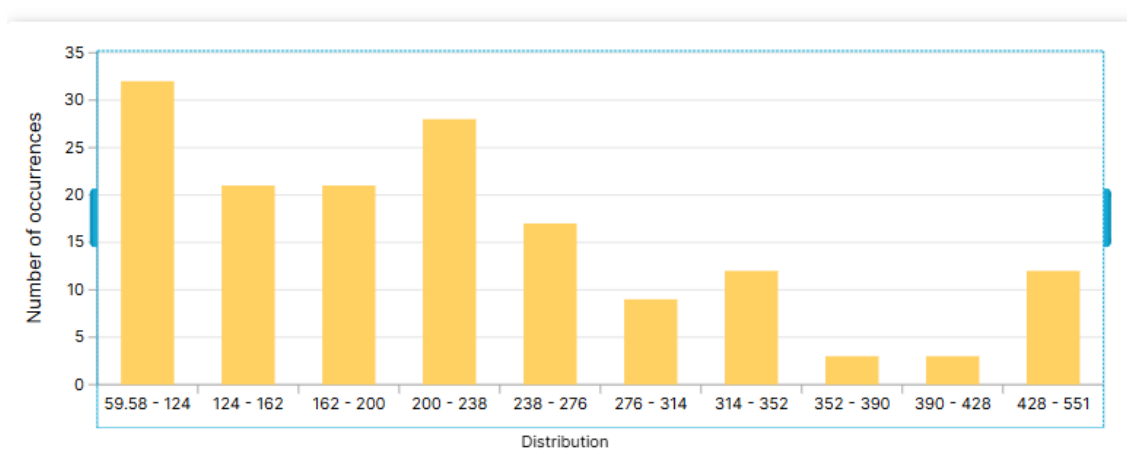


Abbildung 32: Balkendiagramm zur Darstellung verschiedener Transportweglängen und dessen Häufigkeit im Eventlog (eigene Darstellung)

Durch eine grafische Auswertung bezüglich der Auswirkungen auf Kosten und CO₂-Emissionen könnten sich somit gezielt auffälligere Emissions- und Kostentreiber identifizieren lassen. Hierbei lässt sich erkennen, dass die grafische Auswertung durch Fälle, welche durch ein frühzeitiges Lebensende nicht an den Händler weitertransportiert werden, als fragmentierte Werte (Werk B & Werk C alleinstehend) die eindeutige Aussagekraft mindern.

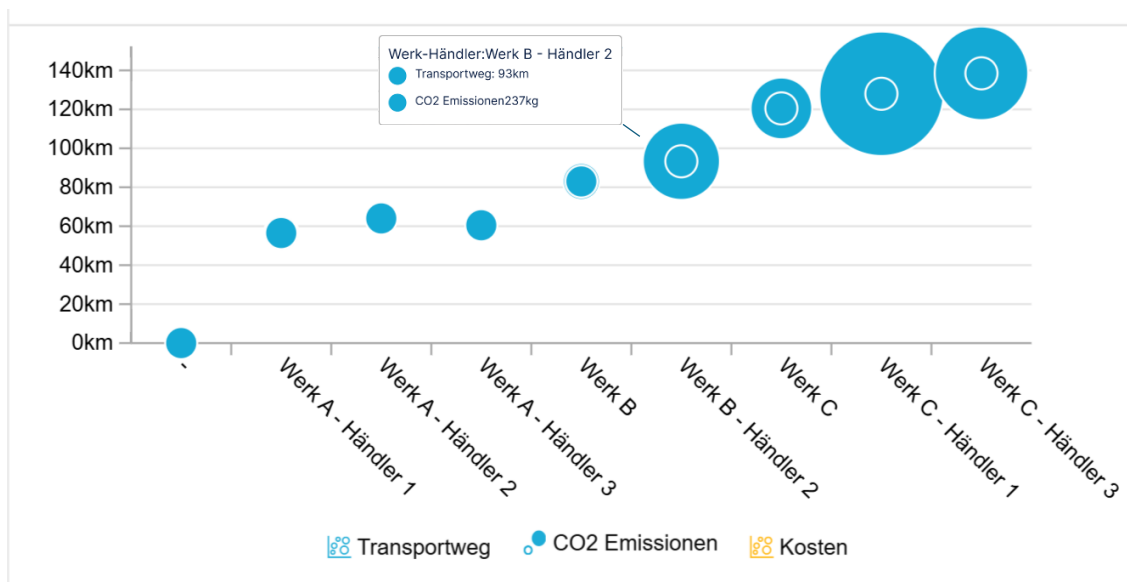


Abbildung 33: Bubble Plot für die Werk-Händler-Transportwege und dessen Verteilung (eigene Darstellung)

Neben diesen zentralen Erkenntnissen wurden weitere relevante Aspekte durch die Prozessanalyse gewonnen, die zusätzliches Potential aufweisen. Die relevanten Grafiken und Auswertungen wurden im Anhang beigefügt und ergaben folgende Erkenntnisse:

- Korrelation zwischen der Anzahl von C-Koeffizienz-Überläufen und des prozentualen Abfalls des SoH. Somit könnte in einem Scatterplot Diagramm sichtbar

gemacht werden, dass Batterien mit einem verstärkten prozentualen SoH-Abfall durchschnittlich höhere Zählerwerte für C-Rate Overflows aufweisen (s. Anhang 6.6)

- Korrelation zwischen dem Abweichungsgrad zur initialen Nennkapazität der Batterie und C-Koeffizienz-Überläufen während der Nutzungsphase. Dadurch könnte erkannt werden, dass eine höhere Abweichung von der Soll-Nennkapazität (75.000 Wh) bei der Zellassemblierung tendenziell zu höheren C-Koeffizienz-Überläufen führt (s. Anhang 6.7)

Die systematische Analyse von Nutzungsmustern, Qualitätsindikatoren, Entscheidungsunterstützung zum Lebenszyklusmanagement sowie der ganzheitlichen Transportoptimierung zeigt, dass durch PM signifikante Wertschöpfungspotenziale realisiert werden können. Die Erkenntnisse liefern eine messbare und skalierbare Basis, um Prozessoptimierungen, Qualitätssicherungsmaßnahmen und nachhaltige Geschäftsmodelle im Kontext der Batteriebranche und darüber hinaus substanziell zu stärken. Abschließend lässt sich feststellen, dass jeder Akteur der Wertschöpfungskette potenziell wertvolle Daten besitzt, welche für die gesamtheitliche Analyse des Lebenszyklus mit wertvoller Bedeutung zur Optimierung der Ressourceneffizienz beitragen kann.

4.3 Strategische Erkenntnisse durch die Symbiose aus DPP & PM

Die systematische Integration des DPPs mit Methoden des PM eröffnet mögliche Potenziale zur Generierung strategischer Wettbewerbsvorteile in der Batteriebranche. Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht exemplarisch, wie durch eine gezielte Analyse von Lebenszyklusdaten neue strategische Möglichkeiten entstehen, die eine nachhaltige Differenzierung im Wettbewerb ermöglichen und über die operative Steuerung hinausgehen. Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung ist die Möglichkeit zur frühzeitigen Fehlererkennung und präventiven Qualitätssteuerung. Ausgewertete Qualitätsindikatoren und dessen Korrelationen ermöglichen es Herstellern, bereits in frühen Produktionsphasen gezielt einzugreifen und Qualitätsmängel proaktiv zu beheben, wodurch spätere Folgekosten, wie Gewährleistungsfälle und Reklamationen, nachhaltig gesenkt werden. Darüber hinaus führt die Steigerung der Produktzuverlässigkeit zu einer verbesserten Marktpositionierung und einem gestärkten Vertrauen seitens der Kunden. Ein weiterer strategisch relevanter Aspekt betrifft die datenbasierte Steuerung von Second-Life-Entscheidungen. Die kontinuierliche Analyse des Zustands der Batterie über definierte Kontrollpunkte hinweg kann Indikatoren hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit im Sinne einer

Second-Life-Nutzung aufweisen. So zeigte die finale SoH-Messung vor dem Produktlebensende eine stringente Schwellenwertlogik: Batterien mit einem SoH oberhalb von ca. 85 % konnten für eine Zweitnutzung eingeordnet werden. Diese datenbasierte Entscheidungssicherheit kann es Unternehmen ermöglichen, ihre Strategien für Second-Life-Geschäftsmodelle zu fundieren und zu optimieren. Dadurch könnten neue Geschäftsfelder entstehen, die nicht nur ökologische und regulatorische Anforderungen erfüllen, sondern auch die Erschließung zusätzlicher Erlöspotenziale und Kosteneinsparungen ermöglichen und somit langfristige Wettbewerbsvorteile sichern. Die Analyse der Transportoptimierung hinsichtlich Kosten und Emissionen zeigte ebenfalls strategisches Potenzial. Die untersuchte Transportmatrix zeigt eine Korrelation zwischen der Distanz von Transportwegen, CO₂-Emissionen sowie den entstehenden Logistikkosten. Es wurde ersichtlich, dass Batterien mit längeren Transportwegen unverhältnismäßig höhere Emissionen und Kosten verursachen. Unternehmen könnten auf Grundlage dieser Erkenntnis ihre Lieferketten- und Logistikstrategie gezielt optimieren, um sowohl Kostensenkungen als auch nachhaltigkeitsbezogene Anforderungen (z. B. CSDDD) effizient zu erfüllen. Diese datenbasierte Logistikoptimierung stärkt somit nicht nur die Performanz für Umweltbestrebungen, sondern stellt auch eine strategische Differenzierung in einem zunehmend umweltbewussten Marktumfeld dar. Ein weiterer wesentlicher Erkenntnisbereich betrifft die prädiktive Analyse von Nutzungsmustern, insbesondere im Zusammenhang mit Schnellladezyklen. Hier zeigte sich eine exemplarische Korrelation zwischen der Häufigkeit von Schnellladevorgängen und einer beschleunigten Degradation des SoH. Batterien, die häufig Schnellladezyklen ausgesetzt waren, wiesen in der Auswertung eine erkennbare Korrelation zu einer schnelleren Leistungsverschlechterung auf. Durch diese Erkenntnis eröffnet sich die Möglichkeit, proaktive Kundenberatung und Produktentwicklung gezielt auf die Lebensdaueroptimierung auszurichten. OEMs könnten so datenbasierte Serviceleistungen anbieten, Kunden gezielt auf potenziell schädliche Nutzungsverhalten hinweisen und präventive Empfehlungen für optimale Ladepraktiken geben. Strategisch betrachtet könnte diese nutzungsadaptive Kundenberatung die Kundenzufriedenheit stärken, Service- und Garantiekosten reduzieren und eine differenzierte Positionierung im Wettbewerb ermöglichen. Die dargestellten Ergebnisse besitzen dazu eine grundlegend realitätsnahe Übertragbarkeit und Skalierbarkeit. Durch die Erweiterung der Datenbasis durch zusätzliche IoT-Daten sowie weiteren Technologien oder Echtzeitmonitoring ließe sich die Aussagekraft und Präzision der Analysen weiter steigern.

Insgesamt zeigt sich, dass die strategische Verbindung von DPP und PM weit über rein operative Vorteile hinausgeht und Unternehmen befähigt, nachhaltige Wettbewerbsvorteile zu schaffen, die zugleich den Anforderungen einer zunehmend datengetriebenen Kreislaufwirtschaft entsprechen. Die Analyseergebnisse legen nahe, dass der strategische Nutzen des DPP maßgeblich davon abhängt, in welchem Maße Unternehmen in der Lage sind, die erfassten Daten nicht nur technisch zu verwalten, sondern auch systematisch auszuwerten und in ökonomisch wie ökologisch relevante Handlungen zu überführen. Auf Basis der Fallstudie lässt sich eine Matrix zur strategischen Positionierung abbilden, welche als Orientierung für Unternehmen im Transformationsprozess dienen kann. Hierbei wird deutlich, dass gleichermaßen die Integration zirkulärer Wertschöpfungsansätze in die Unternehmensstrategie, als auch die notwendige Datengrundlage essenziell ist, um die Potentiale und damit strategischen Vorteile durch PM zu nutzen.

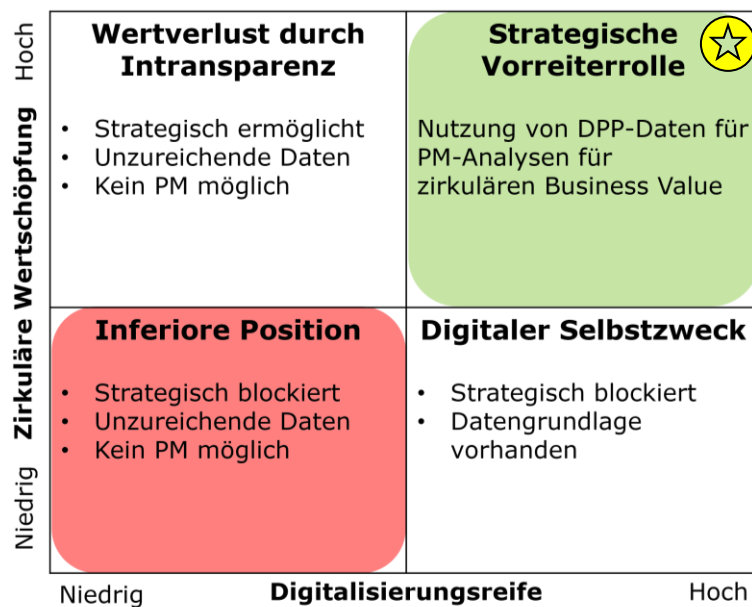


Abbildung 34: Strategische Positionierung durch PM auf DPP-Datenbasis (eigene Darstellung)

4.4 Kritische Reflektion der Methodik für die Praxis

Die Anwendung von PM auf Daten des DPP ermöglicht wegweisende Erkenntnisse, offenbart jedoch zugleich zentrale methodische und praktische Limitationen, die in einer realistischen Umsetzung berücksichtigt werden sollten. Besonders herausfordernd erwies sich die hohe Heterogenität und Fragmentierung der Batterielebenszyklen: Batterien, die bereits frühzeitig aus dem Prozess ausscheiden, erzeugen fragmentierte Datensätze mit Lücken, wodurch die Vergleichbarkeit und analytische Aussagekraft eingeschränkt werden. Dies zeigte sich exemplarisch bei der Korrelation zwischen Schnellladezyklen und

SoH-Werten, bei denen unvollständige Datenpunkte das Gesamtbild verzerren. Ein weiterer kritischer Faktor, welcher sich aus der Analyse ableiten ließ, ist die die Wichtigkeit und aktuell mangelhafte Interoperabilität realer Datensysteme. Obwohl in der Fallstudie keine unterschiedlichen semantischen Modelle zusammengeführt worden sind, sondern nur unterschiedliche Datenarten (Messwerte, Aktivitäten, Zähler) konsolidiert wurden, führte dies bereits zu ersten Schwierigkeiten in der Aggregation derer. In der Realität stammen die erforderlichen Informationen von diversen Akteursgruppen entlang der Wertschöpfungskette, deren technische Standards und Systeme oft sehr unterschiedlich und damit potenziell inkompatibel sind. Dies unterstreicht den Bedarf an einheitlichen Datenstandards und verbindlichen Schnittstellen, wie sie beispielsweise Initiativen wie Catena-X forcieren. Hinzu kommt, dass sensible oder wettbewerbsrelevante Daten derzeit kaum transparent geteilt werden. Die Durchführung des PoC zeigt, dass eine mangelhafte Datengrundlage eine zentrale Hürde für die praktische Einführung eines DPP darstellt. Zudem erweisen sich die technologischen Grenzen heutiger PM-Tools wie Celonis als substantiell: Diese sind primär für lineare Prozesse konzipiert und können zirkuläre oder rekursive Abläufe, wie sie für eine Kreislaufwirtschaft essenziell sind, nur bedingt abbilden. Standardmetriken wie Durchlaufzeiten und Häufigkeiten sind nur eingeschränkt geeignet, ökologische Nachhaltigkeitsdimensionen oder komplexere Zusammenhänge (z. B. zwischen Prüfdaten, Temperatur, Ladeverhalten und SoH-Werten) vollständig abzubilden. Dies reduziert die strategische Aussagekraft, insbesondere bei langfristigen, lebenszyklusübergreifenden Analysen. Des Weiteren zeigte die praktische Durchführung, dass PM insbesondere bei standardisierten, hochfrequentierten Abläufen effizient ist, während Prozesse mit langen Zeitabständen oder sehr stark abweichenden Varianten zusätzliche Methoden zur genauen Analyse benötigen. Um das volle Potenzial der Verknüpfung von DPP und PM auszuschöpfen, sind somit technologische Weiterentwicklungen, klare regulatorische Rahmenbedingungen und eine veränderte Datenkultur nötig. Diese Erkenntnisse können damit als konstruktive Impulse genutzt werden, um bestehende Konzepte und Technologien gezielt weiterzuentwickeln. Ein zusätzlicher Limitationsfaktor betrifft die hohen Lizenzkosten führender PM-Anbieter wie Celonis. Auch wenn diese individuell auf den Einsatzbereich und Unternehmensgröße festgelegt werden, können für eine Celonis EMS Lizenz eine jährliche Lizenzgebühr von bis zu 150.000 \$USD anfallen. Um die vollständige Kostenkalkulation für die Umsetzung von PM zu erfassen sollte laut einer Kalkulation für die Implementierung und Durchführung

durchschnittlich mit ca. 6,4 Millionen Euro an Betriebskosten gerechnet werden, inklusive Lizenzkosten von durchschnittlichen 40.000€ für ein Jahr (Turdiyeva 2024). Für einzelne Unternehmen, insbesondere KMU, erscheint ein eigenständiger Einsatz ökonomisch damit kaum tragfähig, zumal der Mehrwert nur bei umfassender Datenverfügbarkeit entlang der Lieferkette voll ausgeschöpft werden kann. In der Praxis könnte sich daher ein konsortialer Ansatz etablieren: Übergeordnete Datenrauminitiativen wie Catena-X könnten PM künftig als integrierte Dienstleistung bereitstellen. Die im Rahmen regulatorischer Pflichten ohnehin erhobenen DPP-Daten würden dabei über IoT-gestützte Sensorik automatisiert erfasst, über Blockchain-Technologien gesichert übertragen und zentral ausgewertet. Unternehmen könnten so ohne eigenen Analyseaufwand von standardisierten Auswertungen profitieren – etwa durch optionale Zusatzangebote wie Handlungsempfehlungen oder Lieferkettenanalysen, was Effizienzpotenziale hebt und strategische Mehrwerte auf Basis bestehender Datenflüsse erschließt.

5 Geschäftsmodelle und Wettbewerbsfähigkeit durch den DPP

Im Kontext digitaler Transformationsprozesse könnte der DPP bewiesenermaßen strategische Potenziale eröffnen, die über rein regulatorische Compliance hinausreichen. Im Folgenden werden die strategischen Implikationen als aktive Treiber des DPPs in grundsätzlichem Hinblick auf neu entstehende Geschäftsmodelle und Wettbewerbsfähigkeit untersucht. Es wird reflektiert, inwiefern der DPP nicht nur als regulatorisches Instrument, sondern als Treiber für digitale Wertschöpfung fungiert. Im Fokus stehen neben neuen Geschäftsmodelle und Wettbewerbsvorteile dessen Skalierung, die Rolle von Stakeholder Harmonisierung und Change-Management bei der erfolgreichen Implementierung.

5.1 Erschließung neuer digitaler Geschäftsmodelle

Digitale Geschäftsmodelle bezeichnen hybride Wertschöpfungskonzepte, bei denen physische Produkte durch datenbasierte Services ergänzt oder vollständig zu kundenspezifischen Lösungsangeboten transformiert werden. Die Digitalisierung ermöglicht durch intelligente Technologien und die internetbasierte Vernetzung von Maschinen, Produkten und Kunden neue Umsatzpotenziale, etwa durch integrierte Produkt-Dienstleistungsbündel mit hoher Individualisierbarkeit und geringen Grenzkosten. Industrieunternehmen bietet sich dadurch die Möglichkeit, sich von Produktanbietern zu Lösungsanbietern zu entwickeln, wobei digitale Services zentrale Elemente des Geschäftsmodells werden (Häckel/Übelhör 2019, S. 168–169). Ein digitales Geschäftsmodell liegt vor, wenn digitale

Technologien substantielle Veränderungen in der Art und Weise bewirken, wie Unternehmen Werte schaffen, vermitteln und abschöpfen (Häckel/Übelhör 2019, S. 171). Der DPP ermöglicht es Unternehmen dabei, datengestützte, kreislaufwirtschaftliche Geschäftsmodelle zu etablieren, die neue Erlösquellen generieren, Kundenbindung stärken und damit ökologische Verantwortung mit ökonomischem Erfolg vereinen.

