

Studie | Januar 2022

Circular Economy und Digitalisierung – Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation

Eine Studie im Auftrag von
Huawei Technologies Deutschland GmbH



Dr.-Ing. Stephan Ramesohl

Dr. Holger Berg

Joscha Wirtz

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Autorinnen und Autoren:

Dr.-Ing. Stephan Ramesohl
E-Mail: stephan.ramesohl@wupperinst.org

Dr. Holger Berg
Joscha Wirtz

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich bei René Arnold (Huawei) für wertvolle Hinweise und Kommentare sowie bei Maike Jansen (Wuppertal Institut) für Beiträge zum Thema Smart Waste Management.

Diese Studie ist ein Ergebnis des Projekts „Shaping the Digital Transformation – Digital solution systems for the sustainability transition“ im Auftrag von

Huawei Technologies Deutschland GmbH
Hansaallee 205
40549 Düsseldorf

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Ramesohl, S., Berg, H., & Wirtz, J. (2022). Circular Economy und Digitalisierung – Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation: Studie im Rahmen des Projekts „Shaping the Digital Transformation“, Wuppertal

Wuppertal, Januar 2022

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).

Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Executive Summary

Der Übergang zu einer ressourcenschonenden Circular Economy ist unverzichtbare Voraussetzung für industrielle Klimaneutralität und die Industrietransformation zur Nachhaltigkeit. Das Ziel der Circular Economy ist dabei die Entkopplung der wirtschaftlichen Wertschöpfung vom materiellen Ressourcenverbrauch um letztlich eine absolute Reduktion der physischen Stoffströme und der damit verbundenen Umweltwirkungen zu erreichen.

Digitalisierung und Datenverfügbarkeit sind die zentralen Erfolgsvoraussetzungen für das Gelingen der Circular Economy. Digitale Technologien und Anwendungen ermöglichen, gegenwärtige Verfahren, Prozesse und Strukturen zu verbessern (**Improve**) oder erste Schritte in eine neue Ausrichtung von Geschäftsmodellen oder Verhaltensweisen zu gehen (**Convert**). Gleichzeitig muss die Digitalisierung aber auch für einen weitergehenden Umbau von Wirtschaft und Wertschöpfung sowie für die ökologische Neuorientierung von Gesellschaft und Lebensstilen wirksam werden (**Transform**). Die drei Wirkungsebenen sind miteinander verknüpft, beeinflussen sich gegenseitig und müssen mit einem ganzheitlichen Ansatz adressiert werden.

Improve - Prozesse und Logistik der Circular Economy optimieren

Das breite Portfolio digitaler Lösungen schafft neue Möglichkeiten zur Optimierung von industriellen Prozessen auf allen Produktionsstufen und ermöglicht Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale von 20% oder mehr auszuschöpfen. Beim Produktdesign helfen digitale Tools bei der ressourceneffizienten Konstruktion von Bauteilen und Produkten. Computergestützte (CNC) Fertigungsverfahren oder innovative additive Herstellungsverfahren wie 3D Druck können weitere Leichtbaupotenziale erschließen.

Smart Waste Management eröffnet signifikante Effizienzsteigerungen für die Abfall- und Recyclingwirtschaft. So können durch den Einsatz von entsprechender Sensorik und digitalen Lösungen bedarfsgerechte Echtzeit- Routenplanungen und Leerungen erreicht werden. Material und Verpackungen mit digitalen Informationen erleichtern die Nachverfolgung und Identifikation von Stoffflüssen für die Recyclingwirtschaft (tracking und tracing). Maschinenlesbare Codes an Kunststoffverpackungen oder Sortiertechnologien mit Künstlicher Intelligenz (KI) erhöhen die Qualität der Wiederverwertung. Digitale Handelsplattformen bieten neuen Kanäle für die Vermarktung von qualitätsgeprüften und zertifizierten Sekundärmaterialien (Rezyklaten).

Convert - Geschäftsmodelle, Nutzungsverhalten neu ausrichten

Die Digitalisierung ermöglicht neue zirkuläre Geschäftsmodelle, die Kundenanforderungen mit minimalem Ressourceneinsatz bedienen und stärker mit Dienstleistungen zur Ressourcenschonung verbunden werden. Bei nutzungsbasierten Geschäftsmodellen (pay per use) bleibt das Produkt im Besitz des Herstellers und kann mehrfach genutzt werden. Dies schafft einen klaren Anreiz, möglichst robuste und langlebige Produkte zur Verfügung zu stellen. Gleiches gilt für Konzepte der Sharing Economy oder Second Hand Vermarktung. Hier werden Geräte, Werkzeuge oder Fahrzeuge durch eine große Kundengruppe gemeinsam und dadurch intensiver bzw. länger genutzt. Digitalisierung senkt Transaktionskosten und ermöglicht durch Plattformen und Smartphone-Apps die Organisation und Skalierung dieser Ansätze und Geschäftsmodelle.

Die Informationen zu Produkten z.B. in Form eines digitalen Produktpasses (DPP) in Verbindung mit Assistenz-Tools auf dem Smartphone erleichtern es den Verbraucher*innen ihre Entscheidungen im Sinne von Klima und Ressourcenschutz zu treffen.

Transform – Voraussetzungen für die digital-ökologische Industrietransformation schaffen

Die digitale und ökologische Transformation unserer Wirtschaft können nur zum Erfolg führen, wenn sie als eine gemeinsame Gestaltungsaufgabe verstanden werden. Diese Aufgabe erfordert einen Wandel auf unterschiedlichen Ebenen:

Digitalisierung konsequent zu Ende denken - die Circular Economy muss als Data Economy verstanden werden. Die unterschiedlichen Daten im Unternehmen müssen zusammenwachsen und Klima- und Ressourcenschutz im Sinne einer nachhaltigkeitsorientierten Buchführung (*Sustainability Ledger*) ein integraler Bestandteil der digitalen Managementsysteme werden.

Transformation durch Transparenz – durchgängige Datenkreisläufe sind entscheidend für die Koordination des Gesamtsystems. Hierzu braucht es die technischen Voraussetzungen in Form von gemeinsamen Datenmodellen und Referenzarchitekturen z.B. für den digitalen Produktpass. Doch erst ein Wandel hin zu einer Kultur des proaktiven Teilens von Daten im Rahmen von regulatorischen Leitplanken wird zum Erfolg führen.

Infrastrukturen und Datenräume für die digitale Circular Economy – es müssen zuverlässige und sichere Infrastrukturen für Datenspeicherung und -verarbeitung entstehen (z.B. im Rahmen von GAIA-X). Dazu braucht es klare Leitlinien, faire Regeln und eine vertrauenswürdige Data-Governance sowie Standards und Schnittstellen, die eine effiziente und flexible Skalierung in unterschiedlichen Anwendungsfällen sowie eine Ausweitung der Einsatzbereiche durch Interoperabilität mit anderen Systemen ermöglichen.

Digital und zirkulär heißt systemisch - ein neues Mindset für Zukunftsfähigkeit und Selbstverständnis für die eigene Rolle in der Transformation von Systemen ist gefordert, quasi als "Prozess im Prozess" in Verbindung mit einer Kultur des Datenteilens und der Zusammenarbeit.

Leitplanken der Transformation - eine nationale digitale Circular Economy Strategie ist überfällig. Es braucht einen integrierten Ansatz, der ressortübergreifend einen übergeordneten Rahmen für eine digital-ökologische Wirtschaftspolitik schafft und allen Akteuren der Circular Economy eine verlässliche Orientierung, Anreize und Leitplanken für eigenes Handeln gibt.

Wir stehen am Anfang eines historisch wichtigen Jahrzehnts, in dem zusammen mit der internationalen Gemeinschaft die Weichen für die Sicherung der weltweiten natürlichen Lebensgrundlagen gestellt werden müssen. Der Aufbau einer klimaneutralen und ressourceneffizienten Circular Economy ist dafür ein Schlüsselbereich. Die gleichzeitig stattfindende digitale Transformation aller Lebens- und Wirtschaftsbereiche eröffnet immer neue Handlungsoptionen und erweitert so kontinuierlich den Lösungsraum. Wir haben die Chance, die Transformationsdynamik der Digitalisierung für die Aufgabe der Transformation unserer Wirtschaftsweisen und Lebensstile einzusetzen.

Die Politik und insbesondere die neue Bundesregierung steht daher in der Verantwortung, in den nächsten Jahren konsistente Zielbilder und Anreizsysteme für die digitale wie ökologische Transformation unserer Ökonomie zu formulieren und so einen verlässlichen und motivierenden Regulierungsrahmen für privates und unternehmerisches Handeln zu schaffen. So kann ein übergreifendes Verständnis aller Akteure und Stakeholder von einem gemeinsamen Transformationspfad in eine nachhaltige Zukunft für Wirtschaft und Gesellschaft im Industrieland Deutschland entstehen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Herausforderung – Circular Economy und Digitalisierung als gemeinsame Gestaltungsaufgabe	9
3	Improve - Prozesse und Logistik der Circular Economy optimieren	13
4	Convert - Geschäftsmodelle, Nutzungsverhalten neu ausrichten	16
5	Transform - Voraussetzungen für die digital-ökologische Industrietransformation schaffen	21
5.1	Digitalisierung konsequent zu Ende denken - die Circular Economy als Data Economy verstehen	22
5.2	Transformation durch Transparenz – durchgängige Datenkreisläufe als Game Changer	24
5.3	Infrastrukturen und Datenräume für die digitale Circular Economy	24
5.4	Digital und zirkulär heißt systemisch - eine neues Mindset für Zukunftsfähigkeit	26
5.5	Leitplanken der Transformation - eine nationale Circular Economy Strategie ist überfällig	27
6	Die Bedingung – digitale Lösungen nachhaltig und zirkulär gestalten	28
7	Fazit	29
8	Literaturverzeichnis	30

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich ganz herzlich bei allen Teilnehmenden des Workshops “Die digital-ökologische Industrietransformation gestalten – Geschäftsmodelle und politische Rahmenbedingungen für Klima- und Ressourcenschutz”. Deren Impulse und Diskussionen lieferten eine wertvolle Grundlage für diesen Bericht. Teilgenommen haben: Adriana Neligan (Institut der deutschen Wirtschaft), Alexander Jasperneite (Mercedes Benz), Christoph Epping (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz), Christoph Teusch (AFB Social & Green IT), Dieter Rehfeld (Institut Arbeit und Technik), Ernst Stöckl-Pukall (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), Georg Kobiela (Germanwatch), Hanno Heitmann (Büro Bettina Hoffmann B90/Grüne), Jean-Francois Renault (Projektträger Jülich), Katarin Wagner (HSBC Deutschland), Klaus Lützenkirchen (Siemens), Klaus Meyer (CirQuality OWL), Matthias Kuom (DG Connect), Moritz Niehaus (IG Metall), Ole Wintermann (Bertelsmann Stiftung), Paula Petersen (Project Together „Circular Futures“), Rebecca Tauer (WWF Deutschland) und René Arnold (Huawei). Von Seiten des Wuppertal Instituts nahmen Stephan Ramesohl, Holger Berg und Joscha Wirtz (Forschungsbereich Digitale Transformation) teil.

Die Verantwortung für Inhalt und Aussagen des Berichts liegt dabei ausschließlich bei den Autoren.

1 Einleitung

In den kommenden Jahren wird Klimaschutz zu einer der wichtigsten Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft, das unterstreicht nicht zuletzt der Ressortzuschnitt der neuen Bundesregierung mit der Bündelung beider Themen im Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Mit dem Ziel der Klimaneutralität Deutschlands bis zum Jahr 2045 ist auch die deutsche Industrie gefordert, die Treibhausgasemissionen ihrer Produktionsprozesse und Geschäftsmodelle drastisch zu reduzieren und langfristig vollständig zu vermeiden.

Die Zahl der mittelständischen Unternehmen wie auch der globalen Konzerne wächst, die eigene Ziele und Strategien für die Klimaneutralität ihres wirtschaftlichen Handelns in den nächsten Jahrzehnten formulieren und zum Beispiel wie im Umsetzungsappell der Stiftung 2° eine ambitionierte klimapolitische Flankierung ihrer Initiativen einfordern (Stiftung 2°, 2021).

Gleichzeitig wurden Ressourcenschutz und die Kreislaufwirtschaft durch den Green Deal der EU Kommission mit dem Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020a) wie auch durch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm *ProgRes III* (BMU, 2020a) auf die Agenda gesetzt und die Wirtschaft erkundet die ökonomischen Potenziale der Circular Economy - nicht zuletzt unter dem Eindruck gestörter Lieferketten seit der Pandemie oder den offensichtlichen Knappheiten auf globalen Rohstoffmärkten. Dazu kommen Städte wie München oder Kiel, die für sich das Zielbild der Zero Waste City anstreben und zusammen mit ihren Bürgerinnen und Bürgern realisieren möchten. Das Thema der Kreislaufwirtschaft ist ebenfalls eine Priorität im Koalitionsvertrag und durch eine neue Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie sollen bestehenden rohstoffpolitische Strategien gebündelt werden.

Beide Handlungsfelder - Klimaschutz und Ressourcenschutz - sind Eckpfeiler einer global nachhaltigen Entwicklung, für die sich unsere Art zu leben und zu wirtschaften grundlegend verändern muss. In allen zentralen Handlungsbereichen von Wirtschaft und Gesellschaft - den sogenannten Transformationsarenen - steht ein tiefgreifender ökologischer Systemwandel an, damit die Ziele im Klima-, Ressourcen- und Umweltschutz erreicht werden können.

