

WHITEPAPER

Smart Circular Economy in der Fluidtechnikbranche

Autoren und Autorinnen:

Fraunhofer IIS: Katrin Dietrich, Lara Schmidt, Dr. Lydia Bühler, Dr. Andreas Hamper

VDMA: Dr. Christian Geis, Imane Najib

November 2025



Executive Summary

Die vorliegende Studie mit dem Titel "Smart Circular Economy in der Fluidtechnikbranche" untersucht die Chancen und Herausforderungen der Implementierung einer Circular Economy (CE) in diesem zentralen Sektor des Maschinen- und Anlagenbaus. Die Fluidtechnik, zu der Hydraulik, Pneumatik und Dichtungstechnik gehören, ist entscheidend für zahlreiche industrielle Anwendungen und zeichnet sich durch hohe technische Flexibilität sowie eine starke internationale Ausrichtung aus. In dieser stark mittelständisch geprägten Branche agieren viele Unternehmen die nicht nur hochwertige Komponenten produzieren, sondern auch eng mit Forschungsinstitutionen vernetzt sind und dadurch ihre Innovationskraft stärken.

Zunehmender internationaler Wettbewerb, regulatorische Anforderungen und der Druck durch volatile Ressourcenverfügbarkeit und internationale Abhängigkeiten stellt die Branche vor globale Herausforderungen. Die Circular Economy hat zum Ziel Wirtschaftswachstum von der Entnahme von Primärrohstoffen aus der Umwelt zu entkoppeln und bietet damit einen Gegenentwurf, um eine nachhaltige, resiliente Wertschöpfung sicherzustellen. Aufgrund der Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit ihrer Produkte bietet die Fluidtechnik ein erhebliches Potenzial zur erfolgreichen Umsetzung von CE-Prinzipien. Die Digitalisierung spielt hierbei eine Schlüsselrolle, indem Technologien wie digitale Zwillinge und intelligente Sensorik die Transparenz im Lebenszyklus von Produkten erhöhen und die Implementierung von CE-Geschäftsmodellen unterstützen (smarte Circular Economy).

Die Studie nutzt den Transformationsnavigator »Smart Circularity« vom Fraunhofer IIS, um den Reifegrad von Unternehmen in Bezug auf smarte Circular Economy Lösungen zu messen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Reifegrad im Bereich Technologie und Daten sowie Wertschöpfung bereits fortgeschritten ist, während in den Dimensionen Produkte und Organisation noch erhebliches Verbesserungspotenzial besteht.

Die Identifikation von 13 praxisnahen smart Circular Economy Anwendungsfällen bietet wertvolle Orientierung für Unternehmen und zeigt konkrete Lösungsansätze zur Optimierung ihrer Prozesse und zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle.

Abschließend formuliert die Studie zehn Handlungsempfehlungen, die auf verschiedenen Ebenen - produktbezogen bis branchenübergreifend - ansetzen: von der Gestaltung langlebiger Produkte über die Implementierung neuer Geschäftsmodelle bis zur Förderung von Kollaborationen im Ökosystem und der Standardisierung von Datenformaten. Diese Empfehlungen sollen die Fluidtechnikbranche zukunftsfähig machen, die Effizienz steigern und einen aktiven Beitrag zur Lösung globaler Herausforderungen leisten.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	I
Vorwort.....	V
1 Einleitung & Grundlagen.....	1
1.1 Überblick über die Fluidtechnikbranche	1
1.2 Smart Circular Economy in der Fluidtechnik.....	2
2 Status quo von Smart CE-Lösungen in der Fluidtechnikbranche	5
2.1 Transformationsnavigator »Smart Circularity«.....	6
2.2 Reifegradmessung in der Fluidtechnikbranche	7
2.3 Ergebnisse aus der Branchenstudie.....	8
2.4 Branchenbild	10
2.4.1 Technologie und Daten	11
2.4.2 Organisation.....	12
2.4.3 Produkte	14
2.4.4 Wertschöpfung.....	15
2.5 Leistungspotenziale	17
2.6 Erkenntnisse und Trends in der Fluidtechnikbranche	18
3 Smart CE-Use-Cases	20
3.1 Methodik Use Case Sammlung und Ausarbeitung	20
3.2 Use Cases	23
3.2.1 Lebenszyklusbezogene Use Cases	23
3.2.2 Enabling Use Cases.....	28
3.3 Analyse und Zusammenfassung der Use Cases.....	30
3.3.1 Problemstellungen als Ausgangspunkt.....	30
3.3.2 Lösungsansätze.....	31
3.3.3 Voraussetzungen für die Umsetzung.....	32
4 Eine zirkuläre Fluidtechnikbranche - Handlungsempfehlungen für die digitale und nachhaltige Transformation	33
4.1 Nano-Ebene: Worauf Unternehmen zukünftig bei der Produktgestaltung achten sollten.	34

4.2	Micro-Ebene: Wie sich Unternehmen zukünftig intern transformieren sollten.	35
4.3	Meso-Ebene: Wie sich Unternehmen zukünftig im Business-Ökosystem aufstellen sollten	36
4.4	Macro-Ebene: Wie branchenweite Initiativen die Transformation zu einer Smart CE befähigen.....	39
5	Schlussfolgerung.....	41
	Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: CE als alternatives Konzept zur heutigen linearen Wirtschaft</i>	<i>3</i>
<i>Abbildung 2: 9R-Framework nach Potting et al. (2017).....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 3: Dimensionen & Sub-Dimensionen des Transformationsnavigators »Smart Circularity«</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 4: Demografische Verteilung des Branchenbildes</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 5: Branchenbild der Fluidtechnikbranche auf Meta-Dimensions-Ebene</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 6: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Technologie und Daten</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 7: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Organisation.....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 8: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Produkte</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 9: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Wertschöpfung</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 10: Branchenbild der Fluidtechnikbranche: ausgeschöpfte Leistungspotenziale</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 11: Einordnung in den Produktlebenszyklus der ausgewählten 13 Use Cases.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 12: Betrachtungsebenen einer CE</i>	<i>33</i>

Vorwort

Dieses Whitepaper wurde gemeinsam von Fraunhofer IIS und dem VDMA-Fachverband Fluidtechnik im Rahmen des Verbundforschungsprojekts Fluid 4.0 erstellt.

Im Fokus stehen Strategien und Praxisbeispiele zur Umsetzung der Circular Economy in der Fluidtechnikbranche – mit besonderem Fokus auf die Rolle der Digitalisierung, dem Stand der Umsetzung in Unternehmen sowie konkreten Handlungsempfehlungen. Die Inhalte basieren auf einer umfassenden Branchenstudie, Reifegradanalysen und erarbeiteten Use Cases aus dem Verbundforschungsprojekt Fluid 4.0.

Das Papier richtet sich an Unternehmen der Fluidtechnik sowie an OEMs, Maschinenhersteller und Anwender, die fluidtechnische Produkte nutzen.

1 Einleitung & Grundlagen

Die Fluidtechnikbranche befindet sich in einem Transformationsprozess, der durch Nachhaltigkeit und Digitalisierung geprägt ist. Angesichts globaler Herausforderungen wie Klimawandel, Ressourcenknappheit und zunehmenden regulatorischen Anforderungen ist die Integration von Prinzipien der Circular Economy (CE) in die Geschäftsmodelle und -prozesse der Branche nicht nur wünschenswert, sondern unerlässlich. Ähnlich gestaltet es sich mit der digitalen Transformation: Regulatorik, Kundenanforderungen und Innovationen fordern eine Integration in Kernaspekte der Produkte und Branche. Die Transformation von Unternehmen in Bezug auf Digitalisierung, Resilienz und Nachhaltigkeit durch Circular Economy wird in dem Forschungsfeld Smart Circular Economy (Smart CE) zusammengefasst.

Diese Studie fokussiert darauf, die Relevanz und das Potenzial der Smart CE innerhalb der Fluidtechnik zu beleuchten und konkrete Handlungsempfehlungen für Unternehmen zu formulieren, um die Transformation hin zu einer digitalen und nachhaltigen Branche aktiv zu gestalten. Die Studien und Ergebnisse sind im Rahmen des Arbeitspakets CE des Verbundforschungsprojektes *Fluid 4.0* entstanden, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert wird.

Untersucht werden die Herausforderungen und Chancen der Smart CE in der Fluidtechnikbranche, um aktuelle Trends sowie innovative Ansätze vorzustellen, die Unternehmen dabei unterstützen, CE-Prinzipien in ihre Geschäftsstrategien zu integrieren. Zudem werden Handlungsempfehlungen formuliert, die auf den Erkenntnissen aus einer umfassenden Branchenstudie sowie den beschriebenen Anwendungsfälle basieren und konkrete Schritte zur Umsetzung einer nachhaltigen Transformation aufzeigen. Ziel ist es, Unternehmen in der Fluidtechnik zu befähigen, die Potenziale der CE zu erkennen und aktiv zu nutzen, um eine zukunftsfähige und ressourcenschonende Branche zu gestalten.

1.1 Überblick über die Fluidtechnikbranche

Die Fluidtechnik, mit ihren Teilbranchen Hydraulik, Pneumatik und Dichtungstechnik, ist eine Schlüsseltechnologie des Maschinen- und Anlagenbaus. Sie ist eine zuverlässige, sichere sowie robuste Technologie und ermöglicht gleichzeitig die präzise Steuerung und Übertragung von Kräften und Bewegungen in einer Vielzahl von Anwendungen in der Automobil- und Bauindustrie, in der Landtechnik bis hin zur Energie und Verfahrenstechnik. Die Hydraulik findet Anwendung bspw. in Fertigungsanlagen zur Aufbringung hoher Kräfte (Pressstraßen für die Karosseriefertigung in der Automobilindustrie) bei gleichzeitig hoher Positionierungsgüte, oder in mobilen Arbeitsmaschinen als kraftdichte und robuste Aktoren für die jeweilige

Arbeitsausrüstung. Während hingegen Pneumatiksysteme schnelle, dynamische und kosteneffiziente Lösungen bieten und u.a. in der Automatisierungstechnik, Verpackungsindustrie oder Medizintechnik verbreitet sind. Die Dichtungstechnik spielt eine zentrale Rolle für die Betriebssicherheit und Effizienz fluidtechnischer Systeme, indem sie Leckagen verhindert und Komponenten vor äußeren Einflüssen schützt. Sie findet auch außerhalb der fluidtechnischen Antriebstechnik Anwendung, beispielsweise in Turbinen, Pumpen und Rohrleitungssystemen zur Medienförderung in chemischen Anlagen, wo sie die Integrität von Prozessen und die Lebensdauer technischer Systeme sichert. Durch diese vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und ihre technische Relevanz ist die Fluidtechnik ein unverzichtbarer Bestandteil moderner industrieller Wertschöpfung.

Charakteristisch für die Fluidtechnikbranche ist ihre hohe technische Flexibilität. Dies betrifft sowohl die eingesetzten Systeme als auch die Komponenten, welche häufig individuell auf spezifische Anwendungen zugeschnitten sind, sei es durch das auf die Anwendung angepasste Systemlayout eines fluidtechnischen Antriebs oder die auf die Applikation abgestimmte Anpassung von einzelnen Komponenten. Damit zeichnen sich fluidtechnische Antriebe meist durch eine hohe Leistungsdichte, Zuverlässigkeit und Präzision gegenüber anderen Antriebstechnologien aus, gleichzeitig sind sie auf Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit optimiert.

In Deutschland ist die Branche stark mittelständisch geprägt. Viele Unternehmen sind hochspezialisierte, oft familiengeführte Betriebe mit tiefem technischem Know-how und hoher Innovationskraft (Plattform Industrie 4.0 2024). Als Zulieferer übernehmen diese *Hidden Champions* nicht nur die Lieferung einzelner Komponenten, sondern häufig auch Systemverantwortung, indem sie Subsysteme liefern oder in der Systementwicklung beteiligt sind und auf die Anwendung maßgeschneiderte Lösungen bieten.

Ein weiteres Merkmal der Fluidtechnikbranche ist die starke internationale Ausrichtung. Deutsche Fluidtechnikunternehmen zählen zu den weltweit führenden Anbietern und exportieren einen Großteil ihrer Produkte. Gleichzeitig ist die Branche eng mit Forschungsinstitutionen, Hochschulen und Normungsorganisationen vernetzt, was die kontinuierliche Weiterentwicklung von Technologien und Standards fördert.

1.2 Smart Circular Economy in der Fluidtechnik

Die CE gewinnt weltweit an Bedeutung, nicht nur als Antwort auf ökologische Herausforderungen wie Ressourcenknappheit, Klimawandel und Umweltbelastungen, sondern auch als strategischer Hebel für wirtschaftliche Resilienz, Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit (European Commission 2020). Der globale Rohstoffverbrauch steigt kontinuierlich, während gleichzeitig regulatorische Anforderungen, wie z. B. durch den EU

Green Deal, zunehmen (ebd.). Die Industrie steht vor der Aufgabe, ihre Wertschöpfungssysteme grundlegend neu, digital, nachhaltig und resilient zu denken (ebd.).

Die CE¹ stellt ein alternatives Konzept zur heutigen linearen Wirtschaft dar und zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum von der Extraktion primärer Rohstoffe zu entkoppeln (Ellen MacArthur Foundation 2013). Dies verspricht eine nachhaltigere Wirtschaftsweise und widerstandsfähigere Wertschöpfungsnetzwerke durch die Kreislaufführung von Ressourcen und eine intensivere Nutzung dieser (Vgl. Abbildung 1).

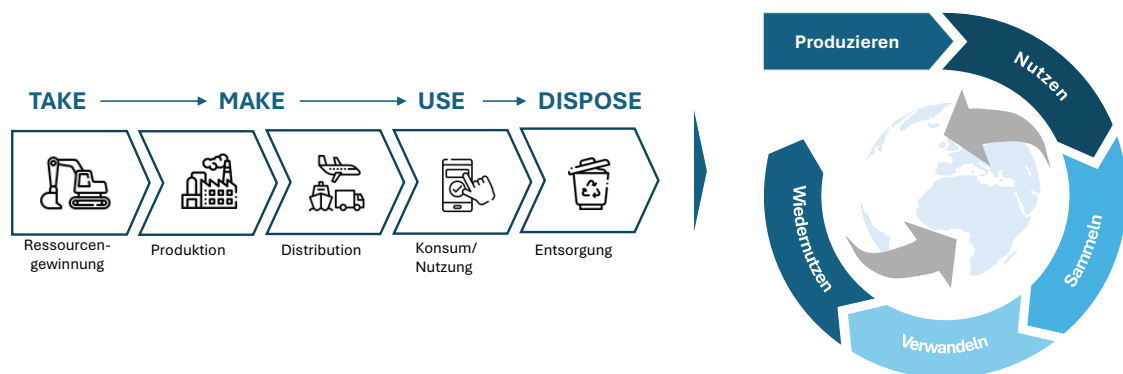


Abbildung 1: CE als alternatives Konzept zur heutigen linearen Wirtschaft

In der Praxis wird die Circular Economy durch verschiedene CE-Strategien oder sogenannte R-Strategien operationalisiert. Ein etabliertes und anerkanntes Rahmenwerk in Forschung und Praxis ist das 9R-Framework von Potting et al. (2017). Obwohl es als 9R-Framework bezeichnet wird, umfasst es tatsächlich zehn Strategien, wobei "Refuse" (R0) bedeutet, ein Produkt (oder Teile eines Produktes) obsolet zu machen und somit als nullte Strategie zählt. Die anderen neun Strategien sind Rethink (R1), Reduce (R2), Reuse (R3), Repair (R4), Refurbish (R5), Remanufacture (R6), Repurpose (R7), Recycle (R8) und Recover (R9). Diese Strategien sind hierarchisch angeordnet, wobei die Anwendung einer niedrigeren R-Strategie zu einem höheren Grad an Zirkularität führt, da sie statt einer längeren Verwendung und Kreislaufführung von Beginn an einen geringeren Ressourceneinsatz ermöglichen.

¹ Statt der direkten Übersetzung *Kreislaufwirtschaft* wird im vorliegenden Whitepaper ausschließlich der Begriff der *Circular Economy* verwendet, da der deutsche Begriff stark durch Abfallwirtschaft und Recycling geprägt ist und somit eingrenzend wirkt. Die Circular Economy zielt hingegen auf einen ganzheitlichen Ansatz, der den gesamten Lebenszyklus eines Produkts betrachtet von der Entstehung des Geschäftsmodell und des Produkts über die Nutzung bis hin zur Verwertung.

