

## 前往循環經濟路上的德國：透過數位化實現低碳化？

華明儀

文藻外語大學歐洲研究所

### 摘要

物料管理占全球溫室氣體排放量的三分之二左右。根據德國聯邦環保局統計，2018年德國人均消耗原料為16.1噸。為使物料管理更加高效性和永續性，德國正努力將其轉變為循環經濟。然而，循環經濟要求在產品生命週期的所有階段都需有資訊流，數位技術的應用可支持循環經濟的發展，但是否可以實現德國經濟的低碳化目標？

本研究探討了數位化能否以及如何支持德國低碳循環經濟的發展，着眼於德國當前的發展，並研究數位化在轉型過程中的作用，更透過企業案例了解數位循環經濟的發展動態。

**關鍵詞：**循環經濟、數位化、低碳化、氣候保護、德國

# Deutschland auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft: Dekarbonisierung durch Digitalisierung?<sup>1</sup>

ARMIN IBITZ

Graduate Institute of European Studies,  
Wenzao Ursuline University of Languages

## Abstract

Die Materialwirtschaft ist für rund zwei Drittel der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Laut Umweltbundesamt wurden in Deutschland im Jahr 2018 statistisch gesehen pro Kopf 16,1 Tonnen Rohstoffe konsumiert. Um die Materialwirtschaft effizienter und nachhaltiger zu gestalten, wird in Deutschland die Transformation in eine Kreislaufwirtschaft angestrebt. Allerdings setzt eine zirkuläre Wirtschaft Informationsfluss über alle Produktlebensphasen voraus. Der Einsatz digitaler Technik könnte die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft unterstützen, aber lässt sich damit eine Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft erreichen?

Basierend auf einem Governance-Ansatz geht die Arbeit der Frage nach, ob und wie Digitalisierung die Entwicklung einer kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft in Deutschland unterstützen kann. Dabei wird auf aktuelle Entwicklungen in Deutschland eingegangen, die Rolle der Digitalisierung im Transformationsprozess untersucht und es werden unternehmerische Beispiele vorgestellt, die die Dynamik im Bereich der digitalen Kreislaufwirtschaft verdeutlichen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die derzeitigen Bemühungen nicht ausreichen, um Deutschlands Dekarbonisierung maßgebend voranzutreiben.

**Schlagwörter: Kreislaufwirtschaft, Dekarbonisierung, Digitalisierung, Klimaschutz, Deutschland**

---

<sup>1</sup> Diese Studie wurde durch Mittel des Ministeriums für Wissenschaft und Technik Taiwan gefördert (MOST 108-2410-H-160-011-).

## I. Forschungshintergrund

Das 21. Jahrhundert wird bestimmt von zwei großen Megatrends: Digitalisierung und Klimawandel. Das enorme Wirtschaftswachstum der letzten Jahrzehnte hat zwar vielen Regionen zu Wohlstand verholfen, die Menschheit sieht sich aber immer größeren ökologischen Herausforderungen gegenübergestellt. Unser Wirtschaftssystem verbraucht nicht nur Unmengen an Primärrohstoffen, sondern treibt auch die Erderwärmung an. Der jährliche Materialverbrauch der Menschheit liegt jenseits der 100 Milliarden Tonnen Marke<sup>2</sup> und die globalen Kohlendioxidemissionen (CO<sub>2</sub>) aus fossilen Brennstoffen und der Industrie im Jahr 2019 werden auf etwa 36,8 Milliarden Tonnen geschätzt.<sup>3</sup> Das Materialmanagement ist für gut zwei Drittel der weltweiten Emissionen verantwortlich und bis zu 4,1 Milliarden Tonnen Kohlendioxidäquivalente (CO<sub>2e</sub>) werden mit Altprodukten in Verbindung gebracht. Indessen steigt die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration weiter an.

Die derzeitigen Produktions- und Verbrauchsmodi basieren überwiegend auf linearen Prinzipien, bei denen Ressourcen gewonnen, verarbeitet, genutzt und als Abfall entsorgt werden. Jährlich werden weltweit fast 400 Millionen Tonnen Plastik, 240 Millionen Tonnen Papier und 59 Millionen Tonnen Aluminium produziert, und der größte Teil davon wird nicht recycelt (Weltbank, 2012). Global gesehen werden nur neun Prozent aller eingesetzten Materialien wieder als Input in das Produktionssystem rückgeführt, 91 % werden entsorgt (Circle Economy, 2018). Steigt die Weltbevölkerung - wie prognostiziert - bis 2030 auf 8,5 Milliarden an, werden neben der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen auch die Treibhausgasemissionen zunehmen (UNO, 2015). Dies wird nicht nur das derzeitige Produktionssystem, sondern auch die globalen Ökosysteme über die Belastungsgrenzen befördern. Neue Ansätze zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Verbrauch von Primärressourcen und Treibhausgasemissionen sind gefordert und ein Lösungsansatz könnte in der Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft liegen - genauer gesagt der digitalen Kreislaufwirtschaft.