Digitalisierung ist eine Erfolgsvoraussetzung für diesen ökologischen Wandel. Digitale Technologien und Anwendungen ermöglichen, gegenwärtige Verfahren, Prozesse und Strukturen zu verbessern (**Improve**) oder erste Schritte in eine neue Ausrichtung von Geschäftsmodellen oder Rahmenbedingungen zu gehen (**Convert**) (Abbildung 1). Gleichzeitig muss die Digitalisierung aber auch für einen weitergehenden Umbau von Wirtschaft und Wertschöpfung sowie für die ökologische Neuorientierung von Gesellschaft und Lebensstilen wirksam werden (**Transform**). Gerade diese letzte Wirkungsebene wird entscheidend für den Erfolg des ökologischen Wandels sein, sie muss daher stärker in den Fokus der Debatte rücken.

Die drei Wirkungsebenen sind miteinander verknüpft, beeinflussen sich gegenseitig und müssen mit einem ganzheitlichen Ansatz adressiert werden. Es gilt, die kurzfristig realisierbaren Potenziale der Optimierung zeitnah zu erschließen und gleichzeitig damit zu beginnen, heute schon die Voraussetzungen für den tiefergehenden Wandel von Strukturen und Rahmenbedingungen in Wirtschaft und Gesellschaft zu schaffen.

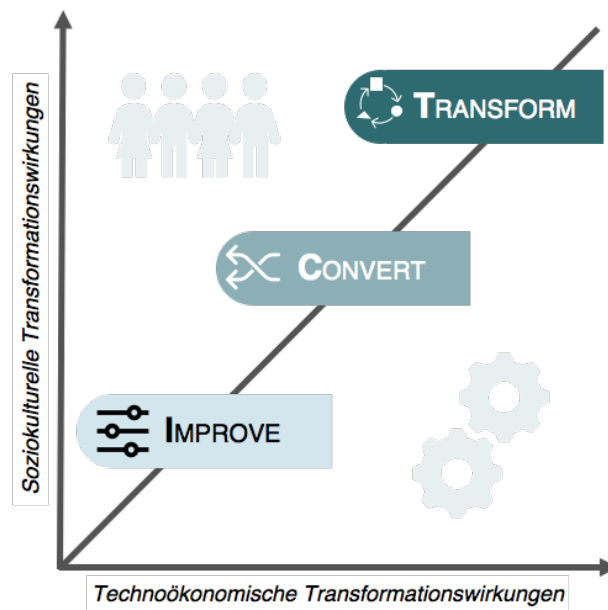


Abbildung 1: Wirkungsebenen der Digitalisierung für die Nachhaltigkeitstransformation (Quelle: Eigene Darstellung)

Hier setzt das Projekt "Digitalisierung gestalten - Transformation zur Nachhaltigkeit ermöglichen" im Auftrag von Huawei Technologies Deutschland an. Innerhalb des Projekts werden die besonderen Transformationspotenziale der Digitalisierung herausgearbeitet und für Deutschland am Beispiel der ausgewählten Handlungsfelder Mobilität, Circular Economy sowie Landwirtschaft und Ernährung diskutiert (Ramesohl et al., 2021).

Dieser Bericht adressiert das zweite Handlungsfeld einer klimaschonenden und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft, die Circular Economy¹. Bisher wird Kreislaufwirtschaft dabei vor allem mit Fokus auf Recycling und Wiederverwertung von Materialien diskutiert. Das greift jedoch zu kurz - es muss um die Skalierung von neuen, ressourcenschonenden Geschäftsmodellen und der umfassenden Transformation von Wertschöpfungsketten und Industriestrukturen gehen. Die Analyse zeigt: richtig eingesetzt ist Digitalisierung unverzichtbar für diesen Wandel.

Der vorliegende Bericht möchte Anstöße für diesen Weg liefern und neue Impulse für eine klima- und ressourcenschonende Industrietransformation in Deutschland setzen. Der Bericht verarbeitet dabei Ergebnisse eines interdisziplinären Workshops zum Thema "Die digital-ökologische Industrietransformation gestalten - Geschäftsmodelle und politische Rahmenbedingungen für Klima- und Ressourcenschutz" mit Expertinnen und Experten aus Forschung, Zivilgesellschaft, Behörden und Privatunternehmen (Teilnehmer*innen siehe Danksagung). Die Workshop-Diskussion wird dabei erweitert um aktuelle Erkenntnisse aus der Forschung zu den technologischen, ökonomischen und politischen Entwicklungsperspektiven und Umsetzungsbedingungen für eine klimaschonende und ressourceneffiziente Circular Economy.

¹ Wir werden im weiteren Verlauf den umfassenden Begriff der Circular Economy verwenden, der eine systemische Transformation über alle Wertschöpfungsstufen einschließlich der Nutzungsphase beschreibt. Diese Perspektive ist damit breiter gefasst als das Verständnis des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), das "Kreislaufwirtschaft mit einer funktionierenden, effektiv regulierten Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft" gleichsetzt (Müller et al., 2020).

2 Herausforderung – Circular Economy und Digitalisierung als gemeinsame Gestaltungsaufgabe

Der Übergang zu einer ressourcenschonenden Circular Economy ist die Kernstrategie einer Industrietransformation zur Nachhaltigkeit und unverzichtbare Voraussetzung für industrielle Klimaneutralität. Das Ziel der Circular Economy ist dabei die Entkopplung der wirtschaftlichen Wertschöpfung vom materiellen Ressourcenverbrauch und letztlich die absolute Reduktion der physischen Stoffströme und der damit verbundenen Umweltwirkungen und Treibhausgasemissionen. Damit ist eines der zentralen Handlungsfelder der nächsten Jahrzehnte umrissen. Wie die Energiewende gehören auch die Ressourcenwende und Industriewende zu den wichtigen Transformationsarenen, in denen sich eine global nachhaltige Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft entscheiden wird. Das Thema hat in jüngster Zeit an Aufmerksamkeit gewonnen und muss zusammen mit Klimaschutz und dem Erhalt der Biodiversität in den Mittelpunkt einer nachhaltigkeitsorientierten Politik rücken.

Klimaschutz nur mit Ressourcenschutz

Das Klimaschutzziel einer CO₂-freien Wirtschaft bis zum Jahr 2045 ist definiert, Unternehmen und Politik müssen im nächsten Jahrzehnt die Transformation der deutschen Wirtschaft einleiten. Dabei zeichnet sich ab, dass von einer ressourceneffizienten Circular Economy erhebliche Beiträge zur Treibhausgaseminderung erwartet werden können, die für die Klimaneutralität der Industrie unverzichtbar sind (Kadner et al., 2021; Sun et al., 2021). Das International Resource Panel schätzt z.B., dass in den G7-Ländern die Treibhausgasemissionen von Gebäuden und Fahrzeugen um bis zu je 40 Prozent bis 2050 reduziert werden können (Ekins & Hughes, 2017). Andere Studien sehen das Potenzial, dass sich die Treibhausgasemissionen der vier CO₂-intensivsten Stoffströme der europäischen Industrie (Stahl, Plastik, Aluminium und Zement) durch Ressourceneffizienz und Kreislauf-Strategien bis zum Jahr 2050 um bis zu 60 Prozent senken lassen (Material Economics, 2018). Dieser Minderungsbeitrag der Ressourcenschonung wird in aktuellen Diskussionen zur Klimaneutralität der Industrie immer noch unzureichend berücksichtigt².

Das Potenzial ist groß - und noch ungenutzt

Die Produktionsverfahren und Wertschöpfungsketten unserer Wirtschaft bieten vielfältige Möglichkeiten, den Einsatz von aus der Natur entnommenen Primärrohstoffen durch Effizienzstrategien zu reduzieren oder durch wiederverwendete Materialien (Sekundärrohstoffe) zu ersetzen. Die Circular Economy Initiative Deutschland schätzt, dass im Vergleich zum Business-as-usual Pfad der Ressourcenverbrauch in Deutschland durch engagierte Circular Economy Strategien bis zum Jahr 2050 um rund zwei Drittel gesenkt werden kann (vgl. Abbildung 2, Kadner et al., 2021).

² Die Studie des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) "Klimapfade 2.0" legt z.B. den Schwerpunkt auf die Versorgung der Industrie mit erneuerbaren Energien und den Ausbau eines Wasserstoffsystems. Die Analyse geht dabei nur exkursorisch auf einzelne Recyclingoptionen wie das rohstoffliche Kunststoffrecycling ein während weitergehende Ressourceneffizienzpotenziale und entsprechende Strukturwandeleffekte in der Grundstoffindustrie nicht berücksichtigt werden (Burchardt et al., 2021).

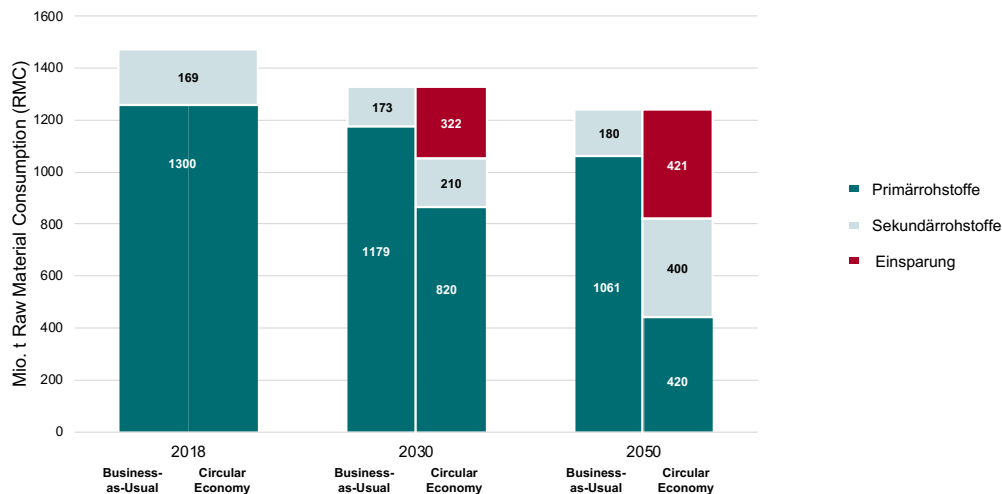


Abbildung 2: Vergleich Circular Economy Szenario zum Business-as-Usual Case beim Ressourcenverbrauch (RMC) in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach (Kadner et al., 2021))

Gegenwärtig sind wir von diesem Pfad jedoch noch weit entfernt. Deutschland hat im internationalen Vergleich zwar ein sehr umfassendes - und kostenintensives - System der Abfallsorgung und -verwertung und auch die deutsche Umwelttechnologie-Branche ist weltweit traditionell sehr stark aufgestellt. Bei den eigentlichen Leistungsindikatoren für eine Circular Economy steht Deutschland jedoch weniger gut da. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen vermeidet in Deutschland bislang nur etwa 13 Prozent des Ressourcenverbrauchs und selbst unter Berücksichtigung globaler Vorketten beträgt die Einsparung nur 18 Prozent (Steger et al., 2019). Auch im europäischen Vergleich liegt Deutschland beim Einsatz von Sekundärmaterialien gerade im europäischen Mittelfeld, andere Länder wie die Niederlande oder Belgien weisen heute schon mit fast 30 % bzw. 25 % deutlich höhere Nutzungsraten von wiedergewonnen Rohstoffen aus (Bahn-Walkowiak et al., 2021). Gleiches gilt für die Ressourcenproduktivität, d.h. die Wertschöpfung pro Materialverbrauch, wo Deutschland ebenfalls nur im europäischen Durchschnitt liegt (EEA, 2020).

Recycling ist wichtig - kann das Problem aber nicht allein lösen

Das Grundprinzip einer Circular Economy liegt im Bild der Kreislaufführung, d.h. der Rückgewinnung und Wiederverwertung von Ressourcen durch Recycling. Das ist wichtig und hier bestehen noch große ungenutzte Potenziale - so werden aktuell nur knapp 40% der Kunststoffabfälle der privaten Haushalte einer stofflichen Verwertung zugeführt (Lindner et al., 2020). Und dennoch gibt es klare Grenzen für das Recycling: eine vollständige Erfassung und 100%ige Wiederverwertung von allen Rohstoffen kann jedoch nicht erreicht werden und ist auch weder ökologisch zielführend noch wirtschaftlich sinnvoll. Bei allen Umwandlungsprozessen treten technische Verluste auf und je nach Stoffzusammensetzung ist eine Degradation im Recyclingprozess nicht zu vermeiden, d.h. die Struktur des Materials verändert sich und verliert an Leistungsfähigkeit. Dazu sind alle Recyclingverfahren selbst mit Energieaufwand, Emissionen und Umweltbelastungen z.B. durch Wasserverbrauch verbunden. Je nach Fall kann der ökologische Aufwand damit größer als der Nutzen sein.

Wichtiger als Recycling ist damit, den Ressourcenverbrauch gar nicht erst entstehen zu lassen und möglichst wenig Rohstoffe für die Bereitstellung von Waren, Dienstleistungen und Infra-

strukturen einzusetzen. Das ist besonders wichtig in den Bereichen, in denen die Neuproduktion deutlich höher liegt als der Anfall von Abfällen und Reststoffen und dieser Mehrbedarf zwangsläufig durch Primärrohstoffe gedeckt werden muss³.

Circular Economy - Industrietransformation durch ressourceneffiziente Wertschöpfung

Die Herausforderungen für die Realisierung einer Circular Economy sind groß und der Zeitraum zum Handeln kurz. Ein wichtiger erster Schritt ist, industrielle Produktionsprozesse kontinuierlich zu verbessern und einzelne Technologien zu optimieren - es wird allein jedoch nicht reichen, um eine global nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Die auf Energie- und Rohstoffverbrauch ausgelegte Struktur und Logik von industriellen Wertschöpfungsketten müssen von Grund auf neu gedacht und konsequent an Klimaschutz und Ressourcenschonung ausgerichtet werden. Es geht darum, Ressourceneinsatz von Grund auf zu vermeiden, die Wertschöpfung von einmal eingesetzten Ressourcen möglichst lange auf möglichst hohem Niveau zu erhalten und durch neue Geschäftsmodelle mit möglichst wenig physischen Produkten einen möglichst hohen Nutzen zu stiften. Zu einer Circular Economy gehören damit auch eine Veränderung der Nachfrage und die Stärkung nachhaltiger Lebensstile, bei denen der Konsum von energie- und materialintensiven Produkten und Dienstleistungen immer mehr durch immaterielle Bedürfnisbefriedigung ersetzt wird. Inwieweit die Virtualisierung unseres Alltags und Konsums dazu beitragen wird, ist noch offen. Konzepte wie die einer digitalen Parallelwelt im Sinne des Metaverse stehen noch am Anfang und die ökologischen und sozialen Wirkungen sind in ihrer Ambivalenz und Dimension noch nicht abschätzbar.