Ein zentrales Geschäftsmodell, das durch den DPP operationalisiert werden könnte, ist die Second-Life-Nutzung von Produkten oder Komponenten. Insbesondere in der Batterieindustrie eröffnet die Transparenz über Ladezyklen, SoH und Nutzungsverhalten neue Möglichkeiten zur gezielten Wiederverwendung, Aufbereitung und Rohstoffrückgewinnung technischer Komponenten (Nagl/Bozem 2018, S. 122–127).

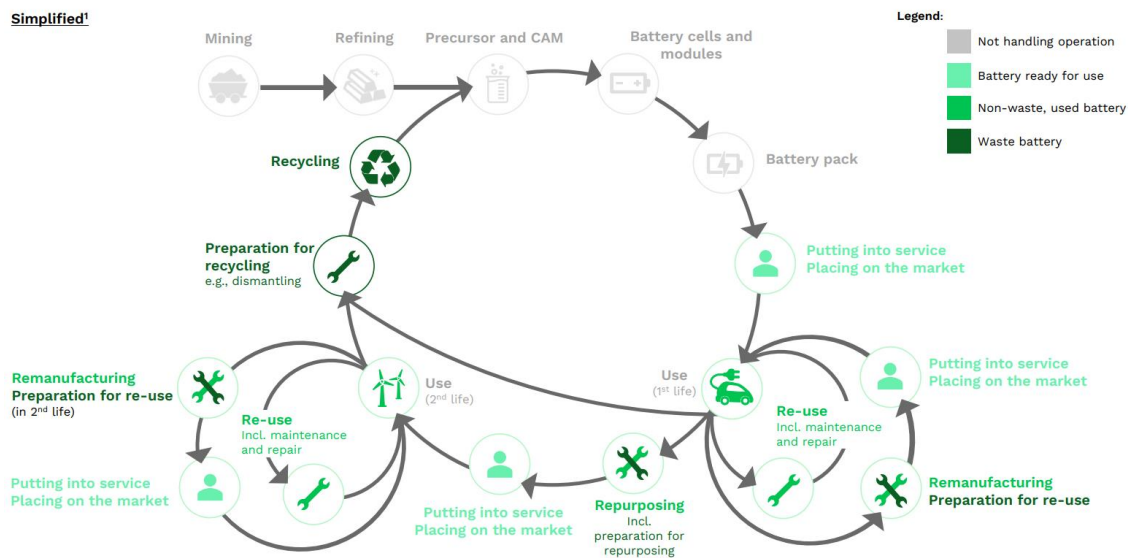


Abbildung 35: Zirkuläres Wirtschaftsmodell von Batterien (The Battery Pass 2023, S. 35)

Elektrofahrzeug-Batterien weisen nach einer Erstnutzung von etwa acht bis zehn Jahren meist noch 70 bis 85 % ihrer ursprünglichen Kapazität auf und ermöglichen so eine Zweitverwendung über weitere fünf bis acht Jahre in weniger intensiven und passiven Anwendungen wie Energiespeicher (Herrmann et al., S. 77). Prognosen zufolge könnten bis zum Jahr 2030 etwa 105.000 ausrangierte Batterien allein in der EU wirtschaftlich sinnvoll einer Second-Life-Nutzung zugeführt werden, was einer Kapazität von rund 2,25 GWh entspricht (Wautelet/Ayed 2024b, S. 21). Die ökonomischen Vorteile sind sowohl für OEMs als auch für Aufbereitungsunternehmen vielversprechend: OEMs profitieren von Kosteneinsparungen bei der Weitergabe der Batterien, da sie nicht entsorgt werden müssen, sowie zusätzlichen Erlösen aus deren Verkauf, während Unternehmen, die Batterien wiederverwerten, einen Preisvorteil von etwa 40 % gegenüber Neuanschaffungen realisieren können (Element Energy 2019, S. 49). Durch verlässliche Daten über SoH,

Ladezyklen und Nutzungsprofile kann der Batteriepass eine standardisierte, schnelle Eingangsbewertung und effiziente Rekonfiguration der Batteriepacks ermöglichen (Wautelet/Ayed 2024a, S. 26). Im Folgenden wird der Wiederaufbereitungsprozess für Energiespeicher prozessual dargelegt. Hier bestehen besonders in der Eingangsprüfung und Demontage aktuell Datenlücken, die eine lückenlose Datenerfassung erschweren (Wautelet/Ayed 2024b, S. 23).

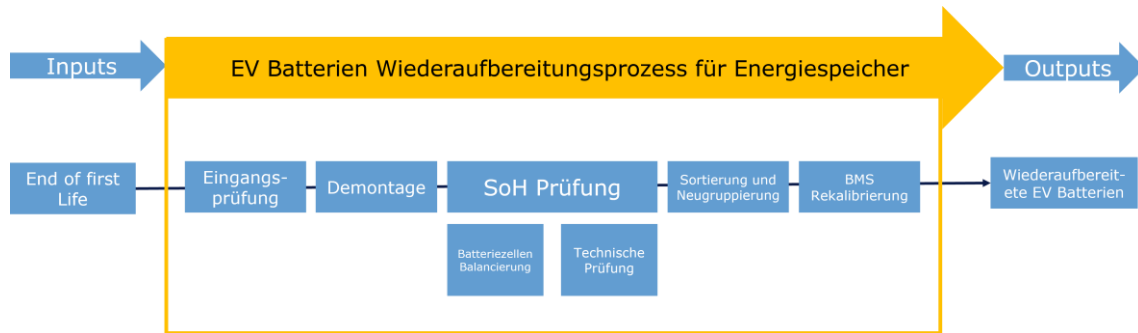


Abbildung 36: Wiederaufbereitungsprozess von gebrauchten EV-Batterien zur Verwendung als Energiespeicher (eigene Darstellung nach Wautelet/Ayed (2024b, S. 23))

Darüber hinaus adressiert der Batteriepass die wachsende Nachfrage und begrenzte Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe wie Lithium, Mangan, Nickel und Kobalt. Durch systematische Rückverfolgung und effiziente Rückführung lassen sich wertvolle Materialien gezielt zurückgewinnen und kosteneffizient in Produktionskreisläufe reintegrieren und damit zwischen 5-20% des aktiven Materialbedarfs für Elektrofahrzeuge in Europa decken (Herrmann et al., S. 106). Dies könnte zu einer Erhöhung der europäischen Recyclingumsätze um 5-15% resultieren, sowie einer Emissionseinsparung von bis zu 10%, was sich durch eine öffentliche Kommunikation positiv auf die Wahrnehmung des Unternehmens durch Endkunden durch nachhaltige Praktiken auswirken könnte (Herrmann et al., S. 107).



Abbildung 37: Beispiel für einen Second-Life Energiespeicher aus alten EV-Batterien (Krummenacher 2024)

Praxisbeispiele, wie das von Daimler in Lünen umgesetzte weltweit größte Second-Life-Speicherprojekt mit 13MWh (Köllner 2016) sowie das Connected Energy Projekt von Renault in Belgien mit 720 kWh Speicherkapazität (Renault Group 2020) bestätigen bereits heute die kommerzielle Tragfähigkeit dieser Ansätze. Zusätzlich leisten stationäre Second-Life-Speicher einen energiepolitischen Beitrag, indem sie zur Netzstabilität beitragen und fossile Spitzenlastkraftwerke ersetzen, was die strategische Marktposition frühzeitig investierender Unternehmen weiter stärkt (Wautelet/Ayed 2024b, S. 22–23). Der DPP könnte also die digitale Grundlage für die Entstehung von Second Life Geschäftsmodellen bieten, indem er belastbare Informationen über Zustand, Herkunft und Nutzung dokumentiert und bereitstellt. Unternehmen können Second-Life-Produkte gezielt als Geschäftsmodell entwickeln, zertifizieren und gewinnbringend vermarkten – ein Vorgehen, das sowohl Materialkosten senkt als auch neue Kundengruppen anspricht und eine Differenzierung im Markt ermöglicht. Dies beinhaltet zum einen die erneute Wiederverwendung, aber auch die Umnutzung zu einem anderen Zweck (Bernhardt/Kaur/Kooper 2023, S. 7–9). Ein weiteres Geschäftsmodell stellt „Data as a Service“ (DaaS) dar. Dabei bieten Unternehmen nicht primär Rohdaten zum Kauf an, sondern stellen produktbezogene Analysen, Zustandsbewertungen oder prädiktive Services auf Abruf zur Verfügung – etwa über APIs oder digitale Plattformen. Im Kontext des DPP könnte dies bedeuten, dass datenbasierte Zusatzleistungen wie SoH-Diagnosen, Nutzungsprognosen oder Wartungsempfehlungen als Service gegenüber Dritten, wie beispielsweise Flottenbetreibern, Reparaturdiensten oder Versicherungen, vermarktet werden (Tchitcherin

2024, S. 59). Dies ist ein denkbar potenzieller und vielversprechender Einsatzbereich für die Analyse von Daten mittels PM über konsortiale Drittanbieter, welche über die entsprechende Datenhoheit verfügen. Der DPP kann zudem als zentrale digitale Informationsschnittstelle zur Unterstützung nutzungsbasierter Geschäftsmodelle wie „Product-as-a-Service“ (PaaS) dienen. Durch die digitale Verbindung zwischen Herstellern, Endkunden und weiteren Akteuren der Wertschöpfungskette schafft der DPP die notwendige Transparenz, um neue Servicemodelle wie Leasing oder nutzungsabhängige Bezahlvarianten (z. B. Pay-per-Use) zu realisieren. In diesen Modellen ermöglicht der DPP den Zugriff auf produktindividuelle Informationen und stellt damit eine durchgängige Kommunikation über die Produktlebensdauer hinweg sicher. Die Integration von Daten aus der Nutzungsphase, beispielsweise durch IoT-Sensorik, erlaubt eine präzise Erfassung von Produktzustand und dessen Beanspruchung, wodurch sowohl die Anbieter ihre Serviceprozesse optimieren als auch die Kunden ihre Nutzungskosten steuern können. Zudem könnte der DPP auch Wiederverkaufs- und Aufbereitungs-Konzepte im Rahmen eines PaaS unterstützen, indem er strukturierte Rückgabeinformationen sowie Reparatur- und Demontageanleitungen verfügbar macht (Stretton 2025). Zudem eröffnet der DPP die Erschließung neuer Märkte für datenbasierte Zusatzservices. Hersteller und Drittanbieter könnten durch Echtheitszertifikate, digitale Zwillinge, E-Warranty-Angebote oder exklusive Serviceleistungen einen Mehrwert für das Produkt und Unternehmen schaffen. Fallbeispiele wie die Einführung von DPPs bei dem Unternehmen Dior durch den Dienstleister Aura Blockchain Consortium zeigen, dass Produkte mit integrierten digitalen Zusatzfunktionen neue kundenindividuelle Interaktionen schafft und damit höhere Absatzmengen und Margen erzielen können (Aura Blockchain Consortium, S. 9–11). Ein strategisch relevanter Aspekt des DPP liegt in der Möglichkeit zur gezielten Monetarisierung interner Produktdaten. Unternehmen können ihre Datenbestände systematisch bewerten und wirtschaftlich nutzen, etwa durch die Entwicklung datenbasierter Services, die Ableitung von Entscheidungsgrundlagen oder potenziell auch durch die Bereitstellung ausgewählter Informationen an Dritte. Die wirtschaftliche Attraktivität solcher Daten ergibt sich insbesondere durch deren Exklusivität sowie das Potenzial, daraus verwertbare Einsichten zu gewinnen. Voraussetzung hierfür ist eine stringente Datenhoheit und ein adäquates Datenmanagement, das die Integrität und Vertraulichkeit sensibler Informationen sichert (Tchitcherin 2024, S. 62). Im Rahmen eines Pilotprojekts von Siemens wurde dazu ein DPP-Prototyp entwickelt, der regulatorisch geforderte Daten kostenfrei zugänglich

macht, gleichzeitig jedoch zusätzliche, kundenspezifische Informationen als kostenpflichtige Zusatzfunktion anbietet, welche für Kunden einen potenziellen Mehrwert darstellen könnten. Dadurch entsteht ein potenzielles Geschäftsmodell, bei dem nicht nur das physische Produkt, sondern auch die zugehörigen Daten als wirtschaftliche Ressource betrachtet werden (Siemens 2025).

5.2 Wettbewerbsvorteile durch den DPP

Die Erzielung von Wettbewerbsvorteilen stellt ein Kernziel strategischen Handelns dar und umfasst die Schaffung einer nachhaltigen, langfristigen Differenzierung gegenüber Wettbewerbern durch ökonomische, operative oder marktbezogene Alleinstellungsmerkmale (Porter, S. 21). Laut Porter können technologische Innovationen unter gewissen Voraussetzungen signifikanten Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens haben. Hierbei ist unter anderem entscheidend, ob ein Unternehmen einen besseren Technologieansatz zur Erreichung von Zielen verwendet als dessen Wettbewerber (Porter, S. 169–170). Der strategische Nutzen technologischer Innovationen ist daran zu bewerten, ob diese einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil durch Kostenführerschaft oder Differenzierung ermöglichen. In seinem Konzept zur Analyse technologischer Einflussfaktoren auf deren kompetitives Potential schlägt Porter vier Tests vor, anhand derer sich der nachhaltige Mehrwert einer Technologie in Bezug auf die strategische Positionierung durch Wettbewerbsvorteile evaluieren lässt (Wang/Haydn/Zhang 2022, S. 171; Porter, S. 171). Diese Tests lassen sich auf den DPP anwenden, um dessen potenziellen Beitrag zur Stärkung der Wettbewerbsposition von Unternehmen zu evaluieren. Nach Porter soll eine technologische Veränderung selbst die Kosten senken und die Differenzierungsfähigkeit eines Unternehmens verbessern (Porter, S. 170–171). Der DPP erfüllt beide Bedingungen, indem er die Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette steigert und damit operative Kosten senkt (Barwasser et al., S. 22). Gleichzeitig ermöglicht er eine stärkere Differenzierung durch transparente, vertrauensbildende Nachhaltigkeitsinformationen, erhöhte Produktsicherheit sowie interaktive Nutzererlebnisse (Aura Blockchain Consortium, S. 9–11). Insbesondere in B2B-Segmenten und in Märkten mit wachsender Umweltbewusstseins seitens Investoren und Verbrauchern gewinnt diese Form glaubwürdiger Nachhaltigkeitskommunikation zunehmend an strategischer Relevanz (PwC 2025). Des Weiteren bewirkt eine kompetitive technologische Neuerung eine indirekte Verschiebung von Kosten- oder Differenzierungstreibern zugunsten des Unternehmens – etwa durch Veränderungen in der Ausgestaltung von Aktivitäten oder Produkten (Porter, S. 171–172).

Indem der DPP bereits in der Produktentwicklungsphase kreislaufwirtschaftliche Optimierungen fordert und ermöglicht (Europäische Kommission 18.07.2024), etwa in Bezug auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit oder Recyclingfähigkeit, verändert er grundlegende Design- und Produktionsprozesse. Auch die durch den DPP verbesserte Datenqualität lässt sich auf indirekte Wettbewerbsvorteile ableiten, da sie die Analysefähigkeit stärken (Jensen et al. 2023, S. 250). Selbst bei späterer Imitation durch Wettbewerber verbleibt der Vorteil bei denjenigen, die die technologieinduzierte Wertsteigerung frühzeitig strategisch nutzen (Porter, S. 172). In diesem Kontext kann der DPP eine frühzeitige Fehlererkennung, optimierte Qualitätskontrollen sowie beschleunigte Produktverbesserungen ermöglichen, wodurch sich die Kostenstruktur senken und Produktions- sowie Montageprozesse effizienter gestalten lassen. Gleichzeitig werden Risiken im Bereich Produktqualität minimiert, was besonders in komplexen, globalen Lieferketten ein relevanter Kostenvorteil gegenüber Wettbewerbern sein kann (Psarommatis/May 2024, S. 16–17). Diese Datengrundlage wird durch IoT Anbindung ermöglicht und könnte durch PM-Analysen sichtbar und messbar gemacht und über die Blockchain sicher und eindeutig abgespeichert werden. Des Weiteren eröffnet der DPP damit spezifische strategische Vorteile im Kontext von Predictive Maintenance und vorausschauendem Servicemanagement. Indem Daten über den Zustand und die Nutzung von Produkten in Echtzeit verfügbar gemacht werden, können Wartungs- und Reparaturprozesse proaktiv gesteuert werden. Dies reduziert nicht nur operative Wartungskosten, sondern verbessert auch die Kundenbindung und -zufriedenheit, indem Produktverfügbarkeit und Nutzungsdauer optimiert werden (Massoth, S. 13). Insbesondere in Branchen mit hohen Wartungsanforderungen, wie der Maschinenbau- oder Batterieindustrie, entstehen dadurch Wettbewerbsvorteile im Bereich der Servicequalität (MP 2025). Dies eröffnet zudem die Möglichkeit der Positionierung als technologischer Vorreiter („First Mover“), um zusätzliche Wettbewerbsvorteile über die Effekte der Technologie zu generieren, wie beispielsweise durch frühe Lernkurveneffekte, Markenaufbau oder die proaktive Mitgestaltung von Industriestandards. Im Fall der Betrachtung hinsichtlich des DPP ist dies besonders relevant, da viele Unternehmen sich derzeit auf die regulatorische Erfüllungspflicht fokussieren. Akteure, die den DPP proaktiv und über Compliance hinaus strategisch nutzen, könnten sich durch Innovationsführerschaft, bevorzugte Marktpositionierung oder Entwicklung neuer Geschäftsmodelle signifikant vom Wettbewerb abheben (Homrich 2024). Im Umfeld streng regulierter Industrien entwickeln sich Konformitätsanforderungen zunehmend zum

notwendigen Einkaufskriterium, wodurch Unternehmen ohne entsprechenden digitalen Nachweis an Wettbewerbsfähigkeit verlieren (Böhler/Zühlke 2025). Als letzter Test für die Wettbewerbsfähigkeit durch technologische Innovationen ist die strukturelle Wirkung technologischen Wandels auf die gesamte Branche zu reflektieren (Porter, S. 172). Auch dies lässt sich auf den DPP ableiten. Durch die Förderung einheitlicher Datenmodelle und interoperabler Systeme trägt der DPP zur Standardisierung und qualitativen Verbesserung der Datenlandschaft bei. Dies stärkt nicht nur einzelne Unternehmen, sondern verbessert auch die Funktionsweise ganzer Wertschöpfungsnetzwerke und eliminiert anfallende Interpretationskosten (Neligan et al., S. 22–23). Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit zur Teilnahme an führenden Datenökosystemen wie beispielsweise durch Catena-X. Der DPP dient hier als Zugangsschlüssel zu kollaborativen Plattformen mit einheitlichen Datenstandards, was nicht nur den Datenaustausch erleichtert, sondern den Unternehmen auch wertvolle Einblicke in branchenweite Innovationen und Entwicklungen bietet (Massoth, S. 16–17). Wenn die Tests positiv ausfallen kann davon ausgegangen werden, dass eine technologische Neuerung die wettbewerbliche Position eines Unternehmens verbessert (Porter, S. 172). Vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen spricht vieles dafür, dass der DPP eine solche technologische Innovation darstellt – mit weitreichenden Auswirkungen auf Effizienz, Differenzierung und strategische Resilienz im Kontext digitaler und nachhaltiger Transformation. Diese Vorteile verdeutlichen, dass die frühzeitige und umfassende Nutzung des DPP das Potenzial birgt, um nicht nur regulatorische Anforderungen zu erfüllen, sondern auch um langfristige Wettbewerbsvorteile zu erzielen und sich damit von konkurrierenden Marktteilnehmern abzusetzen.