---

<sup>2</sup> Circle Economy, <https://www.legacy.circularity-gap.world/2019>.

<sup>3</sup> Global Carbon Project, <https://www.globalcarbonproject.org/>.

## **Ziel der Studie**

Aufgrund der enormen technologischen Fortschritte, der breiten Verfügbarkeit von digitalen Geräten sowie der unzähligen Einsatzmöglichkeiten bieten sich neue Perspektiven, wie Digitalisierung zur Entwicklung einer kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft beitragen kann. Der Einsatz digitaler Technologien fördert innovative Geschäftsmodelle und eröffnet neue Anwendungsgebiete. Digitalisierung hat aber auf verschiedenen Märkten zu gewaltigen Umbrüchen geführt. Aufgrund der innovativen als auch zerstörerischen Kraft der Digitalisierung gilt es, einen klaren Rahmen mit Zielvorgaben abzustecken, damit sichergestellt wird, dass Digitalisierung zu gesamtwirtschaftlichen und systemischen Umweltverbesserungen führt. Dazu gehört auch die Überlegung, ob, wann und wie Digitalisierung dem Klimaschutz dienlich sein kann (Circle Economy/Ecofys, 2018; Materialeconomics, 2018). Vor diesem Hintergrund versucht vorliegender Beitrag Antworten darauf zu finden, wie der Aufbau einer digitalen Kreislaufwirtschaft mit Emissionsreduktion in Verbindung zu bringen ist. Die Forschung konzentriert sich dabei auf die Entwicklungen in Deutschland. Zum einen deshalb, weil Deutschland als führendes Industrieland Europas richtungsweisend ist, zum anderen weil Berlin in Bezug auf Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft entscheidende Akzente gesetzt hat.

Zuerst führt die Arbeit in das Konzept der Kreislaufwirtschaft ein, dann wird Deutschlands Strategie zur Nutzung digitaler Technologien evaluiert, hinsichtlich dem Ziel des Erreichens einer Null-Emissions-Wirtschaft bis 2050. Mit Blick auf jüngste Entwicklungen in Deutschland wird untersucht, wie Berlin aus den Herausforderungen einen Nutzen zu ziehen und Chancen wahrzunehmen versucht. Dazu beleuchtet die Arbeit wichtige Aspekte der Transformation zu einer digitalen kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft und verweist mit Beispielen auf das unternehmerische Potential. Ziel der Arbeit ist es nicht, exakte Emissionsveränderungen zu prognostizieren, sondern bestehende Trends aufzuzeigen und diese hinsichtlich ihrer Klimawirkung zu diskutieren. Konkret soll die Arbeit folgende Fragen beantworten:

1. Wie sieht Deutschlands Entwicklungsweg hinsichtlich des Aufbaus einer Kreislaufwirtschaft aus?

2. Welche Trends sind bei der Entwicklung einer digitalen Kreislaufwirtschaft erkennbar?
3. Inwieweit kann eine digitale Kreislaufwirtschaft zu realen Emissionsrückgängen beitragen?

Die Auswirkungen der Digitalisierung in Bezug auf die Entwicklung einer kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft wurden in der Forschung lange vernachlässigt. Diesem Defizit an Studien zum Themenbereich Dekarbonisierung mittels digitaler Kreislaufwirtschaft versucht diese Studie beizukommen. Da es sich um ein äußerst dynamisches Forschungsfeld handelt, müssen Entwicklungen stets aktualisiert werden. Die Arbeit greift auf einen Governance-Ansatz zurück, um die Entwicklungen zu analysieren. Bei Digital- als auch Umweltpolitik handelt es sich um besondere Politikfelder, denn als Querschnittsthemen befassen sie sich nicht nur mit einzelnen Regulierungsbereichen, sondern wirken auf viele Politikfelder gleichzeitig. So gelten Bemühungen, die Digitalisierungsprozesse zu steuern, allgemein als schwierig, unübersichtlich und komplex. Zum einen weil sie unter anderem Akteure aus vielen verschiedenen Sektoren (öffentlich, privat, Zivilgesellschaft, Wissenschaft etc.) einbeziehen, zum anderen weil diese meist über unterschiedlichen technologischen Wissensstand besitzen und über unterschiedlichen Zugang zu Ressourcen verfügen. Auch beim Klimaschutz lassen sich komplexe Interdependenzen zu anderen Feldern festmachen. So ist Klimaschutz beispielsweise eng mit Ressourcenpolitik, Wettbewerbspolitik und Innovation verlinkt. Da wirtschaftliche Dynamiken in einer anderen Geschwindigkeit ablaufen als in der Politik, bedarf es neben einer klaren Zielsetzung Koordination und Steuerung zur Umsetzung. In Gesellschaft, Politik und Wirtschaft müssen Zwecke und Ziele digitalisierter Strukturen und Prozesse diskutiert, verhandelt und festgelegt, und auch Maßnahmen zur Umsetzung ausgearbeitet und durchgeführt werden. Dies erfordert eine strategische Gestaltung und Führung. Das Steuern und Koordinieren muss demnach dem Ziel des verbesserten Managements von Interdependenzen zwischen den Akteuren, also dem Staat, der Wirtschaft und der Gesellschaft dienen. Governance versucht, die Art und Weise zu verstehen, wie wir kollektive Entscheidungsfindung konstruieren. Angesiedelt im Spannungsfeld von Ressourcenschutz, Wettbewerbsfähigkeit und Innovationspolitik bietet diese Arbeit nicht