Circular Economy und Digitalisierung - eine gemeinsame Gestaltungsaufgabe

Die zentrale Herausforderung der Circular Economy ist das Management der Stoffströme und Ressourcennutzung über die gesamte Industrie, d.h. innerhalb einzelner Unternehmen einer Wertschöpfungskette wie auch zwischen unterschiedlichen Branchen und Sektoren. Aus einer Wertschöpfungskette wird in der Circular Economy ein Wertschöpfungsnetzwerk, bei dem sich Entscheidungen auf jeder Prozessstufe auf die Handlungsoptionen der anderen Akteure auswirken: die Materialwahl und das Design von Komponenten bestimmen Langlebigkeit und Reparaturfähigkeit von Produkten - Art und Qualität von Recyclingprozessen entscheiden über die Verwendbarkeit von Sekundärmaterialien in neuen Herstellungsprozessen und im Produktdesign.

Die Kreislaufwirtschaft erfordert deshalb einen systemischen Ansatz, der über den Handlungsbereich eines einzelnen Unternehmens hinausgeht. Die notwendige - aber allein nicht hinreichende - Voraussetzung für Handeln in der Circular Economy ist daher der Zugriff auf die Informationen über vorgelagerte Schritte wie auch das gegenseitige Wissen zu den Auswirkungen des eigenen unternehmerischen Handelns auf nachgelagerte Wertschöpfungsstufen. Zusammen mit unternehmerischer wie gesellschaftlicher Motivation und politisch gesetzten Anreizen kann so Handlungsbereitschaft und Handlungsfähigkeit entstehen.

Die zentrale Voraussetzung für viele Maßnahmen und Strategien der Circular Economy ist damit die Verknüpfung von physischen Stoffströmen mit digitalen Datenströmen. Dafür ist es

³ Im Jahr 2019 fielen beispielsweise in Deutschland rund 5 Mio Tonnen Post-Consumer Kunststoffabfälle an, von denen ca. 1 Mio Tonnen als Rezyklat wiedergenutzt werden konnten. Dazu kamen Produktionsabfälle aus der Industrie in gleicher Größenordnung. Die Kunststoffverarbeitung lag im gleichen Jahr jedoch bei gut 14 Mio. Tonnen, Rezyklate deckten damit nur ein Siebtel der benötigten Rohstoffe ab und über 12 Mio. Tonnen wurden als Neuware auf Basis von Erdöl zugeführt (Lindner et al., 2020).

notwendig, Ressourcen und die daraus entstandenen Produkte zu kennzeichnen und mit Informationen zu Mengen, Ort und Zustand an den unterschiedlichen Stellen im System zu erfassen (*tracking*). Auf dieser Grundlage können die Lebenswege und Stoffströme über die Wertschöpfungsstufen nachverfolgt werden (*tracing*), was die Analyse und letztlich auch Optimierung von Stoffströmen ermöglicht.

Deshalb gilt: keine Circular Economy ohne Daten. Erst die Digitalisierung schafft die Grundlagen für eine umfassende ökologische Transformation unserer Wirtschaft. Hier hat sich in den letzten Jahren ein Handlungsfenster geöffnet, unter den Oberbegriffen der Industrie 4.0 und dem Internet of Things (IoT) beschleunigt sich derzeit die digitale Transformation der Wirtschaft und bietet Ansatzpunkte für die ökologische Transformation. Die Grundlagen liefert das Zusammenspiel von digitalen Lösungen in vier zentralen Funktionsbereichen:

- Daten erfassen und vernetzen
- Daten zusammenführen und teilen
- Daten authentifizieren und sichern
- Daten analysieren

Digitale Lösungen kombinieren dabei die unterschiedlichsten digitalen Schlüsseltechnologien wie vernetzte Sensoren und das Internet of Things (IoT), Edge und Cloud Computing sowie digitale Plattformen, Distributed Ledger Technologien (DLT) wie Blockchains und Analyseverfahren wie Big Data oder Künstlicher Intelligenz (KI).

Auf dieser Basis verändert Digitalisierung immer stärker Produktionsprozesse, Wertschöpfungsketten, Wettbewerbspositionen wie auch die Beziehungen zu Kunden und Partnern. Unternehmen werden Teil von Daten-Ökosystemen, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und Technologieführerschaft definieren sich zunehmend durch die Kompetenz zur Koordination und Gestaltung von Datenbeziehungen. Hier können und müssen die Strategien für den Aufbau der Circular Economy ansetzen. Digitalisierung und Nachhaltigkeit müssen als gemeinsame Gestaltungsaufgabe im Sinne der "Twin Transition" gedacht und gelebt werden.

Die nächsten Kapitel vertiefen diese Aspekte:

Kapitel 3 (Improve) skizziert das breite Spektrum von Optionen zur Optimierung der Circular Economy. Die dafür nötigen digitalen Lösungen sind verfügbar, werden eingesetzt und müssen somit systematisch weiterentwickelt und noch stärker genutzt werden.

Kapitel 4 (Convert) geht einen Schritt weiter und adressiert die Neuausrichtung von Wertschöpfung, Geschäftsmodellen und unserem Nutzungsverhalten mit Hilfe digitaler Lösungen. Das ist unverzichtbar für die Zielerreichung einer Circular Economy. Hier besteht Handlungsbedarf, diese Ansätze müssen zügig und breit skaliert werden.

Kapitel 5 (Transform) benennt fünf zentrale Ansatzpunkte, um die Voraussetzungen für diese Skalierung und die weitreichende digital-ökologische Transformation der Wirtschaft im Sinne der Circular Economy zu schaffen.

Kapitel 6 (Bedingung) weist auf die Umweltwirkungen der digitalen Endgeräte und Hardware-Komponenten hin, weshalb die Circular Economy auch für die Digitalisierung gelten muss.

3 Improve - Prozesse und Logistik der Circular Economy optimieren

Das breite Portfolio der heute schon verfügbaren digitalen Lösungen schafft neue Möglichkeiten zur Optimierung von industriellen Prozessen auf allen Produktionsstufen, für die Abfallwirtschaft und Sammellogistik wie auch für die Sortier- und Wiederaufbereitungsanlagen (H. Berg et al., 2021). Alle Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette können im Sinne einer Improve-Strategie durch konkrete Verbesserungen von einzelnen Verarbeitungsschritten und des Handlings von Stoffströmen zur Ressourceneffizienz beitragen. Die Ansatzpunkte werden im Folgenden kurz beschrieben.

Circularity by Design - Produkte ressourceneffizient gestalten

Schon beim Produktdesign können digitale Lösungen helfen, den Ressourceneinsatz zu minimieren. Durch digitale Tools und Verfahren für die Konstruktion von Bauteilen und Produkten können die Leichtbaupotenziale ausgenutzt und der Materialeinsatz von Beginn an optimiert werden. Die Auswertung von Stoffflüssen, Nutzungsmustern und der tatsächlichen Qualität von Recyclingprozessen liefert dabei wichtige Informationen für ein verbessertes, an Ressourcenschonung orientiertem Produktdesign (*Circularity by Design*, vgl. auch (EEA, 2017)) bei dem z.B. die späteren zirkulären Geschäftsmodelle (vgl. Kapitel 4), die Reparaturfähigkeit oder auch die Demontageschritte schon bei der Konstruktion mitgedacht und am digitalen Zwilling simuliert werden. Zwei Aspekte sind dabei von Bedeutung:

Die Grundlage bieten digitale Verfahren wie CAD, die eine digitale Konstruktion und die 3D-Modellierung von Bauteilen und Produkten ermöglichen. Das ist die Basis für etablierte computerunterstützte (CNC) Fertigungsverfahren wie auch für neuere Ansätze der additiven Fertigung (ADM) wie 3D-Druck oder Laserschmelzen. Sie zeichnen sich durch hohe Flexibilität aus und erlauben auch kleinste Produktionsserien bis runter zur Losgröße $N=1$, was eine materialeffiziente Konstruktion und Herstellung auch von geringen Stückzahlen ermöglicht. Bei Gebäuden kommt immer häufiger Building Information Modeling (BIM⁴) zum Einsatz, das ebenfalls ein digitales Abbild des Gebäudes erzeugt und so über den gesamten Lebenszyklus von Konstruktion über Nutzung bis hin zum späteren Rückbau dazu beiträgt, Energie und Ressourcen einzusparen.

Des Weiteren ist auch die Wahl der verwendeten Materialien eine Frage des Produktdesigns. In vielen Bereichen wie bei Verpackungen müssen die Möglichkeiten eines recyclingfreundlichen Designs weiter ausgereizt werden, zum Beispiel durch den Verzicht auf Verbundmaterialien und die Entwicklung gleichwertiger Lösungen auf Basis homogener Monomaterialien, die im Recyclingprozess besser wiedergewonnen werden können. Stoffstromdaten aus der gesamten Prozesskette helfen bei der Modellierung und Bilanzierung von kreislauffähigen Alternativen. Dazu kann die Verwendung von recycelten Sekundärmaterialien deutlich gesteigert werden. Beispiele im Supermarktregal zeigen die Möglichkeiten für den vollständigen 100% Einsatz von Recyclingmaterial z.B. bei Verpackungen von Reinigungs- und Waschmittel und erste Modelle von 100% recycelten Sportschuhen verdeutlichen mögliche Perspektiven für die Sportmodebranche.

4 Teilweise wird BIM auch als Building Information Management definiert

Produktion verbessern, Effizienz steigern, Umweltbelastungen reduzieren

Digitale Technologien werden immer stärker für die Steuerung und Optimierung von Fertigungsverfahren und Produktionsprozessen eingesetzt. Im Rahmen der Industrie 4.0 entsteht ein Werkzeugkasten von digitalen Lösungen, der stetig erweitert wird und neue Beiträge zur Energie- und Ressourceneffizienz ermöglicht. Maschinen und Anlagen können immer präziser gesteuert und flexibler betrieben werden (Plattform Industrie 4.0, 2020), das kann je nach Anwendungsfall Effizienzpotenziale von 20% oder mehr ausschöpfen (Schebek et al., o.J.). Digitalisierung hilft dabei nicht nur, den Energie- und Materialeinsatz sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren, sondern senkt auch den Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen und trägt zur Qualitätssicherung und so zur Vermeidung von Fehlproduktionen und Ausschuss bei. Letztlich werden damit auch Produktionskosten gesenkt und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen gestärkt.

Vorausschauend planen, Absatz und Logistik optimieren, Retouren vermeiden

Datenanalysen helfen bei der besseren Planung und Vorhersage von Materialbedarfen, Produktionsmengen und Transportkapazitäten. KI-basierte Verfahren verbessern die Prognose der Nachfrage und erleichtern eine bedarfsgerechte und zeitnahe Lieferung an Handel und Verbraucher. Sie können so helfen, dass weniger Produkte auf Halde produziert werden. Durch eine bessere Abstimmung der physischen Bereitstellung von Waren mit den tatsächlichen Kundenbedarfen können diese Werkzeuge somit auch zur Vermeidung beziehungsweise zur Verminderung von Retouren und Rücktransporten beitragen. Dazu helfen gerade im Online-Handel digitale Tools wie Assistenzsysteme oder "virtuelle Anproben" auf Basis von VR/AR Technologien, die richtige Wahl zu treffen und insbesondere den Rücklauf von Textilien zu minimieren.

Die maschinenlesbare Kodierung von Produkten erleichtert die noch weitergehende automatisierte Nachverfolgung und das Monitoring von Warenströmen über die verschiedenen Stufen von Handel und Vertrieb. Neue Möglichkeiten entstehen die Verwendung und den Verbleib von Waren nachzuverfolgen und so zum Beispiel auch die - teilweise illegale - Vernichtung von eigentlich noch gebrauchsfähigen Waren einzugrenzen.

Rohstoffe im System halten - Optimierung von Abfallwirtschaft und Recycling

Erkenntnisse, die aus Datenanalysen gewonnen werden, sind eine entscheidende Grundlage für ein effektives und nachhaltiges Wirtschaften auch in der Abfallwirtschaft. Nach der Nutzungsphase sollten alle Abfälle möglichst vollständig erfasst und einer sachgerechten Verwertung zugeführt werden. Die Digitalisierung und insbesondere das breite Spektrum der IoT-Lösungen, hin zum sogenannten Smart Waste Management, bietet viele Optimierungspotenziale für die Abfall- und Recyclingwirtschaft (Piel et al., 2018)⁵. Anwendungsfälle sind digitale Applikationen für die Optimierung der Sammellogistik durch datenbasierte tagesaktuelle bzw. Echtzeit- Routenplanungen oder der Einsatz intelligenter, d.h. mit Sensoren ausgestatteter Abfall- und Sammelbehälter, die eine bedarfsgerechte Leerung je nach Füllstand ermöglichen.