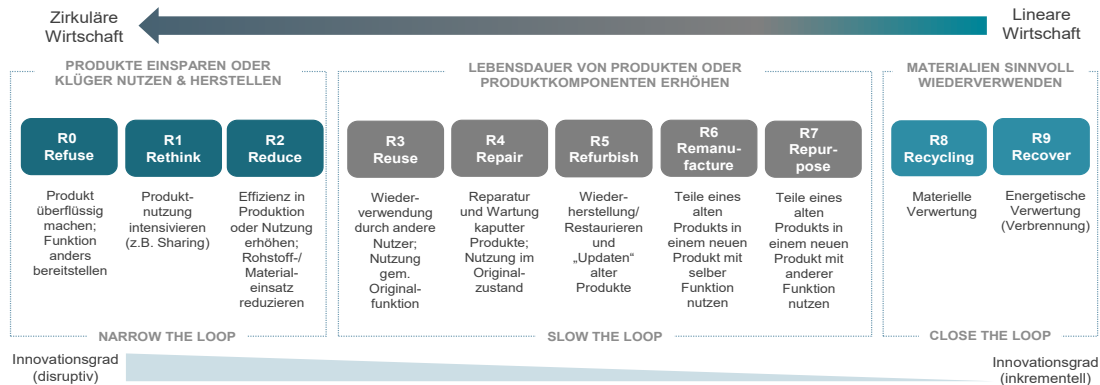


Abbildung 2: 9R-Framework nach Potting et al. (2017).

Trotz der vielversprechenden Chancen des CE-Konzepts steckt die Umsetzung in der Industrie noch in den Kinderschuhen. Eine der größten Herausforderungen bei der Etablierung einer Circular Economy liegt in der Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Informationen (Walden et al. 2021; Wilts und Berg 2017). Die Digitalisierung spielt dabei eine Schlüsselrolle: Technologien wie digitale Zwillinge, intelligente Sensorik und Zustandsüberwachung ermöglichen eine transparente Informationssammlung und -überwachung von Produkten über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Dies bildet die Basis für die Umsetzung von unterschiedlichen R-Strategien, welche beispielsweise Nutzungsdaten benötigen, um zu bewerten, ob eine Komponente wieder aufbereitet werden kann und die Qualität eines Neuteils erreicht (Remanufacturing) oder es gewisse Leistungseinschränkungen gibt (Refurbishment). Die konsequente Digitalisierung und Verwendung von Daten für die Umsetzung der CE wird unter dem Begriff Smart CE subsumiert.

Verbundforschungsprojekte wie *Fluid 4.0* spielen eine entscheidende Rolle bei der Überwindung des Informationsproblems innerhalb der Smart CE. Sie bearbeiten Nachhaltigkeitsfragestellungen aus einer Digitalisierungsperspektive, erleichtern den Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Partnern in der Lieferkette und schließen damit die Informationslücke.

Für die Fluidtechnikbranche ist die Circular Economy ein zukunftsweisendes Thema. Die Branche hat durch ihre langlebigen, hochpräzisen und wartungsfreundlichen Komponenten sowie konstruktiven und materialtechnischen Eigenschaften ein besonderes Potenzial, CE-Prinzipien und -Strategien erfolgreich umzusetzen. Während die verwendeten Materialien – v.a. Sensoren und Magnete aufgrund ihres Gehalts an seltenen Erden und wertvollen Stoffen – ein hohes Rückgewinnungspotenzial aufweisen, sind insbesondere hydraulische Komponenten wie Pumpen und Zylinder durch ihre Größe, Robustheit und hohen Einzelwerte prädestiniert für Maßnahmen/Strategien wie Repair, Refurbishment und Remanufacturing. So lassen sich beispielsweise Kolben und Kolbenstangen von Zylinder gezielt aufbereiten und mit neuen

Dichtungen versehen, wodurch nahezu neuwertige Produkte entstehen. Dichtungen selbst sind hingegen meist nur thermisch verwertbar (Recover).

Die Pneumatik, mit tendenziell kleineren und kostengünstigeren Komponenten, stellt höhere Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit von Rücknahme- und Recyclingprozessen. Dennoch können auch hier durch Strategien wie bspw. Reuse (Wiederverwenden von Ventilen in einem zweiten Lebenszyklus) oder Rethink (Druckluft-as-a-service) ökologische und ökonomische Mehrwerte generiert werden. Zukünftig wird es entscheidend sein, CE-Use Cases und Geschäftsmodelle zu entwickeln, die für alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette attraktiv und umsetzbar sind. Die Implementierung von CE-Geschäftsmodellen wie Remanufacturing, Refurbishment oder datenbasierten Services bieten dabei die Chance, Produkte, Komponenten und Systeme möglichst lange in einem hochwertigen Kreislauf zu halten.

Die Orientierung an den R-Strategien von Refuse bis Recycle dient als strategischer Rahmen für Unternehmen der Fluidtechnik, um CE-Ansätze systematisch in ihre Prozesse und Geschäftsmodelle zu integrieren. Ziel ist es, nachhaltige Wertschöpfungssysteme über Unternehmensgrenzen hinweg in sog. Business-Ökosystemen zu etablieren und die Wettbewerbsfähigkeit der Branche langfristig zu sichern. Die Kombination aus langlebigen Produkten, hoher technischer Expertise und zunehmender Digitalisierung bietet ideale Voraussetzungen, um die CE-Prinzipien in der Praxis umzusetzen und die Transformation der Branche aktiv zu gestalten.

2 Status quo von Smart CE-Lösungen in der Fluidtechnikbranche

Hinsichtlich der beschriebenen signifikanten Potenziale einer Smart CE stellt sich die Frage, wo Unternehmen der Fluidtechnikbranche bei der Umsetzung von Smart CE-Lösungen stehen. Dafür hat das Fraunhofer IIS im Vorfeld zu dieser Studie das Messinstrument Transformationsnavigator »Smart Circularity« entwickelt und in das Forschungsprojekt eingebracht. Dies ist ein Tool zur Reifegradmessung für die Smart Circular Economy und wurde im Rahmen dieser Studie für eine Ist-Analyse bei Unternehmen aus der Fluidtechnikbranche angewandt. Die daraus gewonnenen Daten wurden abschließend in ein Branchenbild überführt.

Das verwendete Tool, das detaillierte Vorgehen zur Reifegradmessung sowie die gewonnenen Ergebnisse und erste Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

2.1 Transformationsnavigator »Smart Circularity«

Zur Ermittlung des Reifegrads von Unternehmen im Kontext einer Smart CE wird der Transformationsnavigator »Smart Circularity« verwendet. Dieses Instrument zur Bewertung des Reifegrads wurde 2022 im Zuge eines Dissertationsprojekts im Bereich Supply Chain Services (SCS) des Fraunhofer Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) entwickelt und fand bereits mehrfach Anwendung (Bühler 2025). Es dient nicht nur der Analyse des aktuellen Stands, sondern unterstützt auch bei der Ableitung von Lösungen für die Implementierung.

Transformationsnavigator »Smart Circularity«

Der Transformationsnavigator wurde sorgfältig unter Verwendung wissenschaftlicher Methoden entwickelt. Zunächst wurde eine strukturierte Literaturrecherche bestehender Reifegradmodelle durchgeführt, um den Bedarf für die Modellentwicklung zu identifizieren und bestehende Modelle für die konzeptionelle Weiterentwicklung zu vergleichen, basierend auf den Arbeiten von Becker et al. (2009). Der darauffolgende iterative Entwicklungsprozess des Transformationsnavigators umfasste drei Forschungsphasen: (1) die theoretische Entwicklung, (2) die empirische Entwicklung und (3) die Testphase, wie von Pigozzo et al. (2013) beschrieben.

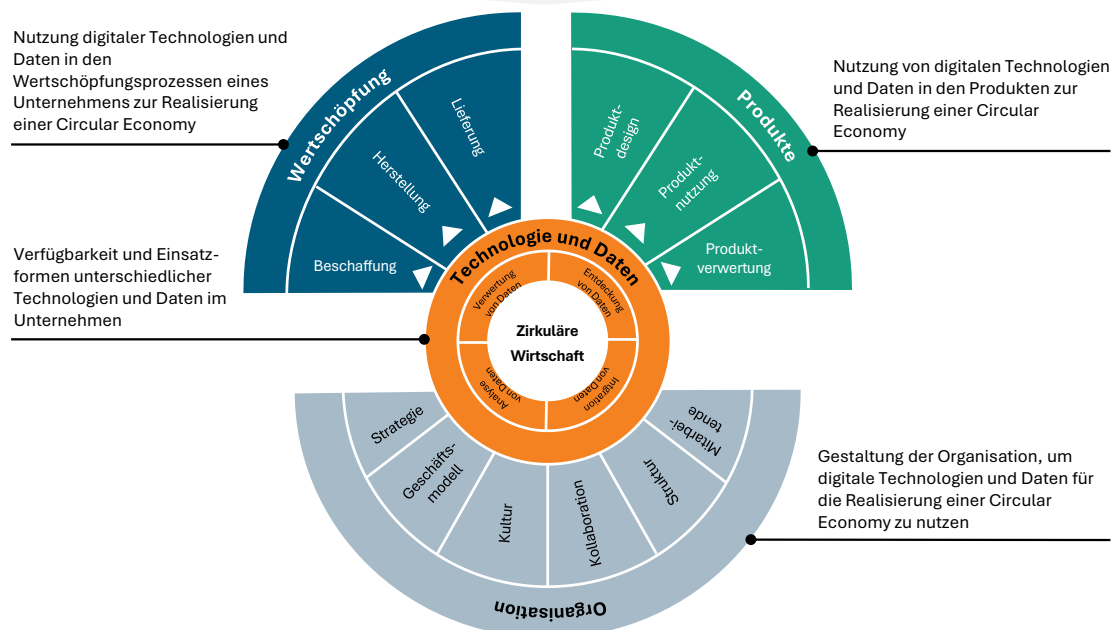


Abbildung 3: Dimensionen & Sub-Dimensionen des Transformationsnavigators »Smart Circularity« (Quelle Fraunhofer IIS)

Der Transformationsnavigator umfasst insgesamt vier Meta-Dimensionen, die in die Bereiche Technologie und Daten, Organisation, Produkte sowie Wertschöpfungsprozesse unterteilt sind. Diese vier Meta-Dimensionen enthalten weitere Sub-Dimensionen, die eine detaillierte Analyse des Status quo eines Unternehmens ermöglichen und im Folgenden erläutert werden.

Die erste Meta-Dimension bezieht sich auf die **Anwendung digitaler Technologien und Daten im Unternehmen**, die als essenzielle Voraussetzung für die vollständige Implementierung einer Smart CE gilt. Die Datenwertschöpfungskette beschreibt den systematischen Ablauf von der Datenerfassung durch IoT-Technologien über die Datenübertragung und -integration bis hin zur Datenanalyse mittels KI-Methoden zur Wissensgenerierung und schließlich zur praktischen Anwendung der Daten (Miller und Mork 2013). Sie bildet die Grundlage der Strukturierung der Meta-Dimension in die Sub-Dimensionen *Datenerfassung*, *Datenintegration*, *Datenanalyse* und *Datennutzung* (Faroukhi et al. 2020).

Die zweite Meta-Dimension, **Organisation**, bezieht sich auf das Unternehmen selbst. Für eine erfolgreiche Umsetzung einer Smart CE sind grundlegende organisatorische Veränderungen notwendig, die nahezu alle Unternehmensbereiche und -funktionen betreffen (Kristoffersen et al. 2021). Diese Dimension wird in die Sub-Dimensionen *Strategie*, *Geschäftsmodell*, *Unternehmenskultur*, *Kollaboration*, *Struktur* und *Mitarbeitende* unterteilt.

Die Meta-Dimension **Produkt** basiert auf dem Lebenszykluskonzept eines Produkts (Cao und Folan 2012), das aus den drei Phasen Beginn des Lebens (BoL), Mitte des Lebens (MoL) und Ende des Lebens (EoL) besteht. Im Einklang damit wird in dieser Dimension die Nutzung digitaler Technologien für eine CE in die Sub-Dimensionen *Produktdesign*, *Produktnutzung* und *Produktverwertung* gegliedert.

Die letzte Meta-Dimension konzentriert sich auf den **Wertschöpfungsprozess**. Ihre Struktur orientiert sich am Supply Chain Operations Reference (SCOR) Modell, das im Wesentlichen die fünf Managementprozesse – *Plan*, *Source*, *Make*, *Deliver* und *Return* – umfasst (Huan et al. 2004). Im Reifegradmodell wird die Anwendung digitaler Technologien für eine Circular Economy in den Wertschöpfungsprozessen *Beschaffung* (Plan und Source), *Herstellung* (Make) sowie *Lieferung* (Deliver und Return) betrachtet, die die Sub-Dimensionen dieser Meta-Dimension bilden.

Der Transformationsnavigator »Smart Circularity« stellt somit ein wissenschaftlich fundiertes und praxisorientiertes Instrument dar, das Unternehmen dabei unterstützt, ihren Entwicklungsstand systematisch zu bewerten, Potenziale für eine Smart CE zu erkennen und darauf aufbauend maßgeschneiderte Roadmaps für die Umsetzung einer Smart CE zu entwickeln. Auf aggregierter Ebene ermöglicht der Transformationsnavigator »Smart Circularity« die Analyse einer Branche in Bezug auf Smart CE, indem die Ergebnisse vieler Unternehmen einer Branche verglichen und analysiert werden.

2.2 Reifegradmessung in der Fluidtechnikbranche

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts *Fluid 4.0* wurde der Transformationsnavigator »Smart Circularity« bei verschiedenen Unternehmen aus der Fluidtechnikbranche angewendet. Zielgruppe waren sowohl Unternehmen, die sich aktiv am öffentlich geförderten Verbundforschungsprojekt *Fluid 4.0* beteiligen, als auch weitere Mitglieder des VDMA-Fachverbands Fluidtechnik. Insgesamt nahmen 14 Fluidtechnik-Unternehmen an dieser Initiative teil. Die Datenerhebung erfolgte zwischen Februar und April 2025 über ein

umfassendes Online-Self-Assessment. Dieses methodische Vorgehen ermöglichte den Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartnern der teilnehmenden Unternehmen eine vereinfachte Dateneingabe, gewährleistete eine konsistente Datenspeicherung und schuf die Grundlage für eine automatisierte Analyse sowie das nachfolgende Reporting der Ergebnisse.

Die Grundlage der Befragung bildete ein detaillierter Fragebogen mit insgesamt 68 Fragen, welche primär die verschiedenen Sub-Dimensionen des Transformationsnavigators abdeckten. Ergänzt wurden diese durch sechs demografische Fragen sowie vier zusätzliche Fragen zur Abschätzung des aktuell ausgeschöpften Potenzials. Letztere sind nicht Bestandteil des Transformationsnavigators, bieten jedoch wertvolle Einblicke in das bereits realisierte Potenzial und identifizieren im Umkehrschluss noch zu hebende Potenziale im Kontext der Implementierung einer Smart CE in der Fluidtechnikbranche.

Die durch die Online-Umfrage gewonnenen Daten wurden wissenschaftlich sowohl auf individueller Unternehmensbasis als auch aggregiert analysiert. In diesem Rahmen wurde eine Bewertung der einzelnen Dimensionen der befragten Unternehmen vorgenommen, die im Anschluss mit einer Peergroup, definiert als der Mittelwert aller befragten Unternehmen, verglichen wurde. Für jedes teilnehmende Unternehmen wurde eine Zusammenfassung erstellt, die zahlreiche maßgeschneiderte Handlungsempfehlungen und potenzielle Maßnahmen umfasst.

Basierend auf den Ergebnissen der Reifegradmessungen wurde zusätzlich zu den individuellen Auswertungen ein anonymisiertes Branchenbild entwickelt, das einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Fluidtechnikbranche hinsichtlich des Reifegrads Smart CE-Lösungen bietet. Dieses soll im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

2.3 Ergebnisse aus der Branchenstudie

Die 14 Teilnehmer der Reifegradmessung mit dem Transformationsnavigator »Smart Circularity« differenzieren sich hinsichtlich ihrer Unternehmensgröße und Rolle in der Lieferkette (vgl. Abbildung 4). Von den Unternehmen zählen vier zur Kategorie der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) mit weniger als 250 Mitarbeitenden, während zehn Unternehmen eine Belegschaft von über 250 Mitarbeitenden aufweisen.

In Bezug auf ihre Position in der Lieferkette nehmen die Unternehmen teilweise mehrere Rollen ein, da sie in unterschiedlichen Lieferketten operieren. Vier Unternehmen haben sich als Original Equipment Manufacturer (OEM) deklariert, während zehn Unternehmen als Tier-1-Lieferanten klassifiziert sind. Darüber hinaus identifizieren sich 8 Unternehmen als Tier-2-Lieferanten.

