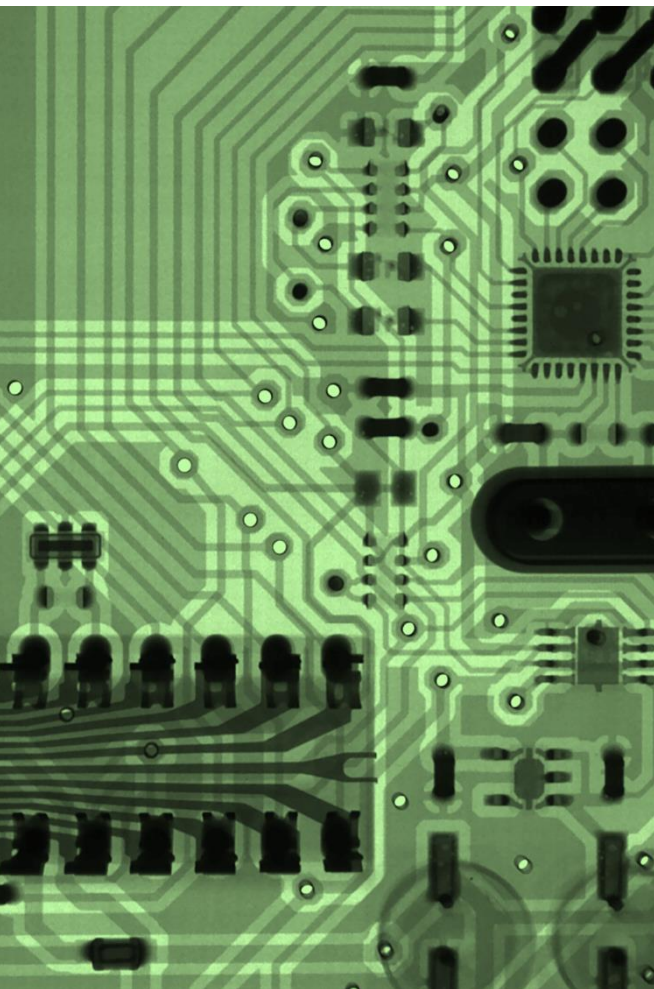


Prospektiven

Neues zur zirkulären Wertschöpfung

Circular Economy News

2024 | 03



Digitalisierung als Enabler für Circular Economy in NRW

Bereit für die doppelte Transformation?

Sabine Büttner, Paul Szabó-Müller, Tim Wöhrmann,
Beatrice Beitz, Uwe Handmann



Autor:innen

Sabine Büttner, Paul Szabó-Müller, Tim Wöhrmann, Beatrice Beitz, Uwe Handmann

Reihe

Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung / Circular Economy News

Uwe Handmann, Wolfgang Irrek, Sabine Büttner (Hrsg.)

ISSN (Print) 2750-4840

ISSN (Online) 2750-4859

1. Auflage, 15.08.2024

Titelbild

Foto von [Mathew Schwartz](#) auf [Unsplash](#)

Bitte zitieren als:

Büttner, Sabine, Paul Szabó-Müller, Tim Wöhrmann, Beatrice Beitz und Uwe Handmann (2024): Digitalisierung als Enabler für Circular Economy in NRW – Bereit für die doppelte Transformation? Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2024/03. Bottrop: Prosperkolleg e.V.

Please cite as:

Büttner, Sabine, Paul Szabó-Müller, Tim Wöhrmann, Beatrice Beitz and Uwe Handmann (2024): Digitalisierung als Enabler für Circular Economy in NRW – Bereit für die doppelte Transformation? Prospektiven – Circular Economy News 2024/03. Bottrop, Germany: Prosperkolleg e.V.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#).

Impressum / Kontakt

Prosperkolleg e.V.

Gladbecker Straße 19b

46236 Bottrop

Germany

info@prosperkolleg.ruhr

Projekt:



www.circular-performer.de

Gefördert durch:

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Abstract

Die Perspektive der „Doppelten Transformation“ versucht die beiden Megatrends Digitalisierung und Nachhaltigkeit zu verbinden und zu integrieren. Auch im Kontext der Circular Economy werden digitale Technologien als wichtige „Enabler“ diskutiert. Der vorliegende Beitrag geht der Frage nach, inwieweit die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebene Ermöglicher-Funktion von additiver Fertigung, Internet der Dinge, Blockchain, digitalem Zwilling, KI usw. für Strategien der Kreislaufwirtschaft bereits in der Praxis produzierender Unternehmen in NRW angekommen ist. Berichtet werden die Ergebnisse einer Studie, welche die innowise GmbH im Auftrag des Projekts Prosperkolleg 2022/23 durchgeführt hat. Dabei werden die Resultate einer explorativen Literaturrecherche qualitativen Interviews mit Unternehmen sowie einem Fachgespräch mit Expert:innen aus dem Bereich Digitalisierung gegenübergestellt. Vorgestellt werden außerdem die Instrumente, die zur Strukturierung der Interviews verwendet wurden, sowie aus den Ergebnissen abgeleitete Empfehlungen für die angewandte Forschung und die strategische Beratung von Unternehmen.

Inhalt

1.	Digitalisierung trifft Circular Economy	4
2.	Vorgehen der Studie	5
3.	Ergebnisse der Studie	6
3.1.	Explorative Literaturrecherche	6
3.1.1.	Handlungsfelder und Strategien der Circular Economy	6
3.1.2.	Digitalisierung und digitale Technologien	7
3.1.3.	Digitalisierung als Enabler für Circular Economy	8
3.1.4.	Betrachtung einzelner Technologien	9
3.2.	Umsetzung in NRW	13
3.3.	Reifegradmodell Digitale Circular Economy	13
3.3.1.	Reifegrad Digitalisierung	13
3.3.2.	Fragenkatalog Circular Economy	15
3.4.	Unternehmensbefragung	16
3.4.1.	Teilnehmende Unternehmen	16
3.4.2.	Digitaler Reifegrad in einzelnen unternehmerischen Feldern	17
3.4.3.	Ausgangslage: Strategien der Circular Economy	19
3.4.4.	Digitalisierung als Enabler von Circular Economy – Status quo	19
3.4.5.	Digitalisierung als Enabler von Circular Economy – Potenziale	20
3.5.	Fachgespräch mit Digitalisierungsexpert:innen	20
3.5.1.	Trends, Treiber und Herausforderungen der Digitalisierung	21
3.5.2.	Rolle von Circular Economy und Nachhaltigkeit	21
3.5.3.	Unterstützungsbedarfe	21
3.6.	Empfehlungen für die angewandte Forschung	22
3.7.	Ableitungen für die strategische Beratung von Unternehmen	23
4.	Zusammenfassung & Ausblick	25
	Literaturverzeichnis	27

1. Digitalisierung trifft Circular Economy

Die Wirtschaft sieht sich zwei Megatrends gegenüber: Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Zunehmend wird gefordert, die beiden Entwicklungen enger miteinander zu verknüpfen und als „Twin Transition“ oder „Doppelte Transformation“ anzugehen (Hofmann et al. 2023). Diese Forderung zielt einerseits darauf ab, Zielkonflikte aufzudecken, wie etwa die negativen Umweltauswirkungen der Digitalisierung aufgrund des massiven und steigenden Bedarfs an Hardware und Infrastruktur. Andererseits gilt es angesichts der Dringlichkeit des ökologischen Wandels zu erkunden, wie sich Synergien nutzen lassen und die Digitalisierung dazu beitragen kann, Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (siehe WBGU 2019). Ein zentrales Handlungsfeld der doppelten Transformation ist die Verknüpfung von Digitalisierung und Circular Economy, nachfolgend auch digitale Circular Economy genannt.

Die Förderung des Übergangs in eine Circular Economy ist ein zentraler Baustein des European Green Deals, wobei die Digitalisierung ein wichtiges Instrument ist. Der zugehörige EU Circular Economy Action Plan (CEAP) basiert auf einem umfassenden Verständnis von Kreislaufwirtschaft, das den Wertschöpfungsprozess ganzheitlich betrachtet, und der Schwerpunkte im Produktdesign, bei der Stärkung von Verbraucherrechten, effizienten Produktionsprozessen und besonders relevanten Wertschöpfungsketten setzt (Europäische Kommission 2015 und 2020). Der Digitalisierung wird dabei explizit eine Rolle bei der Nachverfolgung und Datenverfügbarkeit zu Produkten, Komponenten und Materialien zugesprochen. Im Zentrum steht hier die EU-weite Einführung digitaler Produktpässe für nahezu alle Produkte durch die neue Ökodesign-Verordnung (vgl. Europäische Kommission 2024). Hierdurch wird das Thema „Digitalisierung und Circular Economy“ zur Pflicht für Unternehmen, sei es entweder als direkt adressierte Inverkehrbringer oder indirekt durch die Verflechtung in die entsprechenden Lieferketten.

Die Kreislaufwirtschaftsstrategie Deutschlands knüpft stark an den EU CEAP an. Sie wurde im Juni 2024 im Entwurf vorgelegt und folgt dem Leitbild, „den Wert von Rohstoffen und Produkten möglichst lang zu erhalten, Materialien sparsam zu verwenden und solange wie möglich im Kreislauf zu führen und letztlich hierüber zu einer Stärkung der Resilienz und Innovationskraft des Industriestandortes Deutschland zu führen“ (BMUV 2024). Damit markiert das BMUV eine Abkehr vom Konzept des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, bei dem es vorrangig um die Vermeidung, das Recycling, die energetische Verwertung und sichere Beseitigung von Abfällen geht (Bundesministerium der Justiz o. J.).

Die Digitalisierung als Megatrend, der zentrale Lebensbereiche und wirtschaftlichen Prozesse durchdringt, wird nicht nur durch Institutionen wie die EU-Kommission, das World Economic Forum zusammen mit der Ellen McArthur Stiftung (Ellen MacArthur Foundation 2016), sondern auch seitens der Forschung als wichtige Triebkraft für die Circular Economy benannt (Bressanelli et al. 2022). Digitalen Technologien wird das Potenzial zugesprochen, Circular-Economy-Strategien auf vielfältige Weise zu unterstützen, von der Steuerung und Optimierung von Produktionsprozessen im Rahmen von Industrie 4.0 bis hin zu kreislaforientierten Geschäftsmodellen wie Sharing-Plattformen oder Online-Marktplätzen für Sekundärrohstoffe. Im Fokus stehen dabei digitale Plattformen und Technologien wie Big-Data-Analysen, das Internet der Dinge (IoT), Blockchain oder künstliche Intelligenz, im weiteren Sinne also die umfassende Sammlung, Analyse und Integration von Daten.

Rosa et al. wiesen 2020 darauf hin, dass nicht systematisch untersucht worden sei, wie sich die verschiedenen digitalen Technologien konkret auf die einzelnen Handlungsfelder der Circular Economy auswirken. Andererseits werden seit einiger Zeit Forschung, Entwicklung und Transfer im Themenfeld Digitalisierung und Circular Economy verstärkt gefördert, um dem Mangel an spezifischer empirischer Forschung und der Umsetzung im Konkreten zu begegnen. Im Fokus der Förderbemühungen stehen häufig kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die im Bereich Digitalisierung und folglich auch bei der doppelten Transformation häufig ganz am Anfang stehen (vgl. Quaing et al. 2023).

Aus Sicht der regionalen Transformation in Nordrhein-Westfalen (NRW) wirft all dies die Frage auf, auf welche Art und Weise und in welchem Ausmaß Digitalisierung und Circular Economy in KMU vor Ort zusammen gedacht oder sogar schon umgesetzt werden.

Der vorliegende Artikel möchte dazu beitragen, diese Forschungslücken zu schließen. Der erste Teil zielt darauf ab, auf konzeptioneller Ebene Erkenntnisse über die Potenziale zu gewinnen, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien und zirkulären Strategien ergeben:

Wie können digitale Technologien den Übergang zu einer Circular Economy unterstützen?

Welche digitalen Technologien bzw. Technologiekombinationen kommen als „Enabler“ für welche zirkulären Strategien in spezifischen unternehmerischen Handlungsfeldern in Frage?

Über die theoretische Leistung digitaler Lösungen als Wegbereiter für die Circular Economy hinaus fehlt es an empirischen Daten über ihre tatsächliche Nutzung und den Grad ihrer Verbreitung (in NRW). Weitere Fragestellungen sind daher:

Welche digitalen Technologien nutzen Unternehmen bereits für zirkuläre Strategien in spezifischen Handlungsfeldern? In welchen Unternehmensbereichen?

Welche Treiber und Hindernisse beeinflussen den Einsatz digitaler Lösungen für zirkuläres Wirtschaften?

Um erste Antworten auf diese Fragen geben zu können, beauftragte das vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Klimaschutz und Energie in NRW (MWIKE) geförderte Projekt Prosperkolleg die innowise GmbH im Herbst 2022 mit der Durchführung einer „Studie zur Digitalisierung als Enabler von Circular Economy in NRW“. Ziel war es, den Status quo digital gestützter Circular-Economy-Aktivitäten von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in Nordrhein-Westfalen zu identifizieren, um den Stand von Theorie und Praxis exemplarisch abzugleichen und daraus Empfehlungen für Forschung und Praxis abzuleiten.

Die Studie schließt damit an Schwerpunkte des Projekts Prosperkolleg an, das die Zusammenhänge von Digitalisierung und Circular Economy vor allem im Forschungs- und Demonstrationslabor Circular Digital Economy Lab (CDEL) der Hochschule Ruhr West und im Rahmen der Webseminarreihe #CEResearchNRW sowie im Parallelprojekt (reWIR) wissenschaftlich wie praktisch behandelt hat. Vorausschauend können die in der Studie erarbeiteten Grundlagen und Systematiken u. a. vertiefenden Studien zur Rolle von Künstlicher Intelligenz (KI) im Kontext der Circular Economy als Ausgangspunkt dienen.