5.3 Skalierbarkeit und Marktannahme

Die erfolgreiche Einführung des DPP auf dem Markt hängt wesentlich von dessen Akzeptanz durch zentrale Marktakteure ab, insbesondere Unternehmen und Verbraucher. Die Marktannahme beeinflusst dabei maßgeblich die Skalierbarkeit des DPP: Je stärker die Akzeptanz und Bereitschaft zur Implementierung, desto schneller und umfassender lässt sich der DPP in verschiedenen Branchen und entlang globaler Wertschöpfungsketten etablieren und könnte dadurch attraktive Skaleneffekte ermöglichen (Arorian Technologies 2024). Die Marktannahme wird durch mehrere Faktoren direkt und indirekt mitbestimmt. Zunächst wirken regulatorische Rahmenbedingungen als entscheidende Markttreiber. Vorgaben der Europäischen Kommission wie die ESPR, BattVO und CSRD/CSDDD schaffen rechtlich verbindliche Anreize, die den Einsatz von DPPs

garantieren (Europäische Kommission 18.07.2024). Die verpflichtende Einführung des DPP für bestimmte Produktgruppen spielt somit eine entscheidende Rolle, um den Pass flächendeckend in Unternehmen zu verankern. Ein weiterer Erfolgsfaktor für die Marktannahme des DPP ist die Verfügbarkeit einer skalierbaren, interoperablen und sicheren technischen Infrastruktur. Diese muss nicht nur den unternehmensübergreifenden Datenaustausch ermöglichen, sondern auch interne Systemkompatibilität gewährleisten. Gemeinsame schaffen dabei die Grundlage für autonome Systeminteraktionen und fördern das Vertrauen aller relevanten Stakeholder (Massoth, S. 14). Entscheidend ist zudem ein differenziertes Zugriffs- und Rechtemanagement, das Transparenz und Datenhoheit zugleich sicherstellt (Jansen et al. 2023, S. 7). Ergänzend erfordert die Akzeptanz verlässliche Mechanismen zur Sicherung von Datenauthenzizität, Herkunft und Integrität sowie die Einhaltung strenger Datenschutz- und Sicherheitsstandards (Massoth, S. 14–15). Zuletzt spielen Konsumenten eine entscheidende Rolle für die Marktakzeptanz. Ein DPP, der Transparenz über Herkunft, CO₂-Fußabdruck, Recyclingfähigkeit und Produktlebensdauer bietet, kann glaubwürdig und fundiert das Verbrauchervertrauen stärken und nachhaltigkeitsorientierte Kaufentscheidungen fördern (Barwasser et al., S. 18). Datenschutzbedenken, etwa bei der Erhebung individueller Nutzungsdaten, müssen dabei proaktiv adressiert werden, um die Akzeptanz nicht zu gefährden (Liedtke/Andree 2024, S. 8). Skalierbarkeit ist dabei eng mit Netzwerkeffekten verknüpft. Je breiter DPPs eingesetzt werden, desto stärker müssten die Betriebs- und Implementierungskosten pro Einheit durch standardisierte Infrastrukturkomponenten sinken. Die Harmonisierung technischer und organisatorischer Schnittstellen senkt dabei auch die Markteintrittsbarrieren für KMU. Diese Skaleneffekte ließen sich durch vergleichbare Umstände durch die Betrachtung von Skaleneffekten bei innovative Brennstoffzellensysteme ableiten (Kampker et al. 2022). Ein systematischer Ausbau des DPP über den europäischen Binnenmarkt hinaus ist dabei an internationale Datenkompatibilität gebunden. Die Markannahme und Skalierbarkeit ist begrenzt, wenn relevante Daten aus vor- oder nachgelagerten Lieferketten außerhalb der EU fehlen. In global verflochtenen Wertschöpfungssystemen stellt dies eine zentrale Herausforderung dar (Beanland 2023, S. 14). Die Marktannahme des DPP kann somit nicht nur durch Regulatorik erzwungen werden, sondern sollte durch eigenes Bestreben der Unternehmen maßgeblich mitgestaltet werden.

5.4 Integration und Harmonisierung von Stakeholder-Interessen

Die Integration und Harmonisierung von Stakeholder Interessen ist ein zentraler Erfolgsfaktor bei der Implementierung des DPPs. Der Stakeholder-Ansatz nach Freeman/Reed (1983, S. 91) definiert Stakeholder umfassend als alle Gruppen oder Individuen, die von den Aktivitäten einer Organisation betroffen sind oder deren Zielerreichung beeinflussen können. Im spezifischen Kontext des DPP umfasst dies zahlreiche heterogene Akteure entlang der Wertschöpfungskette. Aus gängiger Literatur wie beispielsweise der McArthur Foundation (MacArthur 2013) lassen sich hierbei fünf besonders relevante, übergeordnete Stakeholdergruppen ableiten: Kunden, Dienstleister, Hersteller, Lieferanten und Drittanbieter wie etwa Wiederaufbereiter und Recyclingeinrichtungen. Darüber hinaus sind zwei weitere wichtige Akteursgruppen zu berücksichtigen: Technologie- und Datenraumanbieter wie Catena-X, die die technische Umsetzung ermöglichen und Regierungsbehörden, welche die Rahmenbedingungen für DPPs setzen (Massoth, S. 17). Die Umsetzung des DPP ist mit vielseitigen Herausforderungen verbunden, da beteiligte Akteursgruppen – insbesondere Datenbereitsteller und Datennutzer – teils divergierende Anforderungen und Interessen verfolgen. Während bestimmte Stakeholdergruppen auf umfassende Material- und Produktdaten angewiesen sind, um zirkuläre Prozesse wie Reparatur oder Wiederverwertung effizient zu gestalten, bestehen bei anderen Akteuren berechtigte Vorbehalte hinsichtlich der Offenlegung sensibler Informationen, etwa im Hinblick auf geistige Eigentumsrechte oder betriebswirtschaftlich relevante Daten. Wie aus einer CIRPASS-Studie hervorgeht, stellen technische und strukturelle Barrieren bei der Datenerhebung sowie Heterogenität hinsichtlich der digitalen Infrastruktur wesentliche Hindernisse dar – insbesondere für KMU. Die Identifikation und Bereitstellung wirtschaftlich relevanter Daten wird dadurch erschwert, was die Notwendigkeit koordinierter Standardisierungsmaßnahmen und gezielter Stakeholder Kommunikation unterstreicht (Wagner/Schneider/Benzuck 2024, S. 9–10). Die CIRPASS-Initiative hat auf Basis einer umfangreichen Stakeholder Befragung neun Handlungsempfehlungen entwickelt, um die Integration und Koordination dieser Interessen systematisch zu unterstützen. Diese Empfehlungen beinhalten unter anderem die frühzeitige Einbindung aller relevanten Stakeholder in den Design- und Governanceprozess, die Entwicklung sektorübergreifender Beteiligungsformate, eine gemeinsame Zieldefinition sowie die Etablierung rollenbasierter Zugriffsrechte, um sowohl Transparenz als auch Datenschutz zu gewährleisten (s. Anhang 8). Ein zentraler Bestandteil dieser Handlungsempfehlungen ist die Schaffung

partizipativer Prozesse, in denen Stakeholder von Beginn an in die Gestaltung und Umsetzung des DPP eingebunden werden. Ein solches Vorgehen fördert Transparenz, Vertrauen und Akzeptanz und unterstützt insbesondere KMU bei der Bewältigung technologischer Herausforderungen. Durch regelmäßige Evaluationen und iterative Anpassungen der Governance-Strukturen wird zudem sichergestellt, dass die Integration der Stakeholder Interessen nicht statisch bleibt, sondern kontinuierlich an neue Herausforderungen und Erkenntnisse angepasst wird (Wagner/Schneider/Bendzuck 2024, S. 72–76).

5.5 Change-Management bei der Implementierung neuer Technologien

Die Einführung des DPP stellt Organisationen vor weitreichende Transformationsprozesse, die über technologische Änderungen hinaus tiefgreifende strukturelle, kulturelle und prozessuale Anpassungen erfordern. Der DPP fordert eine neue Form der Transparenz, die Unternehmen zwingt, interne Prozesse zu hinterfragen und ihre Dateninfrastruktur, Technologieeinsatz und Unternehmenskultur neu auszurichten. Diese Entwicklung bedeutet für Unternehmen eine Verschiebung von kostenbasierten hin zu ethisch motivierten Entscheidungslogiken (Iscar 2024). Ein effektives Change-Management-Programm ist dabei essenziell, um Akzeptanz und Engagement aller Beteiligten sicherzustellen. Es dient dazu, Mitarbeitende vor, während und nach der Einführung neuer Prozesse einzubinden, Widerstände zu adressieren und damit die Erfolgswahrscheinlichkeit des Projekts signifikant zu erhöhen. Laut Columbus liegt ein häufiger Fehler in der Überfokussierung auf technische Lösungen, während der menschliche Aspekt vernachlässigt wird (Columbus 2023). Pacolli (2022, S. 276–279) hebt dazu hervor, dass digitale Änderungsprozesse ohne gleichzeitige Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Belegschaft oft nur mangelhaft durchgeführt werden. Eine nachhaltige Transformation gelingt, wenn Mitarbeitende die Vision und den Wertekompass des Unternehmens verstehen und aktiv mittragen. Die Autorin schlägt daher ein strukturiertes Framework aus den drei zentralen Veränderungshebeln Führung, Kommunikation und Inklusion vor, die gemeinsam die Grundlage für eine resiliente digitale Transformation schaffen (Pacolli 2022, S. 277–279). Dabei betont sie, dass Führungskräfte nicht nur Veränderungen vorantreiben, sondern den kulturellen Wandel eines Unternehmens maßgeblich mitgestalten und Mitarbeitenden Vertrauen, Transparenz und Teilhabe ermöglichen sollten. Widerstände entstehen häufig durch fehlende Kommunikation, mangelndes Verständnis der Zielsetzung oder unzureichende Schulungsmaßnahmen (Pacolli 2022, S. 278). Um dem entgegenzuwirken, empfiehlt sich die frühzeitige Etablierung eines Change-Management-Teams,

idealerweise mit internen Mitarbeitenden besetzt, um die Akzeptanz zu erhöhen (Columbus 2023). Darüber hinaus behalten klassische Change-Management-Elemente (Rollenklärung, Schulung, Kulturentwicklung, kontinuierliches Lernen) auch im digitalen Kontext ihre Gültigkeit, sollten jedoch an die spezifischen Anforderungen digitaler Transformationsprojekte angepasst werden müssen. Die Integration dieser Elemente mindert das Risiko des Scheiterns und erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass eingesetzte digitale Lösungen langfristig genutzt und akzeptiert werden (Pacolli 2022, S. 278–279). Schließlich bedeutet ein strukturierter Wandel nicht nur technologische Umstellung, sondern bietet Unternehmen die Chance, Vertrauen aufzubauen, Kundenbindung zu stärken und ihre Reputation durch proaktive Nachhaltigkeitsstrategien zu verbessern (Columbus 2023).

6 Praktische Reflektion

Im Spannungsfeld zwischen strategischem Anspruch und operativer Realität werden im Folgenden zentrale Erfolgsbedingungen und hemmende Faktoren der praktischen Umsetzung des DPP dargelegt. Die Betrachtung erfolgt mit dem Ziel, konkrete Implikationen für die Effizienz und Wirksamkeit des DPP abzuleiten.

6.1 Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung

Die erfolgreiche Umsetzung des DPPs ist ein komplexer, mehrdimensionaler Transformationsprozess. Aufgrund der Vielzahl an beteiligten Akteuren, sensibler Datenarchitektur und regulatorischen Anforderungen ist das Verständnis zentraler Erfolgsfaktoren essenziell, um eine nachhaltige und strategisch wirksame Implementierung zu gewährleisten. Die nachfolgenden Ausführungen fassen zentrale Erfolgsbedingungen zusammen, die in vorherigen Kapiteln theoretisch eingeführt wurden und reflektieren deren Bedeutung für die praktische Umsetzung. Da keine einschlägigen Anhaltspunkte für definierte kritische Erfolgsfaktoren zur erfolgreichen Umsetzung eines DPP in der gängigen Literatur definiert sind (Petrik/Härer/Schöllkopf 2024, S. 10), werden diese im Folgenden aus der Reflektion der adressierten Inhalte dieser Arbeit abgeleitet. Diese werden dazu in technische und organisatorische Erfolgsfaktoren untergliedert.

6.1.1 Technische Erfolgsfaktoren

Ein zentraler Erfolgsfaktor liegt in der technischen Interoperabilität. Nur wenn alle Akteure auf einheitliche semantische Standards und Datenformate zugreifen können, ist eine reibungslose Kollaboration gewährleistet (Jansen et al. 2023, S. 7). Die ESPR fordert explizit gemeinsame Produktdatenschemata, um diese Interoperabilität sicherzustellen (Europäische Kommission 18.07.2024, S. 42). Darüber hinaus sind die Authentizität und

Unveränderbarkeit von Daten essenziell. Informationen müssen revisionssicher gespeichert, nachverfolgbar und vor Manipulation geschützt sein. Technologisch leisten Blockchain-Infrastrukturen hierzu einen entscheidenden Beitrag (Vlachos/Damvakeraki 2024, S. 40). Eine erfolgreiche Integration weiterer digitaler Technologien ist ebenso entscheidend. Während Blockchain für Transparenz und Nachvollziehbarkeit als vertrauensvolle Basis im Hintergrund agiert, könnte PM auf der Grundlage von DPP-Daten konkrete Optimierungspotenziale aufzeigen. Hierbei könnte der Einsatz von IoT-Sensorik produktionsnahe Echtzeitdaten liefern, die im DPP dokumentiert werden können (Abedi/Saari/Hakola 2024, S. 5). Ergänzend benötigen Unternehmen dezentrale übergeordnete Datenstrukturen mit klar geregelter Zugriff und sollten sich hierbei an industrieüblichen Konsortien orientieren. Datenökosysteme wie Catena-X in Kombination mit der AAS ermöglichen differenzierte Rollen- und Rechtekonzepte und sichern sowohl Transparenz als auch Datensouveränität (Massoth, S. 16–17). Nicht zuletzt ist der Datenschutz ein grundlegender Baustein technischer Implementierung. Die Einhaltung der DSGVO in Bezug auf den grundsätzlichen geschützten Umgang mit Daten (Europäische Kommission 2025, S. 51–52), sowie bereits während der Produktentwicklung (Europäische Kommission 2025, S. 48), als auch branchenspezifischer Sicherheitsstandards zur verschlüsselten Übertragung, sichere Authentifizierungsmechanismen und eine detailliert ausgestaltete Zugriffskontrolle ist entscheidend, um Vertrauen und Datenintegrität zu gewährleisten (Psarommatidis/May 2024, S. 20).

6.1.2 Organisatorisch-strategische Erfolgsfaktoren

Neben den technischen Voraussetzungen müssen auch organisatorische Strukturen und Kompetenzen gegeben sein. Eine klare Governance-Struktur bildet das Rückgrat einer wirksamen Umsetzung. Besonders in unternehmensübergreifenden Projekten hilft eine solche Struktur, Abstimmungsprobleme zu minimieren und Kohärenz zu wahren (Neligan et al., S. 18–19). Ein weiterer kritischer Faktor ist die frühzeitige und strukturierte Integration aller relevanten Stakeholder. Die Implementierung des DPP betrifft zahlreiche Akteursgruppen und sollten durch partizipative Gestaltungsprozesse wie CIRPASS deren Akzeptanz sicherstellen (CIRPASS 2025). Zudem ist die digitale Reife, auch „Technology Readiness“ bezeichnet, eines Unternehmens von entscheidender Bedeutung. Ein digitaler Reifegrad beschreibt den Grad, in dem eine Organisation über die notwendigen technischen, organisatorischen und kulturellen Voraussetzungen verfügt, um digitale Technologien effektiv einzuführen, zu nutzen und kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Diese umfasst sowohl technologische als auch kulturelle Dimensionen (Kane et al. 2017). Unternehmen mit einem hohen digitalen Reifegrad sind besser in der Lage, die Potenziale des DPP in Wettbewerbsvorteile zu realisieren. Die Einführung des DPP ist keine rein unternehmerische Aufgabe. Es bedarf einer übergeordneten Koordination durch Normungsinstitute und branchenweite Konsortien. Programme wie CIRPASS oder Catena-X stellen nicht nur Orientierung bezüglich technischen Referenzarchitekturen bereit, sondern fördern aktiv die Verwaltung und Verbreitung von Best-Practices und ermöglichen eine sektorübergreifende, standardisierte Einführung. Hierbei ist besonders eine systemische Begleitung durch EU-Institutionen notwendig, um regulatorische Klarheit zu schaffen, Interoperabilitätsstandards zu setzen und kleinere Akteure zu unterstützen. Nur durch eine koordinierte Anstrengung auf allen Ebenen kann sich der DPP in der Breite erfolgreich etablieren und attraktive Skaleneffekte wirksam zu machen (Barwasser et al., S. 17–18). Für Unternehmen empfiehlt sich somit für eine erfolgreiche Implementierung eine gezielte Neuausrichtung der bestehenden Datenmanagement-Strategien entsprechend den Anforderungen der zirkulären Wertschöpfungskette. Unternehmen sollten zunächst die Verfügbarkeit relevanter Daten, wie Materialzusammensetzung, Recyclinganteile und Umweltauswirkungen, sicherstellen und vorhandene analoge Informationen konsequent digitalisieren. Zudem wird empfohlen, kooperative Routinen wie gemeinsame Service-Logs zu etablieren, um den Datenfluss entlang der Lieferkette effizienter zu gestalten. Die Integration von Sensorik zur Erfassung nutzungsrelevanter Daten sowie die aktive Einbindung von Kunden in Service-Updates und Produkt-Rücknahmesysteme tragen wesentlich zu einem vollständigen und nachhaltigen Datenkreislauf bei (Jensen et al. 2023, S. 252–253).

6.2 Herausforderungen in der Umsetzung

Die Implementierung des DPP konfrontiert Unternehmen mit einer Vielzahl an Herausforderungen, die regulatorischer, technologischer und organisatorischer Natur sind. Obwohl das langfristige Ziel einer verbesserten Kreislaufwirtschaft breite Zustimmung erfährt, überwiegen bei vielen Marktakteuren noch Zweifel hinsichtlich der konkreten Umsetzung und der damit verbundenen Belastungen (Barwasser et al., S. 17). Ein zentraler Zielkonflikt ergibt sich aus der Forderung der EU nach umfassender Transparenz entlang der Lieferkette bei gleichzeitig fehlenden einheitlichen regulatorischen Standards zur Datenbereitstellung (Alcayaga et al., S. 39). Während Unternehmen verpflichtet sind, sensible Produkt- und Lieferkettendaten offenzulegen, fehlen derzeit verbindliche

Regelungen zur Haftung bei fehlerhaften oder unvollständigen Daten. Dies führt zu Unsicherheit in Bezug auf rechtliche Verantwortlichkeiten und erhöht das Risiko für Unternehmen (Barwasser et al., S. 19). Problematisch ist auch die internationale Dimension des DPP. Produkte mit außereuropäischen Wertschöpfungsstufen sind häufig auf Informationen angewiesen, die von Akteuren außerhalb der EU bereitgestellt werden müssten – Akteuren, die jedoch nicht der EU-Regulatorik unterliegen. Die Folge ist eine strukturelle Datenasymmetrie, welche die Vollständigkeit der Pässe gefährdet und Vertrauen in die Nachvollziehbarkeit und Glaubwürdigkeit der Daten infrage stellt (Alcayaga et al., S. 42). Hierbei besteht zudem das Risiko, dass ausländische Datenschutzregulatorien den Datenaustausch für DPPs verbieten. Es ist also unklar, wie eine internationale Kooperation mit einer harmonisierten Data Governance vereinbar ist (Alcayaga et al., S. 39). Die technologische Komplexität der DPP-Einführung trifft insbesondere KMUs. Diese stehen der Einführung oft kritisch gegenüber, da sie in erster Linie Pflichten, statt strategischer Chancen wahrnehmen müssen. Diese verfügen häufig nicht über ausreichendes menschliches und finanzielles Kapital oder die notwendigen Informationssysteme (Barwasser et al., S. 17). Die Umsetzung technischer Standards wie standardisierte Datenmodelle und Interoperabilitätsanforderungen stellen hohe Anforderungen an Infrastruktur und Know-how. Die Vielzahl parallel angekündigter DPP-Systeme (Batteriepass, Permanentmagnetpass, Fahrzeugpass, Textilienpass, Bauproduktpass) birgt Risiken hinsichtlich ihrer Interoperabilität, insbesondere wenn mehrere Produktpässe in komplexen Produkten zusammentreffen und unterschiedlichen Standards zugrunde liegen (Möller et al. 2024, S. 11). Hinzu kommen Unsicherheiten im Umgang mit sensiblen Daten, insbesondere bei der Festlegung von Zugriffsbeschränkungen entlang der Lieferkette (Möller et al. 2024, S. 16). Zudem fehlt es an klaren Koordinationsstrukturen und übergeordneten Trust Frameworks. Weder eine zentrale Führungsinstanz, Metastruktur noch einheitliche Governance-Strukturen sind aktuell etabliert (Ducuing/Reich 2023, S. 20). Der generelle Mangel an Standardisierung von Datenanforderungen ohne klare Vorgaben der EU resultiert aktuell laut Experteninterview mit Andrea D’Intino des Blockchain-Unternehmens DYNE in eine Fragmentierung der DPP-Landschaft und spezifische, nicht-interoperable Lösungen. Darüber hinaus variieren Komplexität und Anforderungen für die Implementierung des DPP je nach Produkt und Sektor deutlich, was insbesondere im Vergleich von komplexen Produkten (z. B. Gebäude) und weniger komplexen Produkten (z. B. Textilien) zu unterschiedlichen Herausforderungen führen kann. Da aktuell keine weiteren

Rechtsakte, außer die spezifische BattVO, die Anforderungen an konkret zu inkludierende Produktdaten des DPP definieren, sind hierzu vorbereitende Maßnahmen zur gezielten Datenerhebung nicht zielführend und sorgen für Unklarheiten für Akteure (Vlachos/Damvakeraki 2024, S. 41). Ein strukturelles Problem liegt des Weiteren in der asymmetrischen Verteilung von Kosten und Nutzen in Bezug auf die Datenverwertbarkeit. Innerhalb eines DPP-basierten Datenökosystems variieren die Aufgabenbereiche von Datenakteuren – während manche Akteure Daten liefern, nutzen andere Akteure diese. Während viele dabei beide Rollen erfüllen, liegt der Aufwand zur Datenerhebung und -bereitstellung häufig bei Akteuren am Anfang der Lieferkette (beispielsweise Hersteller), während der Nutzen typischerweise durch OEM und spätere Lieferkettenakteure wie Recycler realisiert wird (Jensen et al. 2023, S. 247). Der Mehrwert für die Datenbereitsteller bleibt somit in vielen Fällen unklar, was die Bereitschaft zur Umsetzung weiter senken könnte. Weiterhin resultieren Unklarheiten hinsichtlich der Systemgrenzen des DPP, da regulatorische Anforderungen (ESPR auf Produktebene, CSRD auf Unternehmensebene) oft widersprüchliche Perspektiven und Berichtspflichten implizieren (Germanwatch 2023).