Bei den Anwendungsfeldern wurde zwischen mobilen und stationären Anwendungen unterschieden. Mobile Anwendungen beziehen sich meist auf landwirtschaftliche Maschinen oder Baumaschinen („Off-Highway“), während sich stationäre Anwendungen auf Industrieanwendungen wie beispielsweise in Werkzeugmaschinen, Spritzgussmaschinen oder Pressen beziehen. Fünf Unternehmen ordnen sich ausschließlich dem stationären Bereich zu, während acht Unternehmen sowohl mobile als auch stationäre Anwendungen bedienen. Keines der Unternehmen deckt ausschließlich mobile Anwendungen ab.

Hinsichtlich der angebotenen oder genutzten Technologien zeigt sich, dass acht Unternehmen sich ausschließlich auf Hydrauliksysteme konzentrieren, während vier Unternehmen ausschließlich Pneumatiklösungen anbieten. Zwei Unternehmen bieten sowohl hydraulische als auch pneumatische Technologien an.

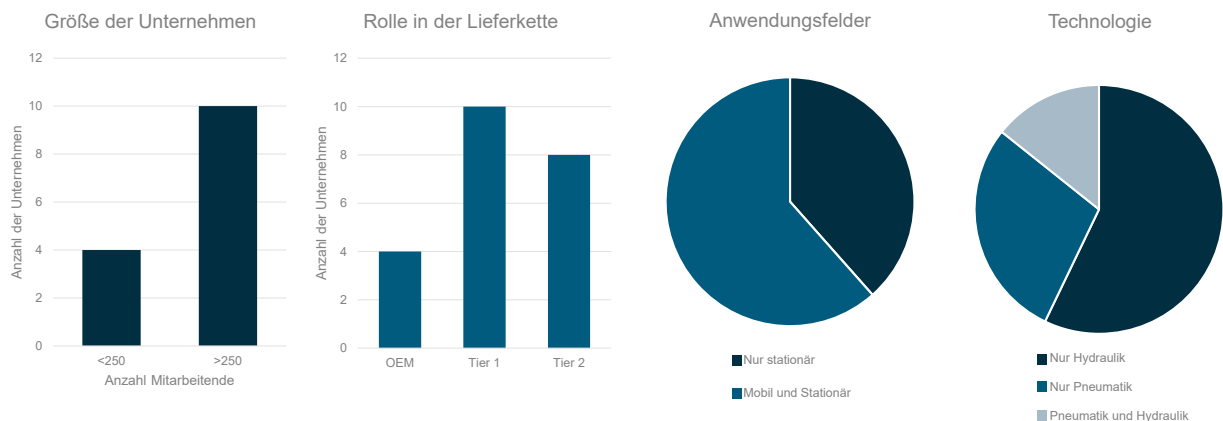


Abbildung 4: Demografische Verteilung des Branchenbildes

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Branchenbild ein breites Spektrum der Fluidtechnikbranche abbildet. Dennoch sind bei der Interpretation folgende einschränkende Faktoren zu beachten: Erstens handelt es sich um eine Selbstbewertung der Unternehmen, was potenziell zu Verzerrungen in den Daten führen kann. Zweitens besteht die Stichprobe lediglich aus 14 Unternehmen, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt. Für umfassendere und aussagekräftigere Resultate wäre eine deutlich größere Anzahl an teilnehmenden Unternehmen erforderlich. Trotz dieser Einschränkungen sollen die gewonnenen Ergebnisse und erste Schlussfolgerungen im Folgenden dargestellt werden, um die Erkenntnisse und Trends innerhalb der Fluidtechnikbranche weiter zu beleuchten.

2.4 Branchenbild

Das Branchenbild zeigt die durchschnittliche Reife der Unternehmen in den vier Meta-Dimensionen, basierend auf deren Selbstbewertung. Der Reifegrad wird auf einer Skala von 1 bis 5 klassifiziert, wobei 1 einen sehr niedrigen und 5 einen sehr hohen Reifegrad signalisiert. Die grafische Darstellung der Ergebnisse umfasst auf der horizontalen Achse den Reifegrad und auf der vertikalen Achse die Anzahl der Unternehmen, die einen bestimmten Reifegrad erreicht haben. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Meta-Dimensionen wurde jeweils ein repräsentativer Durchschnitt aus den 14 Unternehmensdatensätzen gebildet.

Abbildung 5 illustriert, dass die Meta-Dimensionen *Technologie und Daten* mit 3,1 den höchsten Reifegrad aufweist. Die Reifegrade der einzelnen Unternehmen sind zwischen den Werten 2,1 und 3,9 gestreut, wobei die Mehrheit der Unternehmen im Bereich von 3,2 bis 3,9 liegt. Eine weitere große Gruppe an Unternehmen liegt mit ihrem Reifegrad zwischen 2,1 und 3,0. Ausreißer nach unten (Reifegrad < 2) und nach oben (Reifegrad > 4) gibt es in dieser Meta-Dimension nicht. Die Meta-Dimension *Organisation* zeigt einen durchschnittlichen Reifegrad von 2,56, wobei die Streuung zwischen 1,6 und 3,6 liegt. Die meisten Unternehmen erzielten hierbei einen Reifegrad zwischen 2,1 und 3,0. Nur vereinzelt haben Unternehmen einen Reifegrad unter 2 oder über 3 erreicht. Ein Ausreißer mit einem besonders hohen Reifegrad von über 4 ist nicht vorhanden. Die Meta-Dimension *Produkte* weist mit einem Reifegrad von 1,97 den niedrigsten durchschnittlichen Reifegrad und somit einen signifikanten Rückstand auf. Die Reifegrade der Unternehmen variieren in dieser Meta-Dimension von 1,4 bis 3,0. Die Mehrheit der Unternehmen bewegt sich mit ihrem Reifegrad zwischen 1,4 und 2,0, während nur wenige Unternehmen zwischen 2,1 und 2,5 liegen. Lediglich ein Ausreißer über 3 existiert. Schließlich weist die Meta-Dimension *Wertschöpfung* einen durchschnittlichen Reifegrad von 2,85 auf, wobei sich die Reifegrade der Unternehmen zwischen 1,9 und 4,4 befinden. Trotz der breiten Streuung liegen die meisten Unternehmen in einem Bereich zwischen 2,2 und 2,9. Einige wenige Unternehmen haben einen Reifegrad zwischen 3,1 und 3,6 erreicht, während vereinzelt sowohl nach unten als auch nach oben Ausreißer vorhanden sind. Die zugrunde liegenden Faktoren, die zu den Reifegraden der einzelnen Meta-Dimensionen führen, werden im Folgenden detailliert analysiert.

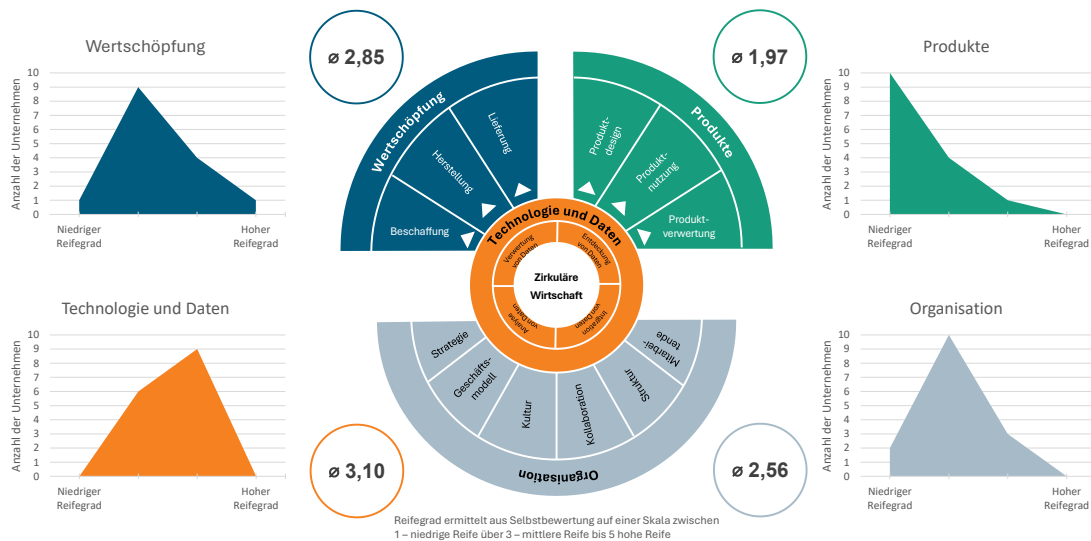


Abbildung 5: Branchenbild der Fluidtechnikbranche auf Meta-Dimensions-Ebene

2.4.1 Technologie und Daten

Der Durchschnittswert der Meta-Dimension ergibt sich aus den Durchschnittswerten der einzelnen zugehörigen Sub-Dimensionen. Abbildung 6 zeigt die Verteilung in der Meta-Dimension *Technologie und Daten*. Im Folgenden soll auf die einzelnen Ergebnisse noch näher eingegangen werden.

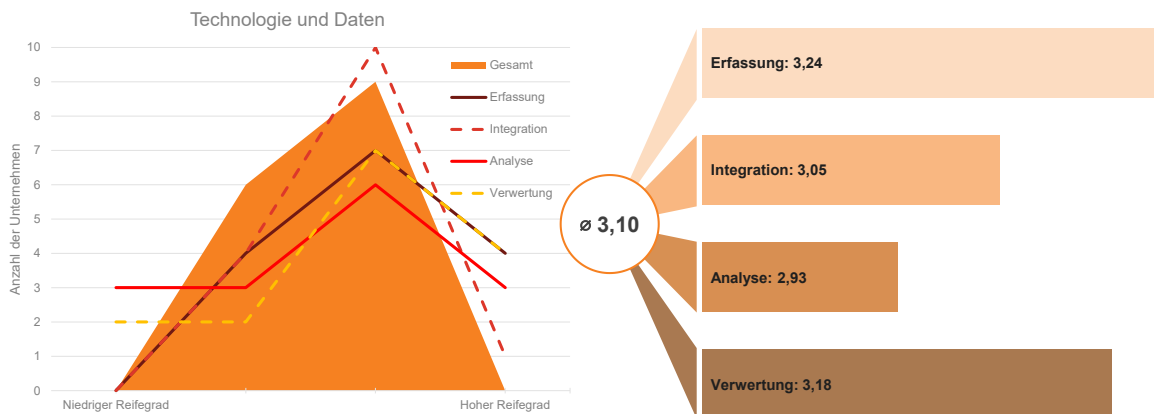


Abbildung 6: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Technologie und Daten

Die durchschnittliche Reife in der Sub-Dimension *Erfassung von Daten* liegt bei 3,24 und weist innerhalb der Meta-Dimension den höchsten Wert auf. Insbesondere der Einsatz von Sensortechnologie und Datenkommunikationstechnologie ist weit verbreitet. Die Nutzung von Technologien zur Identifikation und Lokalisierung zeigt noch deutlichere

Verbesserungspotentiale auf. Die Reifegrade der Unternehmen variieren von „geplant“ (2,3) bis hin zu „für einzelne Produkte oder teilweise in Wertschöpfungsprozessen umgesetzt“ (4).

In der Sub-Dimension *Integration von Daten* liegt der Durchschnitt bei 3,05. Die Reifegrade der einzelnen Unternehmen schwanken zwischen „geplant“ (2) und „für einzelne Produkte oder teilweise in Wertschöpfungsprozessen umgesetzt“ (4,3). Hierbei kommen insbesondere Cloud-Technologien und integrierte Datenbanken zum Einsatz, während der Einsatz von Distributed Ledger Technologien (wie bspw. Blockchain) bislang weniger verbreitet ist.

Die Sub-Dimension *Analyse von Daten* weist mit einem Wert von 2,93 den niedrigsten durchschnittlichen Reifegrad auf. Einige Unternehmen befinden sich hier noch in der Anfangsphase, mit Unternehmensdurchschnitten von „keine Nutzung“ (1) bis „für einzelne Produkte oder teilweise in Wertschöpfungsprozessen umgesetzt“ (4,3) ist die Streuung sehr hoch. Fortgeschrittene Unternehmen nutzen zunehmend maschinelles Lernen bzw. Künstliche Intelligenz sowie mathematische Optimierung, aber auch Prognoseverfahren und Simulationsmethoden finden Anwendung.

Bei der Sub-Dimension Verwertung von Daten beantworteten die Unternehmen wie ausgeprägt der Einsatz von bestimmten Technologiegruppen ist (bspw. Robotik und Virtual Reality). Bei dieser Sub-Dimension mit Durchschnittswert von 3,18 zeigt sich, dass der Reifegrad der teilnehmenden Unternehmen auch hier von „keine Nutzung“ (1) bis „für einzelne Produkte oder Wertschöpfungsprozesse umgesetzt“ (4,3) variiert. Besonders Robotik und Assistenzsysteme sind in Unternehmensprozessen wie bspw. der Produktion verbreitet. Additive Fertigungsverfahren finden ebenfalls vermehrt Anwendung, während Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) nur in einigen Unternehmen eingesetzt werden.

Es zeigt sich eine klare Tendenz, dass kleinere Unternehmen im Bereich Analyse und Verwertung eine geringere Reife aufweisen als größere Unternehmen.

2.4.2 Organisation

In der Meta-Dimension *Organisation* zeigen die Unternehmen der Branchenstudie einen durchschnittlichen Reifegrad von 2,56, was sie zur Dimension mit dem zweitniedrigsten Durchschnitt macht. Besonders auffällig sind die sehr niedrigen Reifegrade in den Bereichen Geschäftsmodell (1,52) und Kollaboration (2,31). Abbildung 7 verdeutlicht die Verteilung der Reifegrade in dieser Dimension, deren Ausprägungen im Folgenden näher erläutert werden.

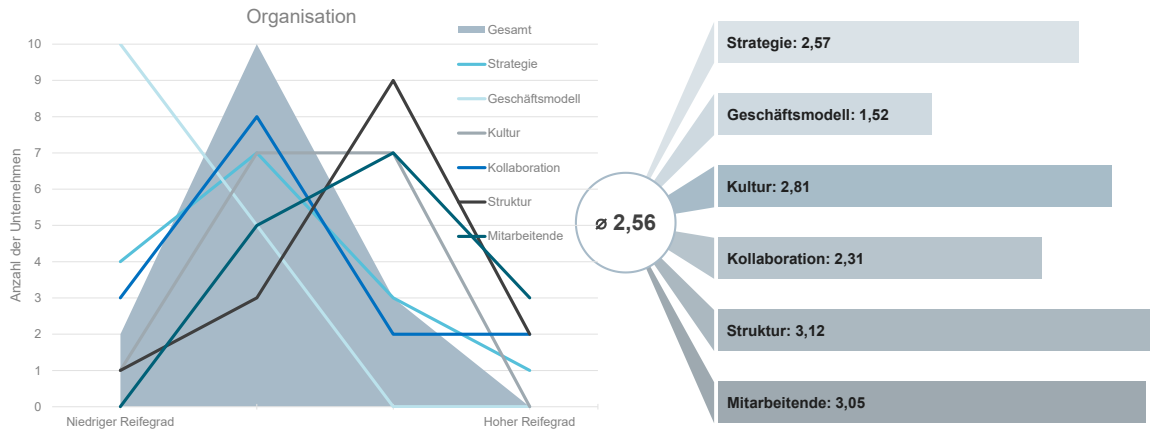


Abbildung 7: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Organisation

Der Durchschnitt der Sub-Dimension *Strategie* liegt bei 2,57 und beschreibt die Bedeutung von digitalen Technologien und Zirkularität innerhalb der Unternehmensstrategie. Die Reifegrade der Unternehmen schwanken zwischen „niedriger Bedeutung“ (1,7) und „hoher Bedeutung“ (4). Immer mehr Unternehmen integrieren Digitalisierung für eine CE und anderen Nachhaltigkeitsaspekte in ihre Unternehmensstrategie und entwickeln teilweise bereits Aktionspläne. Dennoch messen nur wenige Unternehmen die Erfolge in diesem Bereich systematisch mithilfe von KPIs.

Mit einem durchschnittlichen Reifegrad von 1,52 stellt die Sub-Dimension *Geschäftsmodell* die schwächste Kategorie dar. Die Unternehmen variieren bei den Fragen zu der Umsetzung von smart CE-Geschäftsmodellen im Durchschnitt von „keine Umsetzung“ (1) bis „für einzelne Produkte umgesetzt“ (2,7). Modelle wie Take-Back-Systeme und Betreiber-Modelle werden lediglich vereinzelt pilotiert, während Sharing-Modelle nahezu keine Verbreitung finden.