nur neue Einblicke, sondern schafft auch Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten.

## **II. Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung**

Erste Konzepte eines Wirtschaftsmodells, welches Produkte und die in ihnen enthaltenen Materialien höher bewertet und im Kreislauf führt, entstanden bereits in den 1970er Jahren. Aber erst in den 1990er Jahren gewannen diese zunehmend an Bedeutung, als Pearce und Turner (1990) den Begriff der Kreislaufwirtschaft (KW) einführten. Obwohl es für das Konzept noch keine allgemein akzeptierte und klare Definition gibt, wird die Kreislaufwirtschaft als Wirtschaftsmodell verstanden, das Materialien, Ressourcen und Komponenten höher wertschätzt und versucht Abfallprodukte durch Wiederverwendung, Reparatur, Aufarbeitung und Recycling zu minimieren (Kirchherr et al., 2017; Merli et al., 2018).

Eine Kreislaufwirtschaft beruht auf drei Hauptprinzipien: Erstens, dem Erhalt bzw. der Vermehrung des natürlichen Kapitals durch die Kontrolle endlicher Ressourcenbestände und dem Einsatz erneuerbarer Ressourcen. Zweitens, der Optimierung der Ressourcenerträge durch Zirkulation von Produkten, Komponenten und Materialien. Drittens, der Förderung von Systemeffektivität durch Erkennung und Vermeidung negativer externer Effekte (MacArthur, 2013). Die Kreislaufwirtschaft basiert auf Materialrücklaufschleifen, die sowohl den primären als Materialeinsatz und die Abfallmenge reduzieren, aber auch die Verweildauer der Materialien im System verlängern. Ressourcen werden nicht nur einmal, sondern mehrmals genutzt. In Anlehnung an die Natur, bilden Abfall- und Beiprodukte eines Prozesses den Input für den nächsten. Neben- und Abfallprodukte werden möglichst rasch in den Fertigungsprozess eingebracht und im Kreislauf geführt (Abbildung 1). Dies trägt zu einem verlängertem Lebenszyklus von Produkten, Komponenten und Materialien bei, was wiederum natürliche Ressourcen schont und Treibhausgasemissionen vermeidet (Stahel, 2016).

Abbildung 1: Leitbild der Kreislaufwirtschaft



Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020

Die Kreislaufwirtschaft berücksichtigt nicht nur die eigentliche Lebensdauer von Produkten, sondern alle der Produktion vor- und nachgelagerten Prozesse (z.B. Rohstoffgewinnung, Produktdesign, Nutzung, Entsorgung), inklusive Reparatur- und Recyclingfähigkeit sowie Rückgewinnungsmöglichkeit von eingesetzten Materialien. Im Gegensatz zur linearen Wirtschaft setzt die zirkuläre Wirtschaft enge Zusammenarbeit der involvierten Akteure (Designer, Rohstofflieferanten, Hersteller, Verbraucher, Abfallsammler, Entsorger, Wiederaufbereiter) sowie die Verfügbarkeit von