Der Fokus der Untersuchung auf NRW ergibt sich aus dem Förderkontext des Projekts Prosperkolleg. Das Land ist aber auch inhaltlich prädestiniert, um Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft zusammen zu denken: Aufgrund der traditionellen Industriestruktur, insbesondere in den Branchen Maschinenbau, Chemie, Stahl und Automotive, verfügt es über einen großen Transformationsbedarf, aber auch über ein großes Potenzial für digitale Innovationen (MWIDE.NRW 2021). Die Infrastruktur ist gut ausgebaut und bietet eine solide Basis für die Umsetzung sowohl digitaler Technologien als auch von Circular-Economy-Konzepten mit vorhandenen Fachkräften und der Nachwuchsförderung an Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Innovationszentren. Zudem unterstützt die Landesregierung Innovationen an der Schnittstelle von Digitalisierung und Circular Economy durch gezielte Förderungen wie zum Beispiel im Rahmen des von der EU kofinanzierten Strukturförderungsprogrammes EFRE/JTF NRW 2021-2027.

2. Vorgehen der Studie

Explorative Literaturrecherche

Im Herbst 2022 wurde zunächst eine explorative Literaturrecherche durchgeführt, um den Stand der Forschung in Bezug auf Digitalisierung und Circular Economy zu erfassen. Berücksichtigung fanden insbesondere peer-reviewed Artikel und ergänzend dazu graue Literatur wie Berichte, Konferenzbeiträge und Dissertationen in deutscher und englischer Sprache. Die gefundenen Quellen wurden gesichtet und nach Relevanz für die Fragestellung und Aktualität ausgewählt. Aus diesen Literaturquellen wurden Informationen zur Anwendung digitaler Technologien für Circular Economy extrahiert und zusammengefasst. Die Ergebnisse dieses Schritts flossen außerdem in die Entwicklung des

Erhebungsinstruments bzw. Reifegradmodells „Digitale Circular Economy“ ein, mit dem im zweiten Teil der Studie die praktische Bedeutung der Digitalisierung für die Circular Economy in kleinen und mittelständischen Unternehmen in NRW untersucht wurde. Zusätzlich wurde im Internet nach konkreten Umsetzungsbeispielen in Unternehmen in NRW recherchiert.

Qualitative Befragung von Unternehmen und Expert:innen

Ziel der qualitativen Unternehmensbefragung war es, Eindrücke zum aktuellen Stand der Umsetzung von Digitalisierung in Verbindung mit Circular Economy in Unternehmen in NRW zu erfassen sowie die damit verbundenen Umsetzungshürden und Unterstützungsbedarfe zu identifizieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden qualitative Interviews mit Vertreter:innen von acht Unternehmen durchgeführt. Als Gesprächsleitfaden diente das auf Basis der explorativen Literaturrecherche entwickelte Reifegradmodell „Digitale Circular Economy“ (siehe Kap. 3.3). Zusätzlich wurde ein zweistündiges Online-Fachgespräch mit drei Expert:innen aus dem Bereich digitaler Technologien geführt, das die Themen Digitalisierung, Circular Economy und Unterstützungsbedarfe von Unternehmen abdeckte. Durch die Kombination der Unternehmensgespräche mit dem Expert:innen-Austausch im Bereich digitaler Technologien konnte ein vertieftes Verständnis für die Herausforderungen der digitalen Circular Economy in Unternehmen in NRW gewonnen werden.

Ableitung von Empfehlungen

Der dritte Teil der Studie eröffnete Perspektiven für die wissenschaftliche wie praktische Weiterführung des Themas. Dazu wurden aus den Ergebnissen von Literaturrecherche und Unternehmensbefragung im Prozess deutlich gewordene Forschungslücken benannt und Ansätze angewandter Forschung (F&E-Projekte) kurz skizziert. Mit Blick auf die Praxis wurden schließlich Erfolgsfaktoren und ein Vorgehensmodell für die Beratung von Unternehmen entwickelt.

3. Ergebnisse der Studie

3.1. Explorative Literaturrecherche

Um Erkenntnisse über den Nutzen digitaler Technologien zur Unterstützung zirkulärer Strategien zu gewinnen, wurden zuerst Handlungsfelder für die Umsetzung zirkulärer Strategien in Unternehmen definiert. Es folgte eine Begriffsbestimmung von Digitalisierung und eine Eingrenzung relevanter digitaler Technologien als Enabler für Circular Economy. Danach wurde ein auf dieser Basis entwickeltes Reifegradmodell für Digitalisierung und Circular Economy konzipiert, mit dem der Status quo systematisch erfasst und Entwicklungspotenziale für einzelne Unternehmen aufgezeigt werden können.

3.1.1. Handlungsfelder und Strategien der Circular Economy

Die Circular Economy umfasst den kompletten Wertschöpfungsprozess bzw. die gesamte Wertschöpfungskette. Eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung spielen dabei die sogenannten R-Strategien (Campbell-Johnston et al. 2020), deren Name sich aus der englischen Vorsilbe der einzelnen Circular-Economy-Strategien ableitet, beispielsweise Rethink, Reuse, Repair (Mast et al. 2022). Reike et al. (2018) konnten im Rahmen einer Literaturanalyse bis zu 38 R-Strategien identifizieren, welche in vielen verschiedenen Kombinationen – etwa 3R, 4R, 6R, 9R oder 10R – auftreten. Ein häufig verwendetes Modell ist das 9R-Modell von Potting et al. (2017), das Circular-Economy-Strategien in Hinblick auf ihr Potenzial für die Minimierung des Ressourcenverbrauchs systematisch zu ordnen versucht.

Um aus den R-Strategien konkrete Handlungsoptionen für produzierende Unternehmen abzuleiten, wird eine systematische Betrachtung verschiedener unternehmerischer Handlungsfelder empfohlen. Scheelhaase und Zinke (2016) nennen hierzu das Produktdesign, die Roh- und Werkstoffauswahl, den Produktionsprozess, die Logistik sowie die Integration des Produktes am Ende des Lebenszyklus. Der Ansatz von Weber und Stuchtey (2019) nimmt zum Teil andere Stufen der Wertschöpfungskette in den Blick und fokussiert die Materialauswahl, die Nutzungsphase und das Ende der Lebensdauer.

Eine neuere Clusterung, die speziell auf die Anforderungen produzierender Unternehmen ausgerichtet ist, wurde vom Projekt Prosperkolleg durchgeführt (Hermandi et al. 2022) und zu einem Handlungsleitfaden für KMU weiterentwickelt (Prosperkolleg o. J.). Dazu zählen:

Handlungsfeld 1 – Zirkuläre Produktentwicklung (engl. Circular Design): Ein Designansatz, der den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt, indem Produkte so entworfen werden, dass sie beispielsweise wenig Materialressourcen verbrauchen und leicht wiederaufbereitet, wiederverwendet oder recycelt werden können. Dies wird durch Merkmale wie Modularität und Upgradefähigkeit erreicht.

Handlungsfeld 2 – Lieferketten und Einkauf kreislauffähiger Materialien: Die Zusammenarbeit zwischen Akteuren entlang einer transparenten Lieferkette kann dazu beitragen, innovative Lösungen zu fördern, um die Kreislauffähigkeit von Materialien und Produkten zu verbessern. Beispiele hierfür sind der Einkauf von recycelten oder wiederverwendbaren Materialien sowie die regionale und sozialverträgliche Beschaffung.

Handlungsfeld 3 – Ressourceneffiziente Produktion: Das Ziel ist eine Reduktion von Material, Abwasser und Energie, indem Produkte mit minimalem Ressourceneinsatz hergestellt, Betriebsstoffkreisläufe geschlossen und innovative Techniken, einschließlich digitaler, genutzt werden. Voraussetzung dafür ist die fortlaufende Analyse der Produktionsprozesse. Beispiele hierfür sind die interne Wiederverwendung von Produktionsausschüssen und der Einsatz von Sensortechnik.

Handlungsfeld 4 – Rückholung und Wiederverwertung & Produkt-Service-Systeme: Bei Rückführung und Wiederaufbereitung gelangen Produkte oder Komponenten über Rücknahmesysteme zurück zum Hersteller für eine Wiederverwendung oder stoffliche Wiederverwertung. Durch ein Angebot von Produkt-Service-Systemen behält das Unternehmen Kontrolle über seine Produkte und Komponenten. Beide Ansätze vereinfachen Reparatur- und Wartungsservices für eine längere Produktlebensdauer und ermöglichen das Schließen von Kreisläufen.

3.1.2. Digitalisierung und digitale Technologien

Digitalisierung bezeichnet auf einfachster Ebene den Prozess der Umwandlung analoger Informationen in eine digitale Form (Ritter und Pedersen 2020). Effekte erfolgreicher Digitalisierung sind eine erhöhte Transparenz und eine verbesserte Kontrolle und Steuerung von Wertschöpfungsprozessen innerhalb eines Unternehmens, was durch eine automatisierte Erfassung und Analyse von großen Datenmengen ermöglicht wird (Schumacher et al. 2016). Bei der Digitalisierung geht aber nicht nur um den Einsatz digitaler Werkzeuge. Darüber hinaus bieten digitale Technologien die Möglichkeit, Geschäftsprozesse umzugestalten und neue Geschäftsmodelle zu schaffen. Damit ist Digitalisierung ein Schlüsselaspekt bei der Transformation von Industrien (Branca et al. 2020).

Parviainen et al. (2017) konzeptualisieren Digitalisierung als Transformation auf vier Ebenen: Erstens werden auf der Prozessebene manuelle Schritte reduziert und rationalisiert, zweitens wird auf der Organisationsebene das Angebot völlig neuer Dienstleistungen möglich und bestehende Dienstleistungen verändern sich, drittens ändern sich auf der Ebene der Geschäftsbereiche die Rollen und Wertschöpfungsketten, und viertens wandeln sich auf gesellschaftlicher Ebene Strukturen z. B. die Art der Arbeit und Möglichkeiten der Einflussnahme auf organisationale Entscheidungsfindungen.

Die vorliegende Studie legt auf Basis dieser Vorüberlegungen ein Verständnis von Digitalisierung zugrunde, welches sich auf die Definitionen von Branca et al. (2020) bezieht und seine Auswirkungen auf verschiedenen Ebenen berücksichtigt (Parviainen et al. 2017).

Wie Branca et al. (2020) in ihrer Definition hervorheben, spielen digitale Technologien eine zentrale Rolle für die Digitalisierung. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) beschreibt im Trendradar 2022 digitale Technologien als „Lösungskomponenten für das digital vernetzte Unternehmen“. Diese Technologien bestehen aus der Vernetzung von betrieblichen Anwendungssystemen sowie Software- und Hardwarekomponenten und schaffen mittels Datenverarbeitung einen datenbasierten Mehrwert (Stich et al. 2022). Das BMWK untersucht digitale Technologien, indem es sie in fünf Bereiche einteilt: „Geschäftsmodelle“, „Produkte“, „Prozesse“, „Vernetzung“ und „Virtualisierung“ sowie „Datenverarbeitung“. Der Reifegrad dieser Technologien wird von der

Innovationsphase über die Prototypenphase bis zur Marktetablierungsphase bewertet. Insgesamt identifiziert das BMWK etwa 300 Trends und Technologien, von denen es 65 als besonders wichtig ansieht.

3.1.3. Digitalisierung als Enabler für Circular Economy

Dass die Digitalisierung bzw. digitale Technologien als Enabler (Ermöglicher) von Circular Economy wirken, dass also digitale (Schlüssel-)Technologien grundsätzlich auch sinnvoll zur Umsetzung von Circular Economy genutzt werden können, ist gemeinhin in der wissenschaftlichen Literatur anerkannt (z. B. Bressanelli et al. 2018; Çetin et al. 2021; Felice und Petrillo 2021; Hedberg und Šipka 2021; Kalogiannidis et al. 2022 Rosa et al. 2020).

Die Ellen McArthur Stiftung weist in einer Studie insbesondere auf das Potenzial digitaler Technologien hin, eine vernetzte Infrastruktur der Circular Economy entlang von Wertschöpfungsketten zu ermöglichen (Ellen MacArthur Foundation 2016). Zirkuläre Geschäftsmodelle erfordern die Vernetzung vieler Akteure, etwa um neue Geschäftspartner zu finden oder für Feedback von Verbrauchenden, so dass Plattformen für Vernetzungs- und Mitgestaltungsprozesse an Bedeutung gewinnen (Kalogiannidis et al. 2022). Der wesentliche Vorteil einer digital vernetzten Infrastruktur besteht darin, dass sie ein hohes Maß an Transparenz bietet und es ermöglicht, schnell und flexibel auf Veränderungen in der politischen und wirtschaftlichen Umgebung zu reagieren – sowohl in ökonomischer als auch in ökologischer Hinsicht (Kalogiannidis et al. 2022).

Felice und Petrillo (2021) untersuchten in einem systematischen Literaturreview den Stand und zukünftige Entwicklungen digitaler Technologien. Sie fanden 32 Studien und identifizierten folgende Schwerpunkte: Simulationen für ökonomische Analysen und Schulungen, additive Fertigung für umweltfreundlichere Materialien, Internet of Things (IoT) und Blockchain zur Optimierung des Abfallmanagements. Es gibt jedoch Barrieren wie mangelnde Interoperabilität und die Notwendigkeit neuer Kommunikationsprotokolle und 5G-Netze für neue Geschäftsmodelle.

Als weitere Anwendungsbeispiele für verschiedene Branchen heben Kurniawan et al. (2022) für den Abfallsektor die Bedeutung digitaler Technologien wie RFID und Künstliche Intelligenz (KI) hervor, um Materialkreisläufe zu schließen. Bressanelli et al. (2022) zeigen anhand einer Fallstudie in der Haushaltsgeräteindustrie, wie in einem dienstleistungsorientierten Geschäftsmodell das Internet der Dinge (IoT), Big Data und Analytik erstens Ressourceneffizienz steigern, zweitens die Lebensdauer verlängern und drittens den Kreislauf schließen können. Çetin et al. (2021) identifizieren für das Bauwesen relevante digitale Technologien wie additive und robotergestützte Fertigung, KI, Big Data, Blockchain, digitale Plattformen, digitale Zwillinge, Materialpässe und IoT. Hojnik et al. (2023) zeigen, wie Digitalisierung die Transparenz, Kontrolle und Verwaltung von Ökoinnovationsprozessen in Unternehmen verbessert.