Der durchschnittliche Reifegrad in der Sub-Dimension *Kultur* beträgt 2,81 und variiert zwischen „geringer Wichtigkeit“ (1,7) und „hoher Wichtigkeit“ (3,7). Die Streuung in Bezug auf die Offenheit der Mitarbeiter und die wahrgenommene Wichtigkeit des Themas smart CE ist gering, wobei die Offenheit tendenziell minimal höher eingeschätzt wird. Bei der Wertschätzung durch Führungskräfte zeigen sich größere Unterschiede, mit häufigen Extremwerten sowohl am unteren als auch am oberen Ende der Skala.

In der Sub-Dimension *Kollaboration*, die sich mit der Zusammenarbeit mit anderen Akteuren im Business-Ökosystem befasst, liegt der durchschnittliche Reifegrad bei 2,31, wobei eine hohe Streuung zwischen den Unternehmensdurchschnittswerten zu beobachten ist. Die Reifegrade reichen von „kein Austausch“ (1) bis hin zu „partieller Austausch“ (4). Obwohl viele Unternehmen über interne Informationsmanagementsysteme verfügen, die den

Datenaustausch erleichtern könnten, bleibt die tatsächliche Umsetzung hinter den Erwartungen zurück. Insbesondere die Nutzung von Plattformen und Datenräumen für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch zeigt ein erhebliches Verbesserungspotenzial.

Mit einem Durchschnitt von 3,12 zeigt sich auch in der Sub-Dimension *Struktur* eine sehr große Streuung, von „keine Struktur zur Förderung einer Smart CE vorhanden“ (1) bis „Struktur vollumfänglich vorhanden“ (5). Die Mehrheit der Unternehmen hat bereits eine formale Verantwortlichkeit auf Führungsebene für eine Smart CE etabliert. Dennoch wird die Organisationsstruktur von vielen nur als teilweise unterstützend eingeschätzt, und ein durchgängiges Mindset für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch ist bei den meisten Unternehmen nur bedingt vorhanden.

Der durchschnittliche Reifegrad in der Sub-Dimension *Mitarbeitende* beträgt 3,05, mit geringeren Schwankungen im Vergleich zu anderen Dimensionen. Die Bewertungen reichen von „geringe Motivation/Verständnis“ (2) bis „hohe Motivation/Verständnis“ (4,3). Während die Motivation der Mitarbeitenden als relativ hoch eingeschätzt wird, besteht bei den erforderlichen Kompetenzen und dem aufgebauten Verständnis in vielen Unternehmen noch Verbesserungspotenzial.

2.4.3 Produkte

Die Ergebnisse der Reifegradmessung der Fluidtechnikbranche zeigen, dass die Meta-Dimension *Produkte* mit einem durchschnittlichen Reifegrad von 1,97 den niedrigsten Reifegrad aller Meta-Dimensionen aufweist. Besonders auffällig ist die Sub-Dimension der Produktverwertung, die mit einem Reifegrad von lediglich 1,32 insgesamt am schlechtesten abschneidet. Die Ausprägungen der verschiedenen Sub-Dimensionen sind in Abbildung 8 dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben.

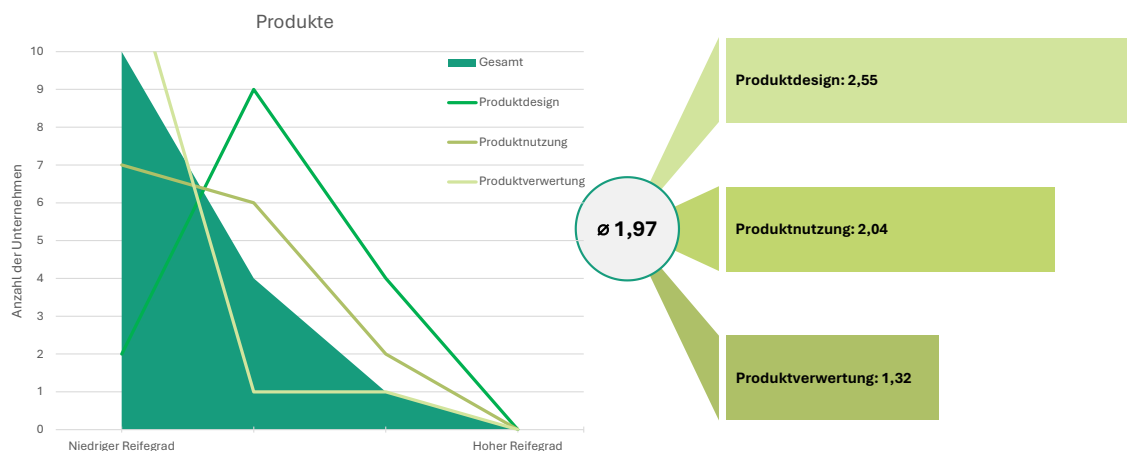


Abbildung 8: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Produkte

Die Sub-Dimension *Produktdesign* weist im Durchschnitt einen Reifegrad von 2,55 auf, wobei die Bewertungen der einzelnen Unternehmen zwischen "geplant" (1,7) und "für einzelne Produkte implementiert" (3,5) schwanken. Unternehmen nutzen nur sporadisch verfügbare Daten, um zukünftige Produkte modularer zu gestalten. Eine Modulare Produktgestaltung fördert CE, da zum Beispiel Reparaturen und das Wiederaufbereiten von Produkten dadurch ermöglicht werden. Während die Anwendung von Daten zur Anpassung von Produkten an Kundenbedürfnisse oder zur Ermöglichung von CE-Ansätzen noch im Anfangsstadium ist, zeigen einige Unternehmen Fortschritte bei der Implementierung digitaler Zwillinge zur Optimierung von Materialien, Produkten oder Produktionsprozessen. Zusätzlich zeigt sich, dass einige Unternehmen planen, digitale Material- und Produktpässe einzuführen, um Daten über den Lebenszyklus ihrer Produkte zu erfassen.

In der Sub-Dimension *Produktnutzung* liegt der durchschnittliche Reifegrad bei 2,04. Die Bewertungen reichen von "nicht vorhanden" (1) bis "prototypisch umgesetzt" (3,1). Nur wenige Unternehmen setzen Lebenszyklusdaten ein, um ausgediente Produkte einer neuen Nutzungsphase zuzuführen oder Informationen zur Verfügbarkeit von Bauteilen für das Remanufacturing zu erhalten. Obwohl einige Unternehmen planen, Daten aus digitalen Produktpässen für Reparatur- oder Wartungsentscheidungen zu nutzen, ist die tatsächliche Datensammlung über Standort, Verfügbarkeit und Zustand der Produkte zur Optimierung der Produktnutzung für eine CE unzureichend. Die am besten bewertete Funktion in dieser Sub-Dimension ist die Bereitstellung von Wartungshinweisen an Anwender während des Betriebs.

Die Sub-Dimension *Produktverwertung* hat mit einem Reifegrad von 1,32 die schlechteste Bewertung. Die Streuung reicht von "nicht vorhanden" (1) bis "prototypisch umgesetzt" (3), wobei die Mehrheit der Unternehmen bei einem Reifegrad von 1 liegt. Nur sporadisch nutzen Unternehmen Lebenszyklusdaten zur Optimierung von Recyclingprozessen zur optimalen Wiederverwendung von ausgedienten Produkten und deren Teilen. Die Nutzung von Material- oder Produktpässen für End-of-Life-Entscheidungen ist bei nur wenigen Unternehmen geplant.

2.4.4 Wertschöpfung

Die Meta-Dimension der Wertschöpfung weist einen durchschnittlichen Reifegrad von 3,11 auf. Besonders hervorzuheben ist die Sub-Dimension *Herstellung*, die mit einem Reifegrad von 4,0 die insgesamt höchste Bewertung erhält. Die detaillierte Bewertung der einzelnen Subdimensionen ist in Abbildung 9 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

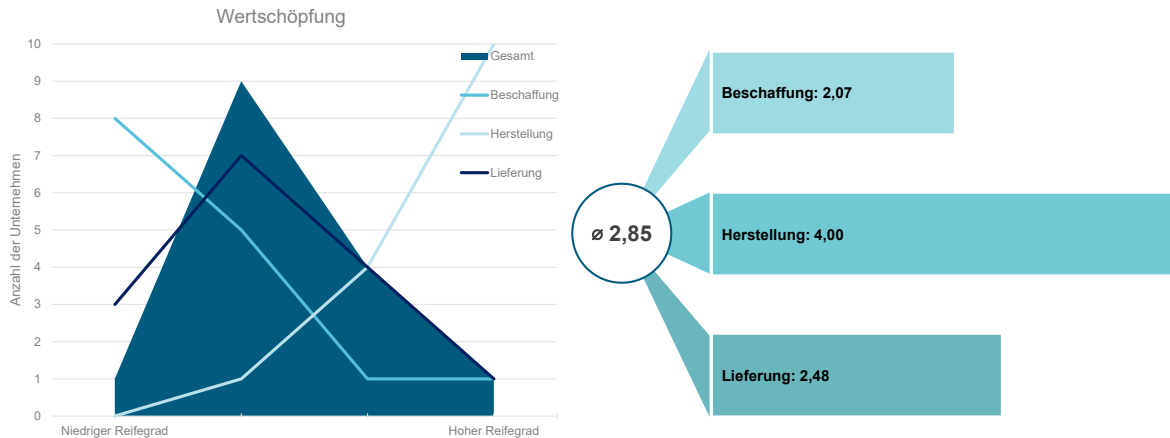


Abbildung 9: Branchenbild der Fluidtechnikbranche in der Meta-Dimension Wertschöpfung

Die Sub-Dimension *Beschaffung* erreicht einen durchschnittlichen Reifegrad von 2,07. Hierbei zeigt sich eine signifikante Streuung der Reifegrade der Unternehmen, die von „geplant“ (1,3) bis „prototypisch umgesetzt“ (4,0) reicht. Nur wenige Unternehmen integrieren Informationen zu bspw. Rezyklaten von Lieferanten in ihre Produktionsprogrammplanung und ERP-Systeme. Bei der Kommunikation mit Lieferanten bezüglich der Bedarfe und Entwicklungen im Kontext ökologischer Nachhaltigkeit sind die Unternehmen in ihrer Entwicklung stark differenziert. Bei der Auswahl von Lieferanten, basierend auf internen und externen ökologischen Nachhaltigkeitskriterien, sind sich die Unternehmen einig, dass diese Kriterien derzeit lediglich eher als Nebenkriterien betrachtet werden.

Die Sub-Dimension *Herstellung*, mit einem durchschnittlichen Reifegrad von 4,0, stellt die am besten bewertete Dimension dar. Dennoch zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Unternehmen, die von „Umsetzung geplant“ (2,3) bis „kontinuierliche Erhebung und Auswertung umgesetzt“ (5,0) variieren. Alle Unternehmen erheben teilweise oder kontinuierlich Produktionsdaten, um interne Wertschöpfungsprozesse ressourceneffizienter zu gestalten und zu optimieren. Ebenso weit fortgeschritten ist die Nutzung von Daten für die Produktionsplanung zur besseren Prognose zukünftiger Bedarfe. Die größten Schwankungen treten bei der Anwendung von Daten zur Steuerung der Auslastung interner Wertschöpfungsprozesse auf, wo bei einigen Unternehmen noch Verbesserungspotential besteht.

Die Sub-Dimension *Lieferung* weist einen durchschnittlichen Reifegrad von 2,48 auf. Hier zeigen sich ausgeprägte Unterschiede zwischen den Unternehmen, die von „nie“ (1,0) bis „einzelne Produkte/Prozesse implementiert“ (4,3) reichen. Nur eine geringe Anzahl an Unternehmen nutzt Daten über Standort, Verfügbarkeit und Zustand, um einen effizienten Rücktransport zu organisieren. Bei der generellen Entscheidung über den gewählten

Verkehrsträger spielt der CO₂-Fußabdruck in der Regel nur eine untergeordnete Rolle. Im Gegensatz dazu setzen jedoch viele Unternehmen digitale Technologien und Daten ein, um logistische Prozesse zu optimieren.

2.5 Leistungspotenziale

Wie bereits anfänglich beschrieben, werden zum Ende des Selbsteinschätzungsbogens vier Fragen zur Abschätzung der Leistungspotenziale gestellt, die selbst keine Meta-Dimension der Reifegradmessung darstellen. Dennoch können sie einige Rückschlüsse auf noch auszuschöpfende Potenziale der Branche aufzeigen. Betrachtet werden die Leistungskennzahlen *Reduktion des Material- und Rohstoffeinsatzes*, *Verlängerung des Lebenszyklus*, *Rückführung von Produkten, Komponenten und Materialien* sowie das *Potenzial zur Verringerung negativer Umweltwirkungen*. Eine Selbsteinschätzung erfolgte auf einer Skala von 0 (kein Potenzial ausgeschöpft) bis 10 (volles Potenzial ausgeschöpft). Die Ergebnisse sind grafisch in Abbildung 10 dargestellt und werden im Folgenden kurz beschrieben.



Abbildung 10: Branchenbild der Fluidtechnikbranche: ausgeschöpfte Leistungspotenziale

Die Leistungskennzahl *Reduktion des Material- und Rohstoffeinsatzes* ist im Durchschnitt mit 5,64 bewertet. Die Selbsteinschätzung der Unternehmen schwankt dabei zwischen 1 (< 10 % ausgeschöpft) bis 9 (80-89 % ausgeschöpft) sehr. Auffällig ist, dass die Unternehmen das noch auszuschöpfende Potenzial entweder als sehr groß oder sehr gering einschätzen. Die mittleren Einstufungen bleiben tendenziell eher aus.

Ähnlich, mit durchschnittlich 5,71 bewertet, sieht es bei der Kennzahl *Verlängerung des Lebenszyklus* aus. Auch hier ist eine große Streuung zwischen 1 (< 10 % ausgeschöpft) und 10 (91-100 % ausgeschöpft) zu beobachten, wobei sich die meisten Unternehmen diesmal in den mittleren Bewertungsstufen zwischen 4 und 8 einordnen.

Die Leistungskennzahl *Rückführung von Produkten, Komponenten und Materialien* hat insgesamt den niedrigsten Durchschnittswert von 3,57. Auch wenn eine Streuung von 1 (< 10 % ausgeschöpft) bis 10 (91-100 % ausgeschöpft) festzustellen ist, befinden sich die meisten Selbsteinschätzungen am unteren Ende zwischen 1 und 4.

Das *Potenzial zur Verringerung negativer Umweltwirkungen* weist eine durchschnittliche Bewertung von 4,57 auf. Auch bei dieser Leistungskennzahl ist eine Streuung zwischen 1 (< 10 % ausgeschöpft) und 9 (80-89 % ausgeschöpft) zu sehen. Die Mehrheit der Unternehmen stuft sich jedoch im Bereich zwischen 3 und 6 ein.

Zu beobachten ist, dass sich kleinere und mittlere Unternehmen selbst schlechter einschätzen als größere Unternehmen. Aufgrund der großen Streuung ist nicht auszuschließen, dass es insbesondere bei den Leistungskennzahlen zu Unter- und Überschätzungen gekommen ist.

2.6 Erkenntnisse und Trends in der Fluidtechnikbranche

Nach der umfangreichen Analyse der Ergebnisse der Reifegradmessung in der Fluidtechnikbranche sollen nun die wichtigsten Erkenntnisse nochmal zusammengefasst und hinsichtlich zukünftiger Trends interpretiert werden.

Die Ergebnisse der Reifegradmessung zeigen, dass Unternehmen zunehmend digitale Technologien und Daten in ihren Wertschöpfungsprozessen integrieren. In der Vergangenheit lag der Fokus vor allem auf der Optimierung der eigenen Herstellung, während die Ausrüstung von Produkten mit digitalen Technologien bislang kaum zur Umsetzung von CE-Strategien genutzt wurde. Dies ist insbesondere in der Produkt- und Wertschöpfungsdimension erkennbar.

Dennoch wird durch die Integration digitaler Technologien in neu entwickelte Produkte eine erste Datenbasis im Feld geschaffen. Zukünftige Entwicklungen sollten darauf abzielen, diese Daten zu nutzen, um Produkte nach CE-Prinzipien zu gestalten und CE-Strategien zu implementieren. Dass bisher die vorwärts gerichtete Optimierung der Prozesse im Vordergrund stand, zeigt sich auch in den organisationalen Sub-Dimensionen. Obwohl die strategische Bedeutung von CE-Ansätzen zunimmt, sind Systeme zur Kontrolle und Messung durch Kennzahlen kaum vorhanden. Zudem bleibt die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle im Vergleich zu anderen Entwicklungen zurück. Dies könnte durch die Positionen in der Lieferkette verstärkt werden, da insbesondere Tier-1- und Tier-2-Lieferanten größere Herausforderungen bei der Umsetzung von Betreiber-, Sharing- oder Take-Back-Modellen haben als OEMs. Hier ist es als Tier-1 und Tier-2-Lieferant notwendig, offene Diskussionen darüber zu führen, wie Unternehmen innerhalb von Ökosystemen von Betreibermodellen und Sharing-Konzepten der OEMs profitieren können. Insbesondere im Hinblick auf Take-Back-Modelle wird von den befragten Unternehmen ein hohes Potenzial vermutet.