⁵ Eine Herausforderung ist hier die Nutzung personenbezogener abfallwirtschaftlicher Daten im Einklang mit den Anforderungen der DSGVO zum Schutz der Privatsphäre. Datenanonymisierung ermöglicht es den Dateneigentümer wie den Abfallwirtschaftsunternehmen und (externen) Datenkonsumenten wie statistische Ämter, Städte und Gemeinden, den Datenschutz sicherzustellen und gleichzeitig ein angemessenes Niveau des verbleibenden Datennutzens und Erkenntnisgewinne zu gewährleisten. Für die Datenanonymisierung können verschiedene Methoden gewählt werden wie z.B. Verfahren zur k-Anonymity und Differential Privacy (Dwork, 2006; Sweeney, 2002).

In Summe wird geschätzt, dass derartige Telematik und Logistik Lösungen den Fuhrpark benötigter Sammelfahrzeuge um 5-10% und die Zahl der Leerungen um bis zu 25% reduzieren können (H. Berg et al., 2020). Weitere Beispiele sind autonome Kehrmaschinen oder (teilweise) autonom fahrende Sammelfahrzeuge, die im zunehmend verdichteten Straßenraum zum Einsatz kommen können. Lösungen aus der Robotik verbessern das Handling an den Fahrzeugen und in den Behandlungsanlagen, was auch einen Beitrag zur Bewältigung der kommenden Herausforderungen des demographischen Wandels und absehbaren Fachkräftemangels in der Belegschaft der Entsorgungsbetriebe leisten kann.

Die oben angesprochenen digitale Informationen an Material und Verpackungen (tracking und tracing) erleichtern die Nachverfolgung und Identifikation von Stoffflüssen für die Recyclingwirtschaft. Maschinenlesbare Codes an Kunststoffverpackungen ermöglichen es zum Beispiel in der Sortieranlage die Verpackungen eines bestimmten Typs in vermischten Abfallstrom zu erkennen und gezielt auszusortieren. Dadurch können die Ausbeute und die Qualität der stofflichen Wiedergewinnung dieser Materialien gesteigert werden

Auch Sortiertechnologien auf Basis der Künstlichen Intelligenz (KI) erhöhen die Qualität der Wiederverwertung und verbessern die Arbeitsbedingungen, wenn zum Beispiel bestimmte Verpackungen oder Produkte durch Bilderkennungsverfahren gescannt und automatisch erfasst werden. Fortschritte in der Anlagensteuerung und Robotik steigern zusätzlich die Leistungsfähigkeit und Präzision von Sortieranlagen (EU-Recycling, 2021; Flemming & Balthasar, o. J.; Hayes, 2021; RECYCLING magazin, 2019).

Im Rahmen der Aufbereitung und weiteren Behandlung von Recyclingmaterial eröffnen sich mit der digitalen Steuerung und Optimierung der Verfahrenstechnik zusätzliche Chancen für eine transparente und verlässliche Dokumentation der Prozessparameter wie Verweilzeit, Temperatur und Druck. Ein Nachweis dieser Verfahrensparameter ist zum Beispiel für die Zertifizierung von bestimmten Recyclingqualitäten erforderlich. Im Schritt der Vermarktung der wiedergewonnenen Materialien als qualitätsgeprüftes Rezyklat helfen diese Informationen zum vorgelagerten Recyclingprozess bei der Dokumentation und Zertifizierung.

Um einen möglichst hohen Anteil der bislang eingesetzten natürlichen Ressourcen durch recyceltes Sekundärmaterial zu substituieren, müssen funktionsfähige und gut skalierbare Märkte für Rezyklaten geschaffen werden. Dafür müssen Sekundärmaterialien in ausreichender Menge, Qualität und zeitlich planbar verfügbar sein und an die entsprechende Nachfrage vermittelt werden. Digitale Handelsplattformen bieten neuen Kanäle für die Vermarktung von qualitätsgeprüften und zertifizierten Sekundärmaterialien (Rezyklaten), die an Bedeutung gewinnen und die bisherigen Hemmnisse überwinden helfen. Sie bündeln die derzeit oft noch stark fragmentierte und regional geprägte Verfügbarkeit von Rezyklaten, vernetzen dadurch die Recyclingbranche mit den Produzenten und sind wichtige Voraussetzung für die Skalierung dieser Märkte. Die Entwicklung von Qualitätsstandards ist eine wichtige Voraussetzung für digitale Märkte wie zum Beispiel die DIN SPEC 91446 zur Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel. Dazu kann die Politik mit produktspezifischen Mindestquoten für den Einsatz von Rezyklaten und Sekundärrohstoffen - wie im Koalitionsvertrag vorgesehen - einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung dieser Märkte und der Schließung der Stoffkreisläufe leisten.

4 Convert - Geschäftsmodelle, Nutzungsverhalten neu ausrichten

Digitale Technologien können an vielen Stellen in der Kreislaufwirtschaft zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen. Diese Verbesserungen allein werden allerdings nicht ausreichen, um die Umweltwirkungen unseres Rohstoffverbrauchs auf ein nachhaltiges Maß zu begrenzen und die ambitionierten Klimaschutzziele zu erreichen. Es muss sich die Art und Weise ändern, wie in der Industrie mit Ressourcen wirtschaftliche Wertschöpfung erzielt wird und wie wir Konsument*innen in der Nutzungsphase von Produkten unsere Bedürfnisse befriedigen. Die Maßnahmen im Sinne einer Convert-Strategie gehen daher einen Schritt weiter. Sie suchen Ansatzpunkte, um Geschäftsmodelle neu auszurichten und die Nutzenden und ihr Verhalten stärker in die Circular Economy einzubeziehen.

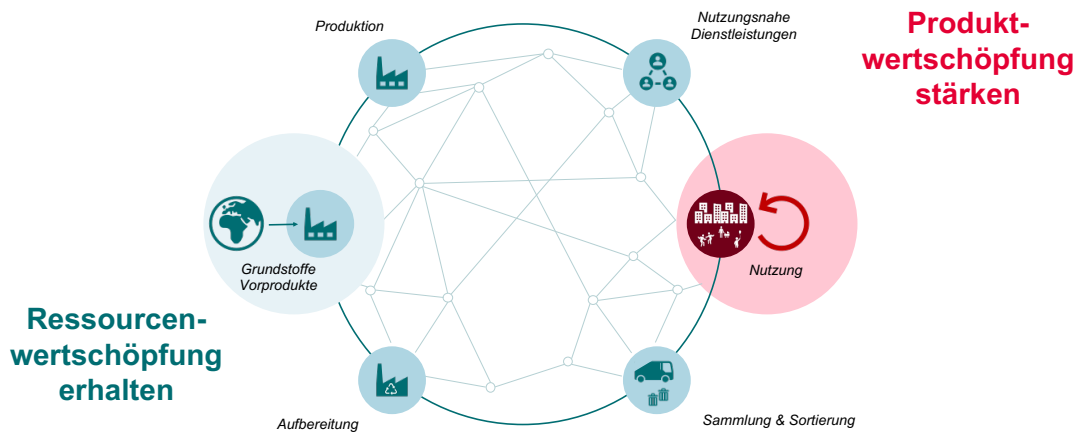


Abbildung 3: Strategien zur Steigerung der Wertschöpfung (Quelle: Eigene Darstellung)

Wertschöpfung neu denken

Die Digitalisierung bietet neue Chancen für zirkuläre Geschäftsmodelle, die Kundenanforderungen mit minimalem Ressourceneinsatz bedienen, deren Produkte für Langlebigkeit ausgelegt sind und stärker mit Dienstleistungen zur Ressourcenschonung verbunden werden (sogenannte Produkt-Service-Systems (Engels et al., 2021)). Hier besteht noch großer Entwicklungsbedarf, denn die Unternehmen, die sich für Ressourceneffizienz engagieren, legen den Schwerpunkt ihrer Maßnahmen immer noch auf die im vorherigen Kapitel angesprochenen Optionen zur Optimierung der Produktionsprozesse oder Energieeinsparungen (Abbildung 4, vgl. auch (BCG & WBCSD, 2018)). Weniger als die Hälfte der Maßnahmen betreffen das Produktdesign und in noch deutlich weniger Unternehmen wird an Produkt-Service-Systemen gearbeitet.

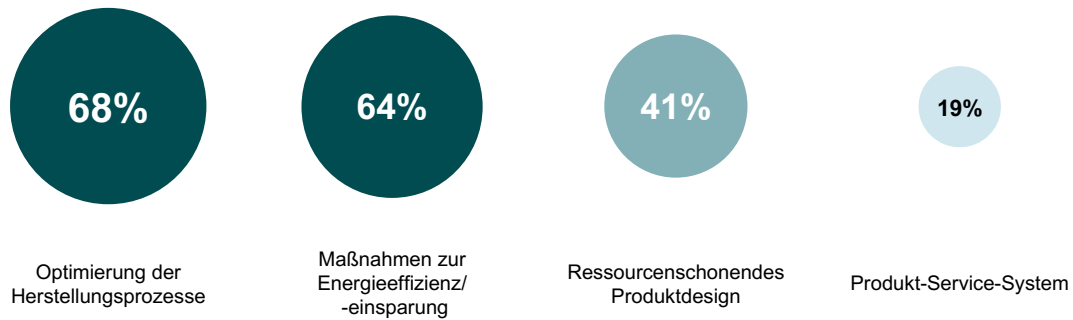


Abbildung 4: Bedeutung von Maßnahmen zur Steigerung von Ressourceneffizienz in Unternehmen (Quelle: Eigene Darstellung nach (Engels et al., 2021))

Mit zirkulären Geschäftsmodellen sind Angebote gemeint, die die sog. "inneren R-Strategien" wie Re-Think, Re-Use, Repair oder Re-Manufacturing in unternehmerisches Handeln und Geschäftschancen übersetzen (vgl. Abbildung 5). Die Grundidee ist einfach: es gilt die Wertschöpfung und Bedürfnisbefriedigung von dem Besitz und Verzehr von natürlichen Rohstoffen zu entkoppeln - Klima- und Ressourcenschutz führt so zu neuen Paradigmen der Wertschöpfung und industriellen Produktionslogiken (Plattform Industrie 4.0, 2021).

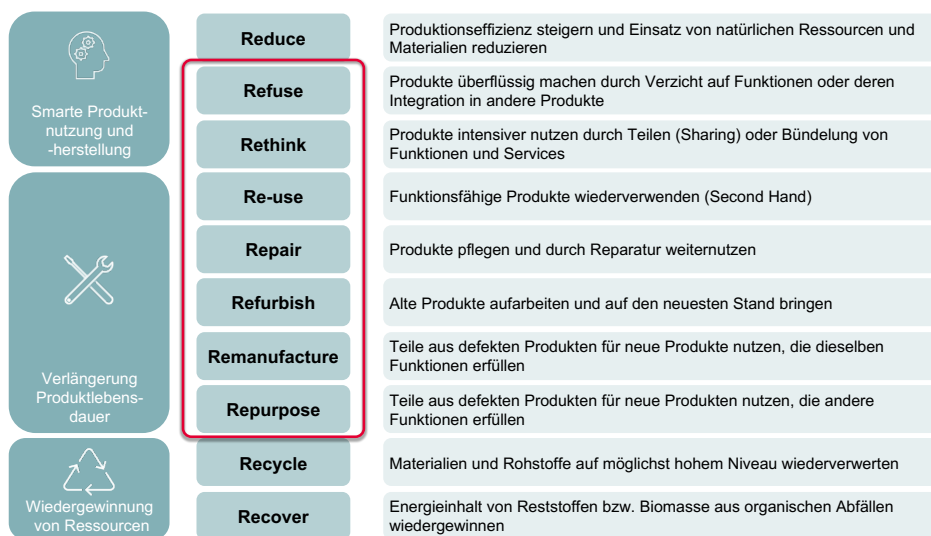


Abbildung 5: Die 10R-Strategieelemente der Circular Economy (Quelle: Eigene Darstellung nach European Environment Agency et al., 2020)

Für zirkuläre, ressourceneffiziente Geschäftsmodelle gibt es unterschiedliche Ansatzpunkte:

Bei **nutzungsbasierten Geschäftsmodellen** - den sogenannten pay-per-use Modellen - werden die Anbieter nur für die tatsächliche Nutzung von Produkten vergütet⁶. Das Produkt bleibt im Besitz des Herstellers und kann nach der Nutzung u.U. auch weiteren Kunden zur Verfügung gestellt werden. In diesem Modell haben die Hersteller einen Anreiz, möglichst robuste und langlebige Produkte zur Verfügung zu stellen, um so die Erlöse der Nutzungsphase zu maximieren. Gerade bei hochwertigen Produkten und kostenintensiven Investitionsgütern

⁶ Ein spezielles Einsatzfeld ist das sogenannte Chemikalien-Leasing, bei dem z.B. Wasch- oder Löse-mittel auf Mietbasis beim Kunden eingesetzt und nach Gebrauch vom Hersteller zurückgenommen und für einen nächsten Einsatz wieder aufbereitet werden (Umweltbundesamt, 2021).

ist es wichtig, kontinuierlich Informationen zur Nutzungsphase zu erhalten. Die Vernetzung der Maschinen mit Sensoren ermöglicht es, jederzeit den Zustand des Produktes zu bewerten, mögliche Fehler und Störfälle rechtzeitig zu erkennen und durch vorausschauende Wartung und Instandhaltung (*predictive maintenance*) jederzeit die Einsatzfähigkeit zu garantieren und Folgekosten zu minimieren. Für den deutschen Maschinenbau bieten diese Strategien die Chance, über Betreibermodelle die Wertschöpfung auszuweiten und gleichzeitig auch die Kundenbeziehung zu stärken.