Alternativ lassen sich spezifische Unternehmensbereiche in Bezug auf Circular Economy und Digitalisierung betrachten. Çetin et al. (2021) nennen Produktdesign, nachhaltiges Betriebs- und Ressourcenmanagement, Optimierung von Ressourcenströmen sowie Tracking und Tracing von Produkten als wichtige Bereiche, in denen Digitalisierung zirkuläre Strategien unterstützt. Diese Anwendungsbereiche decken die gesamte Wertschöpfungskette ab. Hedberg und Šipka (2021) zeigen ebenfalls, wie digitale Technologien entlang der Wertschöpfungskette Potenziale im Produktdesign, in der Produktion, Nutzung, Wiederverwendung, Recycling, Remanufacturing und im Abfallmanagement entfalten.

Vor dem Hintergrund der Circular Economy identifizieren Çetin et al. (2021) das Internet of Things, Cyber-Physikalische-Systeme, Big Data und additive Fertigung als relevante Enabler von Circular Economy; ähnlich Bressanelli et al. (2022) mit Internet of Things, 3D-Druck, Blockchain und Big Data. Parida et al. (2019) identifizieren unter anderem Entwicklungen der Künstlichen Intelligenz (KI), das Internet of Things, Smart Contracts und Cloud Computing als entscheidende digitale Technologien im Sinne der Circular Economy. Pagoropoulos et al. (2017) führen die RFID-Technologie, das Internet of Things, Big Data und das maschinelle Lernen an.

3.1.4. Betrachtung einzelner Technologien

Um einen konkreten Einblick zu geben, werden im Folgenden einzelne Technologien näher beschrieben und hinsichtlich ihrer ermöglichenden Rolle für die Circular Economy in Bezug auf deren Handlungsfelder und die R-Strategien untersucht.



Abbildung 1: Übersicht der ausgewählten digitalen Technologien sowie die erwartbaren Mehrwerte für die Circular Economy (eigene Darstellung).

Additive Fertigung

Unter additiver Fertigung versteht man Herstellungsverfahren, welche „(...) dreidimensionale Bauteile in einem automatisierten, schichtweisen Prozess aus einem formlosen oder form-neutralen Material aufbauen“ (Klahn et al. 2018). Durch die Strategien Reduce, Repair, Refurbish und Recycle wirkt die additive Fertigung als Enabler insbesondere in den Handlungsfeldern (HF) 1, 2 und 3:

HF 1: Im Sinne einer *zirkulären Produktentwicklung* lassen sich durch Leichtbauweisen (Reduce – Material- und Energieaufwände) und Produktpersonalisierung (Erhöhen der Bindung an das Produkt und verlängerte Produktnutzung) Potenziale im Sinne der Circular Economy erschließen. Eine weiterführende Möglichkeit ist die des „Value Added Repair“. Dahinter steht die Idee, Produkte nicht nur zu reparieren, sondern durch Zusatzfunktionen aufzuwerten (Refurbish). Diese Möglichkeit ist besonders interessant, da auch im additiven Herstellungsverfahren Energie aufgewendet wird – eine Aufwertung des Produktes erhöht somit den Nutzen im Sinne der Circular Economy (Sauerwein et al. 2019, Joustra o. J.).

HF 2: Potenziale im Bereich von *Lieferketten und dem Einkauf kreislauffähiger Materialien* lassen sich durch Verkürzen von Transportwegen durch dezentrale Produktion (Bressanelli et al. 2022) sowie die Nutzung von Rezyklaten im additiven Verfahren (Recycle) erzielen (Despeisse et al. 2017, Zhu et al. 2021).

HF 3: Die *Ressourceneffizienz in der Produktion* profitiert durch die Reduktion von Material – und Energieaufwänden, was etwa durch Leichtbau durch Verwenden von komplexen geometrischen Strukturen möglich ist (siehe auch Handlungsfeld 1). Gleichzeitig werden Ausschüsse weitgehend vermieden (Reduce). Die Möglichkeit, Ersatzteile erst bei Bedarf zu fertigen spart Lagerkapazitäten und -bestände und vereinfacht und vergünstigt auf diese Weise Reparaturprozesse (Reduce, Repair, Refurbish). Der insgesamt geringere Materialaufwand ermöglicht die (wirtschaftlichere) Nutzung von Rezyklaten (Recycle) (Bressanelli et al. 2022).

Big-Data-Analyse

Unter Big-Data-Analyse versteht man die Sammlung, Verarbeitung und Auswertung großer Datenmengen (Bendel o. J.). Über die Strategien Refuse, Reduce, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose und Recycle ermöglicht die Big-Data-Technologie die Erschließung von Circular-Economy-Potenzialen in jedem der definierten Handlungsfelder.

HF 1: Im Bereich der zirkulären Produktentwicklung können, etwa durch die Sammlung und Auswertung von Daten entlang des Produktlebenszyklus, Rückschlüsse hinsichtlich gängiger Designprinzipien zur Produktoptimierung im Sinne des Circular Design gezogen werden (Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Modularität, Einsatz alternativer Materialien etc.) (Vacchi et al. 2021).

HF 2: Durch die Analyse großer Datenmengen lassen sich – zur Unterstützung der Reduce-Strategie – Lieferketten und -prozesse effizient gestalten (Verbesserung der Ressourceneffizienz entlang der Lieferketten, Reduzierung von Verschwendungen und Emissionen) (Del Giudice et al. 2020).

HF 3: Im Bereich der ressourceneffizienten Produktion wirken vor allem die Strategien Reduce und Repair. Durch die Analyse und Auswertung großer Datenmengen lassen sich Rückschlüsse hinsichtlich eines optimierten Ressourceneinsatzes und idealer Anlagenparameter ziehen (Reduce) sowie die interne Wartung im Sinne einer zustandsorientierten, vorausschauenden und vorhersagenden Instandhaltung optimieren (Reduce & Repair) (Bressanelli et al. 2022).

HF 4: Die Erfassung und Auswertung von Komponentendaten entlang des Lebenszyklus mittels Big-Data-Analysen erlaubt nachhaltige Entscheidungen hinsichtlich der Produktnutzung nach dem Ende des eigentlichen Lebenszyklus (ggf. Repair, Remanufacture, Repurpose, Refurbish und Recycle). Darüber hinaus bilden Big-Data-Analysen die Grundlage für weitere digitale Technologien (z. B. digitale Zwillinge), wodurch Refuse-Strategien verfolgt werden können (z. B. Virtualisierung von Produkten) (Kristoffersen et al. 2020).

Blockchain

„Blockchain (engl. Blockkette) ist eine spezielle Technologie zur Datenhaltung in dezentralen verteilten Netzwerken, d. h. in Netzwerken, die nicht von einer zentralen Instanz verwaltet werden.“ (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik o. J.). Durch diese Funktion spielt die Blockchain-Technologie insbesondere für die Handlungsfelder 2 und 4 eine wichtige Rolle – Reduce, Repair, Refurbish und Recycle sind dabei relevante Strategieebenen.

HF 2: Die Blockchain-Technologie tritt als eine Art Infrastruktur für die Circular Economy in Aktion, indem sie Transparenz schafft und physische wie nicht-physische Transaktionen ermöglicht. Dies schafft Vorteile im Bereich der Nachverfolgbarkeit und Transparenz (in Echtzeit) entlang von Lieferketten sowie der Nachweisbarkeit der Produktherkunft (Reduce).

HF 4: Darüber hinaus bildet die Blockchain die Basis für Rückhol- oder Produkt-Service-Systeme jedweder Art. Indem Informationen entlang des Produktlebenszyklus dezentral und unveränderlich gespeichert werden, ist ein Höchstmaß an Transparenz gewährleistet. Zudem ist die Blockchain Basis einer sicheren und effizienten Methode zur Zahlungsabwicklung (z. B. „smart contracts“). Im Zusammenhang mit Rückhol- oder Produkt-Service-Systemen lassen sich zahlreiche R-Strategien umsetzen wie Reuse, Rethink, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle) (Böhmecke-Schwafert et al. 2022; Magrini et al. 2021; Andersen und Jæger 2021; Upadhyay et al. 2021).

Digitale Plattform

„Eine digitale Plattform ist Intermediär in einem zweiseitigen bzw. mehrseitigen Markt (...). Die Plattform stellt eine offene Infrastruktur zur Verfügung und bestimmt die Regeln für den Austausch.“ (Lundborg und Gull 2019). Digitale Plattformen ermöglichen die Umsetzung von Strategien der Kreislaufwirtschaft in den Handlungsfeldern 1, 2 und 4.

HF 1: Im Sinne der zirkulären Produktentwicklung bieten sich Möglichkeiten im Bereich der Co-Creation. Dabei nutzen verschiedene Akteure (meist über Open-Source-Ansätze) digitale

Plattformen, um Ideen und Kompetenzen zu vernetzen und so Produkte im Sinne einer Circular Economy zu entwickeln (Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Modularität, Einsatz alternativer Materialien - Rethink, Reduce, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle) (Konietzko et al. 2019).

HF 2: Entlang von Lieferketten ermöglichen es digitale Plattformen, Akteure zu vernetzen (z. B. B2B – „Abfall“ eines Unternehmens als Produktionsmaterial eines anderen Unternehmens). Hierdurch ließe sich die Verschwendung von Materialien reduzieren (Reduce) und Materialien, welche sonst als Abfall (Abwertung) entsorgt würden, einem anderen (gleichwertigen) Zweck zuführen (Repurpose). Auch eine optimierte Vernetzung zwischen Herstellern und Verwertern ist denkbar.

HF 4: Durch eine verbesserte Informationstransparenz lassen sich im Bereich von Recycling und Recover Mehrwerte erzielen (Berg und Wilts 2019). Diese Funktionsweise stellt zudem die Basis für zirkuläre Geschäftsmodelle dar, indem Rückholssysteme inklusive einer Wiederaufbereitung über Plattformen organisiert werden. Je nach Art und Weise der Rückholung und Wiederaufbereitung lassen sich die Strategien Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle bedienen (Roséen 2019). Auch ermöglichen digitale Plattformen die Etablierung von „Sharing-Modellen“ (Rethink) (Schwanholz und Leibold 2020).

Digitaler Produktpass

Digitale Produktpässe haben eine besondere Relevanz, weil sie im Rahmen der neuen EU-Ökodesign-Verordnung verpflichtend eingeführt werden, um dabei zu helfen, nachhaltige und zirkuläre Produkte in Europa zur Normalität zu machen (vgl. Europäische Kommission 2024). Der digitale Produktpass ist ein Instrument zur Verfügungstellung von Informationen entlang des Produktlebenszyklus. Er enthält Daten zu allen relevanten Produktinformationen (Herkunft, Materialien, chemische Substanzen, Reparierbarkeit, Ersatzteile, Verwertung etc.) (BMUV o. J.). So wirkt der digitale Produktpass befähigend auf die vier definierten Handlungsfelder der Circular Economy.

Absolute Transparenz von der (1) zirkulären Produktentwicklung über (2) Lieferketten bis hin zur (3) Produktion ermöglicht den Einsatz nachhaltiger, kreislauffähiger Materialien bei einer optimierten und ressourcenschonenden Produktion (Adisorn et al. 2023). Darüber hinaus lassen sich perspektivisch Geschäftsmodelle im Sinne einer (4) Rückholung und Wiederaufbereitung entwickeln. Werden im Produktpass Informationen über die Nutzungsphase gespeichert, können Unternehmen nachhaltige Rückholssysteme aufbauen und entsprechend Produkte wiederaufbereiten. Die gesammelten Informationen ermöglichen zudem eine Optimierung des Produktes, da Informationen über defekte Teile etc. zur Verfügung stehen und somit bei vermehrtem Auftreten behoben werden können – was zu einer potenziellen Verlängerung der Produktnutzung (in der zukünftige Produktgeneration) führt. Zudem lassen sich über den digitalen Produktpass Informationen zum Umgang mit dem Produkt nach dessen Nutzungsende transportieren. So kann den Konsumierenden einfach aufgezeigt werden, welche Komponenten über (eventuelle) Rückholssysteme weiter im Kreis geführt und wie Komponenten korrekt getrennt, recycelt oder entsorgt werden (Jensen et al. 2023).

Die aufgeführten Potenziale entlang der vier Handlungsfelder werden über eine Reihe von R-Strategien nutzbar gemacht. Hierzu zählen Reduce (optimierter Einsatz von Ressourcen, Einsatz nachhaltiger Ressourcen), Reuse, Refurbish, Remanufacture (Produktinformationen als Basis zur Entscheidungsfindung hinsichtlich Rückholung und Wiederaufbereitung), Repair (Reparaturinformationen im Produktpass erhöhen Nutzungs- und Lebensdauer des Produktes), Recycling, Recover (optimale Entscheidungsgrundlage hinsichtlich Recycling- und Verwertungsverfahren) (Götz et al. 2022).

Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge sind virtuelle Klone realer Produkte, Anlagen oder Prozesse. Über Sensoren lassen sich die virtuellen Klone (bzw. digitalen Zwillinge) mit dem realen Pendant vernetzen (Kuehn 2018).

HF 1: Digitale Zwillinge ermöglichen eine prognostische Produktentwicklung im Sinne der Circular Economy (z. B. Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Modularität, Erweiterbarkeit). Die Simulation von Nutzungsparametern ermöglicht etwa Rückschlüsse auf das Produktverhalten und die mögliche Nutzungsdauer unter den jeweiligen Betriebsparametern. So können Optimierungspotenziale bereits in

der Produktentwicklungsphase identifiziert und umgesetzt werden (Preut et al. 2021, Rocca et al. 2020, Kristoffersen et al. 2020).

HF 3: Der digitale Zwilling ermöglicht die Erfassung des aktuellen Zustandes (Reduce und Repair im Sinne einer ressourceneffizienten Produktion und Instandhaltung) als auch die Simulation zukünftiger Veränderungen in kontrollierter digitaler Umgebung (angepasste Betriebsparameter, Einsatz alternativer Materialien etc. - Reduce) (Kuehn 2018, Singh et al. 2018).