CE-Geschäftsmodelle erfordern eine ausgeprägte kollaborative Zusammenarbeit und Datenaustausch innerhalb des Business-Ökosystems, z. B. zwischen Herstellern, Betreibern, Aufbereiter und Recyclern. Der gegenwärtige Entwicklungsstand in diesen Bereichen zeigt jedoch signifikante Rückstände. Insbesondere im unternehmensübergreifenden Datenaustausch fehlen oft das notwendige Vertrauen und die einheitlichen Standards. Datenräume, die einen souveränen und interoperablen Datenaustausch ermöglichen, können hier Abhilfe schaffen.

Veränderungen in den Dimensionen Geschäftsmodell und Kollaboration erfordern häufig disruptive Anpassungen in Organisation und Prozessen, weshalb Unternehmen in ihrer Transformation tendenziell zurückhaltend agieren. Diese Dimensionen sind eng miteinander verknüpft und bedingen sich gegenseitig, was erklärt, warum sie derzeit die schwächsten Bereiche darstellen. Um jedoch in Zukunft resilienter gegenüber externen Störungen von Lieferketten und Ausfällen in der Rohstoffversorgung zu werden, sollten Unternehmen sich intensiv mit den notwendigen Veränderungen in diesen Dimensionen auseinandersetzen. Begleitend zu diesen Veränderungen ist die Weiterbildung innerhalb des Unternehmens sowie im Wertschöpfungsnetzwerk von essenzieller Bedeutung, um kollaborativ neue Ideen zu entwickeln.

Zudem fordern nicht nur neue Geschäftsmodelle, sondern auch regulatorische Anforderungen und Ansprüche aus dem Wertschöpfungsnetzwerk vermehrt detaillierte Informationen zu Produkten und Wertschöpfungsprozessen, insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeit und eine Circular Economy. Um diesen Anforderungen und dem zunehmenden Kostendruck aktuell und zukünftig gerecht zu werden, ist es für Unternehmen empfehlenswert, Nachhaltigkeits- und Transparenzanforderungen entlang der Lieferkette weiterzugeben. Analog geben auch Kunden der Fluidtechnikbranche bereits heute solche Anforderungen an die Fluidtechnikfirmen weiter.

Ein entscheidendes Werkzeug zur Schaffung von Transparenz und Rückverfolgbarkeit in der Lieferkette kann der digitale Produktpass werden, der schon ab 2027 für einzelne Produkte verpflichtend sein wird. Noch planen nicht alle Unternehmen die Einführung eines digitalen Produktpasses. Die Implementierung eines solchen Passes könnte jedoch nicht nur zur Einhaltung regulatorischer Vorgaben beitragen, sondern auch die Entwicklung neuer datengetriebener Services fördern und als Innovationsmotor fungieren. Unternehmen sollten sich daher intensiv mit den Chancen des digitalen Produktpasses auseinandersetzen.

Es gilt jedoch zu beachten, dass nicht jedes Produkt zwangsläufig mit digitalen Technologien ausgestattet werden muss, da dies auch immer mit einem zusätzlichen Ressourcenaufwand einhergeht. Es ist entscheidend, strategisch zu überlegen, welche im System vorhandenen Daten für spezifische Anwendungsfälle genutzt werden können, sodass in vielen Situationen auch ein statischer Produktpass ausreichend sein kann. Diese Überlegungen sollten bereits

früh im Produktlebenszyklus getroffen werden, da in der Design-Phase entscheidende Voraussetzungen für die CE-Fähigkeit von Produkten und Komponenten geschaffen werden. Es empfiehlt sich, digitale und CE-Kriterien frühzeitig in den Produktdesignprozess zu integrieren. Auch die bedarfsgerechte Auslegung der Produkte auf Basis der erwarteten Nutzungsdauer sollte im Produktdesign einbezogen werden und dabei auch Service-, Aufbereitungs- und Verwertungsprozess berücksichtigen.

Die derzeit ausgeschöpften Leistungspotenziale verdeutlichen, dass insbesondere in der Rückführung von Produkten und Komponenten noch erhebliche Möglichkeiten bestehen. Unternehmen haben diese Potenziale erkannt und begonnen, sich in Richtung einer Smart CE zu transformieren. Dennoch zeigt sich, dass insbesondere im Bereich der Geschäftsmodelle und Kooperationen noch viel Raum für Verbesserungen besteht. Hieran gilt es anzusetzen, um die Transformation hin zu einer Wirtschaft zu ermöglichen, die vom Bezug und Verbrauch primärer Ressourcen entkoppelt ist.

3 Smart CE-Use-Cases

Der Status quo der Fluidtechnikbranche zeigt, dass Unternehmen der Branche noch reichlich Potenzial zur Transformation hin zu einer Smart CE haben. Um dieses Potenzial zu heben und Unternehmen in Ihrer Transformation zu unterstützen, ist es wichtig, konkrete Anwendungsfälle (Use Cases) und mögliche Beispiele aufzuzeigen. Diese sollen Unternehmen eine Inspiration geben, um ihr eigenes Geschäft zu überdenken bzw. weiterzuentwickeln. Im folgenden Kapitel sind dreizehn bereits umgesetzte oder zukünftig vielversprechende Smart CE-Use-Cases innerhalb der Fluidtechnikbranche beschrieben. Hierfür wurden Fokusgruppenworkshops mit Expertinnen und Experten durchgeführt, um die Perspektiven aus der Fluidtechnik, Digitalisierung und Nachhaltigkeit einzubeziehen. Als Ergebnis wurden neun lebenszyklusbezogene Use Cases und vier unterstützende Use Cases ausgearbeitet. Im Anschluss an die Darstellung der Use Cases wird gezeigt, welche Herausforderungen und Lösungsansätze sich daraus ableiten lassen.

3.1 Methodik Use Case Sammlung und Ausarbeitung

Im folgenden Kapitel ist die Methodik erläutert, die zur Identifikation und Auswahl relevanter Smart CE-Use-Cases eingesetzt wurde. Das Ziel bestand darin, relevante Smart CE-Use-Cases für die Fluidtechnikbranche zu entwickeln. Hierfür wurde ein kollaborativer Ansatz gewählt, der die Beteiligung von Expertinnen und Experten innerhalb von Fokusgruppenworkshops sowie die Ausarbeitung im Rahmen des Projekts *Fluid 4.0* umfasst.

Im ersten Schritt wurden innerhalb eines gemeinschaftlichen Brainstormings Ideen zu Use Cases gesammelt. An diesem Fokusgruppenworkshop nahmen 16 Expertinnen und Experten

teil. Nach einer ersten Filterung und Zusammenführung von ähnlichen Ideen für Use Cases wurden 57 Use Cases als eigenständige Konzepte definiert und kurz beschrieben. In einem anonymisierten Online-Abstimmungsverfahren wurden die Use Cases priorisiert. Als Ergebnis konnten dreizehn aus Praxisperspektive als hoch relevant eingestufte Use Cases festgehalten werden. Bei der Priorisierung wurden Kriterien zu Neuheit, Machbarkeit, ökonomischen sowie ökologischen Auswirkungen, Datenbezug und Branchenrelevanz einbezogen. Abbildung 11 illustriert die identifizierten Use Cases entlang des Produktlebenszykluskonzepts.

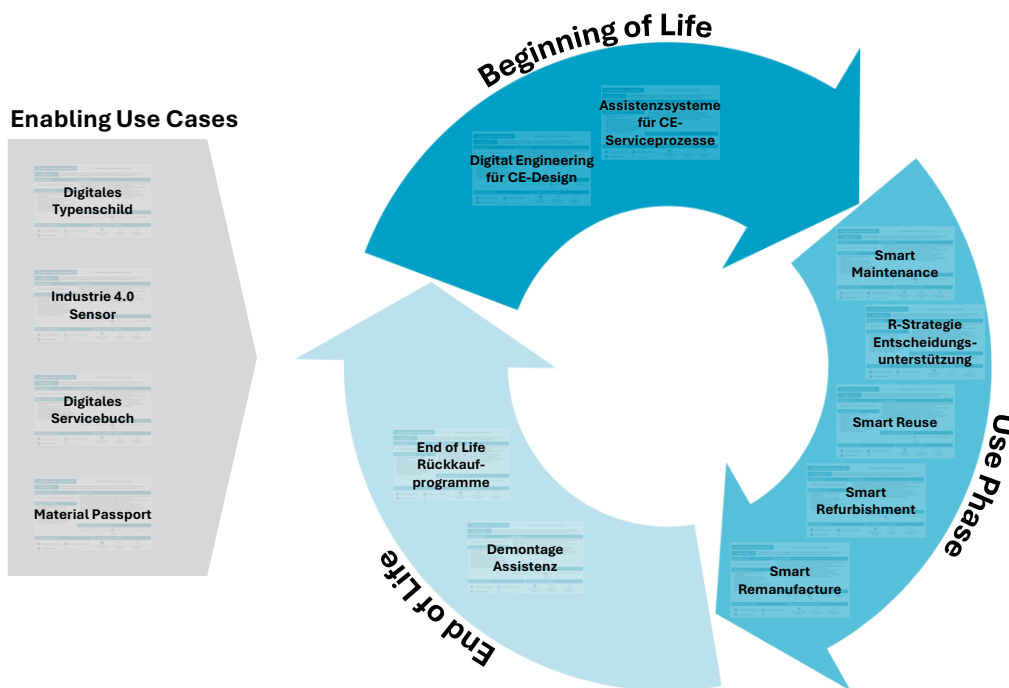


Abbildung 11: Einordnung in den Produktlebenszyklus der ausgewählten 13 Use Cases

Vier dieser 13 Use Cases lassen sich als unterstützende oder **Enabling Use Cases** klassifizieren. Diese schaffen grundlegende Voraussetzungen für die Implementierung anderer Use Cases, tragen jedoch nur indirekt zur Zirkularität bei. So beschreibt beispielsweise der Use Case *Digital Nameplate* als unterstützender Use Case, wie grundlegende statische Informationen zu einem Produkt digital gespeichert werden und für unterschiedliche Akteure im Business-Ökosystem zur Verfügung gestellt werden. Im Falle einer Reparatur oder Wartung hilft die Erkenntnis, welches spezifische Produkt man vor sich hat, bei deren Durchführung, da Ersatzteile schneller identifiziert werden können. Damit bildet es die Voraussetzung für die Umsetzung von direkten, lebenszyklusbezogenen CE Use Cases.

Die neun weiteren Use Cases sind **lebenszyklusbezogene Use Cases** und tragen direkt zu mehr Zirkularität bei. Der Use Case *CE-Design* beschreibt zum Beispiel ein interaktives Entwicklungstool, welches in der Produktentstehung genutzt wird, um ein Produkt nach CE-Prinzipien zu designen. Innerhalb des Tools wird beispielsweise darauf geachtet, dass Eigenschaften wie Reparaturfähigkeit, Modularität und Wiederverwendbarkeit in Designentscheidungen einfließen. Dieser Use Case hat damit direkt einen Einfluss auf die Zirkularität des Bauteils.

Die dreizehn identifizierten Use Cases wurden in einem iterativen Prozess von Expertinnen und Experten detailliert ausgearbeitet. Im folgenden Kapitel werden die Use Cases anhand verschiedener Beschreibungsparameter kurz dargestellt. Diese Parameter umfassen die technologische Reife, die betreffende R-Strategie, die Problemstellung, den Lösungsansatz sowie die Voraussetzungen und sollen für ein besseres Verständnis im Folgenden kurz beschrieben werden.

Die **technologische Reife** wird anhand des Konzepts der Technology Readiness Level (TRL) in Research (TRL 1-3), Development (TRL 4-6) und Deployment (TRL 7-9) eingestuft (DIN EN 16603-11:2020-02). Die Betrachtung der technologischen Reife ist entscheidend, da sie ein Maß dafür bietet, in welchem Stadium sich eine Technologie befindet und wie weit sie von der praktischen Anwendung entfernt ist. Dies ermöglicht es Unternehmen, realistische Erwartungen an die Implementierung und den Erfolg des Use Cases zu setzen.

Die **R-Strategien**, die durch den Use Case beeinflusst werden, sind anhand des eingangs erwähnten 9/10-R-Frameworks von Potting et al. (2017) gruppiert. Die Analyse der R-Strategien ist wichtig, um zu verstehen, welche Ansätze zur Ressourcennutzung und -optimierung verfolgt werden, und wie diese Strategien die Effizienz- und Nachhaltigkeitsziele des Unternehmens unterstützen können.

In der **Problemstellung** werden die Ausgangssituation und die Bedürfnisse beschrieben, die den Ausgangspunkt für den Use Case bilden. Das Verständnis der Problemstellung ist essenziell für Unternehmen, um die Relevanz und den Kontext des Use Cases zu erkennen. Es hilft ihnen, die Herausforderungen, die gelöst werden sollen, klar zu definieren und mit ihren eigenen Herausforderungen abzugleichen, um das Potenzial des Use Cases für sich selbst zu bewerten.

Der **Lösungsansatz** beschreibt die Umsetzungsweise des Use Cases. Die Betrachtung des Lösungsansatzes ist für Unternehmen wichtig, um zu identifizieren, welche Strategien und Methoden zur Lösung der definierten Probleme eingesetzt werden. Dies trägt dazu bei, die Praktikabilität und Effektivität des vorgeschlagenen Ansatzes zu überprüfen.

Die **Voraussetzungen** zeigen auf, was benötigt wird, um den Use Case erfolgreich umzusetzen. Hierbei wird sowohl auf technologische als auch auf organisatorische Voraussetzungen eingegangen. Das Verständnis dieser Voraussetzungen ist für Unternehmen entscheidend, um die notwendigen Ressourcen, Kompetenzen und Rahmenbedingungen zu identifizieren, die für die erfolgreiche Implementierung und den Betrieb des Use Cases erforderlich sind.

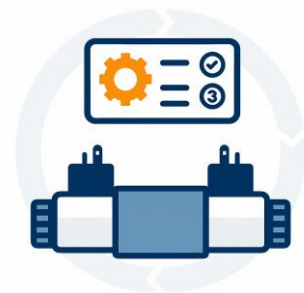
3.2 Use Cases

Im Folgenden sind die dreizehn von Experten und Expertinnen erarbeitete Use Cases dargestellt.

3.2.1 Lebenszyklusbezogene Use Cases

Digital Engineering für CE-Design

Die Produktentwicklung wird mit einem Softwaretool unterstützt, welches eine Gestaltung im Sinne einer CE fördert.



Problemstellung

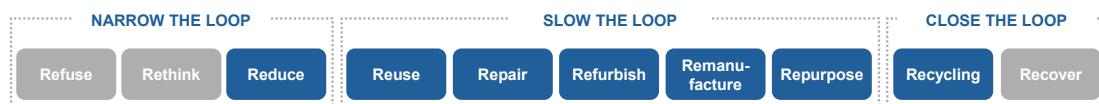
In der Produktentwicklung sind keine oder zu wenig Richtlinien zur Berücksichtigung von CE-Kriterien vorhanden. Dies führt zu fehlender Modularität und Demontierbarkeit von Produkten oder nicht-ökologischer Materialauswahl.

Lösungsansatz

Ein Assistenzsystem unterstützt die Produktentwicklung bei der Materialauswahl, Modularisierung und Übernahmeteile mit Hilfe von Simulationen zur Kostensenkung und Verbesserung der Umweltauswirkung des Produkts.

Voraussetzungen

- Integrierte Daten der Produktentwicklung und aus der Produktnutzung
- Assistenz- und Simulationssoftware inklusive Logiken für die nachhaltige Gestaltung von Produkten



Assistenzsysteme für CE-Serviceprozesse

Mit Hilfe eines Assistenzsystem in der Produktentwicklung werden R-Strategien festgelegt und Serviceprozesse sowie Anleitungen entwickelt.