7 Synthese, Fazit und Ausblick

Abschließend wird die Argumentation dieser Arbeit in einer übergreifenden Synthese verdichtet, um zentrale Erkenntnisse zusammenzufassen. Im Fokus stehen die strategische Einordnung des DPP sowie seine zukünftige Entwicklungsdynamik im Spannungsfeld von regulatorischen Anforderungen, technologischen Potenzialen und unternehmerischer Umsetzungsperspektive.

7.1 Synthese der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit adressierte die Forschungsfrage, wie durch den DPP nachhaltige Geschäftsstrategien entwickelt und Wettbewerbsvorteile realisiert werden können. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Potenziale des DPP über eine rein regulatorisch-berichterstattende Funktion hinausgehen und als strategisches Steuerungselement eine grundlegende Neuausrichtung hin zu datengetriebenen, zirkulären Geschäftsmodellen ermöglicht. Diese strategische Einordnung basiert auf einer Betrachtung regulatorischer, technologischer und operativer Rahmenbedingungen. Regulatorisch wurde deutlich, dass der DPP eine zentrale Rolle bei der Operationalisierung europäischer Nachhaltigkeitsziele einnimmt. Er fungiert als Instrument zur Erfüllung von Transparenzpflichten der EU und erfordert eine europäische sowie internationale Harmonisierung der Daten-systeme. Die Untersuchung identifizierte dabei Spannungsfelder zwischen regulatorischer Transparenzforderung und Schutz sensibler Daten sowie Herausforderungen bei der Integration internationaler Lieferkettenakteure. Technologisch bestätigte die Fallstudie, dass der DPP auf robusten, interoperablen Datenarchitekturen und Schlüsseltechnologien wie IoT und Blockchain basieren sollte. Insbesondere die Kombination von IoT-Datenerhebung und PM könnte auf Argumentationsbasis des vorliegenden PoCs strategisch nutzbare Erkenntnisse liefern: Von frühzeitiger Fehlererkennung über optimierte Produktnutzung bis hin zu wertschöpfenden Second Life Einsatzbereichen. Dabei sichert die Blockchain Technologie die notwendige Transparenz und Datenintegrität. Die Untersuchung verdeutlichte zugleich den hohen Aufwand in der Gewährleistung der Datenqualität und Interoperabilität zwischen den Akteuren. Die strategische Auswertung zeigte, dass der DPP erhebliche Wettbewerbsvorteile ermöglichen kann, indem er operative Effizienzen hebt, Kosten durch Qualitätssteigerungen senkt und Differenzierungsmöglichkeiten am Markt eröffnet. Am Beispiel des Second-Life-Geschäftsmodells wurden konkret messbare ökonomische und ökologische Mehrwerte identifiziert. Zudem

erwiesen sich datenbasierte Services, präventive Wartungsstrategien und ressourcenschonende Prozessoptimierungen als zentrale Hebel zur Wettbewerbsdifferenzierung. Die daraus abgeleitete Matrix zur strategischen Positionierung verdeutlicht die notwendigen Erfolgsbedingungen für Unternehmen, um nachhaltige Wettbewerbsvorteile realisieren zu können. Insgesamt bestätigt die Arbeit die zentrale These, dass der DPP weit mehr als ein regulatorisches Pflichtinstrument ist. Unternehmen, die Daten nicht als Nebenprodukt, sondern als Kernressource strategisch integrieren und aktiv verwerten, sichern sich langfristige Wettbewerbsvorteile. Voraussetzung hierfür sind jedoch klare technologische Standards, organisatorische Anpassungen und kooperative Governance-Strukturen. Der DPP besitzt somit das Potenzial, zu einem zentralen Hebel nachhaltiger, zirkulärer und datengetriebener Wertschöpfung zu werden.

7.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Mit Blick auf zukünftige Entwicklungen zeichnet sich der DPP als Schlüsseltechnologie für zirkuläre Geschäftsstrategien und datengetriebene Wertschöpfung ab, auch wenn der DPP aktuell noch nicht marktwirksam etabliert ist und dessen praktische Einführung noch bevorsteht. Die drei zentrale Entwicklungslinien werden vorraussichtlich für dessen erfolgreiche Implementierung und zukünftige Skalierung entscheidend sein. Technologisch wird der DPP durch zunehmend autonome, intelligente Systeme geprägt. IoT-Technologien könnten künftig vollständig automatisierte Datenerfassung und -übermittlung über Smart Contracts ermöglichen, was Manipulationsrisiken minimiert und Greenwashing verhindert. Die Integration von KI in PM dürfte die automatisierte Auswertung und prädiktive Nutzung dieser Daten weiter verbessern und dabei neue Ansätze zur nachhaltigen Produktgestaltung und Prozessoptimierung hervorbringen. Strategisch könnten sich substantielle Potenziale zur Geschäftsmodellentwicklung ergeben. Unternehmen, die proaktiv DPP-Daten als Grundlage für innovative Dienstleistungen und Produktangebote nutzen, könnten damit ihre Wertschöpfungstiefe deutlich erhöhen. Der Ansatz von Siemens demonstrierte exemplarisch, wie durch kostenpflichtige Zusatzservices oder individualisierte Kundenangebote neue Erlöspotenziale entstehen. Zukünftig dürften Geschäftsmodelle wie DaaS oder PaaS zentrale Markttrends bestimmen, die den DPP als notwendige Informationsbasis voraussetzen. Institutionell und international stehen zukünftige Herausforderungen primär im Bereich Governance und Standardisierung. Für die nachhaltige internationale Skalierung bedarf es global anschlussfähiger Lösungen, die Datenaustausch und -qualität verbindlich regeln. Nur durch einheitliche

Governance-Strukturen und differenzierte Zugriffsmodelle lässt sich die Akzeptanz und das Vertrauen der Akteure gewährleisten und somit eine effektive, globale Integration ermöglichen. Der Batteriepass nimmt im Gesamtkontext dabei aufgrund seiner Priorität eine klare Vorreiterrolle ein, wodurch er als zukunftsweisende Blaupause für weitere DPP-Implementierungen fungiert. Dennoch bleiben weiterhin zahlreiche Unsicherheiten bezüglich der finalen regulatorischen und technologischen Ausgestaltung bestehen. Der langfristige Erfolg des DPP wird damit maßgeblich davon abhängen, wie konkrete Inhalte und Strukturen, insbesondere im Rahmen laufender Standardisierungsanfragen (bspw. Metastruktur), final definiert und umgesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der DPP derzeit am Beginn seiner Entwicklung steht. Die technologischen Grundlagen sind weitgehend vorhanden, doch es fehlt an systematischer Integration, regulatorischer Konsistenz und unternehmerischem Gestaltungswillen. Der entscheidende Hebel für die Zukunft des DPP liegt in der Fähigkeit, ökologische Zielsetzungen, ökonomischen Nutzen und digitale Effizienz in einem gemeinsamen System zu verbinden. Unternehmen, die dies frühzeitig erkennen und aktiv gestalten, werden nicht nur regulatorisch konform agieren – sie könnten zu Pionieren einer datengestützten, zirkulären und resilienten Wirtschaft werden. Der DPP kann dabei zu einem zentralen Baustein einer unternehmerischen Zukunft werden, die Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit nicht als Widerspruch, sondern als strategisches Bündnis versteht.

8 Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Eventlog	75
Anhang 2: Kennzahldefinition, Toleranzrahmen, Korrelationen, Wettbewerbsvorteile und adressierte Zuordnung	81
Anhang 3: Value-Propositions, gegliedert nach Wirtschaft (Business), Umwelt (Environment) und Regulatorik	82
Anhang 4: Prozesseinblicke durch den Business Miner	83
Anhang 4.1: Bar Charts - What does your process look like?	83
Anhang 4.2: Prozessabbild – What does your process look like?.....	83
Anhang 5: Erkenntnisse durch das Asset Data Explorer	84
Anhang 5.1: Fast Charge – Slow Charge	84
Anhang 5.2: CO ₂ -Emissionen	84
Anhang 5.3: Kostentreiber	85
Anhang 5.4: Transportwege	85
Anhang 5.5 Transport [km] – [Werk/Händler] Beziehung:.....	85
Anhang 5.6: CO ₂ -Emissionen – Kosten	86
Anhang 5.7: Datenaggregation Initial Capacity	86
Anhang 6: Erkenntnisse durch das Asset Analysis	87
Anhang 6.1: Process Explorer.....	87
Anhang 6.2: Process AI.....	87
Anhang 6.3: Durchlaufzeit in der Process Overview	89
Anhang 6.4: Beziehungsmuster im Bubble Diagram.....	89
Anhang 6.5 Case and Activity Table	90
Anhang 6.6: Scatterplot Average SoH Degradation - # C-Rate Overflows	90
Anhang 6.7: Scatterplot Abweichung Initiale Nennkapazität - # C-Rate Overflows..	91
Anhang 7: Logisch abgeleitete Korrelationen zwischen PM-Kennzahlen (Heatmap)	91

**Anhang 8: Handlungsempfehlungen zur Harmonisierung von Stakeholder
Interessen92**

Anhang 1: Eventlog

Case id	activity	time stamp	Akteur/Phase	transport_t	co2_emissions_kg	cost_EUR	transport_krt	initial_capacity_wd	resistance_mOhm	SoH	initial_current_deviation	C:45_counter	C-Rate	Overflow_Count	Fast_charge_counter	Slow_Charge_Counter
Batter_001	Folietoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		281	558,61										
Batter_001	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		233,83	526,35										
Batter_001	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 08:00:00	Batteriehersteller		181,94	320,00										
Batter_001	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-09 20:00:00	Batteriehersteller	Verk. C	450	320,00	120	70653,00	3,94							
Batter_001	Defekt erk. ann. Demontage	2024-01-09 20:10:00	OEM		114,33	420,23										
Batter_001	Folietoffgang	2024-01-28 23:00:00	Batteriehersteller		226,88	550,44										
Batter_002	Folietoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		233,83	557,34										
Batter_002	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		181,94	773,83										
Batter_002	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 08:00:00	Batteriehersteller		17,38	395,30										
Batter_002	Qualitätsprüfung	2024-01-01 16:00:00	Batteriehersteller		200,14	517,48										
Batter_002	Demontage	2024-01-03 15:00:00	Batteriehersteller		233,83	557,34										
Batter_003	Folietoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		209,84	547,84										
Batter_003	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		179,82	831,82										
Batter_003	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		194,72	404,68	50	75094	4,7							
Batter_003	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 18:00:00	Batteriehersteller	Verk. A	250	160,00										
Batter_003	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 20:00:00	OEM		186,74	255,24										
Batter_003	Transport zu Händler	2024-01-03 23:00:00	OEM		186,74	255,24										
Batter_003	Transport zu Händler	2024-01-08 10:00:00	OEM	Händler 1	330	180,00	60		0,39		17,8					
Batter_003	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-08 23:00:00	Kunde													
Batter_003	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde							0,945				2	45	206
Batter_003	Nutzung durch Kunde (Lade	2025-01-03 16:00:00	Kunde													
Batter_003	SoH-Kontrolle 2	2025-01-03 16:00:00	Kunde							0,899				1	37	183
Batter_003	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-03 16:00:00	Kunde													
Batter_003	End of first Life - SoH-Prüf	2027-01-03 16:00:00	Kunde							0,837				4	93	255
Batter_003	Recycling	2028-01-24 23:00:00	OEM													
Batter_003	Folietoffgang	2028-01-28 07:00:00	Batteriehersteller		295,52	360,77										
Batter_003	Folietoffgang	2028-01-28 07:00:00	Batteriehersteller		295,52	360,77										
Batter_004	Folietoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		243,49	418,23										
Batter_004	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		184,4	863,20										
Batter_004	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 08:00:00	Batteriehersteller		157,0	360,00										
Batter_004	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 18:00:00	Batteriehersteller	Verk. A	250	160,00	50	74959,6	4,63							
Batter_004	Integration ins Fahrzeug	2024-01-03 23:00:00	OEM		107,99	331,28										
Batter_004	Transport zu Händler	2024-01-03 23:00:00	OEM		124,59	222,45				0,39	38,4					
Batter_004	Transport zu Händler	2024-01-04 10:00:00	OEM	Händler 2	320	201,00	75									
Batter_004	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-04 23:00:00	Kunde													
Batter_004	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde							0,928				5	130	208
Batter_004	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-03 16:00:00	Kunde													
Batter_004	SoH-Kontrolle 2	2026-01-03 16:00:00	Kunde							0,973				7	210	90
Batter_004	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-03 23:00:00	Kunde													
Batter_004	SoH-Kontrolle 3	2026-01-03 23:00:00	Kunde							0,922				6	180	110
Batter_004	Nutzung durch Kunde (Lade	2027-01-03 23:00:00	Kunde													
Batter_004	SoH-Kontrolle 4	2027-01-03 23:00:00	Kunde							0,822				5	108	174
Batter_004	Tierladung registriert	2027-02-15 15:00:00	Kunde													
Batter_004	End of first Life - SoH-Prüf	2028-01-08 23:00:00	OEM							0,64						
Batter_004	Erzeugung	2028-01-08 23:00:00	Batteriehersteller		264,08	276,39										
Batter_004	Folietoffgang	2028-01-08 23:00:00	Batteriehersteller		264,08	276,39										
Batter_005	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		173,98	724,25										
Batter_005	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		63,98	415,42		74867								
Batter_005	Transport zu OEM Werk	2024-01-06 18:00:00	Batteriehersteller	Verk. B	360	210,00	84									
Batter_005	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-06 20:00:00	OEM		108,85	371,60										
Batter_005	Defekt erk. ann. Demontage	2024-01-06 20:10:00	OEM													
Batter_005	Folietoffgang	2024-02-01 23:00:00	Batteriehersteller		272,14	467,87										

case_id	activity	timestamp	Akteurphase	transport_k1	co2_emissions_k1	cost_EUf	transport_kn	initial_capacity_wf	resistance_mOhm	SoH	initial_current_deviation	C>45_counter	C-rate_overflow_Count	Fast_charge_counter	Slow_Charge_Counter
Batteri_0008	Foltestoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		195,32	478,44									
Batteri_0008	Qualitätsprüfung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		210,84	877,05									
Batteri_0008	Transport zu OEM Verk	2024-01-01 08:00:00	Batteriehersteller		123,83	210,00									
Batteri_0008	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-05 18:00:00	Verk B		210,00	210,00	85	79428,9	10,1						
Batteri_0008	Integration ins Fahrzeug	2024-01-06 20:00:00	OEM		102,54	435,50									
Batteri_0008	Transport zu Händler	2024-01-07 07:00:00	OEM		185,85	183,87				0,99	38,1				
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-01 23:00:00	Händler 2		4,20	270,00	100			0,946		3	1	17	175
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 1	2025-01-06 23:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-12 20:00:00	Kunde							0,83		3	1	32	140
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 2	2026-01-12 20:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-01-12 20:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Temperaturbelastung erlis	2027-01-12 20:00:00	Kunde							0,843		5	5	104	122
Batteri_0008	End of first Life - SoH Prüf	2028-02-04 23:00:00	OEM							0,53					
Batteri_0008	End of second Life - SoH Prüf	2029-02-04 23:00:00	OEM		598,18	316,52									
Batteri_0007	Foltestoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		217,38	525,00									
Batteri_0007	Qualitätsprüfung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		230,36	803,08									
Batteri_0007	Transport zu OEM Verk	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		150,43	432,61		74630,1	6,02						
Batteri_0007	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-06 20:00:00	Verk B		340	226,00	80								
Batteri_0007	Integration ins Fahrzeug	2024-01-06 23:00:00	OEM		117,02	397,85				0,99	48,1				
Batteri_0007	Transport zu Händler	2024-01-07 07:00:00	OEM		197,96	188,21									
Batteri_0007	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-01 23:00:00	Händler 2		4,20	270,00	100								
Batteri_0007	SoH-Kontrolle 1	2025-01-06 23:00:00	Kunde							0,512		7	10	180	71
Batteri_0007	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-12 12:00:00	Kunde												
Batteri_0007	SoH-Kontrolle 2	2026-01-06 23:00:00	Kunde							0,487		5	6	112	140
Batteri_0007	Fehlerdiagnose	2026-01-23 23:00:00	OEM												
Batteri_0007	Auschluss	2026-01-24 23:00:00	OEM												
Batteri_0008	Foltestoffgang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		525,18	658,71									
Batteri_0008	Qualitätsprüfung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		268,88	528,21									
Batteri_0008	Transport zu OEM Verk	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		188,32	408,99		74705,9	7,44						
Batteri_0008	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 18:00:00	Verk A		248	163,00	53								
Batteri_0008	Integration ins Fahrzeug	2024-01-03 20:00:00	OEM		110,09	316,67				0,99	36,1				
Batteri_0008	Transport zu Händler	2024-01-03 23:00:00	OEM		217,46	190,83									
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-08 23:00:00	Kunde		330	180,00	80								
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 1	2025-01-06 23:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-12 20:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Vertrag durchgeführt	2024-01-25 23:00:00	Kunde		117,09	216,41				0,332		7	1	29	227
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde												
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-08 23:00:00	Kunde							0,332		7	1	37	190
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 2	2026-01-03 23:00:00	Kunde							0,332		1	1	26	180
Batteri_0008	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-01-08 23:00:00	Kunde												
Batteri_0008	SoH-Kontrolle 3	2027-01-03 23:00:00	Kunde							0,502		1	1	85	148
Batteri_0008	End of first Life - SoH Prüf	2027-01-27 23:00:00	OEM							0,85		2	2	85	148
Batteri_0008	Second Life	2027-01-28 23:00:00	OEM		324,31	328,26									