HF 4: Ein Nebeneffekt des Einsatzes digitaler Zwillinge ist die Erfassung von Daten entlang des Lebenszyklus, wodurch sich zum Ende der Nutzungsphase nachhaltige Entscheidungen hinsichtlich des weiteren Vorgehens treffen lassen (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle im Sinne einer Rückholung und Wiederaufbereitung) (Zhang et al. 2019). Darüber hinaus bieten sich gerade im B2B-Bereich die Umsetzung von Produkt-Service-Systemen im Sinne einer zustandsorientierten und vorhersagenden Fernwartung an (Preut et al. 2021).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Technologie der digitalen Zwillinge als Enabler der Handlungsfelder 1, 3 und 4 auftritt. Als relevante R-Strategien konnten Repair, Reuse, Repair, Remanufacture, Refurbish, Reduce, Repurpose identifiziert werden.

Internet of Things (IoT)

Der Literatur nach ist das Internet of Things (IoT) eine der zentralen digitalen Technologien zur Unterstützung bzw. Ermöglichung der Circular Economy. Ihr Mehrwert liegt vor allem in der Möglichkeit, große Datenmengen zu erfassen und über Analysen (siehe Big-Data-Analyse) sowie Vorhersagen greifbar zu machen (Magrini et al. 2021). Beim Internet of Things handelt es sich um mit Sensorik ausgestattete physische Objekte (so genannte cyber-physikalische Systeme), die Netzwerke bilden. Über das Internet können diese Objekte miteinander kommunizieren und Informationen austauschen. Insbesondere für die Circular Economy liegt der Mehrwert darin, Daten entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu generieren (Bressanelli et al. 2022). Dadurch wirkt sich die IoT-Technologie auf alle vier Handlungsfelder der Circular Economy aus.

HF 1: Eine zirkuläre Produktentwicklung wird möglich, indem die verfügbaren Daten genutzt werden, um Produkte systematisch zirkulär zu gestalten (Langlebigkeit, Reparierbarkeit etc.).

HF 2: Lieferketten lassen sich mittels IoT-Technologie im Sinne einer zirkulären Wertschöpfung optimieren, indem Daten entlang der gesamten Lieferkette zusammengeführt und ausgewertet werden. Potenziale liegen unter anderem in einer lückenlos nachvollziehbaren Lieferkette (Vermeidung von Verschwendung besonders in der Lebensmittelindustrie - Reduce), einer Just-in-time-Belieferung von Unternehmen zur Reduzierung von Lagerbeständen und Vermeidung von Überproduktion - Reduce), einer optimierten Routenplanung (Machine-to-Infrastructure-Kommunikation – Reduce). Darüber hinaus liefern intelligente und nachhaltige Lieferketten die Basis für Rückholssysteme (s. u.) (Rejeb et al. 2020).

HF 3: Im Sinne einer ressourceneffizienten Produktion ermöglicht es die IoT-Technologie, Ressourcenverschwendungen zu minimieren und Instandhaltungsprozesse zu optimieren (Reduce, Repair) (Bressanelli et al. 2018).

RFID-Technologie

RFID-Technologie (Radio-Frequency Identification) bietet die Möglichkeit, Objekte kontaktlos und in Echtzeit zu identifizieren und (kleine) Datensätze auszutauschen (Condemi et al. 2019). RFID-Systeme bestehen aus einem RFID-Tag, einem RFID-Lesegerät und einem IT-Backend-System (Gaukler und Seifert 2007). Grundsätzlich lassen sich für die RFID-Technologien Potenziale in allen vier Handlungsfeldern erkennen.

HF 1: Das Erfassen und die Verfügbarkeit von Daten sind Basis einer zirkulären Produktentwicklung (s. o.).

HF 2: Gleiches gilt für die Gestaltung von Lieferketten. RFID ermöglicht ein Höchstmaß an Transparenz durch Automatisierung und Prozessnachvollziehbarkeit in Echtzeit (Track and Trace).

HF 3: Im Sinne einer ressourceneffizienten Produktion bringt die RFID-Technologie Vorteile bei der Gestaltung von Produktions- und Instandhaltungsprozessen (Zustandsüberwachung etc.) mit sich, wodurch Material- und Energieverschwendungen deutlich reduziert werden können (Reduce, Repair) (Rüdiger 2016) (Pech et al. 2021).

HF 4: Darüber hinaus ermöglicht die RFID-Technologie, als unterstützende Technologie einer übergeordneten IoT-Anwendung, die Umsetzung von Rückholssystemen (Reduce, Reuse, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle) (Rejeb et al. 2020).

Abschließend kann festgehalten werden, dass alle Technologien als Enabler der Circular Economy auftreten. In der Praxis sind Technologien wie RFID, IoT und Big-Data-Analysen so eng miteinander verbunden, dass die Grenzen zwischen ihnen verschwimmen.

3.2. Umsetzung in NRW

Eine nicht repräsentative Onlinerecherche zu Anwendungsbeispielen in der Unternehmenspraxis aus NRW unter Nutzung der entwickelten Kategorisierung zeigte, dass die untersuchten Technologie-/Handlungsfeld-Kombinationen auch in der Praxis Anwendung finden. Für alle digitalen Technologien konnten praktische Umsetzungen in zumindest zwei der vier Handlungsfelder der Circular Economy identifiziert werden, allerdings scheinen nicht alle digitalen Technologien im gleichen Maße genutzt zu werden. So konnten Anwendungen im Bereich der additiven Fertigung und der Blockchain-Technologie lediglich in jeweils einem Unternehmen identifiziert werden. Am mit Abstand häufigsten war der Einsatz digitaler Plattformen zu finden. Für die Technologien Big Data und Sensorik ließen sich darüber hinaus Anwendungsbeispiele für alle vier Handlungsfelder ausmachen.

Auffällig war zudem, dass Digitalisierung und Circular Economy in der Außendarstellung selten in Verbindung gebracht werden. Während die positiven Effekte von Circular-Economy-Maßnahmen gerne präsentiert werden, scheint dies nicht für dabei genutzte Digitalisierungsmaßnahmen zu gelten. Das erschwert einerseits die Suche nach Praxisbeispielen für digitale Circular Economy und lässt andererseits vermuten, dass mehr Unternehmen hier aktiv sind, als es die Suchtreffer suggerieren.

3.3. Reifegradmodell Digitale Circular Economy

Aufgrund der Komplexität des Themas wurde entschieden, die beiden Transformationsthemen Digitalisierung und Circular Economy in mehreren Schritten zu untersuchen bzw. aus unterschiedlichen Perspektiven miteinander in Verbindung zu bringen. Das Instrumentenset wurde auf Basis der Erkenntnisse über digitale Technologien aus der Literaturrecherche sowie dem Fragenkatalog der „Circularity Matrix“ des Prosperkollegs entwickelt: Im ersten Schritt wird der Status quo digitaler Lösungen im Unternehmen mit einem Reifegradmodell ermittelt (Tabelle 1). Sind bereits digitale Technologien zur Förderung von Maßnahmen für Circular Economy im Einsatz, werden diese erfasst (Tabelle 2). Im dritten Schritt werden nun die Handlungsfelder der Circular Economy ins Zentrum gerückt und davon ausgehend der Status und die Potenziale unterstützender digitaler Anwendungen anhand gezielter Fragestellungen erhoben (Tabelle 3).

Auf diese Weise lassen sich in Unternehmensgesprächen qualitative Erkenntnisse über den aktuellen Stand gewinnen, gleichzeitig können Unternehmensvertreter:innen in den einzelnen Bereichen Optimierungspotenziale aus der jeweils nächst höheren Stufe ableiten.

3.3.1. Reifegrad Digitalisierung

Das Reifegradmodell für die Digitalisierung umfasst 21 Unternehmensbereiche, die sich fünf Organisationseinheiten zuordnen lassen:

- (1) Geschäftsmodelle, Strategie, Forschung & Entwicklung
- (2) Verwaltung, z. B. Controlling, Personal, IT, Einkauf
- (3) Managementsysteme für Qualität, Umwelt und Energie

- (4) Produktion, Technik und interne Logistik
- (5) Supply Chain und Vertrieb

Das Modell definiert für jede Organisationseinheit fünf Reifegradstufen, um den Grad der Digitalisierung zu bestimmen. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, das Modell entlang spezifischer digitaler Technologien zu gliedern, um einen offenen Suchraum zu schaffen. Für ein besseres gemeinsames Verständnis sind jedoch teilweise typische Technologien benannt. Die sich hieraus ergebende Matrix diene als Leitfaden in den Unternehmensgesprächen der Studie. In Tabelle 1 sind exemplarisch die fünf Reifegradstufen für ausgewählte Unternehmensbereiche aus vier der fünf Organisationseinheiten gezeigt.

Tabelle 1: Beispiele für die fünf Reifegradstufen für Digitalisierung in versch. Unternehmensbereichen

		Organisationseinheit / Bereich			
Organisationseinheit		Geschäftsmodelle, Strategie, F & E	Managementsysteme	Produktion, Technik und interne Logistik	Supply Chain und Vertrieb
Bereich		Produktentwicklung	Qualitätsmanagement	Produktionssteuerung und -überwachung	Lieferantenbeziehungen
Reifegradstufen	1	klassische Produktentwicklung	manuell/ papierbasiert	keine Datennutzung	Lineare Kommunikation
	2	teildigitalisiert, Insellösung einzelner Abteilungen	teildigitalisiert, z. B. Einsatz von Dokumentenmanagementsystemen (keine Analysen)	Datennutzung vornehmlich zur Dokumentation	Vernetzung mit Lieferanten und Wertschöpfungspartnern
	3	digitalisierte Verknüpfung aller beteiligten Akteure im Unternehmen (inkl. Einsatz von digitalen Assistenzsystemen bspw. AR)	Einsatz von digitalisierten Tools des Datenmanagements und der Datenanalyse	Datennutzung zur Prozessüberwachung (z. B. MDE-Systeme)	Personalisierung und Individualisierung der Lieferantenkommunikation
	4	Produktentwicklung/-simulation unter Einsatz digitaler Technologien (z. B. 3D-Druck, digitaler Zwilling)	Vorausschauendes Qualitätsmanagement auf Basis von digital vernetzten Systemen, Big Data etc.	Datennutzung zur Prozesssteuerung (Vernetzung von Produktionsanlagen)	Lieferantendaten und Echtzeitdaten über den gesamten Ablauf sind zusammengeführt
	5	Vernetzung interner und externer Stakeholder (Co-Creation), Betrachtung des gesamten PLC unter Einsatz von KI, Smart Data etc.	autonomes Qualitätsmanagement auf Basis von IoT-Technologien (z. B. M2M-Kommunikation, Smart Data)	autonome Überwachung und Steuerung von Produktionsprozessen (Smart Factory)	Ableitung von Beschaffungs- und Produktionsstrategien aus Echtzeitdaten und Lieferantendaten

Aus den ermittelten Reifegradstufen lassen sich Innovations- und Handlungsfelder ableiten für sowohl

- einzelbetriebliche Maßnahmen zur Verbesserung der Digitalisierung, wie die Anwendung einer Predictive Maintenance oder die autonome Überwachung und Steuerung von Produktionsprozessen, als auch
- kooperative Maßnahmen zur Verbesserung der Digitalisierung in Wertschöpfungsketten oder -netzwerken, wie die Implementierung digital vernetzter Lösungen in der Kunden- oder Lieferantenkommunikation.

In einem zweiten Schritt werden - sofern im Unternehmen eingesetzt - spezifische digitale Technologien erfasst, die sich den vier Handlungsfeldern der Circular Economy zuordnen lassen, d. h. diese unterstützen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Auszug aus dem Reifegradmodell – Zuordnung von digitalen Technologien zu Handlungsfeldern der Circular Economy

	Auswirkungen auf Circular Economy			
Bereich	Zirkuläre Produktentwicklung	Lieferketten und Einkauf kreislauffähiger Materialien	Ressourceneffiziente Produktion	Rückholung und Wiederverwertung & Produkt Service Systeme
Geschäftsmodell				
Digitalisierungsstrategie				
Produktentwicklung				

3.3.2. Fragenkatalog Circular Economy

Der *Fragenkatalog Circular Economy* dient der vertiefenden Analyse nach der Anwendung des Reifegradmodells und der Erfassung von Potenzialen der Circular Economy im Unternehmen mit Fokus auf den Einsatz digitaler Technologien. Er gliedert sich entlang der vier Handlungsfelder (siehe 3.1.1.). Für den Zweck der Studie wurden ausgewählte Fragen aus dem bereits in der Praxis erprobten Tool „Circularity Matrix“ des Prosperkollegs, übernommen und um den Aspekt „Digitalisierung“ ergänzt (Hermandi et al. 2022).

Tabelle 3: Auszug aus dem Fragenkatalog Circular Economy

Fragen zum Handlungsfeld	Heute	in 3 Jahren	Welche digitalen Technologien werden konkret eingesetzt?	Welche digitalen Technologien sind zukünftig denkbar?
Zirkuläre Produktentwicklung				
Ist Ihr Produkt systematisch ressourcenschonend gestaltet, sodass in der Produktion möglichst wenig Material verbraucht wird und nutzen Sie hierzu digitale Technologien?				
Haben Sie hinsichtlich der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen und dem Einsatz digitaler Technologien im Produktentwicklungsprozess bereits den Großteil der Potenziale ausgeschöpft?				
Nutzen Sie digitale Technologien zur Gestaltung eines möglichst langlebigen, reparierbaren, nachrüstbaren und/oder recyclebaren Produktes?				
...				
Lieferketten und Einkauf kreislauffähiger Materialien				
Sind Ihnen die Lieferketten (sowohl beim Einkauf als auch beim Verkauf) durchgängig bekannt? Welche digitalen Hilfsmittel kommen hierbei zum Einsatz?				
Erfassen und bewerten Sie die Gefährdungen durch den Einsatz beschaffungskritischer Ressourcen mit Hilfe digitaler Technologien (z. B. über entsprechende Kritikalitätsanalysen)?				
...				