Problemstellung

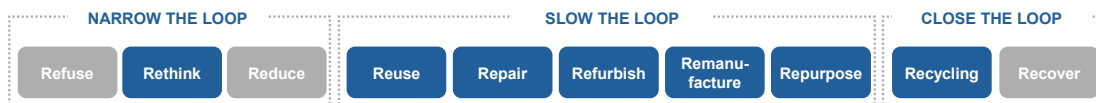
In der Produktentwicklung sind keine oder zu wenig Richtlinien zur Berücksichtigung einer CE vorhanden. Dies führt unter anderem zu fehlenden Servicestrategien und unklaren Serviceprozessen während der Nutzungsphase.

Lösungsansatz

Ein Assistenzsystem schlägt auf Basis von Produktdesigndaten (Materialinformationen, Produktart, vorgesehener Einsatz) die Festlegung von R-Strategien, Serviceprozessen und relevanten Anleitungen vor.

Voraussetzungen

- Integrierte Daten der Produktentwicklungssysteme und Serviceberichte
- Umgesetzte Servicelösungen für R-Strategien über Reparaturdienstleistungen hinaus
- Definierte Servicestrategie inklusive CE-Ansätze für einzelne Produktgruppen
- Assistenzsoftware inklusive möglichen Serviceprozessen und dazugehörige Auswahlprozesse



Smart Maintenance

Die Nutzungsphase wird mit Hilfe von geeigneten Analysen & Wartungslogiken optimiert und Wartungen bedarfsgerecht durchgeführt.



Problemstellung

Wartungsintervalle werden nach festen Vorgaben durchgeführt, aber nicht nach dem tatsächlichen Wartungsbedarf. Hierdurch werden Ressourcen nicht optimal genutzt (z. B. Service hat nicht die passenden Bauteile dabei).

Lösungsansatz

Analysen der Bauteile während der Nutzung (Remote Zugriff, Algorithmen/KI zur Analyse) liefern Informationen für die Instandhaltungsplanung (Zeitpunkt, Wartungsplan, Ersatzteile), wodurch die Verfügbarkeit der Produkte und Systeme sowie die Effizienz der Instandhaltung steigt.

Voraussetzungen

- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Bereitschaft zur Nutzung des Assistenzsystems
- Assistenzsoftware inklusive Logiken zu Instandhaltungsmaßnahmen von Produkten



R-Strategie Entscheidungsunterstützung

Basierend auf Lebenszyklusdaten wird im Einsatzfall des Entscheidungsunterstützungssystem die passende R-Strategie ermittelt.



Problemstellung

Entscheidungen über die Weiterverwendung oder Verschrottung einer Komponente basieren momentan auf Erfahrungswerten und visueller Befundung. Dadurch entstehen Ungenauigkeiten und hohe Abhängigkeiten von Wissenstragenden.

Lösungsansatz

Ein Assistenzsystem schlägt auf Basis von dynamischen Lebenszyklus- und statischen Produktdaten eine oder mehrere R-Strategien vor. Diese Logiken werden in der Produktentwicklung festgelegt.

Voraussetzungen

- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Bereitschaft zur Nutzung des Assistenzsystems
- Definierte Servicestrategie inklusive CE-Ansätze für einzelne Produktgruppen
- Assistenzsoftware inklusive Logiken zur Entscheidung über die passende R-Strategie



Smart Reuse

Die Wiederverwendung von Produkten wird durch datengestützte Zustandsermittlung ermöglicht.



Problemstellung

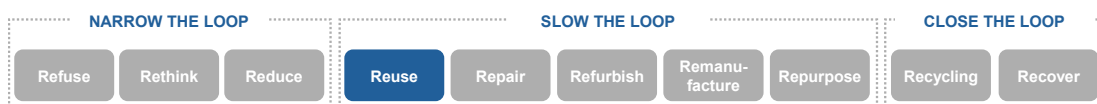
Produkte werden nach der ersten Nutzung entsorgt, da keine Informationen vorhanden sind, in welchem Zustand sich das Produkt befindet und wie es genutzt wurde. Es findet keine Wieder- / Weiterverwendung statt.

Lösungsansatz

Ein Assistenzsystem bewertet auf Basis von dynamischen Lebenszyklus- und statischen Produktdaten wie eine weitere Nutzung des Produkts möglich ist. Hierbei werden die bisherige Nutzung und die Auslegungsparameter einbezogen und Grenzen für eine weitere Nutzung festgelegt.

Voraussetzungen

- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Bereitschaft zur Nutzung des Assistenzsystems und zur Weiterverwendung von Produkten
- Assistenzsoftware inklusive Logiken zur Entscheidung, ob weitere Nutzung möglich ist



Smart Refurbishment

Software- und Hardwarekomponenten werden beim Smart Refurbishment auf Basis von Produkt- und Nutzungsdaten aktualisiert und verbessert.



Problemstellung

Noch funktionsfähige Produkte werden nicht weiter genutzt, weil sie nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und somit nicht kompatibel mit anderen Produkten sind (z. B. die Elektronik eines Ventils).

Lösungsansatz

In der Nutzungsphase werden regelmäßige Software-Updates zur Verfügung gestellt. Hardware-Upgrades werden im Rahmen von Reparaturen und Wartungen ermöglicht und beinhalten Reinigung oder den Austausch einzelner Module.

Voraussetzungen

- Modulares Design und standardisierte Wiederaufbereitungsprozesse
- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Bereitschaft zur Nutzung von wiederaufgearbeiteten Produkten



Smart Remanufacture

Komponenten werden auf Basis von Produkt- und Nutzungsdaten wiederaufbereitet und in einem neuen Produkt eingesetzt.



Problemstellung

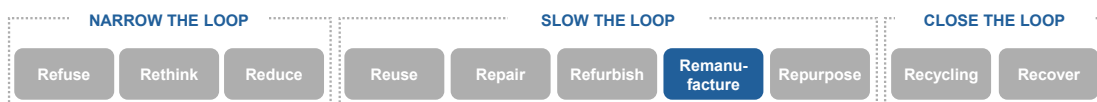
Am Lebensende werden Produkte verschrottet, ohne einzubeziehen, ob es teilweise noch aufgearbeitet und weiter verwendet werden könnte. Nach Wiederaufbereitungsprozessen wird keine oder nur eingeschränkte Garantie vergeben.

Lösungsansatz

Am Lebensende von Produkten werden diese basierend auf Produkt- und Nutzungsdaten in den Remanufacturingprozess einbezogen. Die Komponenten werden aufgearbeitet, für weitere Nutzung eingeplant und Garantien für Qualität und Langlebigkeit gegeben.

Voraussetzungen

- Modulares Design und standardisierte Wiederaufbereitungsprozesse
- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Bereitschaft zur Nutzung von wiederaufgearbeiteten Komponenten in neuen Produkten



Demontage Assistenz

Die Demontage wird durch ein Assistenzsystem erleichtert, das auf Produktentwicklungsdaten basiert und Visualisierungen bereitstellt.



Problemstellung

Die Demontage von Produkten ist teilweise komplex, nicht möglich oder wird nicht umgesetzt, da nicht bekannt ist, was die Möglichkeiten sind. Das Wiederaufbereiten, Wiederverwenden oder Recycling ist dadurch ineffizienter.

Lösungsansatz

Mit Hilfe eines Assistenzsystem wird der Demontageprozess visuell unterstützt und vereinfacht. Dies kann in einfacher Form mit Bildern und Anweisungen auf einem Bildschirm oder in komplexer Variante mit VR-geführten oder halbautomatisierten Prozessen ablaufen.

Voraussetzungen

- Modulares Design von Produkten
- Assistenzsoftware mit Informationen zu Demontageanleitungen von Produkten
- Daten müssen aus verschiedenen Datenbanken zusammengeführt und zu einem System vereint werden, was u.U. zu erhöhtem Aufwand führt



End of Life Rückkaufprogramm

Durch finanzielle Anreize wird die Rückführung von Produkten attraktiver und die Produkte können beim Hersteller aufgearbeitet werden.



Problemstellung

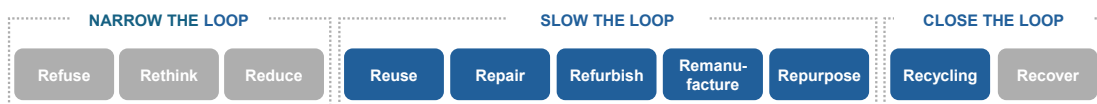
Produkte werden nach Nutzungsende meist zu Recyclern weitergegeben und stofflich verwertet, da der Restwert der Produkte nicht ermittelbar ist. Dadurch bleiben Potentiale zur Wieder- und Weiterverwendung ungenutzt.

Lösungsansatz

Nach Lebensende des Produkts kauft der Hersteller das Produkt wieder zurück und führt es in interne Aufarbeitungsprozesse ein. Auf der Basis von Lebenszyklus- und Materialdaten kann ein Restwert und damit ein ökonomisch sinnvoller Rückkaufpreis ermittelt werden, der über dem reinen Materialwert liegt.

Voraussetzungen

- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Aktive Kollaborationen zwischen Hersteller und Nutzer, um Interaktion zu Rückkauf zu starten



3.2.2 Enabling Use Cases

Digitales Typenschild

Das digitale Typenschild stellt standardisierte Information zur Identifikation des Produkts digital bereit.



Problemstellung

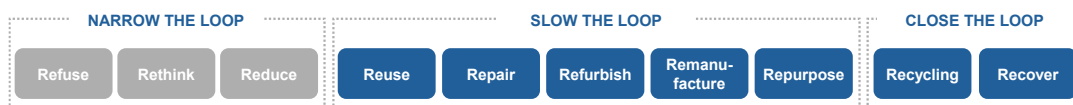
Die Identifikation insbesondere von älteren Produkten ist oft nicht möglich und Produkte haben nicht immer eine digitale Repräsentation. Für die Digitalisierung von Dokumentation, Wartung und Analyse wird eine klare Identifizierung benötigt.

Lösungsansatz

Das physische Typenschild wird mit einem Datenträger (bspw. QR-Code) ausgestattet, um über eine eindeutige ID zu Informationen über das Produkt zu verweisen (bspw. in einer Verwaltungsschale). Darüber können auch andere Informationen mit dem Produkt verknüpft werden.

Voraussetzungen

- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems
- Etablierter Branchenstandard zum Austausch von Daten



Industrie 4.0 Sensor

Ein Sensor erhebt Daten, die standardisiert sind und von unterschiedlichen Systemen weiterverarbeitet werden können.



Problemstellung

Maschinenlesbare Informationen von industriellen Sensoren sind weder in Form noch Inhalt standardisiert, weshalb es nicht möglich ist, über den gesamten Lebenszyklus hinweg standardisierte Daten zu erfassen, um so Nutzung zu optimieren.

Lösungsansatz

Datenmodelle und Datenaustauschstandards ermöglichen einen interoperablen Einsatz von Sensoren verschiedener Hersteller. So können Daten von unterschiedlichen Komponenten verknüpft und zusammen verarbeitet werden.

Voraussetzungen

- Branchenübergreifender Standard für die Erhebung, Interpretation und Übertragung der Sensordaten
- Datenmodelle für grundlegende Messdaten und Akzeptanz diese zu nutzen



Digitales Servicebuch

In einem Datenmodell werden Service- und Wartungsdaten aufgezeichnet und zur Verfügung gestellt.



Problemstellung

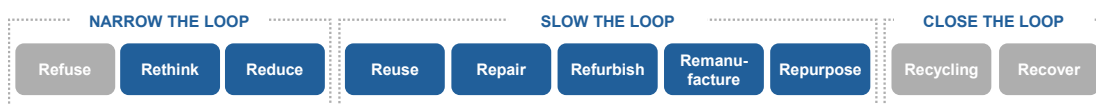
Wartungs- und Servicedaten von Produkten sind für relevante Akteure nicht verfügbar. Dies führt zu einem ineffizienten Betrieb oder falschen Rückschlüssen, wenn ein Produkt während der Nutzung oder am Lebensende bewertet wird.

Lösungsansatz

Service- und Wartungsdaten werden digital und standardisiert erfasst und in einem Datenmodell gespeichert, sodass die Daten für verschiedene Systeme mit Berechtigungsmanagement nutzbar sind. So werden existierende Daten intensiver und auch für anderen Komponenten genutzt.

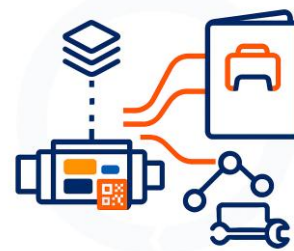
Voraussetzungen

- Standardisierte Möglichkeit zum Datenaustausch inkl. Sicherheits- und Zugriffsmanagement
- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems



Material Passport

Materialinformationen werden in einem Datenmodell dezentral erfasst und den verschiedenen Akteuren zur Verfügung gestellt.



Problemstellung

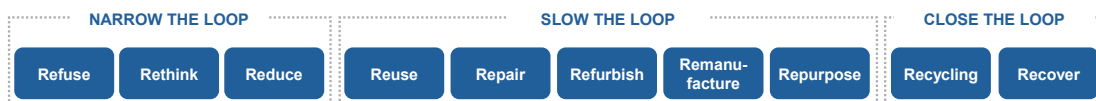
Materialdaten stehen den relevanten Akteuren nicht zur Verfügung. Dies wird bedingt durch fehlende Standardisierung des Datenaustauschs und mangelnde Kollaboration zwischen den verschiedenen, am Prozess beteiligten, Akteuren.

Lösungsansatz

Ein standardisiertes Datenmodell (z.B. der DPP aus der EU Regulatorik) soll den transparenten und sicheren Austausch von Materialinformationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglichen (inkl. Zugriffsmanagement).

Voraussetzungen

- Standardisierte Datenmodelle (bspw. Teilmodelle über die IDTA)
- Standardisierte Möglichkeit zum Datenaustausch inkl. Sicherheits- und Zugriffsmanagement
- Austausch von Informationen auf digitalem Weg innerhalb des Business Ökosystems



3.3 Analyse und Zusammenfassung der Use Cases

Anhand der Use Cases werden im Folgenden die Schwerpunkte in den Bereichen Problemstellungen, Lösungsansätze und Voraussetzungen analysiert, um Gemeinsamkeiten zwischen den unterschiedlichen Use Cases hervorzuheben und Potenziale daraus abzuleiten.

3.3.1 Problemstellungen als Ausgangspunkt

Die Use Cases wurden auf Grundlage von Problemstellungen aus der Praxis entwickelt, für die sie Lösungsoptionen bieten. Bei der Analyse der Problemstellungen stellte sich heraus, dass Ähnlichkeiten vorhanden sind, was eine Clusterung der Use Case nahelegt. Die von Expertinnen durchgeführte Clusterung verdeutlicht die erhöhte Relevanz bestimmter Themenfelder für die Transformation der Fluidtechnikbranche hin zu einer Smart CE. Beispiele hierfür sind allgemeine Digitalisierungsthemen sowie die Definition und Umsetzung von CE- und Service-Strategien im Produktentstehungsprozess.

Cluster der Problemstellungen

- Daten und Digitalisierung:
 - Erfahrungsbasierte Produktzustandsermittlung abhängig von Erfahrungstragenden und daher nicht nutzbar, z. B. für automatisiertes Condition Monitoring
 - Viele Datenpunkte und Informationen nicht digital verfügbar
 - Keine standardisierten Datenformate für Komponenten und innerhalb von Systemen mit fluidtechnischen Bauteilen vorhanden (Situation in verschiedenen Anwendungen und Branchen ggf. unterschiedlich)
 - Kein standardisiertes Datenaustauschformat und Schnittstelle vorhanden
- Ineffizienzen in der Produktentstehung
 - Keine CE- & Servicestrategien für Komponenten definiert (insbesondere im Produktentstehungsprozess)
 - Modularität der Bauteile fehlt
 - CE-Design-Prinzipien z. B. bei Materialauswahl nicht berücksichtigt
- Ineffizienzen bei Entscheidungen in/nach der Nutzungsphase:
 - Komponenten trotz Weiternutzungsmöglichkeit verschrottet
 - Komponenten nicht wiederverwendet
 - Wartung nicht an Nutzung angepasst
 - Keine Remote-Wartung möglich
 - Ersatzteile während des Service nicht verfügbar
- Akzeptanz:
 - Fehlende oder nicht bekannte Wirtschaftlichkeit von CE
 - Vertrauen in wiederaufbereitete Produkte gering

Hierbei fällt auf, dass die Probleme im Bereich Daten und Digitalisierung dominieren. An dieser Stelle setzen insbesondere die unterstützenden Use Cases an. Sie entwickeln einheitliche Datenaustauschformate und Condition-Monitoring-Ansätze sowie Lösungen für die allgemeine Verbesserung der Datenverfügbarkeit, die als Basis für spezialisierte Anwendungen dienen. Für die übrigen Use Cases ist die Verbesserung der digitalen Datenlage somit zentrale Voraussetzung.