case_id	activity	timestamp	akteurphaskst	transport_kl	co2_emissions_kl	cost_eur	transport_kn	initial_capacity_wl	resistance_mOhm	SoH	initial_current_deviation	C:45_counter	Fast_charge_counter	Slow_Charge_Counter
Batteri_009	Rolstoßprüfung	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		272,99	546,32								
Batteri_009	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		217,09	734,98		75285,6						
Batteri_009	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		195,46	432,12	95		5,39					
Batteri_009	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 18:00:00	Batteriehersteller	Verk B	350	228,00								
Batteri_009	Aufbereitung und Qualitätst	2024-01-06 18:00:00	OEM		120,99	408,24								
Batteri_009	Integration ins Fahrzeug	2024-01-08 23:00:00	OEM		228,98	200,40		6,8						
Batteri_009	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-12 00:00:00	Handler 2	Handler 2	460	270,00	100					0	1	25
Batteri_009	Fehldiagnose	2024-01-21 16:00:00	Kunde											
Batteri_009	Wartung durchgeführt	2024-01-29 23:00:00	Kunde		92,93	231,19								
Batteri_009	SoH-Kontrolle 1	2025-01-06 23:00:00	Kunde						0,927					
Batteri_009	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-14 23:00:00	Kunde						0,321			1	1	37
Batteri_009	SoH-Kontrolle 2	2026-01-06 23:00:00	Kunde						0,3			2	2	65
Batteri_009	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-01-12 00:00:00	Kunde						0,9			1	1	26
Batteri_009	SoH-Kontrolle 3	2027-01-06 23:00:00	Kunde						0,89			1	1	180
Batteri_009	Nutzung durch Kunde (Lad	2027-01-12 00:00:00	Kunde											
Batteri_009	End of first Life - SoH Prü	2028-01-20 23:00:00	OEM		349,83	312,87								
Batteri_009	Second Life	2028-01-20 23:00:00	OEM		250,78	812,94								
Batteri_000	Rolstoßprüfung	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		191,9	829,26		7472,5						
Batteri_000	Zellassemblierung	2024-01-04 00:00	Batteriehersteller		79,8	371,89	56		6,92					
Batteri_000	Qualitätsprüfung	2024-01-10 00:00	Batteriehersteller		243	157,00								
Batteri_000	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 18:00:00	Batteriehersteller	Verk A	97,78	401,0								
Batteri_000	Aufbereitung und Qualitätst	2024-01-03 20:00:00	OEM		193,11	203,22	75		0,37		14,2			
Batteri_000	Integration ins Fahrzeug	2024-01-06 18:00:00	OEM		320	201,00								
Batteri_000	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-08 23:00:00	Handler 2	Handler 2					0,826			1	0	233
Batteri_000	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-06 23:00:00	Kunde						0,887			2	1	204
Batteri_000	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde											
Batteri_000	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-02-01 23:00:00	Kunde											
Batteri_000	Fehldiagnose	2026-02-01 23:00:00	Kunde											
Batteri_000	Wartung durchgeführt	2026-02-02 23:00:00	Kunde		59,59	298,49								
Batteri_000	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-02-02 23:00:00	Kunde						0,834			1	4	228
Batteri_000	SoH-Kontrolle 3	2027-01-03 23:00:00	Kunde									1	10	240
Batteri_000	Nutzung durch Kunde (Lad	2027-01-03 23:00:00	Kunde						0,57					
Batteri_000	End of first Life - SoH Prü	2028-01-04 23:00:00	OEM		250,81	206,22								
Batteri_000	Second Life	2028-01-04 23:00:00	OEM		199,97	545,00								
Batteri_001	Rolstoßprüfung	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		167,39	763,39		75983						
Batteri_001	Zellassemblierung	2024-01-04 00:00	Batteriehersteller		101,19	435,03			5,46					
Batteri_001	Qualitätsprüfung	2024-01-10 00:00	Batteriehersteller		310	183,00	88							
Batteri_001	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 18:00:00	Batteriehersteller	Verk A	131,74	421,37								
Batteri_001	Aufbereitung und Qualitätst	2024-01-03 20:00:00	OEM		183,3	182,00			0,39		3,7			
Batteri_001	Integration ins Fahrzeug	2024-01-03 23:00:00	OEM		300	180,00	60							
Batteri_001	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-06 18:00:00	Handler 1	Handler 1										
Batteri_001	Nutzung durch Kunde (Lad	2024-01-06 23:00:00	Kunde											
Batteri_001	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde						0,915			1	1	300
Batteri_001	Nutzung durch Kunde (Lad	2025-01-03 23:00:00	Kunde						0,896			1	4	293
Batteri_001	SoH-Kontrolle 2	2026-01-03 23:00:00	Kunde									2	5	276
Batteri_001	Nutzung durch Kunde (Lad	2026-01-03 23:00:00	Kunde						0,83					
Batteri_001	Fehldiagnose	2027-01-03 13:00:00	Kunde											
Batteri_001	Wartung durchgeführt	2027-01-17 23:00:00	Kunde		71,55	281,88								
Batteri_001	Nutzung durch Kunde (Lad	2027-01-17 23:00:00	Kunde									2	0	4
Batteri_001	SoH-Kontrolle 3	2028-01-18 23:00:00	OEM		326,01	266,76			0,828					
Batteri_001	End of first Life - SoH Prü	2028-01-18 23:00:00	OEM											
Batteri_001	Second Life	2028-01-20 23:00:00	OEM											

case_id	activity	timestamp	Akteurphase	transport_t	co2_emissions_kg	cost_EUR	transport_kn	initial_capacity_wt	resistance_mOhm	SoH	initial_current_deviation	C>45_counter	C-Rate_Overflow_Count	Fast_charge_counter	Slow_Charge_Counter
Bateri_005	Folstoffeinlag	2024-01-01 00:00:00	Battehersteller		24,37	491,60									
Bateri_005	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Battehersteller		27,64	881,72		75278,3							
Bateri_005	Qualitätsprüfung	2024-01-01 06:00:00	Battehersteller		154,72	388,07			6,65						
Bateri_005	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 08:00:00	Battehersteller	Verk. A	251	753,00	51								
Bateri_005	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 20:00:00	OEM		18,22	234,37				0,98	17,6				
Bateri_005	Transport zu Händler	2024-01-06 00:00:00	OEM	Händler 1	300	183,00	60								
Bateri_005	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-08 20:00:00	Kunde							0,937		1	2	70	180
Bateri_005	SoH-Kontrolle 1	2025-01-03 23:00:00	Kunde												
Bateri_005	Nutzung durch Kunde (Lade	2025-01-08 23:00:00	Kunde							0,899		1	3	82	154
Bateri_005	SoH-Kontrolle 2	2026-01-03 23:00:00	Kunde									4	3	91	133
Bateri_005	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-08 23:00:00	Kunde							0,833					
Bateri_005	SoH-Kontrolle 3	2027-01-03 23:00:00	Kunde												
Bateri_005	Fehlerdiagnose	2027-01-03 14:00:00	Kunde		84,18	287,91									
Bateri_005	Entladung durchgefüh	2027-01-03 23:00:00	Kunde												
Bateri_005	End of first Lie - SoH Prü	2027-01-03 23:00:00	Kunde							0,89		4		101	123
Bateri_005	Second Lie	2028-01-28 23:00:00	OEM		302,47	310,68									
Bateri_005	Folstoffeinlag	2024-01-01 00:00:00	Battehersteller		188,32	447,47									
Bateri_006	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Battehersteller		200,91	798,17		74986,2		4,57					
Bateri_006	Qualitätsprüfung	2024-01-01 06:00:00	Battehersteller		130,84	442,87									
Bateri_006	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 08:00:00	Battehersteller	Verk. C	463	318,00	126								
Bateri_006	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 20:00:00	OEM		137,76	402,99				0,97	32,9				
Bateri_006	Integration ins Fahrzeug	2024-01-08 23:00:00	OEM		165,6	193,88									
Bateri_006	Transport zu Händler	2024-01-24 23:00:00	OEM	Händler 3	500	400,00	163								
Bateri_006	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-24 23:00:00	Kunde							0,939		4	2	65	189
Bateri_006	SoH-Kontrolle 1	2025-01-28 20:00:00	Kunde												
Bateri_006	Fehlerdiagnose	2025-01-28 20:00:00	Kunde												
Bateri_006	Entladung durchgefüh	2025-01-28 23:00:00	OEM		86,11	310,93									
Bateri_006	Nutzung durch Kunde (Lade	2025-01-28 23:00:00	Kunde							0,893		5	3	87	132
Bateri_006	SoH-Kontrolle 2	2026-01-24 23:00:00	Kunde												
Bateri_006	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-24 23:00:00	Kunde							0,948		2	1	23	168
Bateri_006	SoH-Kontrolle 3	2027-01-03 23:00:00	Kunde												
Bateri_006	Nutzung durch Kunde (Lade	2027-01-24 23:00:00	Kunde							0,6		2	8	190	48
Bateri_006	SoH-Kontrolle 4	2028-01-24 23:00:00	OEM												
Bateri_006	Entladung	2028-01-24 23:00:00	OEM		316,49	261,06									
Bateri_007	Folstoffeinlag	2024-01-01 00:00:00	Battehersteller		218,23	531,81									
Bateri_007	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Battehersteller		210,12	807,90									
Bateri_007	Qualitätsprüfung	2024-01-01 06:00:00	Battehersteller		160,94	432,85		75231,2		5,35					
Bateri_007	Transport zu OEM Werk	2024-01-03 08:00:00	Battehersteller	Verk. C	444	338,00	124								
Bateri_007	Aufbereitung und Qualitäts	2024-01-03 20:00:00	OEM		135,48	428,99				0,99	24				
Bateri_007	Integration ins Fahrzeug	2024-01-08 23:00:00	OEM		163,88	179,31									
Bateri_007	Transport zu Händler	2024-01-12 12:00:00	OEM	Händler 3	500	400,00	163								
Bateri_007	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-12 12:00:00	Kunde							0,94		3	1	20	201
Bateri_007	SoH-Kontrolle 1	2025-01-12 23:00:00	Kunde												
Bateri_007	Nutzung durch Kunde (Lade	2025-01-12 23:00:00	Kunde							0,902		3	1	12	225
Bateri_007	SoH-Kontrolle 2	2026-01-08 23:00:00	Kunde												
Bateri_007	Fehlerdiagnose	2026-01-08 06:00:00	Kunde												
Bateri_007	Entladung durchgefüh	2026-01-30 23:00:00	OEM		86,25	271,24									
Bateri_007	Nutzung durch Kunde (Lade	2026-01-30 23:00:00	Kunde							0,85		4	2	34	189
Bateri_007	SoH-Kontrolle 3	2027-01-03 23:00:00	Kunde												
Bateri_007	Nutzung durch Kunde (Lade	2024-01-14 23:00:00	Kunde							0,76		4	4	78	211
Bateri_007	SoH-Kontrolle 4	2028-02-01 23:00:00	OEM		316,05	234,85									
Bateri_007	Entladung	2028-02-01 23:00:00	OEM		82,95	440,36									
Bateri_007	Folstoffeinlag	2028-02-04 23:00:00	Battehersteller												

case_id	activity	timestamp	alterphase	transport_t	co2_emissions_t	cost_eur	transport_km	initial_capacity_wt	resistance_mOhm	SoH	initial_current_deviation	C>45_counter	C-Rate	Overflow_Count	Fast_charge_counter	Slow_Charge_Counter
Baterij_018	Rohstoffeingang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		268.15	407.61										
Baterij_018	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		172.47	759.06		75206.6								
Baterij_018	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		133.37	392.40			7.55							
Baterij_018	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 18:00:00	Batteriehersteller	Verk C	491	327.00	121									
Baterij_018	Aufbereitung und Qualitätssicherung	2024-01-02 20:00:00	OEM		107.2	444.81										
Baterij_018	Einbau in Caravan	2024-01-02 23:00:00	Batteriehersteller		218.75	486.17										
Baterij_018	Rohstoffeingang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		254.75	624.50										
Baterij_018	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		202.4	867.94		74821								
Baterij_018	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		124.53	457.91			6.09							
Baterij_018	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 18:00:00	Batteriehersteller	Verk C	460	310.00	126									
Baterij_018	Aufbereitung und Qualitätssicherung	2024-01-02 20:00:00	OEM		125.12	421.02										
Baterij_018	Integration ins Fahrzeug	2024-01-02 23:00:00	OEM		190.68	195.29			0.88	37.5						
Baterij_018	Transport zu Händler	2024-01-02 23:00:00	OEM	Händler 1	500	350.00	130									
Baterij_018	SoH-Kontrolle 1	2025-01-01 00:00:00	Kunde							0.93	4	0	0	3		140
Baterij_018	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2025-01-01 00:00:00	Kunde							0.93	3	0	0	1	17	120
Baterij_018	SoH-Kontrolle 2	2026-01-02 23:00:00	Kunde							0.895						
Baterij_018	Tiefentladung registriert	2026-01-12 16:00:00	Kunde													
Baterij_018	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2026-01-12 12:00:00	Kunde								0	0	1	1	13	139
Baterij_018	SoH-Kontrolle 3	2027-01-06 23:00:00	Kunde							0.839		5	7	185		99
Baterij_018	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2027-01-12 12:00:00	Kunde							0.63						
Baterij_018	End of first Life - SoH Prüfung	2028-02-01 23:00:00	OEM		296.63	341.14										
Baterij_018	Entsorgung	2028-02-02 23:00:00	OEM		148.53	69.20										
Baterij_020	Rohstoffeingang	2024-01-01 00:00:00	Batteriehersteller		197.02	89.20										
Baterij_020	Zellassemblierung	2024-01-01 04:00:00	Batteriehersteller		127.53	364.42		75023.6		3.69						
Baterij_020	Qualitätsprüfung	2024-01-01 10:00:00	Batteriehersteller		248	143.00	51									
Baterij_020	Transport zu OEM Werk	2024-01-01 18:00:00	Batteriehersteller	Verk A	248	143.00	51									
Baterij_020	Aufbereitung und Qualitätssicherung	2024-01-02 20:00:00	OEM		124.54	387.92										
Baterij_020	Integration ins Fahrzeug	2024-01-02 23:00:00	OEM		140.27	216.30				6.3						
Baterij_020	Transport zu Händler	2024-01-02 23:00:00	OEM	Händler 3	350	220.00	70			0.89						
Baterij_020	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2024-01-14 23:00:00	Kunde							0.953	0	0	2	10		85
Baterij_020	SoH-Kontrolle 1	2025-01-02 23:00:00	Kunde													
Baterij_020	Fehlerdiagnose	2025-02-01 23:00:00	Kunde													
Baterij_020	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2025-01-02 23:00:00	OEM		108.42	246.09					0	0	0	2		80
Baterij_020	SoH-Kontrolle 2	2026-01-08 23:00:00	Kunde							0.82						
Baterij_020	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2026-01-16 23:00:00	Kunde								1	0	0	1		85
Baterij_020	SoH-Kontrolle 3	2027-01-09 23:00:00	Kunde							0.917		0	1	3		85
Baterij_020	Nutzung durch Kunde (Ladezyklus)	2027-01-16 23:00:00	Kunde								0	0	1	1		85
Baterij_020	End of first Life - SoH Prüfung	2028-02-01 23:00:00	OEM		226.36	292.95				0.8						
Baterij_020	Second Life	2028-02-06 23:00:00	OEM													

Anhang 2: Kennzahldefinition, Toleranzrahmen, Korrelationen, Wettbewerbsvorteile und adressierte Zuordnung

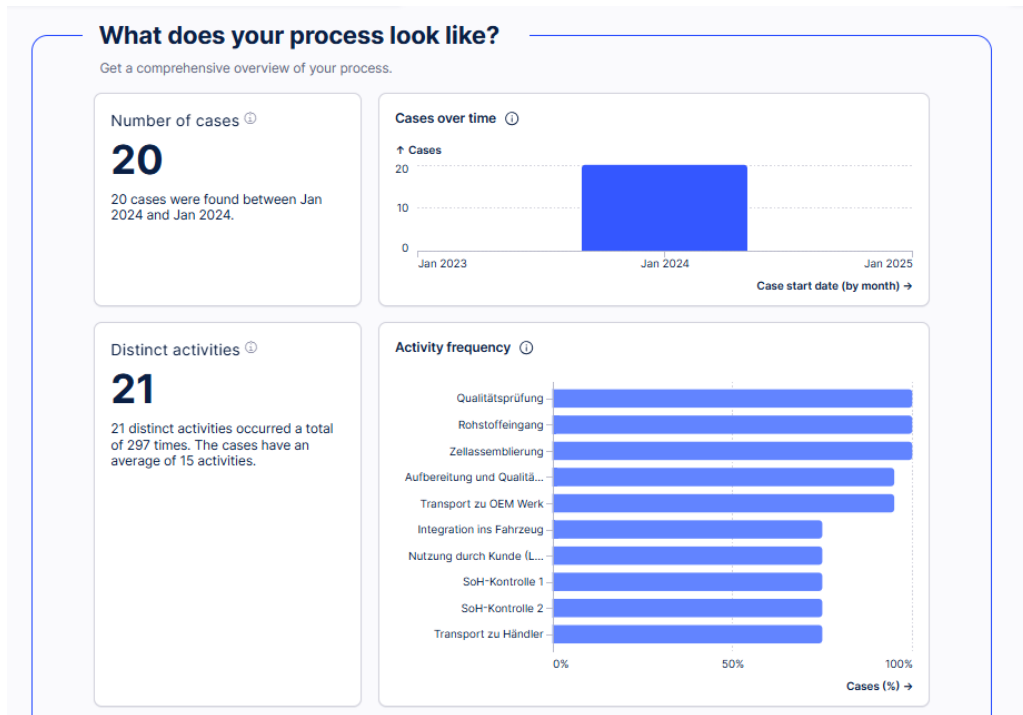
Celonis Process Mining Fallstudie: Ausgelegte Erkenntnisse						
Einsatz in	Kennzahl	Beschreibung	Toleranzrahmen	Potentielle Korrelationen	Wettbewerbsvorteil	Wer gibt die Daten
Produktion	initial_capacity_wh	Initiale Kapazität der Batterie in Wh	75.000 Wh ± 1.5 %	Abweichung ist Hinweis auf Zellelektions- / Kalibrierungsfehler, führt zu ineffizienterem Energieeinsatz, erhöhte CO2-Emissionen pro Ladezyklus	Qualitätskontrolle in Zellassemblierung, Kalibrierung von Messwerten und Optimierung von Fertigungsprozessen	Batteriehersteller
	initial_current_deviation_mA	Abweichung vom Referenzstrom beim Integrationstest in mA der Batterie in das Fahrzeug	< 30 mA: optimal 30–60 mA: kritisch > 60 mA: potenzieller OEM-Montagefehler	Hoher Wert korreliert oft mit früheren Ausfällen, erhöhter Fehlerdiagnose oder Wartung	OEM kann fehlerhafte Montageprozesse identifizieren. Produktionsqualität, Fehlerprognose und spätere Performance	OEM
	resistance_mOhm	Elektrischer Innenwiderstand in Ohm	< 6 mΩ: gut, 6–10 mΩ: kritisch, >10 mΩ: Über Grenzwert	Hoher Innenwiderstand verursacht Leistungsverlust und mehr Energieverlust, Hitzeentwicklung, Hitze, ineffiziente Nutzung, beschleunigter SoH-Abfall	Rückverfolgbarkeit schlechter Zellchargen für Lieferantenauswahl für OEM und Qualitätssicherung für Batteriehersteller	Batteriehersteller
Nutzung	Fast_charge_counter	Anzahl der Ladevorgänge mit Schnellladetechnologie	>60 pro Jahr: überdurchschnittlich	Korrelation mit höheren Werten in C>45_counter + höherem C-Rate Overflow -> aggressives Ladeverhalten	Früherkennung thermischer Risiken: Qualitätssicherung, Nutzungsmusteranalyse für Flottensteuerung, Leasing, Garantieeinschätzung	Nutzer durch innere Messung
	Slow_Charge_counter	Anzahl der Ladevorgänge mit langsamer/ normaler Ladetechnologie	>100 pro Jahr: schonend (relativ zu Fast_charge_counter und Gesamtanzahl der Ladezyklen)	Korrelation mit stabilen SoH-Werten, niedrigeren Temperaturen, längerer Lebensdauer	Positives Nutzerverhalten identifizieren -> Anreizsystem möglich	Nutzer durch innere Messung
	C>45_counter	Anzahl der Ladevorgänge über 45 Grad (thermischer Stress)	>3 pro Jahr: kritischer Bereich	Hohe thermische Belastung, tritt meist zusammen mit hohem Fast-Charge-Anteil auf	Batterie muss ggf. früher ausgetauscht oder Second-Life ausgeschlossen werden	Nutzer durch innere Messung
	C-Rate Overflow Counter	Häufigkeit von Schnellladevorgängen mit zu hoher C-Rate (Nennkapazität in Ah)	> 5 pro Jahr: dauerhaft überlastet	Höhere Zellbelastung, Stark erhöhter Verschleiß, erhöhter Wartungsaufwand und Fehlermeldungen und sinkender SoH, oft gepaart mit Temperaturproblemen	Rückkopplung auf Batterie- oder Fahrzeugdesign (z. B. Ladestrategie)	Nutzer durch innere Messung
Messung	SoH über Zeit (Kontrollpunkte)	3 Kontrollpunkte während Nutzung mit ca 1 Jahr Abstand zum Gesundheitszustand der Batterie in %	Abweichung > 0.1 pro Jahr: ungewöhnlich schnell	Verlauf über SoH-Kontrollen zeigt beschleunigte Alterung bei hohem Charge Stress / hoher Innenwiderstand	Optimierung von Second-Life-Auswahlprozess, zirkuläres Design	OEM durch Kontrollpunkte während Nutzung durch Kunden / oder innere Messung über Distanzmessung durch OEM
	SoH bei "End of first life"	Abschließende Gesundheitszustandsmessung nach Nutzung im ersten Leben in %	> 0.85: Second Life 0.65–0.85: Recycling < 0.65: Entsorgung	Früher SoH-Abfall korreliert mit hohen Temperatur- oder C-Rate-Werten	Frühwarnindikatoren für OEMs -> Designänderung oder Garantieüberwachung	OEM bei Rücknahme / oder innere Messung über Distanzmessung durch OEM
Supply Chain	transport_duration & transport_to	Dauer des Transports in m und Zieldestination	Abhängig von verfügbaren Transportmatrix der Unternehmen	Werk B & C = längerer Transport, höhere Kosten, höhere CO2 Emissionen	Standortanalyse und Produktionsallokation optimieren	OEM/ Batteriehersteller
	co2_emissions_g	CO2 Emissionen pro Ladephase/Transportweg/Produktionsschritt	> 400 g pro Ladephase: ineffizient	Korrelation mit Zellwiderstand, Fast-Charge-Anteil und v.a. der Transportlänge	Optimierung des CO2-Footprints -> ESG-Vorteile, Regulierungs-Compliance	OEM/ Batteriehersteller
	cost_EUR	Kosten in Euro	Abhängig von verfügbaren Kostendaten der Unternehmen	Korrelation zu Transportdistanzen und damit CO2-Emissionen und einzelner Prozessschritte in Produktion; Hohe Wartung führt zu höheren Kosten	Kostenoptimierung durch zirkuläre Strategien / Prozessoptimierung	OEM/ Batteriehersteller