Neben der Analyse des Status quo ermöglicht der Fragenkatalog auch die Erfassung von anvisierten Entwicklungspotenzialen in einem Zeitraum von drei Jahren und darüber hinaus („zukünftig denkbare Technologien“).

Die Kombination beider Instrumente bietet die Chance, ein umfangreiches qualitatives Bild zur derzeitigen und geplanten Situation in Unternehmen hinsichtlich Digitalisierung und Circular Economy zu erfassen.

3.4. Unternehmensbefragung

3.4.1. Teilnehmende Unternehmen

Bei der Auswahl der Unternehmen sollte darauf geachtet, dass sie ein breites Spektrum an Branchen und Unternehmensgrößen abdecken, um eine Vielzahl von Ansätzen und Praktiken von zirkulären Strategien zu erfassen und mit dem digitalen Reifegrad in Beziehung setzen zu können. Im Rahmen der Studie wurden ausschließlich Unternehmen angesprochen, die bereits zirkuläre Strategien in ihrem Unternehmen umgesetzt haben. Insofern ist die Unternehmensauswahl in Richtung Circular Economy Umsetzung verzerrt.

Insgesamt erklärten sich sieben Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes und ein Serviceanbieter für Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge für ein Interview bereit. Bei den produzierenden Unternehmen handelt es sich um zwei Hersteller von Konsumgütern für Seifen und Tiernahrung, um zwei Produzenten von Industriekomponenten wie Metallschläuchen und Kunststoffrohren sowie einen Schraubenhersteller, einen Produzenten von Papierverpackungen und ein Unternehmen aus der Chemiebranche. Die Auswahl spiegelt auch die geografische Vielfalt NRW wider, mit vier Unternehmen aus dem Ruhrgebiet (Essen, Dinslaken, Datteln, Ennepetal), zwei vom Niederrhein (Emmerich,

Hünxe), eines aus Ost-Westfalen-Lippe (Bielefeld) und eines aus dem Münsterland (Südlohn). Die Bandbreite der Unternehmensgrößen reicht von 50 bis 630 Mitarbeitenden.

3.4.2. Digitaler Reifegrad in einzelnen unternehmerischen Feldern

Mithilfe der oben beschriebenen Instrumente wurden Vertreter:innen der teilnehmenden Unternehmen in Präsenzterminen von zwei bis drei Stunden befragt. Die Erfassung des digitalen Reifegrads der Unternehmen (vgl. Tabelle 1) ergab, dass dieser in den einzelnen Bereichen der fünf unternehmerischen Felder insgesamt zwischen Stufe 1 und 4 variiert. Keines der Unternehmen ordnete sich in einem Bereich in der höchsten Stufe 5 ein. Am häufigsten verorteten sich die Teilnehmenden in den mittleren Stufen. Die seltene Zuordnung zu Stufe 1 (insg. 8 Nennungen) verdeutlicht umgekehrt, dass Digitalisierung in der Regel mindestens im Ansatz umgesetzt ist.

(1) Unternehmensstrategie, Forschung & Entwicklung

	Anzahl der Nennungen pro Reifegradstufe				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Geschäftsmodell	3	0	4	1	0
Digitalisierungsstrategie	1	4	3	0	0
Produktentwicklung	0	4	0	3	0

Die Digitalisierung bei Geschäftsmodell und Digitalisierungsstrategie variiert zwischen Stufe 1 und 4. Die Hälfte der befragten Unternehmen bietet digitale Informationsdienstleistungen und digitale Zusatzservices (Stufe 3), ein Unternehmen nutzt darüber hinaus Webanalytik und Smart Data für Serviceinnovationen (Stufe 4). Drei Unternehmen verfolgen ein „klassisches Geschäftsmodell“ ohne digitale Services. Fast alle verfügen über Ansätze einer Digitalisierungsstrategie (Stufe 2) oder haben mit einer systematischen Planung begonnen (Stufe 3). Jedoch beobachtet keines der Unternehmen neue Technologien und Kundenanforderungen aktiv, um daraus z. B. eine Konsequenzanalyse zu erstellen (Stufe 4), oder besitzt eine integrierte Digitalisierungsstrategie mit Erfolgsindikatoren.

Anders sieht es bei der Produktentwicklung aus, wo drei Unternehmen bereits digitale Technologien wie 3D-Druck oder digitale Zwillinge verwenden. Alle Unternehmen mit eigener Produktentwicklung verwenden mindestens in einzelnen Abteilungen digitale Technologien (Stufe 2).

(2) Verwaltung

	Anzahl der Nennungen pro Reifegradstufe				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
IT-Infrastruktur	0	1	3	4	0
Administration	0	2	4	1	0
Auftragsmanagement	0	3	3	2	0
Einkauf	0	2	5	1	0
Personalmanagement	0	2	4	2	0

Beim Einsatz digitaler Technologien zur Unterstützung von Verwaltungsaufgaben liegen die Nennungen der Befragten auf den Stufen 2 bis 4 breit verteilt. Bezüglich der IT-Infrastruktur verfügen die Hälfte der Unternehmen über eine durchgängige interne und externe digitale Vernetzung, z. B. über Cloud-Lösungen (Stufe 4). Zur Administration setzt ein Großteil neben den MS Office-Lösungen auch vollintegrierte ERP-/Transportmanagement-Systeme ein (Stufe 3). Der Einkauf läuft ebenfalls überwiegend digitalisiert, z. B. über ERP-Systeme (Stufe 3).

(3) Managementsysteme

	Anzahl der Nennungen pro Reifegradstufe				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Qualitätsmanagement	1	3	3	0	0
Energiemanagementsystem	0	1	4	0	0
Umweltmanagementsystem	0	4	1	0	0

Beim Einsatz von Managementsystemen fällt auf, dass es hier auch in Stufe 4 keine einzige Nennung gibt. Im Rahmen des Qualitätsmanagements setzen die Unternehmen (teil-)digitalisierte Lösungen für Datenmanagement und Datenanalyse ein (Stufen 2 und 3). Im Energiemanagement dominiert der Einsatz von digitalisierten Tools des Datenmanagements und der Datenanalyse (Stufe 3), während die meisten Unternehmen beim Umweltmanagement auf teildigitalisierte Lösungen, etwa Dokumentenmanagementsysteme, setzen (Stufe 2).

(4) Produktion, Technik und interne Logistik

	Anzahl der Nennungen pro Reifegradstufe				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Produktionsplanung	0	3	4	1	0
Produktionssteuerung und -überwachung	0	2	5	0	0
Instandhaltung	0	3	4	0	0
Kommissionierung Lager-/ Bestandsmanagement	1	2	3	2	0

Für die Produktionsplanung setzen vier der befragten Unternehmen auf automatisierte Anpassung und Optimierung der Produktionsplanung auf Basis von Echtzeitdaten (Stufe 4), entsprechend nutzt auch die Hälfte Daten aus vernetzten Produktionsanlagen zur Prozesssteuerung. Zur Instandhaltung kommen einfache Tools wie Excel-Tabellen (Stufe 2) oder professionelle Sensorik zur Zustandsüberwachung zum Einsatz (Stufe 3). Beim Lagermanagement variiert die Bandbreite zwischen manuell/papierbasiert (Stufe 1) und digitaler Lagerlogistik und Lagerverwaltung (Stufe 4).

(5) Supply Chain und Vertrieb

	Anzahl der Nennungen pro Reifegradstufe				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Kooperation in der Wertschöpfungskette	0	5	2	1	0
Herkunftsverfolgung (Sendungsverfolgung)	0	3	2	0	0
Lieferantenbeziehungen	1	3	3	1	0
Kundenbeziehungen	1	3	3	0	0

In der Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen der Wertschöpfungskette dominiert die Nutzung digitaler Insellösungen (Stufe 2), ein Studienteilnehmer verwendet umfassende Netzwerke mit digitalem Datenaustausch und -zugriff (Stufe 4). Bei den Beziehungen zu Lieferanten wie zu Kunden setzen jeweils drei Unternehmen auf Personalisierung und Individualisierung in der Kommunikation.

3.4.3. Ausgangslage: Strategien der Circular Economy

Den Auswahlkriterien der Studie entsprechend war allen teilnehmenden Unternehmen das Konzept der Circular Economy bekannt, während die Bandbreite der zielgerichteten Implementierung von Strategien recht groß war. Zieht man die Handlungsfelder der Circular Economy als Kategorisierungsrahmen heran (vgl. Tabelle 3), lässt sich die Gruppe der befragten Unternehmen folgendermaßen charakterisieren:

Beim *Produktdesign* hängt es stark vom Produkt ab, ob bzw. welche Strategien zum Einsatz kommen. Bei langlebigen Produkten wie Trockenseifenspendern, E-Ladeinfrastruktur oder Schlauchsystemen werden Haltbarkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit sowie der Einsatz von nachwachsenden bzw. abbaubaren Rohstoffen verfolgt, während zirkuläre Produktentwicklung bei biobasierten Verbrauchsgütern wie Tierfutter oder Chemikalien keine Rolle spielen. Bei der Verpackung hingegen – obwohl schnelllebiges Verbrauchsprodukt – werden Strategien wie Designoptimierung zur Vermeidung von Ausschüssen und der Einsatz von Recyclingmaterial bzw. nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt.

Bezüglich des Handlungsfelds *Lieferkette und Einkauf* berichteten drei der acht teilnehmenden Unternehmen, dass sie beim Einkauf auf Regionalität achten. Weitere Maßnahmen kreislauforientierter Beschaffung wurden nicht genannt.

Ein Schwerpunkt bereits umgesetzter Strategien und Maßnahmen liegt im Bereich der *ressourceneffizienten Produktion*. Dies ist erwartbar, da Effizienzgewinne meist auch mit Kosteneinsparungen einhergehen und daher im Fokus der meisten Unternehmen stehen. Material- und Energieeinsparungen wurden von einem Teil der Unternehmen jedoch bewusst mit den selbst gesteckten Nachhaltigkeitszielen verknüpft. Die genannten Maßnahmen reichen von der Energierückgewinnung durch Abwärme über den Einsatz von Umwelt- und Energiemanagementsystemen und die gezielte Energie- und Materialeinsparung im Produktionsprozess bis zur Reduktion von Abfallmengen und die Wiederverwertung von Ausschüssen.

Im Feld *Rückführung und Wiederaufbereitung & Produkt-Service-Systeme* können zwei Studienteilnehmer zum Zeitpunkt der Befragung Aktivitäten nennen: Für seine Trockenseifenspender bietet der Hersteller Reparaturservices, Ersatzteile sowie Rücknahmegarantien an. Der Hersteller der Elektroladeinfrastruktur bietet die Rücknahme und Wiederaufbereitung der kompletten Ladestation inkl. aller Komponenten an.

3.4.4. Digitalisierung als Enabler von Circular Economy – Status quo

Der Einsatz digitaler Technologien als Enabler für Circular Economy (vgl. die Tabellen 2 und 3) lässt sich bei einem Teil der befragten Unternehmen in Ansätzen erkennen. Mehrfach genannt wurde die Erfassung und Auswertung von Produktions- und Verbrauchsdaten, teilweise mittels Sensorik. Ziele sind die Optimierung von Ressourcenverbräuchen und die Senkung von Abfallmengen ebenso wie die Überwachung und vorausschauende Instandhaltung von Anlagen. Dem Produzenten von Oleochemikalien gelingt es etwa durch ein Überwachungssystem, anormale Zustände von Pumpen frühzeitig zu erkennen, durch vorbeugende Maßnahmen deren Lebensdauer zu verlängern und Stillstände der damit verbundenen Anlagen zu vermeiden.

Auch die E-Ladestationen des entsprechenden Anbieters werden mit Sensoren in Echtzeit überwacht, um Ausfälle vorherzusagen und schnell beheben zu können. Beim Trockenseifenhersteller ist Sensorik zum Monitoring des Füllstandes in Seifenspendern für das geplante Geschäftsmodell „Soap-as-a-Service“ vorgesehen. Diese Beispiele illustrieren zugleich, dass digitale Technologien eine entscheidende Rolle zur Umsetzung zirkulärer Geschäftsmodelle spielen, insbesondere bei Produkt-Service-Systemen. Einem der beteiligten Unternehmen ist es aufgrund fehlender praktikabler Sensorik-Lösungen bislang nicht gelungen, ein Rückholssystem für seine Produkte zu organisieren, obwohl diese Strategie als erfolversprechend identifiziert worden war.

Zwei der Studienteilnehmer setzen digitale Zwillinge ein. Im einen Fall handelt es sich beim digitalen Produktzwillings um einen Zusatzservice für Kunden, um den optimalen Einsatz des Produkts

(Schrauben) in Bauprojekten planen zu können. Im anderen Fall wird ein digitales Abbild der Produktionsanlagen im Prozessleitsystem eingesetzt.

Eines der befragten Unternehmen nutzt 3D-Druck (additive Fertigung) im Rahmen der Produktentwicklung.

3.4.5. Digitalisierung als Enabler von Circular Economy – Potenziale

Befragt nach den Potenzialen der Digitalisierung (vgl. Tabelle 3), die zur Unterstützung zirkulärer Strategien für die Zukunft gesehen werden, nannten die Studienteilnehmer:innen folgende Technologien:

- Additive Fertigung / 3D-Druck zur Herstellung von Ersatzteilen
- Big-Data-Analysen zur Optimierung von Produktions- und Instandhaltungsprozessen
- Sensorik zur Produktionssteuerung und Zustandsüberwachung (Instandhaltung 4.0)
- Digitale Assistenzsysteme in Form von Virtual oder Augmented Reality zur Verkaufsunterstützung, zur Fehlervermeidung und Effizienzsteigerung in Produktionsprozessen sowie im Lagerbereich
- Digitaler Zwilling in Kombination mit Überwachungssystemen
- Digitaler Produktpass

Diese Angaben bauen auf dem Status quo auf und zeigen, dass bereits eingesetzte Technologien weitergeführt werden sollen bzw. eine Orientierung an der nächsthöheren Stufe des digitalen Reifegradmodells zu beobachten ist. Ein besonderes Augenmerk der Studie lag auf den Einschätzungen der Unternehmen zum digitalen Produktpass. Nach Erläuterungen des Konzepts und auf Nachfrage erklärten fast alle Teilnehmenden, dass diese Anwendung für sie mittelfristig interessant sei, etwa um den zunehmenden Informations- und Transparenzanforderungen von Seiten der Kunden begegnen zu können. Als Treiber sah sich hier allerdings keines der Unternehmen.