Die Use Cases, die nicht zu den unterstützenden Use Cases gehören, adressieren vorrangig Ineffizienzen in der Produktentwicklungsphase und bei Lebenszyklusentscheidungen. Für die Produktentwicklungsphase sind insbesondere fehlende Modularität der Bauteile und die Materialauswahl ohne Fokus auf CE-Designprinzipien zu nennen, welche beispielsweise Grundlagen für die Use Cases *Digital Engineering für CE-Design*, *Assistenzsystem für CE-Serviceprozesse*, *Smart Refurbishment* und *Demontage Assistenzsystem* bilden. Zudem ist die Definition von CE- und Servicestrategien bereits in der Produktentwicklungsphase relevant für die Use Cases *Assistenzsystem für CE-Serviceprozesse*, *Smart Remanufacture*, *Demontage Assistenzsystem* sowie *End-of-Life-Rückkaufprogramm*, da hierdurch Transparenz über die Möglichkeiten während des Lebenszyklus geschaffen wird. Ineffizienzen bei Entscheidungen während oder nach der Nutzungsphase, auf die sich innerhalb der Use Cases bezogen werden, sind beispielsweise die Verschrottung von Komponenten, obwohl eine Nutzung immer noch möglich wäre, oder auch, dass Wartungen nicht an die Nutzung der Komponente angepasst sind.

Abschließend sind auch Akzeptanzhürden zu nennen, da teilweise die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung der R-Strategien nicht bekannt ist oder auch das Vertrauen in wiederaufbereitete Komponenten bei einzelnen Kunden zu gering ist.

3.3.2 Lösungsansätze

In 10 von 13 Use Cases beinhalten die Lösungsansätze Assistenzsysteme wie zum Beispiel interaktive Dashboards oder Entscheidungsunterstützungssysteme. Ein Ziel dieser Assistenzsysteme ist die Effizienzsteigerung von teilweise manueller Arbeit, wie beispielsweise beim datenbasierten Entscheidungsunterstützungssystem über R-Strategien, bei dem durch eine datenbasierte Analyse die Entscheidung der Mitarbeitenden beschleunigt und verbessert werden soll.

Darüber hinaus nutzen neun Use Cases KI-Algorithmen, regelbasierte oder statistische Verfahren zur Produkt- und Nutzungsdatenanalyse. Die Integration von Daten ist Teil von allen Use Cases und beinhaltet die Verbindung und das standardisierte Aufbereiten von Daten in unterschiedlichen Datenbanken und Cloudplattformen. Diese Lösungsansätze zeigen die Relevanz der Digitalisierung, um Smart Circular Economy Use Cases umzusetzen.

3.3.3 Voraussetzungen für die Umsetzung

Für die Realisierung von allen Use Cases müssen Voraussetzungen erfüllt und Barrieren überwunden werden. Als zentral sind datenbezogene Aspekte für viele Use Cases genannt: Dazu zählen beispielsweise die Erhöhung der Datenverfügbarkeit, das Etablieren von Datenstandards oder die Förderung der Bereitschaft zum Datenteilen. Besonders beim Use Case *Smart Maintenance* müssen Nutzungsdaten vom Endnutzer für die Analyse bereitgestellt werden. Diese Voraussetzung spricht auch ökosystembezogene Barrieren an, da hier die Zusammenarbeit von unterschiedlichen Akteuren im Business-Ökosystem vertieft werden muss.

Eine regulatorische und produktbezogene Voraussetzung ist die Klärung von Produkthaftung und Garantiebestimmungen nach Remanufacturing und Refurbishment.

Die geringe Wirtschaftlichkeit von Rückwärtslogistik, Wiederaufbereitung und Reparaturen (bei niedrigen Stückzahlen und vorwärts gerichteten Geschäftsmodellen) hemmt die Skalierung, insbesondere bei preiswerten Produkten. Eine weitere Barriere für die Umsetzung von vielen Use Cases sind die geringen Produktionskosten mancher fluidtechnischen Produkte. Insbesondere innerhalb der Pneumatik, aber auch teilweise in der Hydraulik gibt es Produkte, deren Wiederaufbereitung um ein Vielfaches teurer wäre als die Neuproduktion. Somit sollte in die Produktauswahl für die Umsetzung der Use Cases immer auch die Produktionskosten und die Werthaltigkeit einfließen. Teilweise können durch hohe Stückzahlen auch in der Wiederaufbereitung oder Rückführung Effizienzen erreicht werden, die die geringen Produktionskosten ausgleichen.

Die Analyse der 13 Use Cases verdeutlicht, dass Digitalisierung und Datenstandardisierung die zentralen Grundlagen für eine Smart Circular Economy in der Fluidtechnik sind. Unterstützende Use Cases legen durch die Entwicklung einheitlicher Datenaustauschformate und Condition-Monitoring-Infrastrukturen das Fundament, auf dem spezialisierte Anwendungsfälle aufsetzen. Nur so lassen sich Ineffizienzen in der Produktentwicklung ebenso vermeiden wie vorzeitige Verschrottung und nicht nutzungsgerechte Wartung.

4 Eine zirkuläre Fluidtechnikbranche - Handlungsempfehlungen für die digitale und nachhaltige Transformation

Um die digitale und nachhaltige Transformation in der Fluidtechnikbranche zu beschleunigen, werden im abschließenden Kapitel zehn Handlungsempfehlungen ausgesprochen und erläutert. Sie sind aus der »Smart Circularity« Branchenstudie und der Analyse der Smart CE-Use-Cases abgeleitet. Die Handlungsempfehlungen malen ein Zukunftsbild, auf welches die Fluidtechnikbranche ihre Entwicklung in den nächsten Jahren ausrichten kann.

Um besser zu verstehen, an welchen Stellen die Handlungsempfehlungen greifen, sind diese nach den unterschiedlichen Betrachtungsebenen einer CE gegliedert. Es wird hierbei zwischen Nano-, Micro-, Meso- und Macro-Ebene unterschieden (Vgl. Abbildung 12), wobei für eine ganzheitliche Transformation Veränderungen auf allen Ebenen notwendig sind, jedoch die Akteure, welche Veränderungen anstoßen können, sich stark unterscheiden (Kirchherr et al. 2017; Ghisellini et al. 2016; Saidani et al. 2017; Geisendorf und Pietrulla 2018).

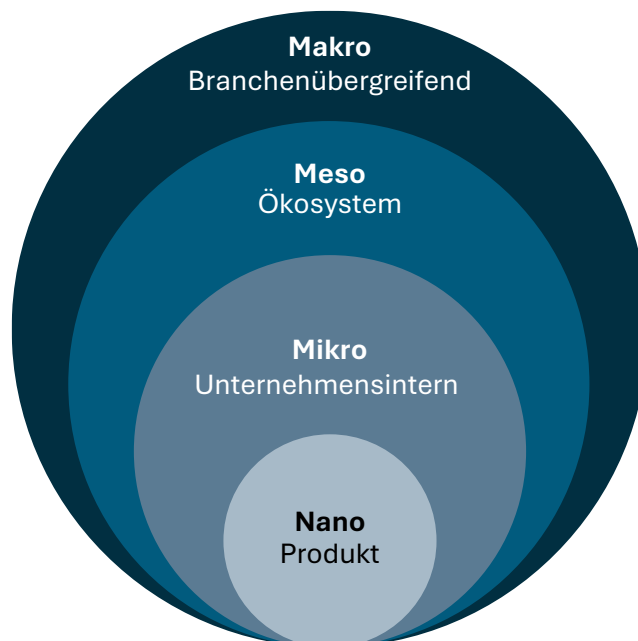


Abbildung 12: Betrachtungsebenen einer CE

Die Nano-Ebene befasst sich mit den Produkten selbst, während die Mikro-Ebene unternehmensinterne Fragestellungen behandelt. Auf der Meso-Ebene sind Themen angesiedelt, die nicht nur ein einzelnes Unternehmen betreffen, sondern mehrere Unternehmen

in der Lieferkette und im Business-Ökosystem. Die Macro-Ebene umfasst branchenübergreifende Themen wie Standardisierung und Regulatorik, die auf nationaler oder internationaler Ebene diskutiert werden. Anhand dieser Ebenen sind im Folgenden die Handlungsempfehlungen gegliedert.

4.1 Nano-Ebene: Worauf Unternehmen zukünftig bei der Produktgestaltung achten sollten.

Es sollten Daten von übergeordneten Systemen orchestriert und genutzt werden, um eine etwaig unnötige digitale Ausstattung der Komponenten vermeiden zu können.

In Fertigung, Betrieb und übergeordnete Systeme sind heute bereits vielfältige digitale Infrastrukturen etabliert, die kontinuierlich Daten generieren. Diese Potenziale bleiben jedoch oftmals ungenutzt, da eine systematische Integration und Verknüpfung der Datenquellen fehlen. Anstatt jede einzelne Komponente mit zusätzlicher Sensorik und eigener Elektronik auszustatten – was mit erheblichen Kosten- und Umweltfolgen verbunden sein kann – eröffnet die Nutzung vorhandener Sensor- und Systemdaten neue Möglichkeiten. Dies sollte bereits in der Entwicklung der Produkte und Systeme mitgedacht werden, um spätere hohe Kosten zu vermeiden. Über Informationen zu Komponentenzuständen, Betriebsparametern oder zum Lebenszyklus lassen sich vielfach die gleichen Erkenntnisse gewinnen, die andernfalls nur durch eine direkte Ausstattung der Produkte mit Sensoren zugänglich wären. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Investitions- und Materialaufwände reduzieren, sondern auch ökologische Belastungen verringern, während zugleich die Effizienz und Nachhaltigkeit in der Fluidtechnik durch die gezielte Nutzung bereits vorhandener Daten gesteigert wird.

Produkte sollten bewusst langlebig gestaltet werden und dabei Service-, Aufbereitungs- und Verwertungsprozesse mitbedacht werden.

In der Fluidtechnikbranche ist es häufig der Fall, dass die Lebensdauer der Komponenten ihren Lebenszyklus übertrifft, diese jedoch nicht für weitere Lebenszyklen genutzt werden. Dies führt zu einer suboptimalen Ressourcennutzung, da der Lebenszyklus länger sein könnte. Die Lösung besteht darin, Komponenten entweder bedarfsgerechter zu konzipieren oder ihnen gezielt ein zweites Leben zu geben. Hierdurch entstehen ökonomische und ökologische Vorteile für die herstellenden Unternehmen. Für eine bedarfsgerechte Konzeption ist es entscheidend, die Anwendungen der Produkte genau kennenzulernen und Potenziale für einen weiteren Lebenszyklus frühzeitig zu berücksichtigen. Hierbei können Lastprofile oder andere

Nutzungsdaten von vergleichbaren Anwendungen aus der Vergangenheit wertvolle Einblicke bieten. Prognosen und Simulationen für zukünftige Anwendungen helfen dabei, die Produkte optimal auf die tatsächlichen Anforderungen auszurichten. Um ein zweites Leben für Produkte zu ermöglichen, können Rückführungsprogramme, digitale Produktpässe sowie Remanufacturing- und Refurbishing-Angebote implementiert werden. Diese Maßnahmen fördern die Rückführung und Wiederaufbereitung von Komponenten, sodass sie erneut in den Produktionszyklus integriert werden können. Insgesamt zeigt sich, dass die bewusste Gestaltung langlebiger Produkte in Kombination mit durchdachten Service- und Verwertungsprozessen nicht nur die Lebensdauer der Produkte verlängert, sondern auch einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung einer Smart CE in der Fluidtechnik leisten kann.

4.2 Micro-Ebene: Wie sich Unternehmen zukünftig intern transformieren sollten.

*Ökonomische und ökologische **CE-Kennzahlen** sollten definiert und strategisch implementiert werden, um resilienter, nachhaltiger und effizienter zu werden.*

Die Erfassung und Analyse von Kennzahlen ermöglicht es Unternehmen, die Entwicklungen und Veränderungen innerhalb ihrer Geschäftsprozesse zu messen und visuell darzustellen. Ohne eine klare Sicht auf die Fortschritte und Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen in Richtung Smart CE besteht die Gefahr, dass nicht die richtigen Entscheidungen getroffen werden. Die Verknüpfung von Kennzahlen mit Anreizsystemen, wie beispielsweise Boni, kann zusätzlich dazu beitragen, das Engagement der Mitarbeitenden zu erhöhen und eine nachhaltige Denkweise innerhalb der Organisation zu fördern. Mögliche Kennzahlen, um Zirkularität zu fördern und zu messen, sind beispielsweise der zirkuläre Produktanteil, der Anteil an recycelbaren Materialien oder der Recyclinganteil des Produkts. Indem Unternehmen diese Kennzahlen regelmäßig überwachen und analysieren, können sie nicht nur den Fortschritt ihrer nachhaltigen Initiativen nachvollziehen, sondern auch gezielte Maßnahmen ergreifen, um die Effizienz und Effektivität ihrer Prozesse zu steigern. Insgesamt sind Kennzahlen ein unverzichtbares Werkzeug, um die Transformation hin zu einer CE aktiv voranzutreiben und den langfristigen Erfolg in der Fluidtechnikbranche zu sichern.

***Neue Geschäftsmodelle** sollten genutzt werden, um eine Entkopplung des Umsatzes vom Verkauf des physischen Produkts zu erzielen.*

Um die Herausforderungen der Fluidtechnikbranche im Kontext einer Smart CE zu meistern, sollten Unternehmen nutzungs- und ergebnisorientierte Geschäftsmodelle entwickeln, die die

Entkopplung des Umsatzes vom Verkauf physischer Produkte (z. B. durch Services) ermöglichen und neue Potenziale eröffnen. Dies erfordert ein Umdenken in der Fluidtechnikbranche hin zu innovativen Geschäftsmodellen, welches zum heutigen Stand noch eher gering ausgeprägt ist ([Vgl. Kapitel 2](#)). Mögliche Geschäftsmodelle sind zum Beispiel Services wie Smart Maintenance, Software-Upgrade-Services oder die Wiederaufarbeitung von Komponenten, was insbesondere für die langlebigen Produkte der Fluidtechnik sinnvoll ist. Diese Ansätze bieten ein großes Potenzial, da sie nicht nur Umsatzströme diversifizieren, sondern auch die Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung in der Branche fördern. Unternehmen sollten die Balance zwischen dem Potenzial der Geschäftsmodelle und der Realisierbarkeit ihrer Umsetzung abwägen, um die für ihr Unternehmen passenden Geschäftsmodelle zu identifizieren und zu implementieren. Um Geschäftsmodelle umzusetzen, sind insbesondere neue Kollaborationen innerhalb des Business-Ökosystems und die Rückführung von Komponenten wichtig, worauf im nächsten Abschnitt im Zuge der Meso-Ebene näher eingegangen wird.

4.3 Meso-Ebene: Wie sich Unternehmen zukünftig im Business-Ökosystem aufstellen sollten.

Kollaborationen innerhalb des Business-Ökosystems sollten intensiviert werden, um Datenverfügbarkeiten zu erhöhen und Betreibermodelle zu ermöglichen.

Die Nutzung von Kollaborationen innerhalb der vorhandenen Lieferkette und neuen Business-Ökosystemen stellt eine vielversprechende Strategie dar, um die Verfügbarkeit von Daten zu erhöhen und beispielsweise Betreibermodelle zu ermöglichen. In der Fluidtechnikbranche ist laut der Branchenstudie aus [Kapitel 2](#) die Reife der Zusammenarbeit derzeit noch sehr niedrig, was gleichzeitig eine bedeutende Chance bietet, Veränderungen herbeizuführen. Durch den Aufbau starker Beziehungen zwischen den Akteuren können diese Kollaborationen als Enabler für weitere Entwicklungen fungieren. Eine gute Zusammenarbeit fördert nicht nur den Austausch von Informationen, sondern schafft auch Vertrauen, das für die Bereitschaft zum Datenaustausch unerlässlich ist. Wie bereits in der Mikro-Ebene erwähnt, sind Kollaborationen auch wichtig für die Umsetzung von Geschäftsmodellen. Ein Beispiel hierfür sind Betreibermodelle, wobei mehrere Ökosystempartner an einer *as a Service* Lösungen partizipieren können. Wenn in Zukunft beispielsweise eine Produktionsanlage einem Endkunden zur Nutzung als Service bereitgestellt wird, können z. B. die hydraulischen Komponenten vom Komponentenhersteller bereitgestellt und betreut werden („power-as-a-service“), während die restliche Anlage von dem Maschinenhersteller zur Verfügung gestellt wird. So können mehrere Ökosystempartner davon profitieren, Ressourcen gebündelt und

Effizienzen genutzt werden. Insgesamt zeigt sich, dass die aktive Nutzung von Kollaborationen innerhalb des Business-Ökosystems nicht nur die Datenverfügbarkeit erhöht, sondern auch die Grundlage für die Entwicklung neuer, profitabler Geschäftsmodelle schafft. Indem Unternehmen ihre Zusammenarbeit stärken und Vertrauen aufbauen, können sie die Voraussetzungen für eine innovative und zukunftsfähige Fluidtechnikbranche schaffen.