Konzepte **der Sharing Economy** gehen in die gleiche Richtung. Hier werden Geräte, Werkzeuge oder Fahrzeuge durch Kunden gemeinsam und dadurch intensiver genutzt - mit dem gleichen Ressourceneinsatz kann damit eine höhere Wertschöpfung und Bedürfnisbefriedigung erreicht werden. Digitalisierung senkt die Transaktionskosten und ermöglicht durch Plattformen und Smartphone-Apps die Organisation und Skalierung dieser Ansätze, sowohl als private Initiativen wie auch als kommerzielle Geschäftsmodelle. Das Konzept beschränkt sich jedoch nicht auf Anwendungen im privaten Alltag. Die Idee lässt sich auch auf Fertigungsanlagen im Sinne einer *Shared Production* oder *Production-as-a-Service* übertragen. In der Industrie, gerade im Mittelstand, stehen Maschinen aus unterschiedlichen Gründen erhebliche Zeiten still und könnten von anderen Unternehmen in diesen Phasen genutzt werden. Digitalisierung erlaubt es, Maschinenmodule mit bestimmten Skills (Fertigungsfähigkeiten wie bohren, fräsen, schneiden) zu definieren, in vernetzten Systemen anzubieten und abzurufen (SmartFactoryKL, 2021). Ein weiteres etabliertes Beispiel mit über 60 Jahren Tradition sind die Maschinenringe in der Landwirtschaft, bei denen teure Landmaschinen nur für die kurzfristige Einsätze in den einzelnen Betrieben genutzt werden. Mittlerweile hat sich darum ein umfassendes Ökosystem von - mittlerweile auch digitalen - Dienstleistungen entwickelt, wie bspw. Prognose von Agrar-Wetterdaten oder Dokumentenverwaltung.

Neue Wertschöpfungspotenziale entstehen auch rund um die **Lebensdauererlängerung von Produkten** während und nach der ersten Nutzungsphase. Reparatur und Instandhaltung ermöglichen es den Nutzenden ihre Produkte und Güter möglichst lange im Einsatz zu halten. Hier setzen auch politische Maßnahmen zur Lebensdauererlängerung wie einem Anspruch der Nutzenden auf Reparatur (Right-to-Repair), garantierte Mindestlebensdauern oder der Verpflichtung zur Bereitstellung von Ersatzteilen durch die Hersteller an (z.B. EU-Ökodesignrichtlinie oder der für 2022 angekündigten *Sustainable Products Initiative* (SIP) der EU). Die digitale Verfügbarkeit von Reparaturinformationen und -anleitungen wie auch von erforderlichen Software-Downloads ist eine weitere wichtige Voraussetzung. Zugang zu den digitalen Konstruktionsdaten in Verbindung mit Technologien wie 3D-Druck (s.o.) bieten neue Optionen zur Ersatzteilversorgung und sind ebenfalls ein Beitrag zur Reparaturfähigkeit und damit zur Langlebigkeit von Produkten. Auch bei der Rücknahme und wieder Ausarbeitungen (Re-manufacture, Refurbish) helfen die Informationen des digitalen Produktes zur Identifizierung und sachgerechten Behandlung des jeweiligen Bauteils oder Produkts.

Ein weiterer - etablierter - Bereich für zirkuläres Wirtschaften ist die **Vermarktung von Gebrauchsgütern (Second Hand)** durch Privatpersonen oder gewerblichen Akteuren. Im Sinne des Re-use werden gebrauchsfähige Produkte länger genutzt - oder wieder einer Nutzung zugeführt. Bei Autos ist das ein Markt mit langer Tradition und auch in der Industrie werden langlebige Investitionsgüter als Gebrauchsmaschinen und Anlagen weitergenutzt. Große Potenziale bieten aber auch die Alltagsgegenstände bei uns zuhause. Es wird geschätzt, dass im Durchschnitt jeder bundesdeutsche Haushalt voll funktionsfähige aber ungenutzte Waren und Gegenstände im Wert von über 1.200 Euro besitzt (Abbildung 6, (Schwilling et al., 2021)). Für Deutschland ergibt das einen Wert von insgesamt über 50 Mrd. Euro. Diese Waren - und damit auch Rohstoffe - könnten durch eine Second Hand Nutzung zu mindestens in Teilen in den Kreislauf zurückfließen. Digitale Plattformen und Smartphone Apps erleichtern den direkten Verkauf zwischen Privatpersonen und ermöglichen virtuelle Flohmärkte oder auch Tauschbörsen.

Gesamtwert der ungenutzten Produkte in Deutschland

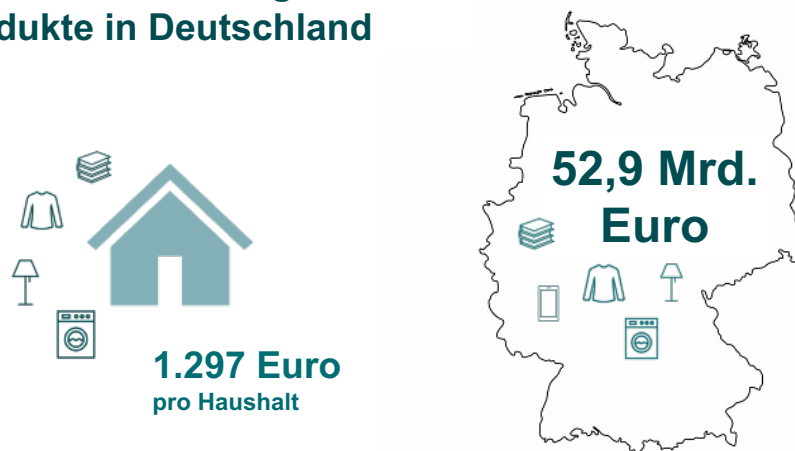


Abbildung 6: Abschätzung des Gesamtwerts der ungenutzten Produkte in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach (Schwilling et al., 2021))

Nutzungsverhalten ändern

In einer Circular Economy gewinnt die Nutzungsphase an Bedeutung. Verbraucherinnen und Verbraucher haben Einfluss auf Auswahl, Nutzung und Entsorgung von Produkten - damit steigt gleichzeitig die Bedeutung des individuellen Verhaltens für den Ressourcenverbrauch der gesamten Wirtschaft.

Die Informationen zu Produkten z.B. in Form eines digitalen Produktpasses (DPP) erleichtern es den Verbraucher*innen ihre Entscheidungen im Sinne von Klima und Ressourcenschutz zutreffen. Das betrifft in erster Linie die Auswahl und Bewertung von ökologisch vorteilhaften Alternativen in der Kaufentscheidung. Die Daten des DPP in Verbindung mit Assistenz-Tools bieten die Möglichkeit viel stärker als bisher verschiedene ökologischen Kriterien zu berücksichtigen und auch Wechselwirkungen und Zielkonflikte entsprechend der individuellen Präferenzen abzuwägen. Das betrifft zum Beispiel den ökologischen Fußabdruck des Produkts mit den in der Vorkette angefallenen Emissionen oder Indikatoren zur Langlebigkeit, Reparatur- und Recyclingfähigkeit. Gleichmaßen können Entscheidungen zur Abfallvermeidung erleichtert werden. Dazu können Hinweise zur richtigen Bedienung, Pflege und sachgerechten Reparatur leicht gefunden werden oder auch durch Smartphone Apps in Erinnerung gerufen werden und mit Dienstleistern in der Nähe vernetzt werden. Komplexe Informationen und Zusammenhänge können so veranschaulicht und ins Alltagsleben einbezogen werden. Im Ergebnis werden die Konsument*innen in ihrer Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit gestärkt.

Digitale Technologien können auch das Verhalten von uns Verbraucher*innen am Ende der Nutzungsdauer verändern und eine richtige Erfassung und Trennung von Abfällen unterstützen. Sensoren und Bilderkennungstechnologien in Tonnen, Container und Sammelfahrzeugen können Daten zu Mengen und Zusammensetzung des Abfalls liefern und damit auch Fehlwürfe identifizieren. Auf dieser Basis sind neue Optionen für Feedback, Lernen und Incentivierung der richtigen Entsorgung und letztlich auch Abfallvermeidung durch die Nutzenden möglich, die z.B. auch Ansätze von Nudging oder Gamification einsetzen. Diese verhaltensbezogenen Strategien ergänzen die im vorherigen Kapitel skizzierten Lösungen zur logistisch-technischen Optimierung der Abfallsammlung und -entsorgung.

Doch nicht nur wir privaten Verbraucher*innen können und müssen unser Verhalten ändern und unseren Konsum und Lebensstile stärker nachhaltig gestalten. Mit einem gesamten Einkaufsvolumen von 500 Mrd. Euro ist die Beschaffung der öffentlichen Hand in Deutschland ein wichtiger Nachfragefaktor und in vielen Märkten die größte Kundengruppe (Fischer & Küpper, 2021). Entsprechend groß ist die Verantwortung, aber auch die Wirkung der öffentlichen Beschaffung für Klimaschutz und die Entwicklung einer Circular Economy. Digitale Lösungen helfen bei der Umsetzung einer nachhaltigkeitsorientierten Beschaffung durch öffentliche Institutionen (*Green Public Procurement*) z.B. durch Aufbau von zentralen anwendungsfreundlichen Plattformen, die eine einfachen und vergaberechtlich konforme Berücksichtigung von präqualifizierten, ökologisch ausgerichteten Anbietern bei Vergabeverfahren erleichtern.

Der Anfang ist gemacht - die Skalierung steht aus

In den letzten Jahren sind immer mehr beispielhafte Initiativen für zirkuläre, ressourceneffiziente Geschäftsmodelle entstanden und gleichzeitig gibt es auch immer wieder gegenläufige Trends wie zum Beispiel Fast Fashion, die mit einer Beschleunigung des Wechsels von Modekollektionen den Konsum und damit auch Ressourcenverbrauch anheizen. Die Bekleidungsproduktion hat sich von 2000 bis 2014 auf mehr als 100 Mrd. Kleidungsstücke verdoppelt, bis 2030 wird mit einer jährlichen Produktion von 200 Mrd. Stück gerechnet. Pro Jahr kaufen deutsche Verbraucher*innen im Durchschnitt 60 Kleidungsstücke pro Jahr – tragen diese allerdings nur noch halb so lang wie vor 15 Jahren (Kopp et al., 2021).

Der Aufbau einer Circular Economy ist damit noch kein Selbstläufer. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Ausweitung und Verbreitung der in diesem Kapitel skizzierten Geschäftsmodelle und Verhaltensänderungen im großen Maßstab. Hier ist die Politik gefordert, mit verbindlichen Zielvorgaben, konsistenten Anreizsystemen und regulatorischen Rahmensetzungen die erforderlichen Transformationsprozesse einzuleiten.

Es muss dabei gelingen, über einzelne noch fragmentierte Ansätze hinauszukommen und eine breite, selbstverstärkende Dynamik der Skalierung anzustoßen. Gleichzeitig müssen die im vorherigen Kapitel angesprochenen vielen Möglichkeiten zur Optimierung von einzelnen Prozessschritten und dem Stoffstrommanagement konsequent ausgeschöpft und durch neue innovative Technologien erweitert werden.

Beide Perspektiven hängen zusammen und beeinflussen sich gegenseitig, sie sind beide Dimensionen des Systemwandels. Digitalisierung kann diesen Wandel ermöglichen und treiben, wenn sie als integrales Element der ökologischen Industrietransformation verstanden wird.

Im nächsten Kapitel werden zentrale Eckpfeiler und Voraussetzungen dafür diskutiert.

5 Transform - Voraussetzungen für die digital-ökologische Industrietransformation schaffen

Digitalisierung und Nachhaltigkeit setzen den Rahmen für das kommende Jahrzehnt. Sie stellen beide dabei vergleichbare Anforderungen an die Akteure: es gilt sich auf eine immer stärker vernetzte Welt einzustellen und dafür ein systemisches Denken und Handeln zu entwickeln. Anpassungsfähigkeit an eine hohe Innovationsdynamik und den schnellen Wandel von Umfeld, Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten sind gefordert. In beiden Feldern gibt es damit keinen statischen Endzustand, Leben und Handeln ist eingebettet in übergeordnete Veränderungsprozesse, Change Management wird zur dauerhaften Schlüsselaufgabe.

Die digitale und ökologische Transformation unserer Wirtschaft kann nur zum Erfolg führen, wenn sie als eine gemeinsame Gestaltungsaufgabe verstanden wird. Diese Aufgabe erfordert einen Wandel auf unterschiedlichen Ebenen: Unternehmen müssen sich intern neu aufstellen, weiterentwickeln und neue Fähigkeiten aufbauen. Die Beziehungen von Unternehmen innerhalb einer Wertschöpfungskette oder Branchen verändern sich, Partnerschaften und Kooperationen gewinnen an Bedeutung, es müssen neue Strukturen für die digitalen Interaktionen und Datenflüssen zwischen Akteuren geschaffen werden - und nicht zuletzt müssen sich auch politische Rahmenbedingungen und Anreizsystem an die neuen Herausforderungen und Gestaltungsaufgaben anpassen.

Wir sehen folgende fünf Eckpunkte und Handlungsfelder, um den Rahmen für eine erfolgreiche digitale und ökologische Transformation aufzuspannen. Sie müssen im Mittelpunkt der Agenda der kommenden Jahre stehen (Abbildung 7).