Abschließend lässt sich zu den Ergebnissen der Unternehmensbefragung sagen, dass die Konzepte der Digitalisierung und Circular Economy den Unternehmen zwar bekannt sind, sie jedoch in der Praxis selten miteinander verknüpft werden. Potenziale für eine "digitale Circular Economy" lassen sich in allen Beteiligten identifizieren, wobei bereits umgesetzte Maßnahmen nur vereinzelt festgestellt werden konnten.

Typische Hindernisse bei der Umsetzung sind laut Befragung ein mangelndes Verständnis der Digitalisierungspotenziale, fehlendes systematisches Vorgehen in Bezug auf die Digitalisierung sowie begrenzte personelle, zeitliche und finanzielle Ressourcen. Es besteht Bedarf an Unterstützung in Form von themenspezifischen regionalen Netzwerken, praxisorientierten Anwendungsbeispielen und einem einfachen Zugang zu Unterstützungs- und Fördermöglichkeiten.

3.5. Fachgespräch mit Digitalisierungsexpert:innen

Um die Perspektive des produzierenden Gewerbes zu ergänzen, wurde im Mai 2023 ein Fachgespräch mit drei Digitalisierungsexpert:innen durchgeführt. Vertreten waren ein Software-Hersteller (Instandhaltungssoftware für Industrie und Wirtschaft, Facility Management, Medizin und Pflege sowie Ver- und Entsorger), ein IT-Berater (für die Branchen Nahrungsmittel, Getränke, Chemie, Pharma und Kosmetik sowie Handel) und eine Technologiemanagerin aus dem Bereich Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft (Science-to-Business-Center im Bereich der industriellen Automation). Alle drei pflegen Kunden- oder Partner-Beziehungen zu produzierenden Unternehmen und können daher über deren Bedarfe und Herausforderungen in Bezug auf die Digitalisierung berichten. Das Gespräch wurde von einem vorher entwickelten Fragenkatalog strukturiert und dauerte ca. zwei Stunden.

Die Ergebnisse dieses qualitativen und nicht repräsentativen Fachgesprächs werden im Folgenden zusammengefasst.

3.5.1. Trends, Treiber und Herausforderungen der Digitalisierung

Auf die Frage nach Trends der digitalen Transformation und aktuell besonders nachgefragten digitalen Lösungen oder Technologien berichtete ein Experte, dass er eine risikogetriebene Nachfrage im Bereich der IT-Sicherheit beobachte. Während früher hier Lösungen aus einer Hand gefragt gewesen seien, löse sich dies zugunsten von Spezialisierung auf.

Als ein weiterer Grund für Digitalisierung wird die Steigerung von Effizienz benannt. Diese wird durch Prozessoptimierung in der Produktion, u. a. durch den Einsatz von maschinellem Lernen bzw. KI erreicht. Als Beispiel wurde ein Projekt zur Identifikation und Vermeidung von Druckluft-Leckagen mittels KI genannt. Effizienzgewinne verspricht auch die Sensorik in der Produktion. Das „Nachrüsten“ alter Anlagen mit Sensorik ermögliche hier vor allem KMU eine verhältnismäßig günstige Lösung. Nachhaltigkeit – sowohl, was die längere Lebensdauer von Maschinen und die gesteigerte Transparenz durch die Sensordaten angeht – sei hier „ein interessanter Nebeneffekt“.

Grundsätzlich nehme die Bedeutung von Datenerfassung und -auswertung zu, angetrieben durch die von Gesetzgeber und Kund:innen geforderte Transparenz über Nachhaltigkeitsthemen. In diesem Kontext spiele der Einsatz von Blockchain-Technologien und der digitale Produktpass eine zunehmende Rolle.

Als zentrale Herausforderungen der Digitalisierung im Unternehmen sah die Expert:innen-Runde folgende Aspekte an: fehlende und unklare Zuständigkeiten (insbesondere bei KMU), die Komplexität der Anforderungen durch die Verbindung von technischer, organisatorischer und strategischer Ebene, fehlendes Verständnis für Digitalisierung, eine fehlende Digitalisierungsstrategie, die Komplexität der bestehenden IT-Landschaft im Unternehmen, mangelnder Veränderungsdruck, Zeitmangel sowie fehlende finanzielle Ressourcen.

3.5.2. Rolle von Circular Economy und Nachhaltigkeit

Auf die Frage, welche Rolle Circular Economy bzw. Nachhaltigkeit für die Unternehmenskunden spielt, zeigte sich die unterschiedliche Ausrichtung der jeweiligen Kundengruppen der Expert:innen. Während Nachhaltigkeit für besonders innovative Unternehmen quasi eine Selbstverständlichkeit ist, ist sie für andere in erster Linie durch Compliance-Anforderungen getrieben oder noch gar kein Thema – insbesondere, wenn die Ansprechpartner nicht aus der Geschäftsführung kommen.

Möglichkeiten, durch die eigenen IT-Produkte bzw. Dienstleistungen den Unternehmen dabei zu helfen, Circular-Economy-Potenziale erschließen, wurden vor allem in der Effizienzsteigerung, im Energiemanagement und im Datenmanagement für regulatorische Transparenz-Anforderungen zu Nachhaltigkeitsaspekten gesehen. Die Instandhaltungssoftware, die einer der Experten anbietet, helfe dabei, Anlagen effizienter und länger zu betreiben. Mit dem Begriff der „Circular Economy“ hatte der Anbieter diese Produktleistung selbst bislang allerdings nicht in Verbindung gebracht.

Mit Blick auf die eigene Organisation sehen die Expert:innen die Hebel zu verbesserter Nachhaltigkeit vor allem beim Energieverbrauch und den Reisetätigkeiten. Hier wurden Verbesserungsmaßnahmen wie neue Technologien zur Reduzierung des Stromverbrauchs der Rechenzentren, eine geplante Geothermieanlage und der Umstieg auf Remote-Beratung genannt.

3.5.3. Unterstützungsbedarfe

Der dritte Fragenblock drehte sich um benötigte Unterstützungsangebote. Die Expert:innen nannten vor allem Netzwerke und geeignete Partner, um sich selbst neue Themen – wie die Circular Economy – erschließen zu können.

Mit Blick auf die Unternehmenskunden und deren Bedarf an Hilfestellung für die doppelte Transformation zur Nachhaltigkeit und Digitalisierung wurden genannt: Netzwerke und Erfahrungsaustausch, Hilfe bei der Identifizierung und Beantragung geeigneter Fördermittel, Anwendungsbeispiele und Best Practices, einfache und praxisnahe Checklisten für Entscheider und Anwender, Unterstützung

bei der Vermittlung eines grundlegenden Verständnisses von Digitalisierung sowie „Erklär- und Lern-Nuggets“ zur Fortbildung.

3.6. Empfehlungen für die angewandte Forschung

Dass digitale Technologien bzw. die Digitalisierung im Allgemeinen als Enabler von Circular Economy betrachtet werden, konnte im Rahmen der Literaturanalyse (siehe Kap. 3.1.) bestätigt werden. Einflüsse der unterschiedlichen Technologien auf die Handlungsfelder der Circular Economy werden in der Literatur umfassend behandelt und beschrieben. Regelmäßig werden Praxisbeispiele angeführt, welche die Verknüpfung von Digitalisierung und Circular Economy belegen. Auffällig ist jedoch, dass diese Praxisbeispiele häufig nur einen marginalen Teil der wissenschaftlichen Arbeit ausmachen. Der Fokus liegt vielmehr auf dem theoretischen Beitrag, den digitale Technologien leisten können. Wie die praktische Umsetzung im Detail aussieht, wird hingegen kaum oder gar nicht behandelt (eventuell auch aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen).

Aus der Unternehmensbefragung (siehe Kap. 3.4.) ist zu entnehmen, dass Unternehmen die Themen Digitalisierung und Circular Economy nicht ganzheitlich systematisch betrachten. Trotz eines theoretischen Bewusstseins über Digitalisierungspotenziale zur Umsetzung unternehmensinterner Zirkularitäts- bzw. Nachhaltigkeitsbemühungen, scheitert die praktische Umsetzung häufig an fehlendem Wissen über die Verfügbarkeit und Vorteile einzelner Technologien sowie einer fehlenden Übersicht zu Umsetzungsmöglichkeiten.

Folgende „Defizite“ lassen sich aus den oben beschriebenen Erkenntnissen ableiten:

- Die Wissenschaft produziert Wissen, ohne Verwertungszusammenhänge bereitzustellen.
- Unternehmen fehlen die Transferkompetenzen und vor allem die Transferressourcen, um das bereitgestellte Wissen in der Praxis umzusetzen.

Vor diesem Hintergrund scheint der Fokus auf einen transformativen Forschungsansatz – also einer Forschung, welche nicht nur versucht Transformationsprozesse zu verstehen, sondern selbst zur Transformation beiträgt – zielführend. Im Zentrum eines solchen Ansatzes steht ein enger Austausch gesellschaftlicher Akteure, in diesem Fall vor allem von Unternehmen und der Wissenschaft, über das produzierte Wissen und deren praktische Anwendung. Ziel ist es, nicht nur zu informieren, sondern Veränderungsprozesse aktiv anzustoßen und zur Umsetzung beizutragen (Schneidewind 2018; Di Giulio und Defila 2018).

Je nach Erkenntnisinteresse und Praxiszugang lassen sich unterschiedliche „Zuschnitte“ für transformative Forschung zum Thema Digitalisierung als Enabler für Circular Economy verfolgen, zum Beispiel für

- einzelne Branchen bis hin zu Teil- oder Gesamtwertschöpfungsketten,
- spezifische Prozesse und Aktivitäten in Unternehmen (z. B. Produktentwicklung, Produktion, Geschäftsmodelle),
- spezifische digitale Technologien (z. B. Einsatz von Künstlicher Intelligenz, Einsatz von Blockchain-Technologien) sowie
- eine Kombination der oben genannten Themen.

Entsprechend können innovative Forschungs- und Demonstrationslabore oder gar -zentren eine wichtige Rolle spielen, in denen praxisnah erforscht und demonstriert wird, welche Anwendungsmöglichkeiten es von Digitalisierung für Circular Economy gibt. Das Prosperkolleg bzw. seine Partner verfolgen solche Ansätze bereits in Nachfolgeprojekten wie #digital.zirkulär.ruhr und Circular Performer Emscher-Lippe, die unter anderem Demonstrationslabore, kollektives Lernen und Co-Kreation von Ideen und Lösungen bis hin zu experimentellen Pilotstudien in den Mittelpunkt stellen.

3.7. Ableitungen für die strategische Beratung von Unternehmen

Die Unternehmensgespräche im Rahmen der Studie haben gezeigt, dass die teilnehmenden Unternehmen bereits einzelne Maßnahmen des Themenspektrums Digitalisierung und Circular Economy umgesetzt haben. Von einer systematischen Herangehensweise im Sinne einer „digitalen Circular Economy“ kann jedoch nicht gesprochen werden. Vielmehr handelt es sich um Einzelaktivitäten, die aus verschiedenen Gründen wie Prozessoptimierung, Marketingmaßnahmen, Einhaltung regulatorischer Vorgaben, Kostensenkung oder Umsetzung von Kundenanforderungen umgesetzt wurden.

Bevor ein Vorgehensmodell für eine systematische Beratung zu einer digitalen Circular Economy vorgestellt wird, sollen hier zunächst Erfolgsfaktoren für die Beratung benannt werden, die entweder bereits vorliegen oder zunächst gezielt geschaffen werden sollten, bevor es an die Umsetzung geht:

- Das Produkt- und Leistungsspektrum bietet grundsätzlich Ansatzpunkte für zirkuläre Wertschöpfung.
- Die Stellung in der Wertschöpfungskette „erlaubt“ Maßnahmen im Sinne einer digitalen Circular Economy (Charakteristika der Zuliefer- und Abnehmermärkte).
- Umweltschutz, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit sind keine neuen Themen für das Unternehmen.
- Es besteht ein hohes Interesse am Thema und das angestrebte Projekt wird von der Geschäftsleitung unterstützt.
- Es gibt einen oder mehrere Ansprechpartner, die für ein Projekt Zeit haben oder notwendige Ressourcen zur Verfügung bekommen.
- Daten zum Ressourcenverbrauch sind vorhanden oder können vom Unternehmen bereitgestellt werden.

Sind diese Faktoren vorhanden, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Aufgeschlossenheit gegenüber dem Themenkomplex der „digitalen Circular Economy“. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass ein systematisches Vorgehen seitens der beratenden Akteure zur Steigerung der „digitalen Circular Economy“ in Unternehmen zielführend ist.

Das Vorgehen besteht im Kern aus einem Workflow für den gesamten Prozess (siehe Abb. 2), in den das *Reifegradmodell Digitalisierung* und der *Fragenkatalog Circularity Economy* (siehe Kap. 3.3.) zur Bestimmung der Ist- und Soll-Situation hinsichtlich des Digitalisierungs- und Zirkularitätsgrades in Unternehmen integriert sind.