*Zur Optimierung der Komponenten- und Systemeffizienz, sowie zum Condition Monitoring sollten **Daten von Komponenten und Systemen** unter den involvierten Akteuren **ausgetauscht** werden.*

Zur ganzheitlichen Optimierung der Funktion und Effizienz von Systemen sind Informationen sowohl über das System selbst als auch über die darin eingesetzten Komponenten nötig. Oftmals verfügen fluidtechnische Bauteile nicht über eigene Sensoren, was das Wissen über die Bauteile und deren Nutzung einschränkt. Daher ist es sinnvoll, die Informationen auch für einzelne Komponenten zu nutzen, die in den übergeordneten Systemen vorhanden sind, wie bereits unter den Handlungsempfehlungen auf Nano-Ebene beschrieben. Der Austausch und die gemeinsame Nutzung von Informationen trägt nicht nur zur Verbesserung der Analyse und Entscheidungsfindung beispielsweise während der Instandhaltung bei, sondern hilft auch, andere CE-Strategien zu optimieren. Dafür ist es notwendig, dass Daten und Informationen zwischen Unternehmen ausgetauscht werden und Kollaborationen im Business-Ökosystem entstehen. Außerdem ist hierfür eine umfassende Standardisierung der Daten erforderlich, damit die verschiedenen Unternehmen und Komponenten die Daten weiterverarbeiten können. Hierauf soll im Zuge der Handlungsempfehlungen auf Macro-Ebene noch genauer eingegangen werden.

*Daten aus dem **digitalen Produktpass** sollten genutzt werden, um die Nutzungsdauer zu verlängern und die Produktverwertung zu verbessern.*

Der digitale Produktpass (DPP), als zentrale Möglichkeit auf produktbezogenen Daten zuzugreifen, wird regulatorisch in den nächsten Jahren für Produkte außerhalb der Fluidtechnik verpflichtend. Als technische Umsetzung kann beispielsweise die Verwaltungsschale genutzt werden, in der bereits fluidtechnische digitale Zwillinge erzeugt werden. Der DPP bietet für regulatorisch nicht direkt betroffene Produkte neue Chancen. Beispielsweise stellt die Nutzung von Daten aus dem DPP eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Nutzungsdauer von Produkten in der Fluidtechnik zu verlängern und deren Verwertung zu verbessern, indem mehr Informationen über das Produkt selbst und dessen Nutzung in Entscheidungsprozessen verwendet werden können. Der DPP bietet eine wertvolle Basis für die Integration von

heterogenen Produktinformationen, da er nicht nur statische Informationen über ein Produkt, wie Anleitungen und Empfehlungen zur Lebensdauer und zum Ende der Lebensdauer, enthalten kann, sondern auch dynamische Nutzungsdaten. Die dynamischen Daten ermöglichen es, die tatsächliche Nutzung des Produkts zu überwachen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen, um die Effizienz und Lebensdauer zu maximieren. Obwohl die aktuelle Regulatorik in erster Linie andere Branchen betrifft, könnte es in Zukunft erforderlich werden, dass Unternehmen in der Fluidtechnik ähnliche DPPs für ihre Produkte bereitstellen. Dies könnte insbesondere für Produkte gelten, die von Kunden zur Erfüllung ihrer eigenen DPPs benötigt werden, wie beispielsweise im Automobilsektor. Die Implementierung eines DPP fungiert als Enabler für zahlreiche Use Cases, da hierüber die Datensammlung und die Verteilung an die passenden Akteure sichergestellt werden kann. Dies kann nicht nur zur Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit beitragen, sondern auch neue Umsatzmöglichkeiten durch z. B. neue Wiederaufbereitungsservices eröffnen. Zudem erleichtert der DPP den Zugang zu relevanten Informationen und Empfehlungen, was Unternehmen unterstützt, ihre Produkte länger zu nutzen und besser zu verwerten, wodurch letztlich eine Smart CE in der Fluidtechnikbranche gefördert wird.

*Die **Rückführung** von fluidtechnischen Bauteilen sollten über neue Geschäftsmodelle, wie Rückkaufoptionen oder Material Accounting, forciert werden.*

Die Rückführung von fluidtechnischen Bauteilen sollte durch die Implementierung neuer Geschäftsmodelle, wie bspw. Rückkaufoptionen, aktiv vorangetrieben werden. Für die Wirtschaftlichkeit und Effizienz solcher Systeme ist die Skalierung der Rückführungsprozesse entscheidend. Daneben ermöglicht die Rückführung von Komponenten wiederum neue Geschäftsmodelle, beispielsweise den Verkauf von wiederaufbereiteten Komponenten, wie in der Mikro-Ebene beschrieben. Um die Rückführung zu fördern, ist es unerlässlich, Anreize für die Rückführung von Bauteilen zu schaffen und enge Kollaborationen innerhalb des Business-Ökosystems zu etablieren. Innovative Geschäftsmodelle können beispielsweise Anreize in Form von finanziellen Vergünstigungen, Rabatten oder anderen Vorteilen für die Kunden inkludieren, die ihre Produkte zurückgeben. Auch das Konzept des Material Accountings, bei dem der gesamte Lebenszyklus von Materialien dokumentiert wird, kann die Informationsgrundlage sein, um Anreizsysteme umzusetzen, da so auch die Wiederverwendung oder spezielle Formen des Recyclings präferiert werden können. Dies führt nicht nur zu einer Reduzierung des Abfalls, sondern auch zu einer effizienteren Nutzung der Ressourcen, was wiederum die ökologischen Auswirkungen der Produktion und des Verbrauchs verringert. Die Schaffung solcher Rückföhroptionen können Unternehmen in der Fluidtechnik helfen, ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und gleichzeitig wirtschaftliche Vorteile zu erzielen.

*Es ist notwendig, die gesamte **Lieferkette** bei Circular Economy und Nachhaltigkeitsanforderungen einzubeziehen, um steigenden regulatorischen Anforderungen und zunehmenden Kundendruck in der Zukunft gerecht zu werden.*

Nachhaltigkeitsanforderungen erreichen häufig zuerst die B2C-Unternehmen, gefolgt von den OEMs in allen Branchen, und schließlich werden sie auch die Lieferkette betreffen. In diesem Kontext ist es wichtig, dass größere Unternehmen Tools und Checklisten entwickeln, die KMU helfen, effizienter zu arbeiten. Dadurch können diese Unternehmen Ressourcen sparen, während sie gleichzeitig methodisch klar strukturiert sind, um die erforderlichen Maßnahmen zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsanforderungen ihrer Kunden zu ergreifen. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Weiterbildung der Lieferanten durch gezielte Schulungs- und Informationsangebote. Insbesondere die Auswahl und der Einsatz von Rohstoffen haben einen erheblichen Einfluss auf die Umweltauswirkungen der Produkte. Viele dieser Entscheidungen werden am Anfang in der Lieferkette getroffen. Wenn es gelingt, mehr Kooperationen im Bereich Nachhaltigkeit zu etablieren, können die Lieferanten möglicherweise Produktionsabfall effektiver in ihre Produktionsprozesse integrieren oder andere nachhaltigere Entscheidungen treffen. Insgesamt ist die Weitergabe von Nachhaltigkeitsanforderungen entlang der Lieferkette ein zentraler Aspekt, um den Herausforderungen der Zukunft zu begegnen. Durch die Förderung von Kooperationen, die Bereitstellung von Hilfsmitteln und die Weiterbildung der Lieferanten können Unternehmen in der Fluidtechnikbranche nicht nur ihre eigenen Nachhaltigkeitsziele erreichen, sondern auch einen bedeutenden Beitrag zu einer Circular Economy leisten.

4.4 Macro-Ebene: Wie branchenweite Initiativen die Transformation zu einer Smart CE befähigen.

*Die **Standardisierung von Datenformaten** sollte innerhalb der Branche und darüber hinaus weiter fortgeführt werden, da dies die Integration, Analyse und Verwertung von Daten unterstützt.*

In der Fluidtechnikbranche ist ein entscheidender Schritt zur Förderung einer Smart CE die Standardisierung von Datenaustauschformaten. Die bereits beschriebenen Use Cases aus [Kapitel 3](#) sind auf datengestützte Prozesse angewiesen, deren Umsetzung ohne standardisierte Datenformate nur stark eingeschränkt möglich ist. Einheitliche Datenformate sind zudem unerlässlich, um sicherzustellen, dass Informationen zwischen unterschiedlichen Anwendungen

und Plattformen einfach und korrekt ausgetauscht und interpretiert werden können. In der Branchenstudie in [Kapitel 2](#) zeigt sich, dass die Reife in Bezug auf Datenstandardisierung und -austausch noch sehr gering ist, da viele Unternehmen isoliert arbeiten und bisher nur wenig Datenaustausch zwischen Akteuren stattfindet. Dies beeinträchtigt die Innovationskraft und Effizienz in der gesamten Branche erheblich. Um die Standardisierung von Datenformaten weiter voranzutreiben, sind Verbundforschungsprojekte wie *Fluid 4.0* notwendig, die innovative Lösungen entwickeln und Best Practices für die Branche bereitstellen. Zudem bedarf es gezielter Normungsinitiativen, die von der Fluidtechnikbranche selbst, zusammen mit Zielkundenbranchen und relevanten Normungsorganisationen unterstützt werden sollten, um einheitliche Standards zu etablieren und eine breite Akzeptanz zu gewährleisten. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist die Teilmodellspezifizierung im Rahmen der Industrial Digital Twin Association (IDTA), die eine strukturierte und standardisierte Herangehensweise an Datenformate ermöglicht und die Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen fördert. Insgesamt zeigt sich, dass die Standardisierung von Datenformaten eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung einer Smart CE in der Fluidtechnikbranche darstellt. Durch gezielte Maßnahmen in den Bereichen Normierung, Forschung und Zusammenarbeit können die Weichen für eine zukunftsfähige und innovative Branche gestellt werden.

5 Schlussfolgerung

Im vierten Kapitel dieses Whitepapers wurden die Handlungsempfehlungen für die digitale und nachhaltige Transformation der Fluidtechnikbranche zusammengefasst. Diese Empfehlungen sind nicht nur als Leitfaden für Unternehmen gedacht, sondern auch als Anstoß für eine umfassende Branchenentwicklung hin zu einer Smart CE. Die Fluidtechnik hat das Potenzial, durch innovative Geschäftsmodelle, die Integration digitaler Technologien und die Förderung von Kooperationen innerhalb des Business-Ökosystems, einen signifikanten Beitrag zur nachhaltigen Wertschöpfung zu leisten. Die Nutzung von Daten für die Circular Economy (beispielsweise aus DPPs) kann nicht nur die Lebensdauer von Produkten verlängern (z. B. durch Repair oder Refurbishment), sondern auch deren Verwertung optimieren, was zu neuen oder steigenden Umsatzströmen führen kann. Darüber hinaus sollten Unternehmen aktiv Kollaborationen eingehen, um die Datenverfügbarkeit zu erhöhen und CE-Geschäftsmodelle zu etablieren. Ein ebenfalls zentrales Element dieser Transformation ist die Standardisierung von Datenformaten, die den Austausch und die Analyse von Informationen erleichtert.

Die Empfehlungen richten sich an verschiedene Ebenen – von produktspezifischen, über unternehmensinterne und -übergreifende bis hin zu branchenweiten Maßnahmen – und zielen darauf ab, die Fluidtechnikbranche resilienter und wettbewerbsfähiger zu machen. Indem Unternehmen CE-Prinzipien in ihre Geschäftsstrategien integrieren, können sie nicht nur den Herausforderungen der Gegenwart begegnen, technische und wirtschaftliche Mehrwerte sowohl für Hersteller als auch Anwender schaffen, sondern auch die Weichen für eine nachhaltige Zukunft stellen.

Literaturverzeichnis

Becker, Jörg; Knackstedt, Ralf; Pöppelbuß, Jens (2009): Developing Maturity Models for IT Management. In: *Bus Inf Syst Eng* 1 (3), S. 213–222. DOI: 10.1007/s12599-009-0044-5.

Bühler, Lydia (2025): Smart Circular Economy in produzierenden Unternehmen. Dissertation. Fraunhofer IRB-Verlag; Otto-Friedrich-Universität Bamberg; Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen.

Cao, Hui; Folan, Paul (2012): Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. In: *Production Planning & Control* 23 (8), S. 641–662. DOI: 10.1080/09537287.2011.577460.

DIN EN 16603-11:2020-02, Raumfahrttechnik_ - Definition des Technologie-Reifegrades_(TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO_16290:2013, modifiziert); Deutsche Fassung EN_16603-11:2019.

Ellen MacArthur Foundation (2013): Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

European Commission (2020): Circular economy action plan – For a cleaner and more competitive Europe: Publications Office of the European Union.

Faroukhi, Abou Zakaria; El Alaoui, Imane; Gahi, Youssef; Amine, Aouatif (2020): Big Data Value Chain: A Unified Approach for Integrated Data Quality and Security. In: IEEE (Hg.): 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS). 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS): IEEE, S. 1–8.

Geisendorf, Sylvie; Pietrulla, Felicitas (2018): The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. In: *Thunderbird Intl Bus Rev* 60 (5), S. 771–782. DOI: 10.1002/tie.21924.

Ghisellini, Patrizia; Cialani, Catia; Ulgiati, Sergio (2016): A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. In: *Journal of Cleaner Production* 114, S. 11–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

Huan, Samuel H.; Sheoran, Sunil K.; Wang, Ge (2004): A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 9 (1), S. 23–29. DOI: 10.1108/13598540410517557.

Kirchherr, Julian; Reike, Denise; Hekkert, Marko (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kristoffersen, Eivind; Mikalef, Patrick; Blomsma, Fenna; Li, Jingyue (2021): Towards a business analytics capability for the circular economy. In: *Technological Forecasting and Social Change* 171, S. 120957. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.120957.

Miller, H. Gilbert; Mork, Peter (2013): From Data to Decisions: A Value Chain for Big Data. In: *IT Prof.* 15 (1), S. 57–59. DOI: 10.1109/MITP.2013.11.

Pigosso, Daniela C.A.; Rozenfeld, Henrique; McAloone, Tim C. (2013): Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. In: *Journal of Cleaner Production* 59, S. 160–173. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.040.

Plattform Industrie 4.0 (2024): Der Mittelstand als Wachstums- und Innovationsmotor in der Datenökonomie. Unter Mitarbeit von Svenja Falk (Accenture Holding), Tobias Guggenberger (Fraunhofer ISST), Andreas Hamper (Fraunhofer IIS), Nadja Hoßbach-Zimmermann (Fraunhofer IIS), Lukas Moschko (Robert Bosch GmbH), Jonas Wirth (Trumpf SE & Co. KG). Online verfügbar unter https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/202404_Mittelstand_und_Datenraum.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 25.09.2025.

Potting, José; Hekkert, M. P.; Worrell, E.; Hanemaaijer, Aldert (2017): Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. The Hague, the Netherlands: PBL Publishers (Planbureau voor de Leefomgeving, 2544).

Saidani, Michael; Yannou, Bernard; Leroy, Yann; Cluzel, François (2017): How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. In: *Recycling* 2 (1), S. 6. DOI: 10.3390/recycling2010006.

Walden, Joerg; Steinbrecher, Angelika; Marinkovic, Maroye (2021): Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (11), S. 1717–1727. DOI: 10.1002/cite.202100121.

Wilts, Henning; Berg, Holger (2017): The digital circular economy : can the digital transformation pave the way for resource-efficient materials cycles? Working Paper. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal (In brief). Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-69785>.

Kontakt:

Imane Najib
VDMA Fluidtechnik
Imane.najib@vdma.eu

Katrin Dietrich
Fraunhofer IIS
katrin.dietrich@iis.fraunhofer.de

Verantwortlich:

Dr. Christian Geis
VDMA Fluidtechnik
Christian.geis@vdma.eu

Dr. Lydia Bühler
Fraunhofer IIS
lydia.buehler@iis.fraunhofer.de

DOI: <https://www.doi.org/10.61319/78945612>

Lobbyregister: R000802
EU-Transparenzregister ID: 9765362691-45

vdma.eu