Anhang 3: Value-Propositions, gegliedert nach Wirtschaft (Business), Umwelt (Environment) und Regulatorik

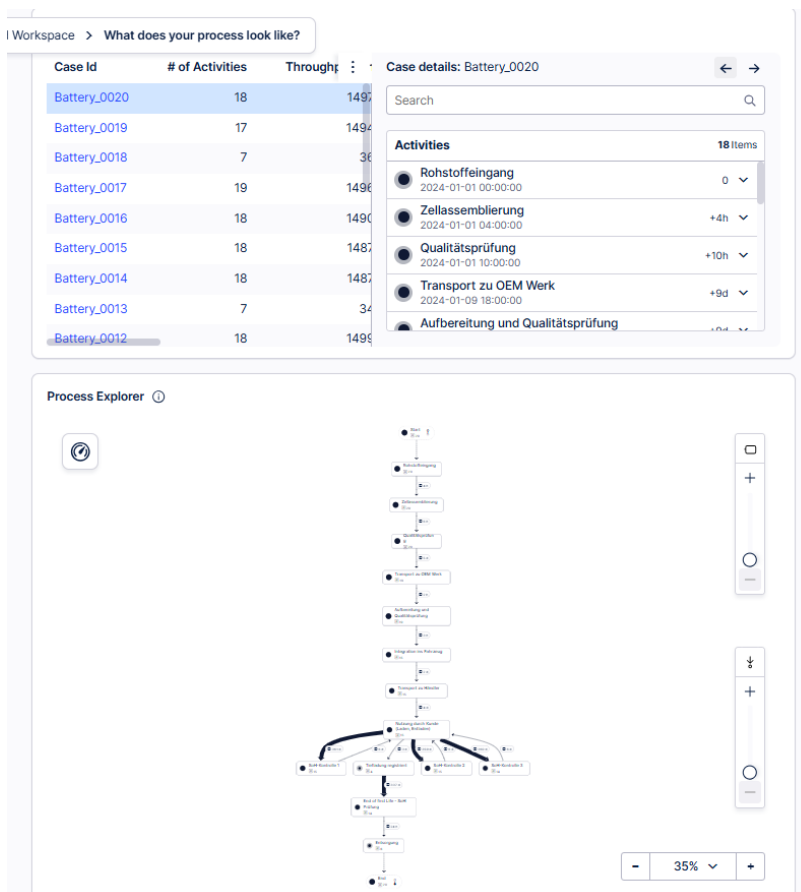
Business Value			Environmental Value			Regulatorischer Value		
Potential	Datengrundlage	Akteur	Potential	Datengrundlage	Zirkulärer Aspekt	Potential	Datengrundlage	Regulation
Reduktion von Wartungskosten	FM deckt Korrelationen zwischen Nutzung (Fast-Charge, C-Rate, Temperatur) und Fehlerdiagnosen/Wartung auf	OEM	Reduktion der CO2-Emissionen	Hohe resistance + fast_charge_counter führen zu mehr CO2-effiziente Prozesse fördern # Transporte zu unnötig weiten Zielen	Klimaziele, CSRD-Reporting	Erfüllung von DPP-Vorgaben (ESPR, BattVO)	Durchgängige Datenstruktur im Eventlog zeigt vollständige Lebenslaufnachverfolgung	EU-Batterieverordnung, ESFR
Second-Life-Potential Evaluation	SoH-Verlauf & Degradationsmuster führen zu fundierter Second-Life-Zuordnung	OEM; Batteriehersteller	Zirkuläres Design durch Second-Life-Reifeanalyse	Objektive SoH-Kriterien sichern Rückführung in Zweitnutzung statt Entsorgung	Ressourceneffizienz, Rohstoffnutzung	CSRD-konformes Nachhaltigkeitsreporting	SoH, CO2, Nutzungsmuster und Materialkreislauf -> quantitativ belegbares Reporting	CSRD, Taxonomie-Verordnung
Ausschussrate senken durch Qualitätsanalyse	initial_capacity_wh, resistance_mOhm, current_deviation_mA -> Früherkennung von Streuung in Produktion	Batteriehersteller	Identifikation ungeeigneter Batterien vor Auslieferung	Kritische Widerstände und Kapazitätswerte -> Ausschuss vor Fahrzeugintegration	Abfallvermeidung	Standardisierung der Rückführungspflicht (Recyclingquote)	Prozesslogik bildet Pfade zu Recycling, Second Life oder Entsorgung objektiv ab	BattVO (Rückführungsquote)
Fehlproduktion & Retouren durch OEM früh erkennen	Abweichungen beim initial_current_deviation bei Integration -> Rückschluss auf Montagefehler	OEM; Batteriehersteller	Weniger Batterieaustausch durch präventive Wartung	Frühe Fehlererkennung bei Nutzung (C-Rate, Überhitzung) reduziert Material- und Energieaufwand für Neuproduktion	Lebenszyklusverlängerung	Standardisierte Datenschnittstellen für Prüfungen	Interoperable Eventlogs (z. B. Catena-X-konform) -> erleichtern Behördenprüfung und Audit	Marktaufsicht, DPP-Richtlinie
Kostentreiber in der Logistik ermitteln	Längere transport_duration und hohe CO2- und Kostenspitzen bei bestimmten Werken identifizieren	OEM, Zulieferer	Bewertung von Nutzungsmustern auf Umweltwirkung	Korrelation Ladeverhalten in Wechselwirkung mit Energieeffizienz zeigt, welche Ladepraktiken nachhaltiger sind	Nutzerklärung und CSRD			
Nutzungsgruppenanalyse durch garantiébedingte Risiken	Abweichende Nutzungsmuster wie Schnellladen -> gezielte Garantiegestaltung & Kundenberatung	OEM, Versicherer, Leasingbetreiber						
Längere Lebensdauer durch rechtzeitige Auswechslung	Identifikation des optimalen SoH-Wechselpunkts reduziert Ausfälle und sichert Verfügbarkeit	OEM, Nutzer						

Anhang 4: Prozesseinblicke durch den Business Miner

Anhang 4.1: Bar Charts - What does your process look like?

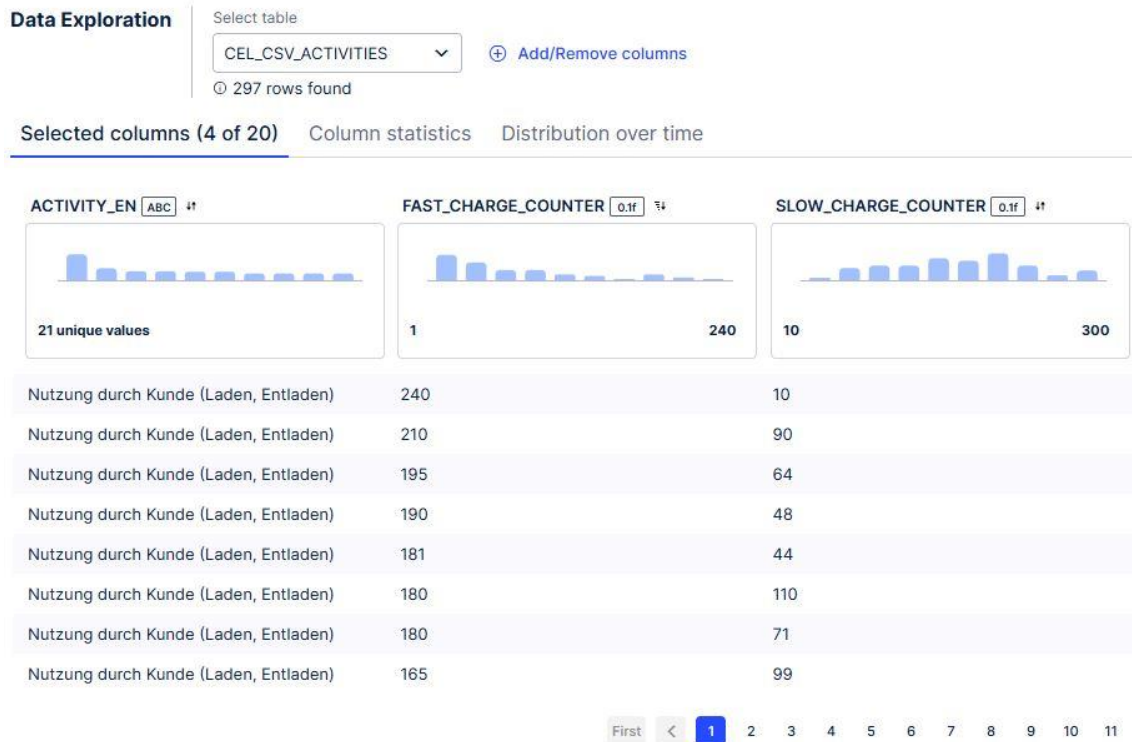


Anhang 4.2: Prozessabbild – What does your process look like?

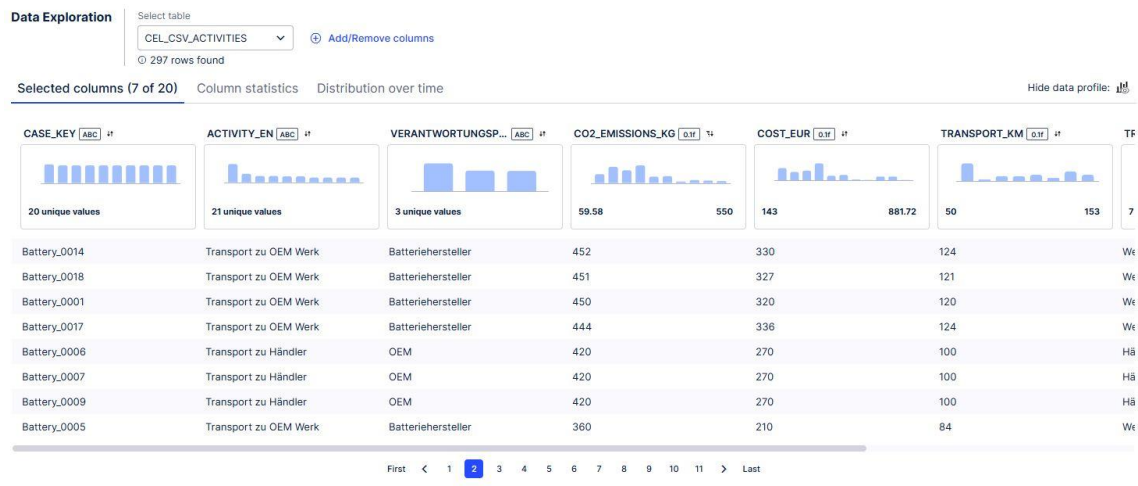


Anhang 5: Erkenntnisse durch das Asset Data Explorer

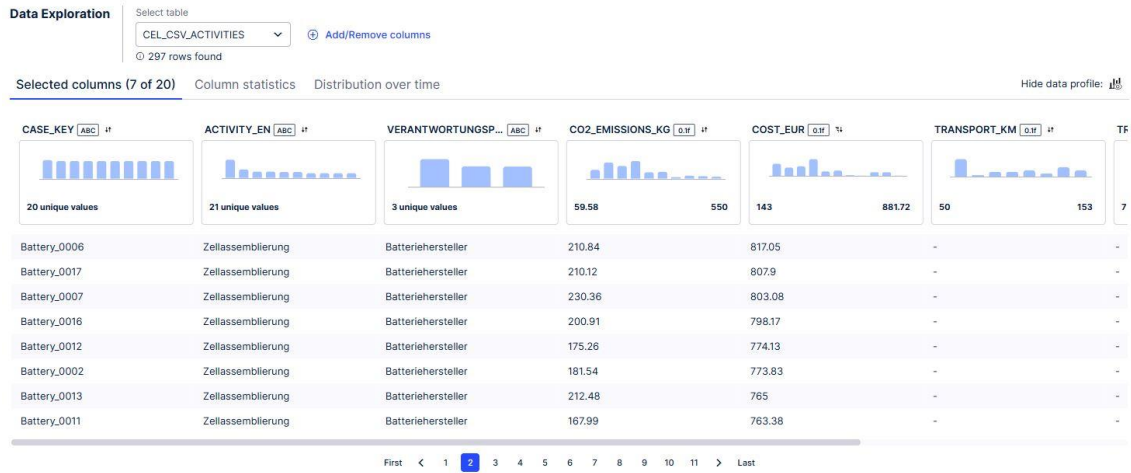
Anhang 5.1: Fast Charge – Slow Charge



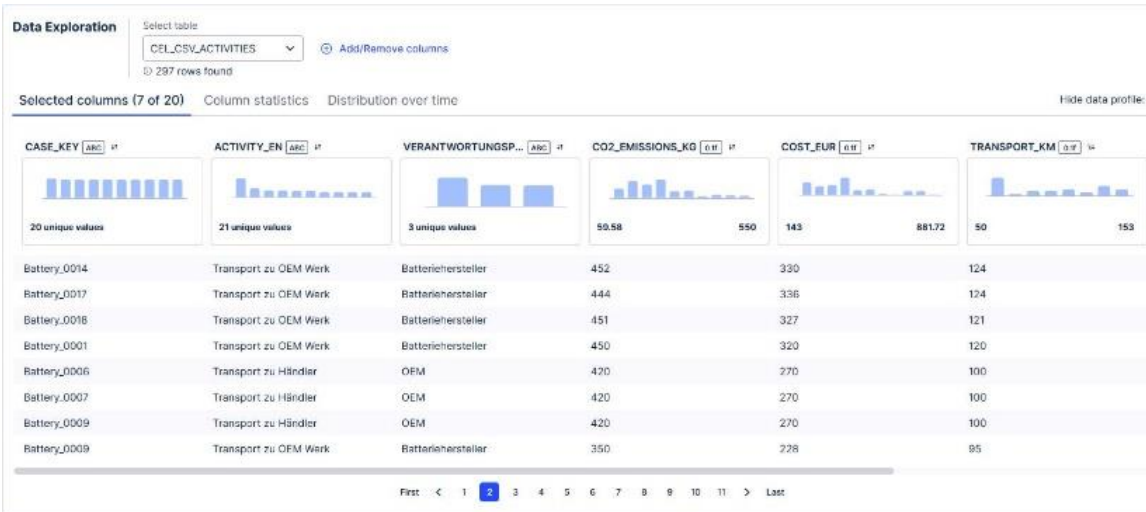
Anhang 5.2: CO₂-Emissionen



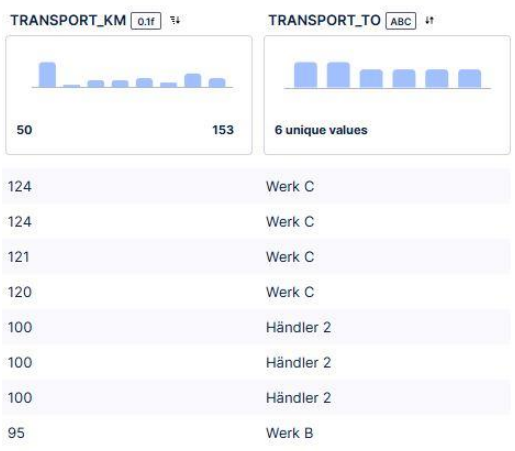
Anhang 5.3: Kostentreiber



Anhang 5.4: Transportwege



Anhang 5.5 Transport [km] – [Werk/Händler] Beziehung:



Anhang 5.6: CO₂-Emissionen – Kosten



Anhang 5.7: Datenaggregation Initial Capacity

Data Aggregation

Dimensions

"_CEL_CSV_ACTIVITIES"."ACTIVITY_EN" ×

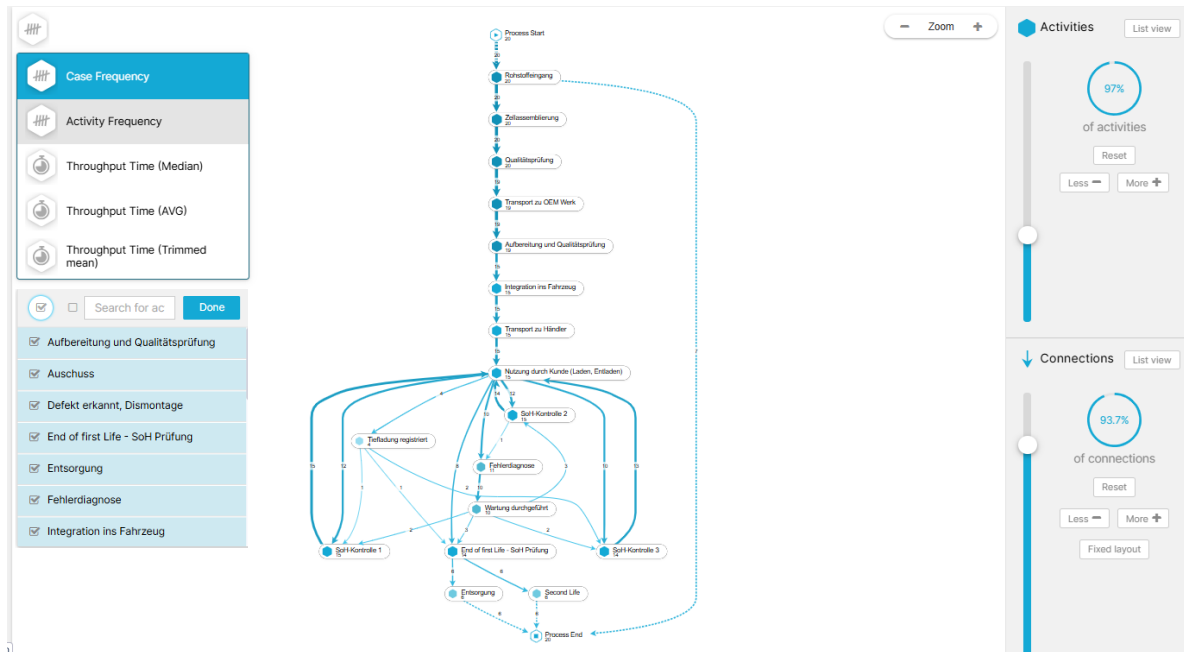
Aggregations

Max	INITIAL_CAPACITY_WH (...)	Save as	🗑️
Min	INITIAL_CAPACITY_WH (...)	Save as	🗑️
Average	INITIAL_CAPACITY_WH (...)	Save as	🗑️
Median	INITIAL_CAPACITY_WH (...)	Save as	🗑️
None	Select column	Save as	🗑️

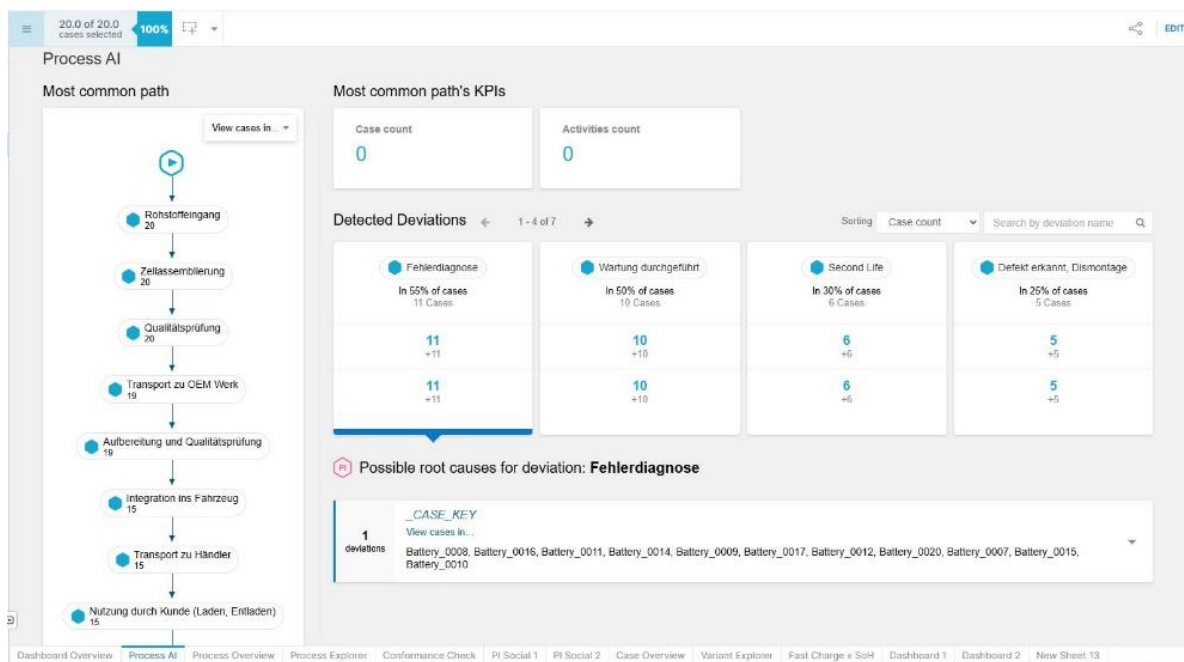
ACTIVITY_EN 📄	Maximum(INITIAL_CAPACITY_WH)	Minimum(INITIAL_CAPACITY_WH)	Average(INITIAL_CAPACITY_WH)	Median(INITIAL_CAPACITY_WH)
Zellassemblierung	75.43K	74.26K	74.98K	75.08K