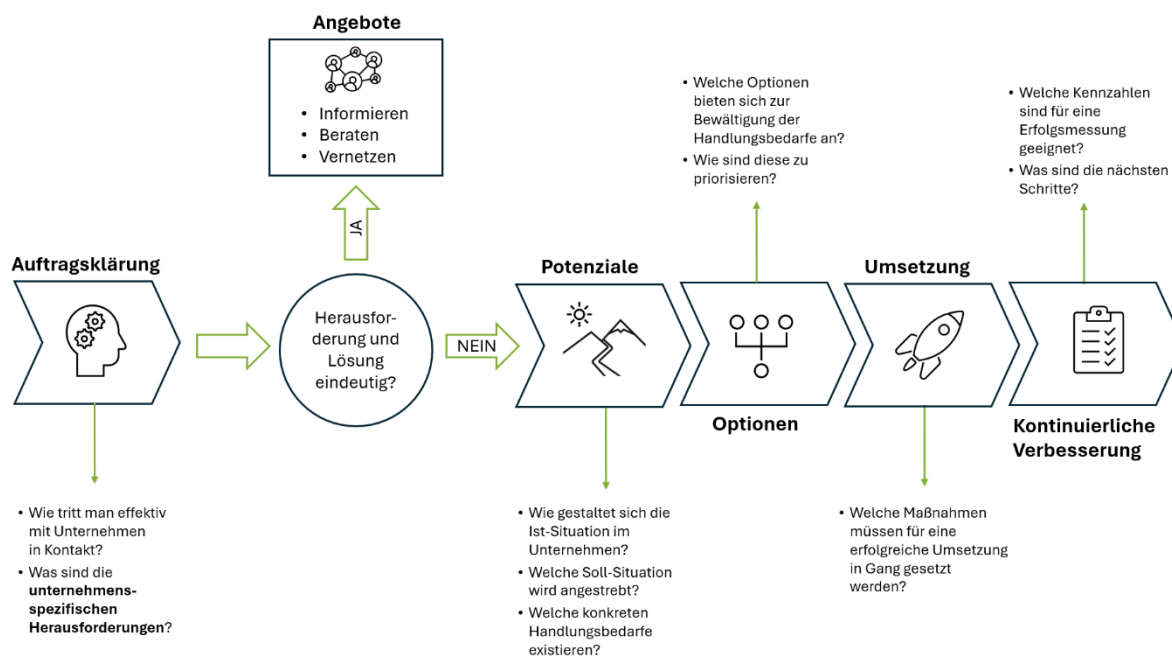


Abbildung 2: Workflow zur Unterstützung einer „digitalen Circular Economy“ in Unternehmen (eigene Darstellung).

Der erste wichtige Schritt ist die Auftragsklärung. Hier werden die Rahmenbedingungen und die Ziele des Beratungsprozesses festgelegt. Sind die unternehmensspezifischen Herausforderungen klar, können konkrete Angebote unterbreitet werden, bestehend aus

- Informationen zu Anwendungsbeispielen und Veröffentlichungen,
- einer Initialberatung
- oder der Vernetzung mit externen Fachpartnern (Berater:innen, Ingenieur:innen, Forschungseinrichtungen etc.).

Ist der Handlungsbedarf unklar, müssen Ansatzpunkte für eine digitale Circular Economy geprüft werden. Es geht im Kern darum, spezifische Handlungsbedarfe zu identifizieren und diese zu priorisieren. Mit dem *Reifegradmodell Digitalisierung* wurde ein Werkzeug geschaffen, welches hierzu ein systematisches Vorgehen liefert. Der *Fragenkatalog Circularity Economy* dient dazu, die gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen und auf den Themenbereich der Circular Economy anwendbar zu machen.

In einem moderierten Gespräch verorten sich die Unternehmensvertreter:innen in den vordefinierten Reifegradstufen. So werden der Status quo und zukünftige Potenziale für Verbesserungen systematisch erfasst. Eine Anwendung durch die Unternehmen – ohne externen Moderator – ist ohne weiteres möglich. Wichtig ist lediglich, dass das *Reifegradmodell* sowie der *Fragenkatalog Circularity Economy* in Form einer Gruppenarbeit ausgefüllt und diskutiert werden. Alternativ können die beiden Instrumente individuell ausgefüllt werden und die anschließende Diskussion und Priorisierung in einem gemeinsamen Workshop erfolgen.

Sind Handlungsbedarfe ermittelt und konkretisiert, müssen Umsetzungsoptionen erarbeitet und priorisiert werden. Anschließend beginnt die Umsetzungsphase. Nach der Umsetzungsphase müssen die erzielten Ergebnisse in einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess überführt werden. Zur Erfolgsmessung sollten Kennzahlen herangezogen werden. Nur so lassen sich notwendige Korrekturen und weiterführende Maßnahmen ableiten.

Der hier vorgeschlagene systematische Workflow und die einfach handhabbaren Instrumente bieten für jedes Unternehmen einen niedrighschweligen Einstieg in das Thema. Wichtig dabei ist: Es gibt nicht *die* Standardlösung. Die jeweiligen Herausforderungen, Rahmenbedingungen und Handlungsmöglichkeiten in den Unternehmen gilt es zu berücksichtigen.

4. Zusammenfassung & Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat sich mit der Frage auseinandergesetzt, wie digitale Technologien im Sinne der doppelten Transformation den Übergang zu einer Circular Economy unterstützen können. Neben der grundsätzlichen Beantwortung dieser Frage interessierte insbesondere, wo sich produzierende Unternehmen in NRW im Vergleich zum Stand der wissenschaftlichen Literatur verorten lassen. Die vorgestellte Studie versteht sich als exemplarische Annäherung an diese Fragestellung und verfolgte dementsprechend einen explorativen, qualitativen Forschungsansatz. Bereits damit zeichnet sich ein recht klares Bild ab, das Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen in NRW und darüber hinaus sein kann, angefangen bei breiten qualitativen und quantitativen Erhebungen bis hin zur Untersuchung einzelner Teilgebiete wie etwa zur Rolle der Künstlichen Intelligenz in der Circular Economy.

Die Forschungsliteratur bestätigt eindeutig das Potenzial der Digitalisierung als „Enabler“ von Circular Economy, d. h., dass grundsätzlich alle digitalen Schlüsseltechnologien auch sinnvoll für Circular Economy angewendet werden können. Entlang der entwickelten Kategorisierung (definierte digitale Technologien, R-Strategien und Handlungsfelder der Circular Economy) konnten Anwendungen für alle R-Strategien bzw. in allen vier Handlungsfelder der Circular Economy gefunden werden. Wie eine Internetrecherche und Interviews mit Unternehmen zeigen, sind diese Technologien in der Praxis jedoch unterschiedlich weit verbreitet, ebenso wie die zirkulären Handlungsfelder unterschiedlich intensiv „bespielt“ werden.

Ein Grund dafür liegt im allgemeinen Stand der Digitalisierung und insbesondere in den betrachteten (kleinen und mittleren) Unternehmen selbst. Viele Unternehmen aus dieser Gruppe verfügen nach wie vor nicht über die erforderliche digitale Infrastruktur oder die entsprechenden Kompetenzen. Auf politischer und rechtlicher Ebene bestehen zudem Unsicherheiten hinsichtlich Datenschutz, Cybersicherheit und Umweltauswirkungen der fortschreitenden Digitalisierung (Hedberg und Šipka 2021, Quaing et al. 2023).

Dies spiegelt sich auch in der Befragung ausgewählter produzierender Unternehmen in NRW im Rahmen der vorgestellten Studie wider. Schaut man zunächst auf den digitalen Reifegrad, so lag dieser bei den Studienteilnehmern in den meisten Unternehmensbereichen eher im Mittelfeld des verwendeten Reifegradmodells (Stufen 2 und 3 von 5 Stufen). Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein hoher Reifegrad nicht mit dem für das jeweilige Unternehmen optimalen Digitalisierungsgrad verwechselt werden darf. Bedenklich ist jedoch, dass Digitalisierung selten ganzheitlich betrachtet und systematisch vorangetrieben wird, sondern vor allem anlass- bzw. problembezogen. Hinsichtlich einer gezielten Nutzung digitaler Technologien als „Ermöglicher“ für Strategien der Circular Economy, lassen sich – mit Ausnahme einzelner Unternehmen – kaum mehr als erste Ansätze erkennen.

Die Studienteilnehmer setzen vor allem Sensoren zur Produktionsplanung und -überwachung sowie zur vorausschauenden Instandhaltung ein, und damit Technologien aus den Feldern RFID, IoT und Big-Data-Analyse. Darüber hinaus kommen digitale Zwillinge als Planungsinstrumente sowie additive Fertigung in der Produktentwicklung vereinzelt zum Einsatz. Die Blockchain-Technologie und der digitale Produktpass wurden von den Befragten hingegen auf die Frage nach bereits verwendeten Technologien nicht genannt. Der Einsatz digitaler Technologien zur Unterstützung der Circular Economy entspricht damit – dies ist nicht verwunderlich – dem digitalen Reifegrad der Unternehmen. Dass digitale Plattformen ebenfalls nicht genannt wurden, die in der Online-Recherche zur Praxis in NRW häufig identifiziert wurden, liegt wahrscheinlich daran, dass bei keinem der befragten Unternehmen eine Plattform (z. B. Sharing, Marktplatz) im Zentrum des Geschäftsmodells steht – oder daran, dass Online-Plattformen schlichtweg so selbstverständlich sind, dass sie von den Unternehmen gar nicht mehr als innovative digitale Technologie wahrgenommen werden.

Die Erhebung zeigt außerdem, dass die eingesetzten Technologien bislang vor allem innerbetriebliche Strategien (Produktentwicklung, ressourceneffiziente Produktion) unterstützen. Aber die Circular Economy kann und muss neue Dimensionen erreichen, indem der gesamte Produktlebenszyklus in

den Blick genommen wird und Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette automatisiert Daten austauschen. Besondere Bedeutung kommt hier dem digitalen Produktpass zu, der EU-weit in den kommenden Jahren sukzessive für nahezu alle in der EU in Verkehr gebrachten Produktgruppen verpflichtend eingeführt wird. Durch den Produktpass werden Produktdaten wie Herkunft, Materialien, Eigenschaften, Reparatur- und Entsorgungsoptionen für alle Akteure transparent zur Verfügung gestellt und damit wesentliche Voraussetzungen für zirkuläre Strategien und Geschäftsmodelle geschaffen. Die rechtliche Grundlage dafür schafft die am 18.07.2024 in Kraft getretene EU-Ökodesign-Verordnung (vgl. Europäische Kommission 2024). Dass sich auch die befragten Unternehmen der Bedeutung des Produktpasses bewusst sind, zeigt sich darin, dass sechs von acht Studienteilnehmern im digitalen Produktpass Potenziale für ihr Geschäftsmodell bzw. zur Erfüllung von Transparenzanforderungen ihrer Kunden gesehen haben.

Aufgrund der komplexen regulatorischen und technologischen Entwicklungen bleibt es wichtig, Unternehmen gezielt und mit geeigneten Instrumenten bei der „doppelten Transformation“ zu unterstützen, zum Beispiel mit dem „Reifegradmodell Digitale Circular Economy“, dem vorgestellten Beratungsansatz und/oder in angewandten Forschungsprojekten mit Unternehmen und weiteren Wirtschaftsakteuren, die konkrete Lösungen für spezifische Herausforderungen erarbeiten. Im Prosperkolleg wurden bereits einige Grundlagen dafür gelegt, die unter anderem in den Projekten #digital.zirkulär.ruhr und Circular Performer Emscher-Lippe weiter verfolgt werden. Perspektivisch soll sich das Prosperkolleg zu einem Transferhub für Digitalisierung und Circular Economy entwickeln und als zentrale Anlaufstelle für das Thema im nördlichen Ruhrgebiet und darüber hinaus dienen.

Bei Interesse am Thema sprechen Sie uns gerne an.

Uwe Handmann, Hochschule Ruhr West, uwe.handmann@hs-ruhrwest.de

Paul Szabó-Müller, Hochschule Ruhr West, paul.szabo-mueller@hs-ruhrwest.de

Literaturverzeichnis

- Adisorn, Thomas; Tholen, Lena; Götz, Thomas (2021): Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. *Energies* 14 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/en14082289>.
- Andersen, Terje; Jæger, Bjørn (2021): Circularity for Electric and Electronic Equipment (EEE), the Edge and Distributed Ledger (Edge&DL) Model. *Sustainability* 13 (17), 9924. <https://doi.org/10.3390/su13179924>.
- Bendel, Oliver (o. J.): Definition: Big Data. Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/big-data-54101>, zuletzt geprüft am 11.07.2024.
- Berg, Holger; Wilts, Henning (2019): Digital Platforms as Market Places for the Circular Economy—Requirements and Challenges. *NachhaltigkeitsManagementForum | Sustainability Management Forum* 27 (1), S. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00550-018-0468-9>.
- BMUV (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Entwurf, 17.06.2024. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nkws_entwurf_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2024.
- BMUV (o. J.): Was ist ein digitaler Produktpass? (FAQ). Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass>, zuletzt geprüft am 10.07.2024.
- Böhmecke-Schwafert, Moritz; Wehinger, Marie; Teigland, Robin (2022): Blockchain for the Circular Economy: Theorizing Blockchain's Role in the Transition to a Circular Economy through an Empirical Investigation. *Business Strategy and the Environment*, Vol. 31, Issue 8. <https://doi.org/10.1002/bse.3032>.
- Branca, Teresa Annunziata; Fornai, Barbara; Colla, Valentina; Murri, Maria Maddalena; Streppa, Eliana; Schröder, Antonius Johannes (2020): The Challenge of Digitalization in the Steel Sector. *Metals* 10 (2), S. 288. <https://doi.org/10.3390/met10020288>.
- Bressanelli, Gianmarco; Adrodegari, Federico; Perona, Marco; Saccani, Nicola (2018): Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. *Sustainability* 10 (3), S. 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- Bressanelli, Gianmarco; Adrodegari, Federico; Pigosso, Daniela C. A.; Parida, Vinit (2022): Towards the Smart Circular Economy Paradigm: A Definition, Conceptualization, and Research Agenda. *Sustainability* 14 (9), 4960. <https://doi.org/10.3390/su14094960>.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (o. J.): Blockchain & Kryptowährung. Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Informationen-und-Empfehlungen/Technologien_sicher_gestalten/Blockchain-Kryptowaehrung/blockchain-kryptowaehrung_node.html, zuletzt geprüft am 09.07.2024.
- Bundesministerium der Justiz (o. J.): KrWG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html#BJNR021210012BJNG000400000>, zuletzt geprüft am 11.07.2024.
- Campbell-Johnston, Kieran; Vermeulen, Walter J.V.; Reike, Denise; Brullot, Sabrina (2020): The Circular Economy and Cascading: Towards a Framework. *Resources, Conservation & Recycling: X* 7, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100038>.
- Çetin, Sultan; Wolf, Catherine de; Bocken, Nancy (2021): Circular Digital Built Environment: An Emerging Framework. *Sustainability* 13 (11), 6348. <https://doi.org/10.3390/su13116348>.
- Condemi, Alessia; Cucchiella, Federica; Schettini, Domenico (2019): Circular Economy and E-Waste: An Opportunity from RFID TAGs. *Applied Sciences* 9 (16), 3422. <https://doi.org/10.3390/app9163422>.