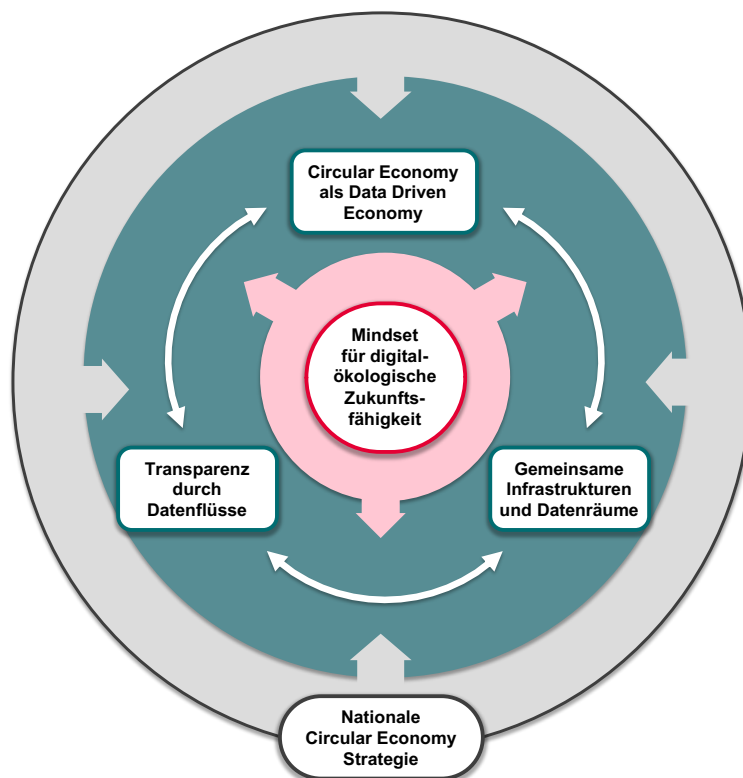


Abbildung 7: Voraussetzungen für die digital-ökologische Industrietransformation (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1 Digitalisierung konsequent zu Ende denken - die Circular Economy als Data Economy verstehen

Die Fähigkeit zur Optimierung der Ressourcennutzung im Unternehmen hängt mit dem Grad der Digitalisierung zusammen, d.h. der Fähigkeit das Potenzial der Daten im Unternehmen voll auszuschöpfen. Empirische Studien zeigen ein klares Bild (Engels et al., 2021): stärker digitalisierte Unternehmen weisen größere Erfolge bei der Materialeinsparung auf (Abbildung 8).

Digitalisierte Unternehmen sparen Material erfolgreicher

Typisierung der Unternehmen nach Digitalisierungsgrad bei Ressourceneffizienzmaßnahmen in Prozent der Unternehmen nach Materialeinsparung (Produzierendes Gewerbe)

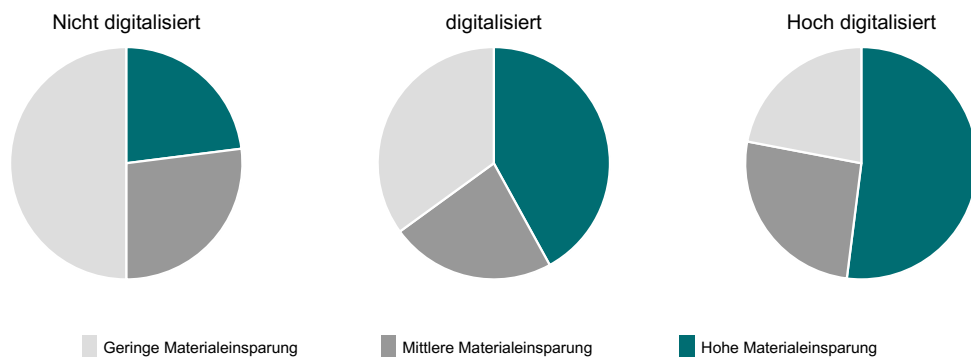


Abbildung 8: Materialeinsparung in deutschen Unternehmen in Abhängigkeit des Digitalisierungsgrads (Quelle: Eigene Darstellung nach (Engels et al., 2021))

Der Digitalisierungsgrad in den Unternehmen muss weiter steigen, Daten und digitale Prozesse müssen immer konsequenter für eigenes Handeln und Entscheiden wie auch für die Interaktionen mit Externen genutzt werden. Es reicht dafür nicht, Daten nur zu erfassen und zu vernetzen. Daten müssen zusammengeführt und integriert werden und so für weitergehende Analysen verfügbar gemacht werden (Abbildung 9). Aus den Rohdaten und Messwerten von vernetzten Sensoren und Datenquellen werden so Informationen, die als Wissen aufbereitet werden und neue Handlungsmöglichkeiten eröffnen können. Auf der höchsten Erkenntnisstufe kann man dann von digitaler "Weisheit (Wisdom)" sprechen, die es erlaubt, das Verständnis der Vergangenheit mit der Einsicht in mögliche Zukünfte zu verbinden.

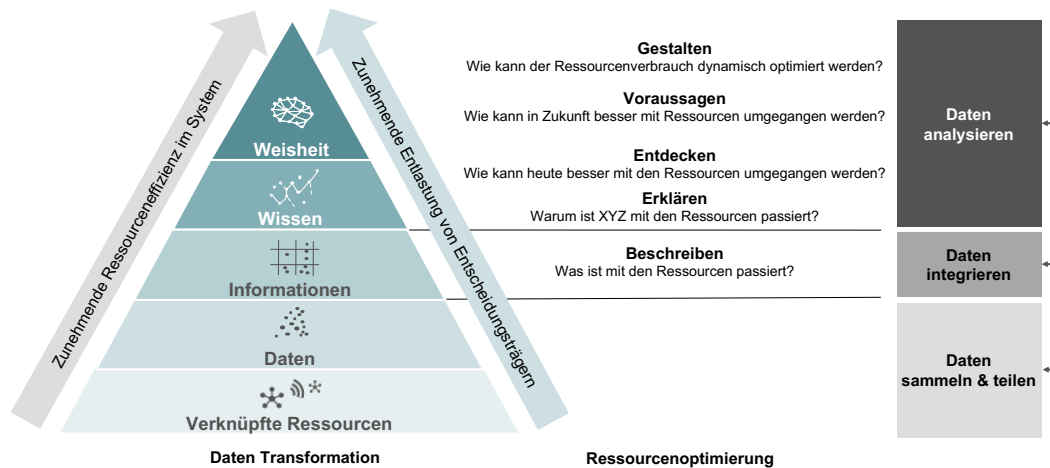


Abbildung 9: Smart Circular Economy Framework (Quelle: Eigene Darstellung nach (Kristoffersen et al., 2020))

In diesem Kontext lässt sich auch der Reifegrad im nachhaltigen Umgang mit Ressourcen schrittweise steigern. Im ersten Schritt geht es darum, den aktuellen Status und die Muster der Ressourcennutzung im Unternehmen bzw. seinen Geschäftsfeldern nachzuvollziehen und beschreiben zu können. Darauf aufbauend können Diagnosen erstellt, Erklärungen gefunden und Optimierungspotenziale entdeckt werden. Lernende Systeme erlauben es darüber hinaus, künftige Entwicklungen zu modellieren und Vorhersagen abzuleiten. Das stärkt die Handlungs- und Reaktionsfähigkeit in komplexen, dynamischen Umgebungen. Viele Unternehmen sehen sich noch als Nachzügler dieser Entwicklung (A. Berg, 2021) und müssen in den nächsten Jahren ihre digitalen Fähigkeiten ausbauen und stärken - die vielfach noch eingesetzte Excel-Tabelle hat ausgedient.

Neue Produktionsverfahren, beschleunigte Innovations- und Produktzyklen, die Plattformisierung von Geschäftsbeziehungen, steigende Ansprüche der Kund*innen - all das treibt die Digitalisierung und Datenorientierung in der Wirtschaft. Doch Unternehmen können sich nicht allein darauf konzentrieren, da sie sich gleichzeitig immer stärker für Treibhausgasminimierungen und Umweltschutz engagieren müssen. Datenorientierung und die Anforderungen des Klima- und Ressourcenschutzes müssen deshalb von Beginn zusammengedacht werden - der Einstieg in die Circular Economy muss auch als eine Datenstrategie verstanden werden.

Perspektivisch muss erreicht werden, dass die Datendimensionen im Unternehmen zusammenwachsen. Nachhaltigkeitsbezogene Daten und Handlungsoptionen werden dann im Sinne eines "Sustainability Ledgers" ein integraler Bestandteil der digitalen Managementsysteme neben den klassischen finanziellen und produktionsbezogenen Aspekten des Controllings (Plattform Industrie 4.0, 2020). Die Nachfrage nach diesen nachhaltigkeitsbezogenen Informationen steigt, insbesondere der Kapitalmarkt und die institutionellen Investoren werden in den nächsten Jahren den Druck erhöhen, um die Nachhaltigkeitswirkungen der Unternehmen in ihrem Portfolio bewerten und ökologische Risiken reduzieren zu können. Regulatorische Anforderungen können diese Entwicklungen flankieren.

5.2 Transformation durch Transparenz – durchgängige Datenkreisläufe als Game Changer

Damit eine datenbasierte Circular Economy entstehen kann müssen Daten über den ganzen Kreislauf verfügbar werden. Das bedeutet bestehende Datensilos aufzubrechen, Grenzen zwischen Akteure durchlässiger zu machen und nicht zuletzt eine Kultur der gemeinsamen Datennutzung zum gemeinsamen Vorteil zu etablieren.

Das Konzept eines digitalen Produktpass (DPP) ist eines der zentralen Instrumente für den Datenaustausch in der Circular Economy. Informationen zum Produkt und seiner Umweltwirkungen werden über den ganzen Lebenszyklus über Unternehmensgrenzen hinweg verfügbar gemacht und schaffen damit die grundlegende Voraussetzung für eine Vielzahl der oben angesprochenen Strategien und Maßnahmen. Angestoßen durch die Initiative der EU (European Commission, 2020a; Götz et al., 2021) werden Konzepte, Umsetzungsbausteine und Pilotprojekte für unterschiedlichste Anwendungsfälle erarbeitet. Entscheidend für den Erfolg wird sein, zusammen mit der Industrie und anderen Stakeholdern einen pragmatischen und flexiblen Ansatz zu finden, der einen Einstieg in diese herausfordernde Aufgabe ermöglicht und Lernerfahrungen für eine kontinuierliche Verbesserung und Weiterentwicklung nutzt. In diesem Sinne sind die laufenden Aktivitäten im Rahmen der EU-Batterieverordnung zu einem Produktpass der Batterien für Elektrofahrzeugen ein erster Pilot Case (Kadner et al., 2021).

Die Politik muss dafür die notwendigen Standards vorantreiben und einen Rahmen festlegen, der die Ziele eines DPP im Blick behält, die ökologische Wirkung für eine Circular Economy sicherstellt und gleichzeitig den Umsetzungsaufwand beherrschbar hält. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Schnittstellen mit schon existierenden oder parallel entstehenden Informationssystemen und Datenbanken⁷ geklärt, Synergien genutzt und Redundanzen wie auch Inkonsistenzen vermieden werden. Wir sehen das als eine Kernaufgabe der Ressourcen- und Wirtschaftspolitik der kommenden Jahre. Die neue Bundesregierung muss sich hier stärker als bisher proaktiv und gestaltend in die Prozesse auf europäischer Ebene einbringen.

5.3 Infrastrukturen und Datenräume für die digitale Circular Economy

Die Grundidee der digitalen Circular Economy ist, das Unternehmen und Akteure Daten teilen und zusammenlegen, in Instrumente wie den DPP einspeisen und auch auf Grundlage von solchen Datenpools wie angesprochen eigene zirkuläre Geschäftsmodelle entwickeln. Dafür müssen praktische Voraussetzungen geschaffen werden:

- zuverlässige und sichere Infrastrukturen für Datenspeicherung und -verarbeitung unter Wahrung der Souveränität der Nutzenden
- klare Leitlinien, faire Regeln und eine vertrauenswürdige Governance für den differenzierten Zugang und die Verwertung von Daten entsprechend der jeweiligen Rolle der Akteure
- Standards und Schnittstellen, die eine effiziente und flexible Skalierung in unterschiedlichen Anwendungsfällen sowie eine Ausweitung der Einsatzbereiche durch Interoperabilität mit anderen Systemen ermöglichen

⁷ Beispiele auf EU-Ebene sind die SCIP Datenbank zu kritischen Stoffen (Substances of very high concern (SVHC) in products) der European Chemicals Agency (ECHA) oder die EU Product Registration database for Energy Labelling (EPREL), vgl. (Götz et al., 2021; Sipka & Hedberg, 2021)

Diese Strukturen und Voraussetzungen erfordern eine koordinierte, kollektive und konzentrierte Aktion vielfältiger Stakeholder, um einen Flickenteppich von individuellen und fragmentierten Einzellösungen zu vermeiden. Der Aufbau der nächsten Generation von Cloud-Infrastrukturen und -Services in Europa als Important Project of Common European Interest (IPCEI-CIS) sowie die laufende internationale Initiative GAIA-X und deren anwendungsspezifische Ausprägung CATENA-X für die Automobilindustrie sind Beispiele für den Aufbau derartiger Infrastrukturen⁸.

In diesem Bereich ist in jüngster Zeit viel in Bewegung geraten und es werden derzeit wichtige generische Voraussetzungen geschaffen, die mit Blick auf die Idee eines europäischen Datenraums für die Circular Economy (Circular Economy Data Space) nun konkret ausgestaltet werden müssen. Schritt für Schritt werden in den nächsten Jahren horizontale Strukturen verfügbar, die in den vertikalen Anwendungsfeldern dann operationalisiert werden können. Die Initiative CATENA-X adressiert z.B. Unternehmen in der automobilen Wertschöpfungskette und verfolgt die Vision, die "anwenderfreundlichste Umgebung für den Aufbau, den Betrieb und die kollaborative Nutzung durchgängiger Datenketten, entlang der gesamten automobilen Wertschöpfungskette" zu schaffen. Diese Bausteine braucht die Circular Economy. Aspekte des Stoffstrommanagements und der Ressourceneffizienz müssen daher wie angekündigt in dem entstehenden Daten-Ökosystem berücksichtigt werden. In anderen Anwendungsfeldern fehlen dagegen noch derartige Konzepte, Strukturen und Initiativen. Sie müssen in den nächsten Jahren entlang einer Roadmap systematisch entwickelt werden.