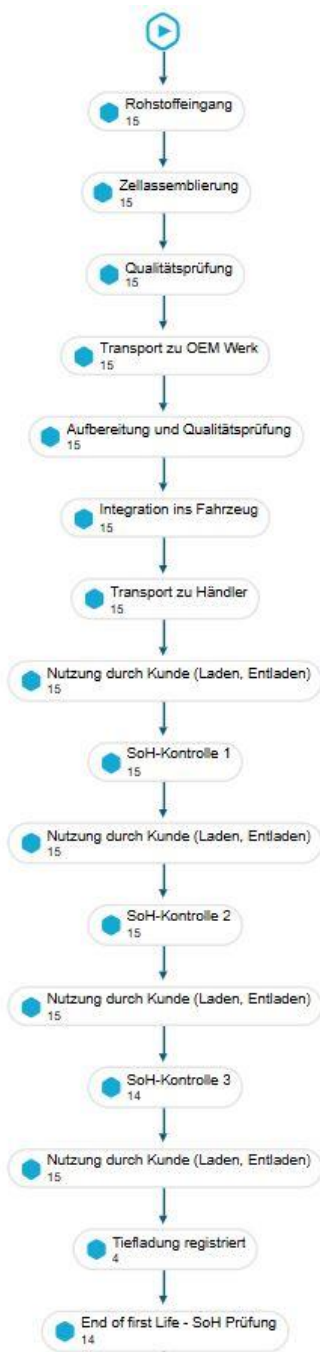
Anhang 6: Erkenntnisse durch das Asset Analysis

Anhang 6.1: Process Explorer

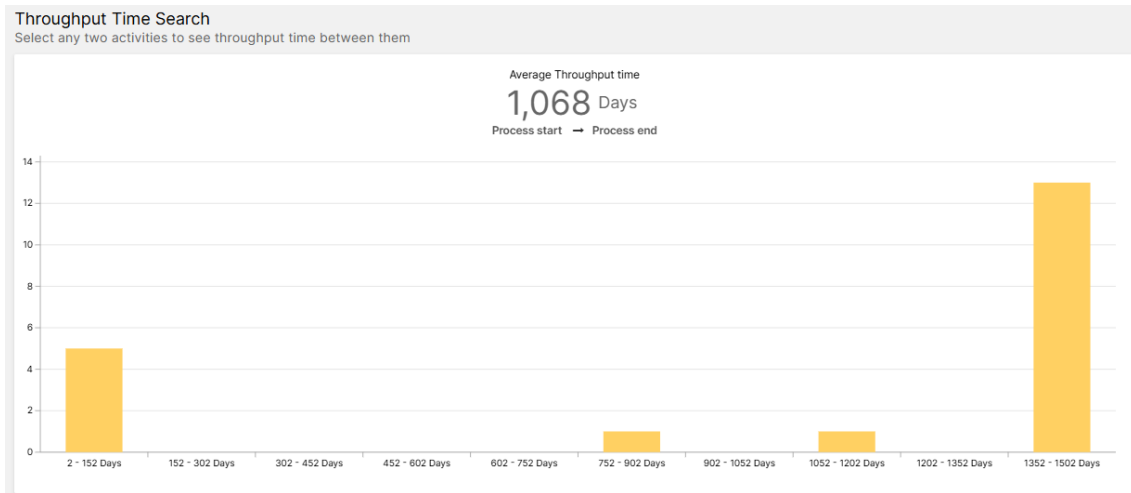


Anhang 6.2: Process AI

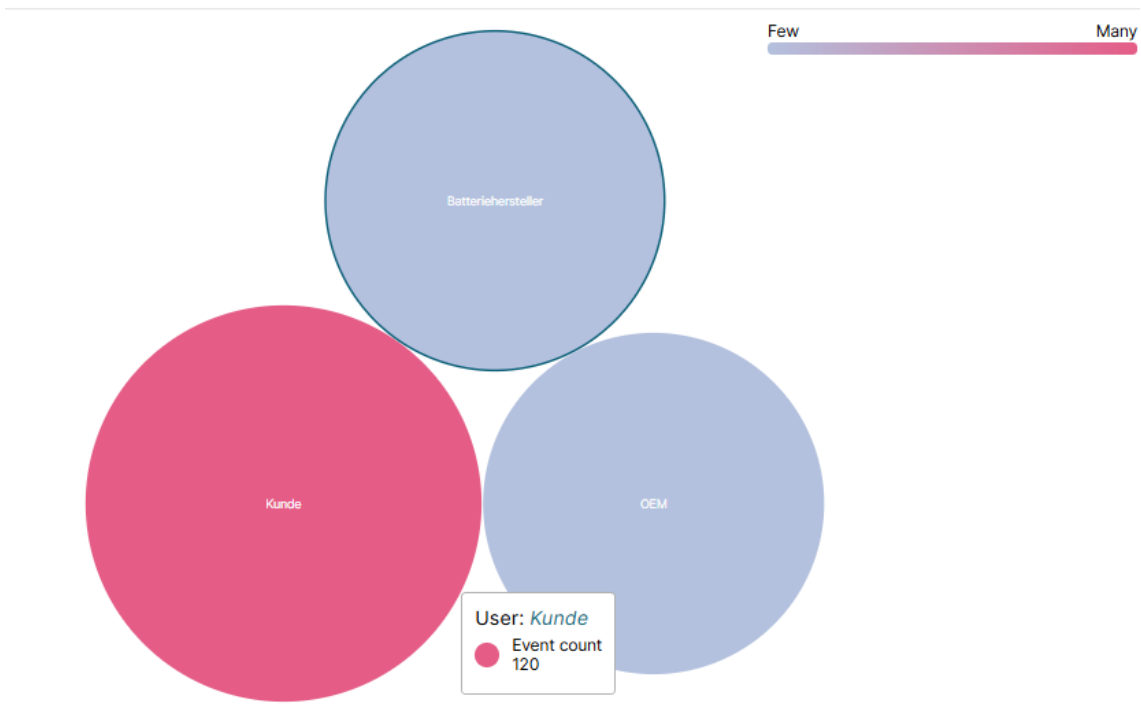




Anhang 6.3: Durchlaufzeit in der Process Overview



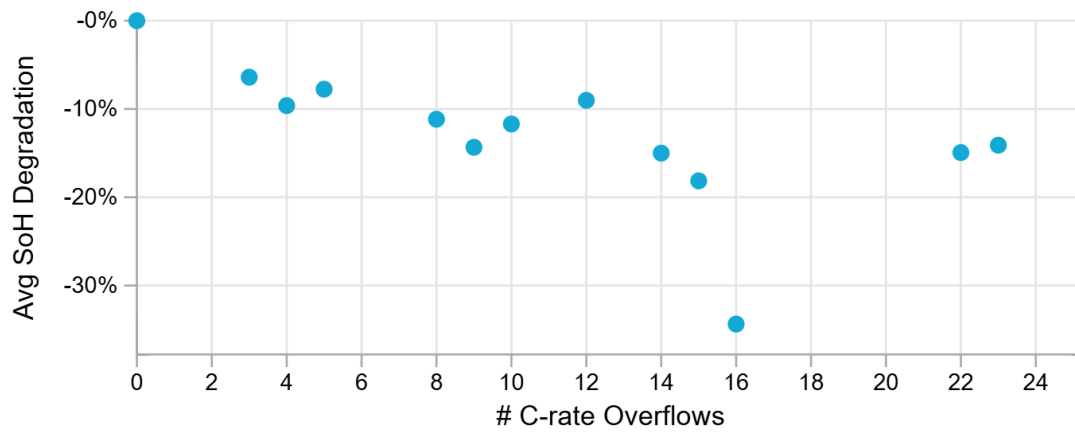
Anhang 6.4: Beziehungsmuster im Bubble Diagram



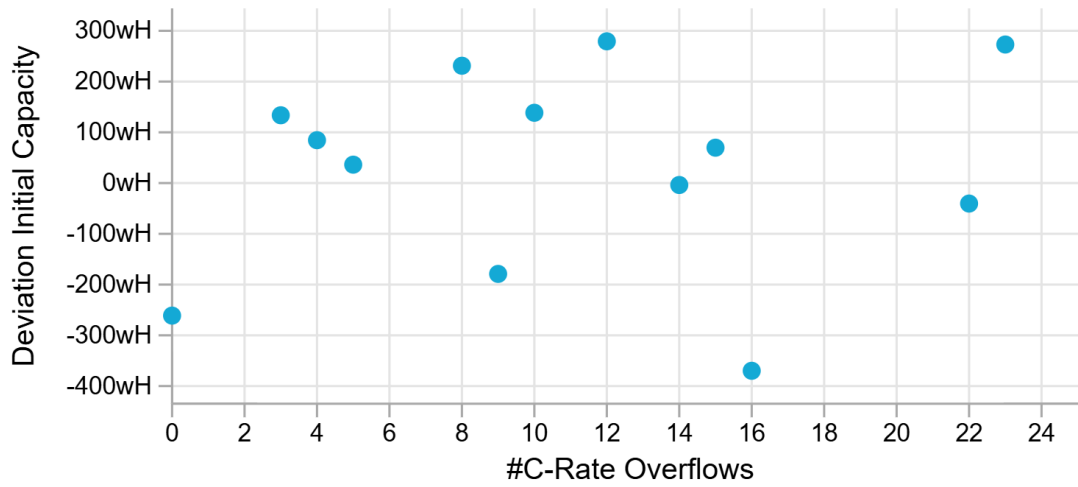
Anhang 6.5 Case and Activity Table

CASE ID	NUMBER OF ACTIVI...	DURATION
Battery_0001	7	1M
Battery_0002	5	3d
Battery_0003	18	4y
Battery_0004	17	4y
Battery_0005	7	1M
Battery_0006	18	4y
Battery_0007	13	2y
Battery_0008	18	3y
Battery_0009	18	4y
Battery_0010	18	4y
Battery_0011	18	4y
Battery_0012	18	4y
Battery_0013	7	1M
Battery_0014	18	4y
Battery_0015	18	4y
Battery_0016	18	4y
Battery_0017	19	4y
Battery_0018	7	1M
Battery_0019	17	4y
Battery_0020	18	4y

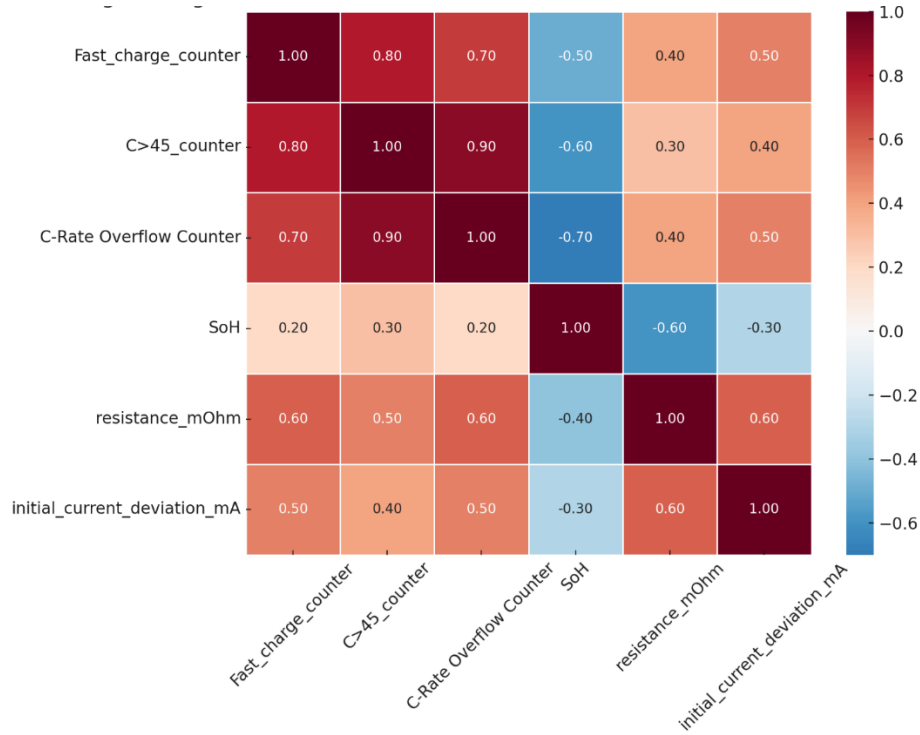
Anhang 6.6: Scatterplot Average SoH Degradation - # C-Rate Overflows



Anhang 6.7: Scatterplot Abweichung Initiale Nennkapazität - # C-Rate Overflows



Anhang 7: Logisch abgeleitete Korrelationen zwischen PM-Kennzahlen (Heatmap)



Anhang 8: Handlungsempfehlungen zur Harmonisierung von Stakeholder Interessen

ID	Title	Expected outcomes	Target stakeholder(s)
R1	<i>Demonstrate use-cases and benefit</i>	Link (economic) benefits clearly to information	CIRPASS, EC
R2	<i>Provide clear information on the requirements and obligations to stakeholders</i>	Description of stakeholder and product group effected by the DPP (to be defined in delegated acts)	EC (delegated acts, preparatory studies)
R3	<i>Provide clear descriptions and calculation methods</i>	Clear description on particular information, such as “generation of waste”	EC, standardization bodies, preparatory studies
R4	<i>Implement information which is already legally mandatory and therefore well available into the DPP (product group specific)</i>	Support market surveillance and customs and simply compliance towards information requirement	Market surveillance, value chain stakeholders
R5	<i>Stimulate IT providers (PLM/ERP/PIM) from all value chain sectors to support data generation and sharing</i>	IT providers are able to pull information which are existing in companies or can support data generation	
R6	<i>Support in particular the micro companies, who often use solely MS Excel, on their way to implement the improved PLM-/ERP-/PIM solutions, which are more and more available as SaaS solutions for rent.</i>	The ESPR states “financial support, including by providing fiscal advantages and investing in physical and digital infrastructure”.	EC
R7	<i>Allow transition time or financial support for information categories/types which are subject to structural barriers</i>	A smart financial incentive system, providing support for the DPP implementation, e.g. during the transition period till the delegated acts comes into force	EC
R8	<i>Reduce technical barriers or provide technical support for information which require extensive manual data gathering e.g. through standardised cross-sector ontology</i>	Due to the majority of SMEs, an increase in data availability and competitiveness is expected	EC, software provider for PDM-, ERP, PIM-Systems
R9	<i>Provide support for information which require extensive manual data gathering</i>	See R6	See R6

Literaturverzeichnis

Abedi, Fatemeh/Saari, Ulla/Hakola, Liisa (2024): Implementation and Adoption of Digital Product Passports: A Systematic Literature Review. In: Abedi, Fatemeh/Saari, Ulla, Hakola, Lisa (Hrsg.): Implementation and Adoption of Digital Product Passports: A Systematic Literature Review. 2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC). Funchal, Portugal, 24.06.2024 - 28.06.2024: IEEE, S. 1–9.

Abreu, Hugo/Pereira, Vasco/Barata, João (2025): Blockchain-based digital product passport: design principles and demonstration. In: International Journal of Production Research, S. 1–20.

Alcayaga et al.: The Digital Product Passport (DPP) for the Circular Economy: Recommendations for policy, business and IT. URL: https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/05/CIRPASS_The-DPP-for-the-Circular-Economy-Recommendations-for-policy-business-and-IT_v12.pdf (27.02.2025).

Alcayaga, Andres: CIRPASS: Der Digitale Produktpass. URL: https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Veranstaltungen/_function/Netzwerktreffen/5_praesentationen.pdf (16.03.2025).

Arorian (2024): Digital Product Passport & Digital Thread for Sustainability. URL: <https://arorian.com/digital-product-passport-digital-thread/> (01.03.2025).

Arorian Technologies (2024): Implementing Digital Product Passport (DPP): Overcoming Challenges. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/implementing-digital-product-passport-dpp-overcoming-challenges-hgsee> (15.02.2025).

Ashton, Kevin (2009): That 'Internet of Things' Thing. In the real world, things matter more than ideas. URL: <https://www.rfidjournal.com/expert-views/that-internet-of-things-thing/73881/> (26.01.2025).

Aura Blockchain Consortium: Embracing Digital Product Passport as a regulatory requirement. Setting a new standard for luxury experiences and circularity.

Barwasser, Adrian et al.: Der Digitale Produktpass – Eine Übersicht. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/771a840f-dea6-4457-8c51-f52005c881bf/content> (26.01.2025).

Barwasser, Adrian et al.: Der Digitale Produktpass – Eine Übersicht. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/771a840f-dea6-4457-8c51-f52005c881bf/content> (26.01.2025).

Batterieforum (2025): C-Koeffizient. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/lexikon/c-koeffizient/> (15.03.2025).

Beanland, Andrew (2023): The EU Digital Product Passport shapes the future of value chains. What it is and how to prepare now. URL: https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/The-EU-DPP-shapes-the-future-of-value-chains_What-it-is-and-how-to-prepare-now.pdf (06.03.2025).

Berger, Katharina/Schöggel, Josef-Peter/Baumgartner, Rupert J. (2022): Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases. In: Journal of Cleaner Production, 353. Jg., S. 131492.

Bernhardt, Wolfgang/Kaur, Hasmeet/Koper, Sebastian (2023): Improving the Circular Economy for Batteries. URL: https://content.rolandberger.com/hubfs/23_2064_ART_Battery_Second_Life-04.pdf?utm_campaign=22-0056_Sustainability-in-Fashion&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz--gE7Oy22-yf23SsfTm2aWqFu_p0Lvz3utezI2viRblddyQAxbfw2AEAZQVMSDEoCjsv6AHU1-dkTmh9LnDGXqRIJtUs6Tch-ogIwZYGCBD03aVXhkw&_hsmi=261784416&utm_content=261784416&utm_source=hs_automation (05.03.2025).

Bernier, Carolyn (2023): DPP EU CIRPASS project. Webinars on the Digital Product Passport CIRPASS Initiative. Europäische Kommission, 06.12.2023. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54874> (02.01.2025).

Bharadwaj, Anandhi et al. (2013): Digital Business Strategy: Toward a Next Generation of Insights.

Böhler, Christian/Zühlke, Hannah (2025): Einklang mit ESG-Kriterien – über die ganze Wertschöpfungskette hinweg. URL: <https://www.rolandberger.com/de/Expertise/Solutions/Nachhaltigkeit-in-Operations.html> (06.03.2025).

Boulding, Kenneth Ewart/Jarrett, Henry: The Economics of the Coming Spaceship Earth. URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781135987985_A23831752/preview-9781135987985_A23831752.pdf (26.01.2025).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMUV) (2025): Europäische Lieferkettenrichtlinie (CSDDD). URL: <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit/wirtschaft/lieferketten/europaeische-lieferkettenrichtlinie-csddd> (01.03.2025).

Celonis (2025a): Process Mining | Celonis | The Leader in Process Mining. URL: <https://www.celonis.com/process-mining/> (05.04.2025).

Celonis (2025b): Activity Table and Case Table. URL: <https://docs.celonis.com/en/activity-table-and-case-table.html> (07.04.2025).

Celonis (2025c): Analysis - Conformance Checker. URL: <https://docs.celonis.com/en/analysis---conformance-checker.html> (07.04.2025).

Celonis (2025d): Business Miner. URL: <https://docs.celonis.com/en/business-miner-overview.html> (07.04.2025).

Celonis (2025e): Celonis Student Thesis and Research (STaR) Program. URL: <https://www.celonis.com/acal-thesis-support/> (07.04.2025).

Celonis (2025f): Creating applications and dashboards using Studio. URL: <https://docs.celonis.com/en/studio.html> (07.04.2025).

Celonis (2025g): Export to Studio. URL: <https://docs.celonis.com/en/export-to-studio.html> (07.04.2025).

Celonis (2025h): PQL - Process Query Language. URL: <https://docs.celonis.com/en/pql--process-query-language.html> (07.04.2025).

Celonis (2025i): Process AI. URL: <https://docs.celonis.com/en/process-ai.html> (07.04.2025).

Celonis (2025j): Process Explorer. URL: <https://docs.celonis.com/en/process-explorer.html> (07.04.2025).

Celonis (2025k): Process Overview screen in Celonis. URL: <https://docs.celonis.com/en/process-overview-screen-in-celonis-4.html> (07.04.2025).

Celonis (2025l): Variant Explorer. URL: <https://docs.celonis.com/en/variant-explorer.html> (07.04.2025).

Circularise (2025): A sustainable future: Using blockchain for digital product passports. URL: <https://www.circularise.com/blogs/a-sustainable-future-using-blockchain-for-digital-product-passport> (13.03.2025).