- Del Giudice, Manlio; Chierici, Roberto; Mazzucchelli, Alice; Fiano, Fabio (2020): Supply chain management in the era of circular economy: the moderating effect of big data. *The International Journal of Logistics Management* 32 (2), S. 337–56. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2020-0119>.
- Despeisse, M.; Baumers, M.; Brown, P.; Charnley, F.; Ford, S. J.; Garmulewicz, A.; Knowles, S. et al. (2017): Unlocking Value for a Circular Economy through 3D Printing: A Research Agenda. *Technological Forecasting and Social Change* 115 (Februar), S. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>.
- Di Giulio, Antonietta; Defila, Rico (Hrsg.) (2018): *Transdisziplinär und transformativ forschen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-21530-9>.
- Ellen MacArthur Foundation (2016): *Intelligent Assets Unlocking the Circular Economy Potential*.
- Europäische Kommission (2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, COM(2015) 614 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 29.02.2024.
- Europäische Kommission (2020): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa. CEAP, COM(2020) 98 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 08.07.2024.
- Europäische Kommission (2024): Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Making sustainable products in the EU the norm. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en, zuletzt geprüft am 25.07.2024.
- Felice, Fabio de; Petrillo, Antonella (2021): Green Transition: The Frontier of the Digidigital Economy Evidenced from a Systematic Literature Review. *Sustainability* 13 (19), 11068. <https://doi.org/10.3390/su131911068>.
- Gaukler, Gary M.; Seifert, Ralf W. (2007): Applications of RFID in Supply Chains. *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies*, S. 29–48. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-607-0_2.
- Götz, Thomas; Berg, Holger; Jansen, Maïke; Adisorn, Thomas; Cembrero, David; Markkanen, Sanna; Chowdhury, Tahmid (2022): Digital Product Passport: The Ticket to Achieving a Climate Neutral and Circular European Economy? <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-80497>.
- Hedberg, Annika; Šipka, Stefan (2021): Toward a circular economy: The role of digitalization (6).
- Hermendi, Carina, Linda Dierke, Stefan Alscher, Manuel Grundmann und Wolfgang Irrek (2022): Circular Economy in KMU – Konzept zur Initiierung, Einführung und Umsetzung. Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2022/02. Bottrop: Prosperkolleg e.V. Online verfügbar unter https://prospektkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/06/prospektiven_22-02_konzept-circular-economy-kmu.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2024.
- Hofmann, Josephine; Ricci, Claudia; Kleinewefers, Christiane; Laurenzano, Adriana (2023): Doppelte Transformation. Metastudie – Synopse des aktuellen Forschungsstandes. Hg. v. Bertelsmann Stiftung. Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Online verfügbar unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/doppelte-transformation>, zuletzt geprüft am 08.07.2024.
- Hojnik, Jana; Ruzzier, Mitja; Konečnik Ruzzier, Maja; Sučić, Boris; Soltwisch, Brandon (2023): Challenges of demographic changes and digitalization on eco-innovation and the circular economy: Qualitative insights from companies. *Journal of Cleaner Production* 396, S. 136439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136439>.

Jensen, Steffen Foldager; Kristensen, Jesper Hemdrup; Adamsen, Sofie; Christensen, Andreas; Waehrens, Brian Vejrum (2023): Digital Product Passports for a Circular Economy: Data Needs for Product Life Cycle Decision-Making. *Sustainable Production and Consumption*, März. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.021>.

Joustra, door Jelle. (o. J.): Value Added Repair Jelle Joustra. Online verfügbar unter <https://jelle-joustra.nl/?p=355>, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Kalogiannidis, Stavros; Kalfas, Dimitrios; Chatzitheodoridis, Fotios; Kontsas, Stamatis (2022): The Impact of Digitalization in Supporting the Performance of Circular Economy: A Case Study of Greece. *JRFM* 15 (8), S. 349. <https://doi.org/10.3390/jrfm15080349>.

Klahn, Christoph; Meboldt, Mirko; Fontana, Filippo; Leutenecker-Twelsiek, Bastian; Jansen, Jasmin (Hg.) (2018): Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung. Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten. Würzburg: Vogel Business Media.

Konietzko, Jan; Bocken, Nancy; Hultink, Erik Jan (2019): Online Platforms and the Circular Economy. In: *Innovation for Sustainability: Business Transformations Towards a Better World*, hrsg. von Nancy Bocken, Paavo Ritala, Laura Albareda, und Robert Verburg, S. 435–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97385-2_23.

Kristoffersen, Eivind; Blomsma, Fenna; Mikalef, Patrick; Li, Jingyue (2020): The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research* 120, S. 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>.

Kuehn, Wolfgang (2018): Digital Twins for Decision Making in Complex Production and Logistic Enterprises. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 13 (3), S. 260–71. <https://doi.org/10.2495/DNE-V13-N3-260-271>.

Kurniawan, Tonni Agustiono; Liang, Xue; O'Callaghan, Elizabeth; Goh, Huihwang; Othman, Mohd Hafiz Dzarfan; Avtar, Ram; Kusworo, Tutuk Djoko (2022): Transformation of Solid Waste Management in China: Moving towards Sustainability through Digitalization-Based Circular Economy. *Sustainability* 14 (4), S. 2374. <https://doi.org/10.3390/su14042374>.

Lundborg, Martin; Gull, Isabel (2019): Digitale Plattformen als Chance für den Mittelstand - Relevanz, Anwendungen, Transfer. Herausgegeben von Begleitforschung Mittelstand-Digital und WIK GmbH. Online verfügbar unter <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/digitale-plattformen-als-chance.html>, zuletzt geprüft am 10.07.2024.

Magrini, Chiara; Nicolas, Jana; Berg, Holger; Bellini, Alberto; Paolini, Enrico; Vincenti, Nazarena; Campadello, Luca; Bonoli, Alessandra (2021): Using Internet of Things and Distributed Ledger Technology for Digital Circular Economy Enablement: The Case of Electronic Equipment. *Sustainability* 13 (9), 4982. <https://doi.org/10.3390/su13094982>.

Mast, Julian, Unruh, Friederike von; Wolfgang Irrek (2022): R-Strategien als Leitlinien der Circular Economy, Rethink – Impulse zur zirkulären Wertschöpfung 2022/03, Bottrop: Prosperkolleg e.V., online verfügbar unter https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/05/rethink_22-03_r-strategien.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2024.

MWIDE.NRW (2021): Regionale Innovationsstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter <https://www.wirtschaft.nrw/innovationsstrategie>, zuletzt geprüft am 07.07.2023.

MWIKE.NRW (2024): EFRE/JTF-Programm Nordrhein-Westfalen 2021–2027. Online verfügbar unter <https://www.efre.nrw.de/>, zuletzt geprüft am 25.07.2024.

Pagoropoulos, Aris; Pigosso, Daniela C.A.; McAlloone, Tim C. (2017): The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review. *Procedia CIRP* 64, S. 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>.

- Parida, Vinit; Sjödin, David; Reim, Wiebke (2019): Reviewing Literature on Digitalization, Business Model Innovation, and Sustainable Industry: Past Achievements and Future Promises. *Sustainability* 11 (2), S. 391. <https://doi.org/10.3390/su11020391>.
- Parviainen, Päivi; Tihinen, Maarit; Kääriäinen, Jukka; Teppola, Susanna (2017): Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. *IJSPM* 5 (1), S. 63–77. <https://doi.org/10.12821/ijispm050104>.
- Pech, Martin; Vrchota, Jaroslav; Bednář, Jiří (2021): Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review. *Sensors* 21 (4), 1470. <https://doi.org/10.3390/s21041470>.
- Potting, José; Hekkert, Marko; Worrell, Ernst; Hanemaaijer, Aldert (2017): Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Hg. v. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Universiteit Utrecht.
- Prosperkolleg (Hrsg.) (o. J.): Lösungsansätze für produzierende Unternehmen in vier Handlungsfeldern. Online verfügbar unter <https://www.prosperkolleg.de/wissen-publikationen/handlungsfelder/>, zuletzt geprüft am 01.07.2024.
- Preut, Anna; Kopka, Jan-Philip; Clausen, Uwe (2021): Digital Twins for the Circular Economy. *Sustainability* 13 (18), 10467. <https://doi.org/10.3390/su131810467>.
- Quaing, Jan; Fink, Julia; Bilfinger, Beatriz; Vorländer, Fabian (2023): Doppelte Transformation gestalten. Ein Praxisleitfaden zu Nachhaltigkeit und Digitalisierung. <https://doi.org/10.14512/9783962389444>.
- Ranta, Valtteri; Aarikka-Stenroos, Leena; Väisänen, Juha-Matti (2021): Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy—Multiple case study. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 164, 105155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105155>.
- Reike, Denise; Vermeulen, Walter J.V.; Witjes, Sjors (2018): The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling* 135, S. 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>.
- Rejeb, Abderahman; Simske, Steve; Rejeb, Karim; Treiblmaier, Horst; Zailani, Suhaiza (2020): Internet of Things Research in Supply Chain Management and Logistics: A Bibliometric Analysis. *Internet of Things* 12 (Dezember), 100318. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100318>.
- Ritter, Thomas; Pedersen, Carsten Lund (2020): Digitization capability and the digitalization of business models in business-to-business firms: Past, present, and future. *Industrial Marketing Management* 86, S. 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.11.019>.
- Rocca, Roberto; Rosa, Paolo; Sassanelli, Claudio; Fumagalli, Luca; Terzi, Sergio (2020): Integrating Virtual Reality and Digital Twin in Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case. *Sustainability* 12 (6): 2286. <https://doi.org/10.3390/su12062286>.
- Rosa, Paolo; Sassanelli, Claudio; Urbinati, Andrea; Chiaroni, Davide; Terzi, Sergio (2020): Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research* 58 (6), S. 1662–1687. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>.
- Roséen, Jakob (2019): Enabling Circular Economy With Digital Technology – A Case Study on the Swedish Online Secondhand Business Sellpy. Master thesis in Sustainable Development at Uppsala University, No. 2019/45. Uppsala.
- Rüdiger, Marcel (2016): RFID-Technologie ermöglicht Smart Maintenance für Smart Factories: Smart Maintenance mit Hilfe der RFID-Technologie als Wettbewerbsvorteil im Zeitalter der Industrie 4.0. *Bibliotheksdienst* 50 (6), S. 578–84. <https://doi.org/10.1515/bd-2016-0066>.
- Sauerwein, Marita; Doubrovski, Eugeni; Balkenende, Ruud; Bakker, Conny (2019): Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production* 226, S. 1138–1149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.108>.

Scheelhaase, Tanja; Zinke; Guido (2016): Potenzialanalyse einer zirkulären Wertschöpfung im Land Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. Hamburg. Berlin: Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk.

Schneidewind, Uwe (2018): Die Große Transformation - Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. Frankfurt am Main: Fischer Verlag GmbH.

Schwanholz, Julia; Leipold, Sina (2020): Sharing for a Circular Economy? An Analysis of Digital Sharing Platforms' Principles and Business Models. *Journal of Cleaner Production* 269 (Oktober), 122327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122327>.

Schumacher, Andreas; Selim, Erol; Sinh, Wilfried (2016): Automation, digitization and digitalization and their implications for manufacturing processes. Hg. v. Innovation and Sustainability 2016.

Singh, Sumit; Shehab, Essam; Higgins, Nigel; Fowler, Kevin; Tomiyama, Tetsuo; Fowler, Chris (2018): *Challenges of Digital Twin in High Value Manufacturing*. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1928>.

Stich, Volker; Stroh, Max-Ferdinand; Abbas, Murtaza; Frings, Kira; Kremer, Sebastian (2022): Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland. Technologie- und Trendradar 2022. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-technologie-trendradar-2022.pdf?_blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 04.03.2024.

Upadhyay, Arvind; Mukhuty, Sumona; Kumar, Vikas; Kazancoglu, Yigit (2021): Blockchain Technology and the Circular Economy: Implications for Sustainability and Social Responsibility. *Journal of Cleaner Production* 293 (April), 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jcle-pro.2021.126130>.

Vacchi, Marco; Siligardi, Cristina; Cedillo-González, Erika Iveth; Ferrari, Anna Maria; Settembre-Blundo, Davide (2021): Industry 4.0 and Smart Data as Enablers of the Circular Economy in Manufacturing: Product Re-Engineering with Circular Eco-Design. *Sustainability* 13 (18), 10366. <https://doi.org/10.3390/su131810366>.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft. Berlin: WBGU. Online verfügbar unter <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/unsere-gemeinsame-digitale-zukunft>, zuletzt geprüft am 01.07.2024.

Weber, Thomas; Stuchtey Martin (Hrsg.) (2019): Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy. Erkenntnisse aus europäischen Strategien. München.

Zhang, Haiwen; Ma, Lin; Sun, Jiao; Lin, Hansheng; Thürer, Matthias (2019): Digital Twin in Services and Industrial Product Service Systems: Review and Analysis. *Procedia CIRP*, 11th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, 83 (Januar), S. 57–60. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.131>.

Zhu, Caihan; Li, Tianya; Mohideen, Mohamedazeem M.; Hu, Ping; Gupta, Ramesh; Ramakrishna, Seeram; Liu, Yong (2021): Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: A Review. *Polymers* 13 (5), 744. <https://doi.org/10.3390/polym13050744>.