Die benötigten grundlegenden horizontalen Strukturen und Ökosysteme können nicht als proprietäre Einzellösungen von einzelnen Unternehmen entwickelt werden. Technologieoffenheit, Flexibilität und Individualität in der Anwendung sowie breites Vertrauen und Akzeptanz der Governance und Regelwerke sind Erfolgsvoraussetzungen. Gleichzeitig müssen aber hohe Investitionssummen und auch exzellentes Technologie Know-How mobilisiert werden, um leistungsfähige Lösungen aufbauen zu können.

Hier bietet sich eine breite aber effektiv koordinierte Zusammenarbeit von Stakeholdern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik an, nach dem Prinzip "Industrie geführt, politisch gerahmt, durch Vorreiter getrieben". Beispiel der jüngeren Vergangenheit wie die Entwicklung des Referenzarchitekturmodells der Industrie 4.0 (RAMI 4.0, vgl. (Arnold & Liebe, 2018)) oder auch AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture) als Rahmen für die Softwareentwicklung im Auto zeigen den Wert solcher kollaborativer Ansätze. So kann zügig eine kritische Masse erreicht werden und gleichzeitig Parallelentwicklungen und Mehrfachkosten vermieden werden.

Wissenschaft und Industrie sind dabei gefordert, tragfähige und zukunftsfeste Lösungen zu konzipieren. Die Politik hat dagegen die wichtige Rolle, Prozesse anzustoßen, die Entwicklungs- und Aufbaukosten insbesondere in der Anfangsphase (mit) zu fördern, die übergeordneten gesellschaftlichen und politischen Ziele zu definieren und ökologische Qualitätsstandards sicherzustellen.

⁸ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/ipcei-cis.html>,
<https://www.gaia-x.eu/>,
<https://catena-x.net/de/>

5.4 Digital und zirkulär heißt systemisch - eine neues Mindset für Zukunftsfähigkeit

Die digitale Transformation wie auch die Circular Economy verändern die Rolle von Unternehmen und anderer Stakeholder im System. Viel stärker als bisher sind die Akteure mit einander vernetzt mit Blick auf die Wertschöpfung, Stoffflüsse, Wechselwirkungen von Handlungen und nicht zuletzt auch den Datenbeziehungen. Wie angesprochen gewinnen Daten einen neuen, eignen Wert im Leistungsaustausch und schaffen die Basis für eigene, datengetriebene Geschäftsmodelle - zum Beispiel wenn die Analyse von Maschinen- oder Gebäudedaten für Dienstleistungen zur Optimierung des Betriebs und zur Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden verwendet werden.

Klassische Grenzen zwischen Unternehmen oder auch innerhalb zwischen Unternehmensbereichen lösen sich auf, die eigene Aktivitäten werden zunehmend zum Teil von größeren, digital organisierten Ökosystemen. Diese können auf Partnerschaften und Kollaboration aufbauen oder aber durch die strategische Ausweitung eigener Handlungsbereiche entstehen. Es ist beispielsweise zu beobachten, dass der Zugriff auf Recyclingkapazitäten und hochwertige Sekundärmaterialien an strategischer Bedeutung für Unternehmen und Branchen gewinnt. Führende Unternehmen des Einzelhandels engagieren sich im Bereich der Sammlung, Sortierung und Wiederverwertung von Verpackungsabfällen und weiten dabei ihre Unternehmensposition auf breite Teile einer Kreislaufwirtschaft aus. In der Automobilindustrie rücken durch die Umstellung auf Elektromobilität die Fahrzeugbatterie und ihre Rohstoffe in den strategischen Fokus. Mit einem unternehmerischen Engagement bzw. strategischen Partnerschaften sowohl bei der Batterieherstellung wie auch beim Recycling stärken die Hersteller ihre Wettbewerbsposition und sichern sich den Zugriff auf wertvolle Rohstoffe und Kompetenzen.

In der Konsequenz fordert diese Entwicklung ein neues Selbstverständnis für die eigene Rolle in der Transformation von Systemen, quasi ein Mindset als "Prozess im Prozess" in Verbindung mit einer Kultur des Datenteilens und der Zusammenarbeit. Traditionell fragmentierte Datensilos - gerade auch innerhalb von Organisationen - müssen aufgebrochen und im Sinne des gemeinsamen Vorteils nutzbar gemacht werden. Die fortschreitende Digitalisierung verlangt damit von den Akteuren in der Wirtschaft, Gesellschaft wie auch in Verwaltungen, neue Kompetenzen und ein systemisches Verständnis zu entwickeln. Die Fähigkeiten zur Transformation sind universelle Voraussetzung - sowohl zur Gestaltung des digitalen Wandels wie zur Bewältigung der Herausforderungen von Klima- und Ressourcenschutz. Nachhaltigkeit und Digitalisierung fordern alle Akteure gleichzeitig, sie dürfen deshalb nicht parallel neben einander stehen, sondern müssen konsequent als eine gemeinsame Transformationsaufgabe verstanden werden.

Wir brauchen eine Agenda zum Aufbau einer digital-ökologischen Transformationskompetenz in Wirtschaft und Gesellschaft. Die politische Förderung von Informationsangeboten, digitalen Innovationen und dem Aufbau von Technologiekompetenz ist hier eine wichtige Hilfestellung, insbesondere für KMU. Hinzu kommen Markttrends wie Software-as-a-Service Lösungen, die die Kosten und Qualifikationsanforderungen für den Einsatz von komplexen Tools und KI-Lösungen deutlich senken und so eine breite Verwendung erleichtern sollen. Entscheidend ist, dass der Aufbau digitaler Kompetenzen sehr viel stärker als bisher gleichzeitig an der Lösung von Aufgaben im Klima- und Ressourcenschutz ausgerichtet und von Beginn an in Strategien der Circular Economy eingebettet ist.

5.5 Leitplanken der Transformation - eine nationale Circular Economy Strategie ist überfällig

Wenn wir die am Anfang in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen und die Notwendigkeit zum Aufbau einer klimaneutralen und ressourceneffizienten Wirtschaft konsequent zu Ende denken, wird deutlich, dass das Ziel nicht nur eine "grüne", saubere Wirtschaft ist - es wird eine andere Wirtschaft sein. Anders als bei der Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energien wird die Entkopplung der Wertschöpfung und Bedürfnisbefriedigung von der Ressourcennutzung durch zirkuläre Geschäftsmodelle und Verhaltensänderungen zu einem Strukturwandel von Sektoren führen. Vorgelagerte Schritte der Materialbereitstellung und -bearbeitung werden relativ an Bedeutung verlieren, Anbieter von nutzungsnahe, häufig digital-unterstützten Dienstleistungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz an Bedeutung gewinnen.

Digitaler Wandel, Klimaschutz und Ressourceneffizienz - vor uns liegt eine tiefgreifende digital-ökologische Industrietransformation, die nicht nur den Weg in die Klimaneutralität weisen, sondern auch zur Resilienz von globalen Lieferketten oder Robustheit gegenüber Rohstoffkrisen beitragen muss.

Das alles ist kein Selbstläufer und wird ohne politische Führung nicht gelingen. Wir brauchen daher eine übergeordnete Circular Economy Strategie, die den Transformationspfad für die kommenden Jahrzehnte beschreibt. Die Aufgabe ist aufgrund der Komplexität der Stoffströme und (internationalen) industriellen Verflechtungen zweifellos sehr herausfordernd. Das deutsche Ressourceneffizienzprogramm *ProgRessIII* zeigt das breite Spektrum der Ansatzpunkte und Handlungsbedarfe, dabei wird auch deutlich, wie kleinteilig und spezifisch Maßnahmen gedacht werden müssen, um zu wirken.

Darauf muss aufgebaut werden- aber: die Aufgabe darf dabei nicht länger in einzelne ministerielle Zuständigkeiten zerlegt und fragmentiert werden. Die Zeit ist mehr als reif für einen integrierten Ansatz, der ressortübergreifend einen übergeordneten Rahmen für eine digital-ökologische Wirtschaftspolitik schafft. Vergleichbar mit der Klimapolitik sollte der Anspruch sein, in Abstimmung mit dem EU-Rahmen - soweit möglich quantitative - Ziele und Zeitrahmen zu definieren, sektorale Beiträge zu spezifizieren und Zwischenschritte festzulegen. So entstehen gemeinsame und verbindliche Leitplanken für die Ausarbeitung, Abstimmung und Umsetzung der fachspezifischen Aufgaben in den verschiedenen beteiligten Ressorts und Handlungsfeldern.

Diese Leitplanken helfen allen Akteuren der Circular Economy, eine verlässliche Orientierung zu gewinnen, sich mit den individuellen Potenzialen und Verantwortungen in der anstehenden Transformation zu verorten, eigene Roadmaps zu entwickeln und erfolgskritische Partnerschaften und Ökosysteme für Umsetzung ihrer jeweiligen Circular Economy Strategien aufzubauen.

Die neue Bundesregierung hat jetzt die Chance, nach der Neujustierung und Stärkung ihrer Klimapolitik nun die beiden Kernthemen Digitalisierung und nachhaltiges Wirtschaften zusammenzuführen und gemeinsam mit den Stakeholdern eine Zukunftsperspektive für eine international wettbewerbsfähige nachhaltige und digitale Wirtschaft zu entwickeln.

6 Die Bedingung – digitale Lösungen nachhaltig und zirkulär gestalten

Die vorangegangenen Abschnitte skizzieren die wichtige Rolle der Digitalisierung für die Transformation unsere Wirtschaft hin zu einer klima- und ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft. Diese Chancen müssen genutzt werden. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass Digitalisierung selbst eine Auswirkung auf die Umwelt hat.

Negative Umweltwirkungen entstehen einmal durch den **Energieverbrauch** und die damit verbundenen **Treibhausgasemissionen** beim Betrieb von Geräten, Anlagen und Infrastrukturen. Unterschiedliche politische wie private Initiativen aus der Digitalwirtschaft zielen darauf ab, in den nächsten Jahren auch hier Klimaneutralität zu erreichen⁹. Ansatzpunkte sind der Einsatz neuer Technologien mit höherer Effizienz, intelligentes Energiemanagement (z.B. durch Nutzung von KI Verfahren) und vor allem die Umstellung auf die Versorgung mit Erneuerbaren Energien (Bieser et al., 2020; Gröger et al., 2021; Hintemann et al., 2020a, 2020b; Masanet et al., 2020).

Dazu kommen die sozialen und ökologischen Auswirkungen der Gewinnung und Verarbeitung der benötigten Rohstoffe für die **Herstellung der physischen Endgeräte, Anlagen und Infrastrukturen**. Gleichzeitig verschärft sich weltweit das Entsorgungsproblem durch steigende Mengen an Elektronikschrott und die Rückgewinnungsquoten der Altgeräte für ein Elektronikschrottreycling sind mit weniger als 20% (global) bzw. 45% (Deutschland) noch völlig unzureichend (Baldé et al., 2020; Forti et al., 2020; Umweltbundesamt, 2020). Für alle digitalen Produkte und Endgeräte sind deshalb die oben skizzierten Prinzipien und Strategien einer Kreislaufwirtschaft konsequent anzuwenden.

Bei privaten Haushalten ist die zunehmende Zahl von digitalen Endgeräten bei gleichzeitig typischerweise kurzer Nutzungsdauer ein wesentlicher Treiber für den Ressourcenverbrauch der Digitalisierung, auch wenn durch die Bündelung von Funktionen in einem Endgerät diese Effekte teilweise kompensiert werden können. Grundsätzlich gilt auch hier: der Schwerpunkt muss auf möglichst langer Nutzungsdauer der Rohstoffe durch die Langlebigkeit sowie Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Endgeräten gelegt werden, z.B. durch modulare Bauweise und Austauschbarkeit von einzelnen Komponenten. Weitere Ansatzpunkte sind Strategien für Software Updates zur Vermeidung von softwarebedingter Obsoleszenz oder die - ggf. zeitlich verzögerte - Freigabe von Hardwarelizenzen und Softwarecodes (Open Source) für alternative Anbieter von Reparaturlösungen und Update-Angeboten.

Im industriellen IoT Umfeld steigt die Zahl elektronischer Bauteile und digitaler Technologien noch schneller. Im Gegensatz zur privaten Nutzung entstehen dabei in Produktionsanlagen und Logistiksystemen komplexe Ökosysteme aus vielfältigen Hardwarekomponenten und Software-Bausteinen unterschiedlichster Anbieter. Hier müssen noch Ansätze für die ökologische Optimierung von Systemarchitekturen, IT Governance und Lebenszyklusmanagement gefunden werden (Wurm et al., 2021). Ein neues Handlungsfeld ist der zunehmende Einsatz von Sensoren und vernetzten digitalen Technologien im Alltag, z.B. als RFID Chips an Produkten oder Mikroelektronik in Textilien (Smart Textiles) und Wearables - die Vermischung mit anderen Stoffflüsse wie Verpackungen oder Textilien erschwert die sachgerechte Entsorgung und Wiedergewinnung der elektronischen Materialien (Köhler et al., 2018).

⁹ Bspw. die Digital Strategie der EU (European Commission, 2020b), die Umweltpolitische Digitalagenda des BMU (BMU, 2020b) oder die European Green Digital Coalition (EGDC, (European Commission, 2021).

7 Fazit

Das Industrieland Deutschland steht am Anfang eines historisch wichtigen Jahrzehnts, in dem zusammen mit der internationalen Gemeinschaft die Weichen für die Sicherung der weltweiten natürlichen Lebensgrundlagen gestellt werden müssen. Wirtschaft und Gesellschaft müssen deshalb in den kommenden Jahren die Voraussetzungen für wirksamen Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz sowie den Erhalt der Biodiversität schaffen. Der Aufbau einer klimaneutralen und ressourceneffizienten Circular Economy ist dafür ein Schlüsselbereich.