CIRPASS (2022): DPP in a nutshell. URL: [https://cirpassproject.eu/dpp-in-a-nutshell/#:~:text=A%20Digital%20Product%20Passport%20\(DPP,means%20through%20a%20data%20carrier.](https://cirpassproject.eu/dpp-in-a-nutshell/#:~:text=A%20Digital%20Product%20Passport%20(DPP,means%20through%20a%20data%20carrier.) (01.02.2025).

CIRPASS (2025): About CIRPASS. URL: <https://cirpassproject.eu/> (04.01.2025).

CIRPASS-2 (2025a): Lighthouse Pilots. URL: <https://cirpass2.eu/lighthouse-pilots/> (27.02.2025).

CIRPASS-2 (2025b): Welcome to CIRPASS-2. URL: <https://cirpass2.eu/> (27.02.2025).

Columbus (2023): Getting ready for digital product passports: part two. URL: <https://www.columbusglobal.com/how-we-think/articles/getting-ready-for-digital-product-passports-part-two/> (06.01.2025).

Deloitte (2025): Zirkuläre Wirtschaft: Studie von Deloitte und BDI | Deloitte Deutschland. URL: <https://www.deloitte.com/de/de/issues/sustainability-climate/zirkulaere-wirtschaft-studie.html> (12.03.2025).

Ducuing, Charlotte/Reich, René Herbert (2023): Data governance: Digital product passports as a case study.

Element Energy (2019): Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. URL: https://www.erm.com/contentassets/553cd40a6def42b196e32e4d70e149a1/element_energy_batteries_on_wheels_public-report_4th-june-2019.pdf (06.04.2025).

Elkington, John (1994): Towards the Sustainable Corporation. Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. In: California Management Review (2), S. 90–100. URL: <https://doi.org/10.2307/41165746> (22.01.2025).

Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EGText von Bedeutung für den EWR. zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781 (25.03.2025).

Europäische Kommission (18.07.2024): VERORDNUNG (EU) 2024/1781 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. ESPR. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/deu> (25.01.2025).

Europäische Kommission (2025): Objectives of the Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Making sustainable products the norm in the EU. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (25.03.2025).

Europäische Kommission (11.12.2019): The European Green Deal. EU Green Deal. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF (25.03.2025).

Europäische Kommission (30.03.2022): New proposals to make sustainable products the norm. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2013.

Europäische Kommission (12/2022): RICHTLINIE (EU) 2022/246 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (CSRD). CSRD. In: Amtsblatt der Europäischen Union (L 322/15). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464> (25.03.2025).

Europäische Kommission (28.07.2023): Verordnung (EU) 2023/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, vom L 191/1, 2023. Jg. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542> (25.03.2025).

Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. ESPR, vom 28.06.2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781 (25.02.2025).

Europäische Kommission (18.07.2024): Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. ESPR. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/deu> (25.01.2025).

Europäische Kommission (25.02.2025): Objectives of the Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Making sustainable products the norm in the EU. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (25.02.2025).

Europäische Kommission (2025): The Digital Product Passport (DPP) as a tool to promote sustainability and circularity. Galatola, Michele, 26.02.2025. URL: https://www.wto.org/library/events/event_resources/tbt_0703202315/69_344.pdf (26.02.2025).

Europäische Kommission (28.02.2025): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Circular Economy Action Plan. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098> (28.02.2025).

Fill, Hans-Georg/Meier, Andreas (2020): Blockchain. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Freeman, R. Edward/Reed, David L. (1983): Stockholders and Stakeholders: A New Perspective on Corporate Governance. In: California Management Review, 25. Jg. (3).

Galotala, Michele: The Digital Product Passport as a tool to promote sustainability and circularity. Europäische Kommission (05.04.2025).

Germanwatch (2023): Der Digitale Produktpass Wie wird er zum Wegbereiter für eine Kreislaufwirtschaft?

Goddin, James et al.: Circularity Indicators Methodology. An approach to measuring circularity. 2. Auflage. URL: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/77e62bc9924c20d0/original/Circularity-Indicators->

Methodology.pdf?_gl=1*1nj54s4*_gcl_au*R0NMLjE3NDI5ODMxOD-
QuQ2owS0NRand5NDZfQmhET0FSSXNBSXZtY3dQblVDYzNiekpO-
dmk3Q3B5bU9wQ2IDUGo1NDFvRnk3UUdzVUdPWGdJRGQ0dnZBTjdqalRHVWF-
BaGFORUFMd193Y0I.*_gcl_au*ODg0NjI-
xMDU0LjE3NDI5ODI4NjY.*_ga*MjU2MTgzMzQ4LjE3NDI5ODI4NjM.*_ga_V32N
675KJX*MTc0MzU4Mjg4OC40LjAuMTc0MzU4Mjg4OC42MC4wLjA. (02.04.2025).

Götz, Thomas: Digital Product Passport: the ticket to achieving a climate neutral and circular European economy? URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8049/file/8049_Digital_Product_Passport.pdf (31.03.2025).

Götz, Thomas et al. (2022): Digital product passport : the ticket to achieving a climate neutral and circular European economy?: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership. URL: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/8049>.

Gubbi, Jayavardhana et al. (2013): Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. In: Future Generation Computer Systems, 29. Jg. (7), S. 1645–1660.

Häckel, Björn/Übelhör, Jochen (2019): Digitale Geschäftsmodelle in der Industrie: Eine Analyse der Auswirkungen und Herausforderungen. In: Digitale Geschäftsmodelle – Band 2, S. 167–181. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-26316-4_9.

Hermes, Vera (2025): Nachhaltigkeit messen: KPIs für Unternehmen. URL: <https://www.lexware.de/wissen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit-messen/> (01.04.2025).

Herrmann, Sophie et al.: Unlocking the Value of the Battery Passport. An exploratory assessment of economic, environmental and social benefits. URL: https://thebatteryassess.eu/assets/images/value-assessment/pdf/2024_BatteryPassport_Value_Assessment.pdf (02.04.2025).

Homrich, Roger (2024): Digitaler Produktpass: Digitaler Zwilling für transparente Lieferketten. URL: <https://www.silicon.de/41712398/digitaler-produktpass-digitaler-zwilling-fuer-transparente-lieferketten> (06.04.2025).

IBM (2025): Was ist OLAP? URL: <https://www.ibm.com/de-de/topics/olap> (18.03.2025).

IHK (2021): Fragen und IHK-Antworten zu SCIP. URL: https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/5059710/addbbc6054704f1c1705f8b382caca8/fragen-und-antworten-zu-scip-data.pdf?utm_source (28.03.2025).

Intersoft (2024): Privacy by Design - General Data Protection Regulation (GDPR). URL: <https://gdpr-info.eu/issues/privacy-by-design/> (27.03.2025).

Iscar, Raphael (2024): Mapping your way to the Digital Product Passport. URL: <https://www.valtech.com/blog/digital-product-passport/> (06.04.2025).

Jansen, Maike et al. (2023): Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems. In: *Systems*, 11. Jg. (3), S. 123. URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/3/123>.

Jensen, Steffen Foldager et al. (2023): Digital product passports for a circular economy: Data needs for product life cycle decision-making. In: *Sustainable Production and Consumption*, 37. Jg., S. 242–255.

Jociute, Dainora (2024): Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit: Triple-Bottom-Line. URL: <https://www.hypeinnovation.de/blog/der-triple-bottom-line-ansatz> (08.04.2025).

Kampker, Achim et al. (2022): Brennstoffzellensystemkosten durch Skaleneffekte senken. In: *maschinenbau*, 2. Jg. (3), S. 28–31.

Kane, Gerald et al. (2017): Achieving Digital Maturity. In: *MIT Sloan Management Review*. URL: <https://sloanreview.mit.edu/projects/achieving-digital-maturity/>.

Kempis, Franz-Josef von (2025): Digitaler Produktpass als Teil der Sustainable Product Strategy der Europäischen Kommission. URL: <https://bdi.eu/artikel/news/digitaler-produktpass-als-teil-der-sustainable-product-strategy-der-europaeischen-kommission> (26.01.2025).

Köllner, Christiane (2016): 2nd-use-Batteriespeicher geht in Betrieb. URL: <https://www.springerprofessional.de/batterie/energiespeicher/2nd-use-batteriespeicher-geht-in-betrieb/10698420> (06.04.2025).

Kollock, Peter (1998): Social Dilemmas: The Anatomy of Cooperation. URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.soc.24.1.183>.

Krummenacher, Peter (2024): Digital Battery Passports. URL: <https://www.bloqsens.com/battery-passport/> (01.04.2025).

Kummer, Beate (2025): SCIP: Kritikpunkte an eine neue Datenbank | CHEManager. URL: <https://www.chemanager-online.com/news/scip-kritikpunkte-eine-neue-datenbank> (01.04.2025).

Lacey, Peter/Rutqvist, Jakob (2015): Waste to Wealth. Creating Advantage in a Circular Economy: Accenture. URL: <https://newsroom.accenture.com/news/2015/the-circular-economy-could-unlock-4-5-trillion-of-economic-growth-finds-new-book-by-accenture> (26.03.2025).

Li, Shancang/Da Xu, Li/Zhao, Shanshan (2014): The internet of things: a survey.

Liedtke, Christa/Andree, Philipp (2024): Kreislaufwirtschaft mit dem Digitalen Produktpass für Verbraucher*innen gestalten – Empfehlungen des SVRV an das BMUV und die Verbraucherforschung auf Basis des Werkstattberichts. Veröffentlichungen des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen. Berlin.

MacArthur, Ellen: Growth Within: A circular economy vision for a competitive Europe. URL: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/growth_within_a_circular_economy_vision_for_a_competitive_europe.pdf (26.03.2025).

MacArthur, Ellen (2013): Towards the Circular Economy: an economic and business rationale for an accelerated transition. URL: <https://emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf> (26.01.2025).

Massoth, Hedda: Digital Product Passports as enablers for the Circular Economy. URL: https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/Publikationen_und_WhitePaper_des_Vereins/2407_DPP_Circular_Economy_WP_v1.pdf (13.03.2025).

Maul, Martin (2022): Gaia-X, Catena-X, IDSA: Parallelen und Gegensätzlichkeiten. URL: <https://blog.doubleslash.de/software-technologien/gaia-x-vs-catena-x-vs-idsa> (08.03.2025).

Meyer, Bernd (2011): Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. URL: <https://papers.gws-os.com/gws-researchreport12-1.pdf> (01.04.2025).

Möller, Frederik et al. (2024): Industrial data ecosystems and data spaces. In: *Electronic Markets*, 34. Jg. (1), S. 1–17. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12525-024-00724-0>.

MP (2025): After-Sales-Service. Wie innovative Strategien Kundenbindung stärken und Profitabilität erhöhen. URL: <https://www.markt-pilot.com/de/after-sales-service> (13.01.2025).

Nagl, Anna/Bozem, Karlheinz (2018): Praxisbeispiel: Geschäftsmodell für Second Life-Batterien. In: *Geschäftsmodelle 4.0*: Springer Gabler, Wiesbaden, S. 121–144. URL: https://link.springer-com.ezproxy.hnu.de/chapter/10.1007/978-3-658-18842-9_3.

Neligan, Adriana et al.: Digital Product Passport as Enabler for the Circular Economy. Relevance and practicability for companies. Berlin/ Köln. URL: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-02/IW-Report_2023-Digitaler-Produktpass-englisch.pdf#:~:text=thus%20automati-cally%20,DIN%2FDKE%2FVDI%2C%202023 (25.03.2025).

Pacolli, Melinda (2022): Importance of Change Management in Digital Transformation Sustainability.

Petrik, Dimitri/Härer, Florian/Schöllkopf, Felix (2024): Realization of a Digital Product Passport for a Cross-Company Carbon Accounting. URL: https://www.researchgate.net/profile/Dimitri-Petrik/publication/385738175_Realization_of_a_Digital_Product_Passport_for_a_Cross-Company_Carbon_Accounting/links/673539d04a70511f071df3ea/Realization-of-a-Digital-Product-Passport-for-a-Cross-Company-Carbon-Accounting.pdf (06.04.2025).

Picopublish (2025): Understand the connection between ESG, CSRD and DPP, and other relevant EU initiatives. URL: <https://www.picopublish.com/sustainability-reporting/understand-the-connection-between-esg-csrd-dpp-and-other-relevant-sustainability-concepts/> (27.02.2025).

Plociennik, Christiane et al. (2022): Requirements for a Digital Product Passport to Boost the Circular Economy.

Porter, Michael E.: *Competitive Advantage. Creating and sustaining superior performance*. 2. Auflage. New York: NY: Free Press.

Pourjafarian, Monireh et al. (2023): A Multi-Stakeholder Digital Product Passport Based on the Asset Administration Shell.

Psarommatis, Foivos/May, Gökan (2024): Digital Product Passport: A Pathway to Circularity and Sustainability in Modern Manufacturing. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/396>.

PwC (2025): Erfolgreiche ESG-Positionierung und Nachhaltigkeitskommunikation. URL: <https://www.pwc.de/de/nachhaltigkeit/sustainable-transformation/nachhaltigkeitskommunikation/erfolgreiche-esg-positionierung-und-kommunikation.html> (06.03.2025).

Reichel, Almut/Schoenmakere, Mieke de/Gillabel, Jeroen (2016): Circular economy in Europe — Developing the knowledge base. URL: <https://www.socialistsanddemocrats.eu/sites/default/files/Circular%20economy%20in%20Europe.pdf> (01.04.2025).

Renault Group (2020): A second life for batteries: from energy usage to industrial storage. URL: <https://www.renaultgroup.com/en/magazine/energy-and-motorization/a-second-life-for-batteries-from-energy-usage-to-industrial-storage> (06.03.2025).

Richardson, Katherine et al. (2023): Earth beyond six of nine planetary boundaries.

Sales, Flavia (2025): Tracing Triumph: How Digital Product Passports Scale Circular Profits. URL: <https://www.finboot.com/post/tracing-triumph-how-digital-product-passports-scale-circular-profits> (08.04.2025).

Savitz, Andrew (2013): The Triple Bottom Line. How Today's Best-Run Companies Are Achieving Economic, Social and Environmental Success - and How You Can Too: John Wiley & Sons.

Schacht, Sigurd/Lanquillon, Carsten (2019): Blockchain und maschinelles Lernen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schade, Ulrich/Gerz, Michael (2019): Investigations into Data Ecosystems: a systematic mapping study. In: Knowledge and Information Systems, 61. Jg. (2), S. 589–630. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10115-018-1323-6>.

Schallmo, Daniel/Williams, Christopher/Lohse, Jochen (2019): Digitalisierung. Fallstudien, Tools und Erkenntnisse für das digitale Zeitalter.

Schmidt, Alexander/Farbstein, Evan (2025): The Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), explained. URL: <https://normative.io/insight/csrd-explained/> (25.02.2025).

SCIP (2025): SCIP - ECHA Substances of Concern In Products Database. URL: https://echa.europa.eu/de/scip?p_p_id=it_smc_liferay_privacy_web_portlet_PrivacyPortlet_INSTANCE_cookie_privacy&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_state_rcv (08.02.2025).

Siemens (2025): Siemens Battery Passport Starter Package. URL: https://www.dex.siemens.com/industrialssoftware/automation-software/siemens-battery-passport-starter-package?cclcl=en_US (06.03.2025).

Slaper, Timothy (2011): The triple bottom line: What is it and how does it work. URL: <https://stuff.mit.edu/afs/athena/course/2/2.813/www/readings/triplebottomline.pdf>.

Stretton, Chris (2024): Digital product passports (DPP): what, how, and why? URL: https://www.circularise.com/blogs/digital-product-passports-dpp-what-how-and-why?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign={campaign}&utm_content={adgroup}&utm_term=digital%20product%20passport&utm_term=digital%20product%20passport&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7238260635&hsa_cam=20926597602&hsa_grp=160500713511&hsa_ad=687349529516&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-1256125198283&hsa_kw=digital%20product%20passport&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwp8--BhBREi-wAj7og1wDXzzJX0YGBwMIlySMP_dxvxmSuljYFAYMbhryO4NdvT46gM-U0MRoCYBAQAvD_BwE (28.03.2025).

Stretton, Chris (2025): Unlock Product-as-a-Service (PaaS) business models with digital product passports. URL: <https://www.circularise.com/blogs/unlock-paas-models-with-dpps> (05.04.2025).

Stretton, Chris/Daphne, Tian/Ramkumar, Shyaam (2025): Battery Regulation EU. Learn about battery passports. URL: <https://www.circularise.com/blogs/battery-regulation-eu-what-you-need-to-know-about-battery-passports> (25.03.2025).

Tchitcherin, Mihail (2024): Digital Product Passport and Data Ecosystem Concepting. URL: https://www.stjm.fi/wp-content/uploads/2024/11/STJM_Digital-Product-Passport-and-Data-Ecosystems-Concepting_Final-report.pdf (06.04.2025).

The Battery Pass (2023): Battery Passport Content Guidance. Achieving compliance with the EU Battery Regulation and increasing sustainability and circularity. URL: https://the-batterypass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_Content_Guidance.pdf (06.04.2025).

The Battery Pass (2025): Battery Pass. Wrapping up and looking ahead. URL: https://www.linkedin.com/posts/batterypass_batterypass-batterypassports-digitalproductpassports-activity-7312787009192816641-FYyM/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAA-DeRtmoBA6scO04LT6BRPHSit92DsN1mHow (02.04.2025).

The Circle Economy (2025): Circularity Gap Report 2024. URL: <https://www.circularity-gap.world/2024> (27.03.2025).

Turdibayeva, Kazyna (2024): How much does process mining cost? 2024 pricing guide. URL: <https://www.processmaker.com/blog/how-much-does-process-mining-cost-2024-pricing-guide/> (08.03.2025).

van der Aalst, Wil (2012): Process mining. Making knowledge discovery process centric. In: ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 13. Jg. (2), S. 45–49.

van der Aalst, Wil et al. (2012): Process Mining Manifesto. In: van der Alst, Wil et al. (Hrsg.): Process Mining Manifesto. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 169–194.

Vlachos, Ioannis/Damvakeraki, Tonia (2024): Digital Product Passports. A Blockchain-based Perspective. URL: https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/document/download/b6e3c85c-43c1-405b-aba8-e49a71249ef7_en?filename=EUBOF_DPP_report.pdf (13.03.2025).

Voulgaridis, Konstantinos et al. (2024): Digital product passports as enablers of digital circular economy: a framework based on technological perspective. In: Telecommunication Systems, 85. Jg. (4), S. 699–715. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-024-01104-x>.

Wagner, Eduard/Schneider, Andreas/Bendzuck, Konrad (2024): Stakeholder Consultation on Key Data. URL: https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/07/D2.3_Stakeholder_consultation_on_key_data_V1.1.pdf (07.04.2025).

Walden Holding (2022): The Digital Product Passport: A Prisoner's Dilemma and How We Solve It - Walden Holding. URL: <https://walden-holding.de/2022/09/28/the-digital-product-passport-a-prisoners-dilemma-and-how-we-solve-it/> (26.03.2025).

Wang, Jason/Haydn, Burke/Zhang, Abraham (2022): Overcoming barriers to circular product design. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527321003224?via%3Dihub> (02.03.2025).

Wautelet, Thibaut/Ayed, Anne-Christine (2024a): Exploring possible Digital Product Passport (DPP) use cases in battery, electronics and textile value chains. URL: https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/04/CIRPASS_D2.2_DPP_UseCases_Report_v2.0.pdf (27.03.2025).

Wautelet, Thibaut/Ayed, Anne-Christine (2024b): Exploring possible Digital Product Passport (DPP) use cases in battery, electronics and textile value chains. URL: https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/04/CIRPASS_D2.2_DPP_UseCases_Report_v2.0.pdf (01.04.2025).

WBCSD: Circular Transition Indicators V4.0. Metrics for business, by business. URL: https://www.wbcd.org/wp-content/uploads/2023/09/Circular_Transition_Indicators_v4.pdf (02.04.2025).

WBCSD (2018): Circular Metrics. Landscape Analysis. URL: https://docs.wbcd.org/2018/06/Circular_Metrics-Landscape_analysis.pdf (26.01.2025).

Weske, Mathias (2012): Business Process Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Williams, Nathan (2022): Transparency and Technology: How to Transform to Sustainability by Applying Blockchain Technology. In: Wollmann, Peter/Püringer, Reto (Hrsg.): Transforming Public and Private Sector Organizations. Cham: Springer International Publishing, S. 345–357.

Wunder, Michael (Hrsg.) (2009): Verteilte Führungsinformationssysteme. Dordrecht/Heidelberg: Springer. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-00509-1_2.pdf (26.03.2025).

Zhang, Abraham/Seuring, Stefan (2024): Digital product passport for sustainable and circular supply chain management: a structured review of use cases. In: International Journal of Logistics Research and Applications, 27. Jg. (12), S. 2513–2540.