Die gleichzeitig stattfindende digitale Transformation aller Lebens- und Wirtschaftsbereiche eröffnet dafür immer neue Handlungsoptionen und erweitert so kontinuierlich den Lösungsraum. Wir haben die Chance, die Transformationsdynamik der Digitalisierung für die Aufgabe der Transformation unserer Wirtschaftsweisen und Lebensstile einzusetzen. Ansatzpunkte ergeben sich dafür auf unterschiedlichen Ebenen:

- Die permanente Verbesserung und Optimierung von einzelnen Prozessen und Aktivitäten auf allen Stufen des ökonomischen Lebenszyklus sind die unverzichtbare Grundlage für Kostensenkungen, Effizienzsteigerungen und die Reduktion der Umweltbelastungen
- Gleichzeitig gilt, dass Klimaneutralität und ein global nachhaltiges und langfristig zukunftsfähiges Niveau der Ressourcennutzung nur erreicht werden kann, wenn der Rohstoffbedarf insgesamt durch zirkuläre, materialeffiziente Geschäftsmodelle und nachhaltigeres Konsumverhalten gesenkt wird.

Im Zusammenspiel digitaler Lösungen und durch die gegenseitige Verstärkung dieser Handlungsebenen ergibt sich eine digital-ökologische Zukunftsperspektive für Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland.

Eine umfassende Transformation ist möglich, wenn sich bei den Unternehmen und Akteuren in der Circular Economy ein neues Bewusstsein für die eigene Rolle in immer stärker vernetzten, sich wandelnden Wertschöpfungssystemen aufbaut. Gleichzeitig muss das Verständnis für die Bedeutung von offenen, kollaborativen Datenbeziehungen wachsen und eine Kultur der Datenteilens und der gemeinschaftlichen Datennutzung entstehen. Leistungsfähige und vertrauenswürdige Infrastrukturen sowie breit akzeptierte Regeln und Institutionen der Governance von Datenbeziehungen sind die Voraussetzung für die Skalierung und Umsetzung einer datenbasierten Circular Economy im großen Maßstab. Hier ist in den letzten Jahren viel in Bewegung gekommen, die laufenden Entwicklungen zu Datenräumen, Cloud Infrastrukturen und industrieübergreifenden Informationssystemen müssen vorangebracht und konsequent für die Aufgaben von Klimaschutz und Ressourceneffizienz eingesetzt werden.

Die vorangegangenen Kapitel machen deutlich, dass die Entwicklungslinien der Digitalisierung und die Gestaltungsaufgaben der Circular Economy in die gleiche Richtung weisen. Zu häufig werden aber noch zwei parallele, unzureichend verbundene Handlungsstränge verfolgt. Das muss sich ändern. Die Politik steht daher in der Verantwortung, in den nächsten Jahren konsistente Zielbilder, verbindliche Vorgaben und Anreizsysteme für die digitale wie ökologische Transformation unserer Ökonomie zu formulieren und so einen verlässlichen und motivierenden Regulierungsrahmen für privates und unternehmerisches Handeln zu schaffen. So kann ein übergreifendes Verständnis aller Akteure und Stakeholder von einem gemeinsamen Transformationspfad in eine nachhaltige Zukunft für Wirtschaft und Gesellschaft im Industrieland Deutschland entstehen.

8 Literaturverzeichnis

- Arnold, R., & Liebe, A. (2018). *Digitale Wertschöpfungsnetzwerke und RAMI 4.0 im Hessischen Mittelstand*. https://www.digitalstrategie-hessen.de/mm/Studie-RAMI40_WEB.pdf
- Bahn-Walkowiak, B., Griestop, L., Gyori, G., Tauer, R., & Wilts, H. (2021). *Impulspapier: Vom Flickenteppich zur echten Kreislaufwirtschaft*. WWF, Wuppertal Institut. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Impulspapier-circular-economy.pdf>
- Baldé, C. P., Wagner, M., Iattoni, G., & Kuehr, R. (2020). *In-depth review of the WEEE Collection Rates and Targets*. United Nations University, United Nations Institute for Training and Research. In-depth review of the WEEE Collection Rates and Targets <https://globalewaste.org › proxy › In-depth-review-...>
- BCG, & WBCSD. (2018). *The new big circle: Achieving growth and business model innovation through circular economy implementation*. https://docs.wbcsd.org/2018/01/The_new_big_circle.pdf
- Berg, A. (2021). *Digitalisierung der Wirtschaft—Wo steht Deutschland nach zwei Jahren Pandemie?* [Präsentation]. Bitkom e.V. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierungsschub-in-Wirtschaft-wird-Pandemie-ueberdauern>
- Berg, H., Bendix, P., Jansen, M., Le Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., Pohjalainen, E., & Wahlström, M. (2021). *Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production*. European Environment Agency, European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production>
- Berg, H., Bendix, P., Nicolas, J., Wagner, J., & Günther, M. (2020). *Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen* [Gutachten]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; INTECUS. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/893>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., & Hilty, L. (2020). *Klimaschutz durch digitale Technologien—Chancen und Risiken* [Kurzstudie]. Bitkom e.V., Borderstep Institut, Universität Zürich. https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf
- BMU. (2020a). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020 – 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*. <https://www.bmu.de/download/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-progress-iii/>
- BMU. (2020b). *Umweltpolitische Digitalagenda*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- Burchardt, J., Franke, K., Herhold, P., Hohaus, M., Humpert, H., Päivärinta, J., Richenhagen, E., Ritter, D., Schönberger, S., Schröder, J., Strobl, S., Tries, C., & Türpitz, A. (2021). *Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. BDI, BCG. <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>
- Dwork, C. (2006). *Differential Privacy*. 33rd International Colloquium on Automata, Languages and Programming, part II (ICALP 2006). <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/dwork.pdf>
- EEA. (2017). *Circular by design—Products in the circular economy* (No 6/2017; EEA Report). European Environment Agency.
- EEA. (2020). *Resource efficiency and the circular economy in Europe 2019 – even more from less; An overview of the policies, approaches and targets of 32 European countries* (EEA Report Nr. 26/2019). European Environment Agency.

- Ekins, P., & Hughes, N. (2017). *Resource Efficiency: Potential and Economic Implications—A Report by the International Resource Panel* [International Resource Panel Report]. United Nations Development Programme.
- Engels, B., Schaefer, T., Schleicher, C., Fritsch, M., Schmitz, E., Wiegand, R., & Arnold, R. (2021). *Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen*. Institut der deutschen Wirtschaft, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <https://www.iwkoeln.de/studien/adriana-neligan-digitalisierung-als-enabler-fuer-ressourceneffizienz-in-unternehmen.html>
- EU-Recycling. (2021, Oktober). *Künstliche Intelligenz: Aus der Abfallbranche nicht mehr wegzudenken*. EU-Recycling: Umwelttechnik. <https://eu-recycling.com/Archive/33048>
- European Commission. (2020a). *A new Circular Economy Action Plan—For a cleaner and more competitive Europe* (Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM(2020) 98 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- European Commission. (2020b). *Shaping Europe's digital future*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0067&from=en>
- European Commission. (2021). *European Green Digital Coalition*. European Commission - Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-green-digital-coalition>
- European Environment Agency, EPA Network, ISPRA, & Sistema Nazionale per la Protezione dell' Ambiente. (2020). *Bellagio Declaration. Circular Economy Monitoring Principles*. <https://www.isprambiente.gov.it/files2021/notizie/bellagio-declaration-final.pdf>
- Fischer, A., & Küper, M. (2021). *Green Public Procurement: Potenziale einer nachhaltigen Beschaffung* (IW-Policy paper). Institut der deutschen Wirtschaft. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/policy_papers/PDF/2021/IW-Policy-Paper_2021-Green-Public-Procurement.pdf
- Flemming, F., & Balthasar, D. (o. J.). *An introduction to AI in sorting technologies*. Recycling Today. <https://www.recyclingtoday.com/article/an-introduction-to-ai-in-recycling-sorting-technologies/>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020*. http://ewaste-monitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM_2020_def_dec_2020-1.pdf
- Götz, T., Adisorn, T., & Tholen, L. (2021). *Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept* (Wuppertal Report) [Kurzstudie]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://doi.org/10.48506/opus-7694>
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). *Green Cloud Computing. Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing* [Abschlussbericht]. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/green-cloud-computing>
- Hayes, J. (2021, September 15). *AI-driven robotics key to recycling's challenges*. Engineering & Technology. <https://eandt.theiet.org/content/articles/2021/09/ai-driven-robotics-key-to-recycling-s-challenges/>
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Clausen, J. (2020a). *Rechenzentren in Europa—Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung Teil 1*. eco. https://www.eco.de/wp-content/uploads/2020/05/eco-studie_rechenzentren-in-europa_chancen-fuer-eine-nachhaltige-digitalisierung_teil1-1.pdf
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Clausen, J. (2020b). *Rechenzentren in Europa—Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung Teil 2*. eco. https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2020/11/di_studie_rechenzentren_teil2_201110.pdf

- Kadner, S., Kobus, J., Stuchtey, M. R., & Weber, T. (2021). *Circular Economy Roadmap für Deutschland*. Circular Economy Initiative Deutschland, Systemiq, acatech. <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/>
- Köhler, A. R., Gröger, J., & Liu, R. (2018). *Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung* [Kurzgutachten]. Öko-Institut e.V. https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/Expertise_Oekoinstitut.pdf
- Kopp, M., Cobbing, M., & Wohlgemuth, V. (2021). *Freiwillige Selbstverpflichtung—Ein Mode-Märchen über grüne Fast-Fashion*. Greenpeace. <https://www.greenpeace.de/publikationen/20211122-greenpeace-detox-mode-maerchen-pt1.pdf>
- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., & Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 120, 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>
- Lindner, C., Schmitt, J., & Hein, J. (2020). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*. Conversio Market & Strategy. <https://www.bkv-gmbh.de/studien/studie-stoffstrombild-kunststoffe-in-deutschland-2019-conversio.html>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- Material Economics. (2018). *The Circular Economy: A powerful force for climate change*. <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1>
- Müller, F., Kohlmeyer, R., Krüger, F., Kosmol, J., Krause, S., Dorer, C., & Röhreich, M. (2020). *Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf
- Piel, Seebeck, Schmidt, Eikelmann, Trabandt, Möllmann, & Giern. (2018). *Mobile IT-Systeme. Technische Übersicht und Standards*. BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. https://www.bde.de/search/?user_login&backto=/presse/bde-direkt-162018/&q=Mobile%20IT%20Systeme
- Plattform Industrie 4.0. (2020). *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-nachhaltige-produktion.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- Plattform Industrie 4.0. (2021). *Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit* [Thesenpapier]. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Thesen-Nachhaltigkeit-Geschaeftsmodelle.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Ramesohl, S., Gunnemann, A., & Berg, H. (2021). *Digitalisierung gestalten—Transformation zur Nachhaltigkeit ermöglichen*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Huawei. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7869>
- RECYCLING magazin. (2019, Juni 30). *Mit KI erfolgreich gegen Müllberge*. <https://www.recycling-magazin.de/2019/06/30/mit-ki-erfolgreich-gegen-muellberge/>
- Schebek, L., Campitelli, A., Fischer, J., Abele, E., Bauerdick, C., Anderl, R., Haag, S., Sauer, A., Mandel, J., Lucke, D., Bogdanov, I., Nuffer, A.-K., Steinhilper, R., Böhner, J., Lothes, G., Schock, C., Zühlke, D., Plociennik, C., & Bergweiler, S. (o.J.). *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0—Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes* (S. 06.2021). VDI Zentrum Ressourceneffizienz. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf
- Schwilling, T., Schulze, I., Wilts, H., & Du Bois, P. (2021). *Circular Economy 2021. Secondhand in*

- Deutschland. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, Wuppertal Institut, eBay Kleinanzeigen. <https://magazin.ebay-kleinanzeigen.de/app/uploads/sites/8/2021/11/Circular-Economy-2021.pdf>
- Sipka, S., & Hedberg, A. (2021). *Building a circular economy: The role of information transfer* (Sustainable Prosperity for Europe Programme) [Discussion Paper]. European Policy Center (EPC). <https://www.epc.eu/en/Publications/Building-a-circular-economy-The-role-of-information-transfer~43d53c>
- SmartFactoryKL. (2021). *GALIA-X Projekt smartMA-X startet in Kaiserslautern* [Pressemitteilung]. <https://smartfactory.de/gaia-x-projekt-smartma-x-startet-in-kaiserslautern/>
- Steger, S., Ritthoff, M., Bulach, W., Schüler, D., Kosinska, I., Degreif, S., Dehoust, G., Bergmann, T., Krause, P., & Oetjen-Dehne, R. (2019). *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität*. Bundesumweltamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_34-2019_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf
- Stiftung 2°. (2021). *Eine Umsetzungsoffensive für Klimaneutralität. Jetzt*. https://klimawirtschaft.org/wp-content/uploads/2021/10/Stiftung2Grad_Unternehmensappell_DEU_A4_lay_03.pdf
- Sun, X., Lettow, F., & Neuhoff, K. (2021). *Klimaneutralität braucht koordinierte Maßnahmen zur Stärkung von hochwertigem Recycling* (2.0, DIW Wochenbericht). DIW Berlin. http://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.820722.de
- Sweeney, L. (2002). *Achieving k-Anonymity privacy protection using generalization and suppression*. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021848850200165X>
- Umweltbundesamt. (2020, Juli 20). *Elektroaltgeräte*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#aktuelle-herausforderungen>
- Umweltbundesamt. (2021). *Chemikalienleasing*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-management/nachhaltige-chemie/chemikalienleasing-portaleinstieg#ein-innovatives-geschäftsmodell-zum-nachhaltigen-management-von-chemikalien>
- Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., & Ramesohl, S. (2021). *Wege in eine ökologische Machine Economy. Warum wir eine „Grüne Governance der Machine Economy“ brauchen* (CO:DINA) [Positionspapier]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier-4_Wege-in-eine-machine-economy.pdf