Produktinformationen voraus. Im derzeitig vorherrschenden System mangelt es sowohl an Kooperation als auch Verfügbarkeit von Daten. So kümmern sich Produktentwickler kaum um die Reparaturfähigkeit ihrer Produkte. Der Fertigung ist der anhaftende ökologische Rucksack der eingesetzten Inputstoffe weitestgehend unbekannt. Produkthersteller geben keine Daten über die im Produkt vorhandenen Materialien an die Wiederverwertungsfirma weiter. Die dadurch entstehenden Informationsdefizite führen nicht nur zu höheren Transaktionskosten und verhindern effiziente Materialwirtschaft, sondern resultieren auch in negativen Umweltwirkungen (Emissionen). Das Materialmanagement ist für rund zwei Drittel aller globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Auch aus ökonomischer Perspektive erscheint es sinnvoll, Kooperation und Datenfluss zwischen den einzelnen Beteiligten der Produktionskette zu stärken, denn eine Kreislaufwirtschaft versucht, maximalen Wert aus den Materialien zu generieren (Geissdoerfer et al., 2017; Ghisellini et al. 2016; McDonough und Braungart, 2010). Effizientes Ressourcenmanagement kann einen enormen Beitrag zum Klimaschutz leisten (Circle Economy/Ecofys, 2018), denn die kaskadenartige Neuordnung würde über verschiedene Sektoren hinweg Emissionsreduktionen über die gesamte Wertschöpfungskette auslösen. Effizientes Materialmanagement scheitert vor allem am Informationsdefizit. Aufgrund des höchst arbeitsteiligen und globalisierten Produktionssystems erschien es bislang unmöglich, diesen enormen Datenfluss über alle Beteiligte und den gesamten Lebenszyklus zu bewerkstelligen.

### **Die Rolle der Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft**

Während die Kreislaufwirtschaft in der Theorie enorme Vorteile verspricht, geht der Aufbau von Materialkreisläufen in der Praxis nur langsam vonstatten (Korhonen et al., 2017). Noch immer verharren zu viele Unternehmen in einem auf fossilen Rohstoffen basierendem, linearem Produktionssystem (Haas et al., 2015). Zu den wesentlichen Hindernissen einer stärkeren Zirkularität zählen neben institutionellen und technologischen Aspekten auch der Mangel an Informationen (Wilts, 2017). So kann ein unzureichender Zugang zu Informationen zu einer Präferenz von Geschäftsmodellen führen, die auf der Beschaffung von Primärrohstoffen basieren und den Aufbau zirkulärer Stoffströme verhindern. Mangelnde Transparenz und Vernetzung führt dazu, dass sich

für viele Abfallfraktionen keine Abnehmer finden lassen. Der Wert von Abfallstoffen korreliert in hohem Maße mit Informationen über deren Zusammensetzung, Qualität und Reinheit, sowie deren Gefährlichkeit und den Kosten der Entsorgung. Aufgrund unsicherer Informationslage ziehen es Unternehmen vor, weiter auf primäre Rohstoffe einzusetzen. Das verlangsamt wiederum die Entwicklung von Sekundärrohstoffmärkten. Es lassen sich also zwei Hauptformen von Informationsdefiziten erkennen:

- Menge: Mangel an Informationen über die auf dem Markt verfügbaren Mengen recycelten Ressourcen. Folglich können keine Skaleneffekte erzielt werden und Sekundärrohstoffe bleiben unnötig teuer.
- Qualität: Mangel an Daten über Reinheit, Art und Zusammensetzung der Materialien. Die Qualität von Recyclaten ist unsicher.

Da sich selbst hochwertige Recyclate in einem Szenario des fehlenden Informationsflusses nicht optimal vermarkten lassen (Akerlof, 1978), sieht sich die Industrie mit erhöhten Transaktions- und Suchkosten konfrontiert. Außerdem erschwert der Informationsmangel Preisgestaltungsprozesse, die letztendlich die Unterzeichnung von langfristigen Beschaffungsverträgen verzögern bzw. verhindern. Für die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft ist somit eine verbesserte Verfügbarkeit von Informationen über Materialflüsse unerlässlich. Abhilfe könnte der verstärkte Einsatz digitaler Informationssysteme zur Überwachung der Menge und Qualität von Produkten und Sekundärrohstoffen schaffen. Während der sektorübergreifende Einsatz vor einigen Jahren aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der enormen Datenmengen unrealistisch erschien, erlauben sinkende Anschaffungskosten, Miniaturisierung, große Verfügbarkeit sowie Vernetzungsfähigkeit der Geräte den Einsatz zur Koordinierung der Material- und Informationsflüsse in Betracht zu ziehen. Mittels digitaler Geräte lassen sich nicht nur die Informationslücken zur effizienteren Nutzung von Rohstoffen (Rückverfolgbarkeit Standort, Zusammensetzung und Verfügbarkeit) schließen, sondern es wären durch Innovationen auch Emissionsreduktionen denkbar.

**Abbildung 2: Einsatzbereiche digitaler Technologien für die Kreislaufwirtschaft.**

Quelle: In Anlehnung an Pagoropoulos et al., 2017

In drei Bereichen kann Digitalisierung die KW unterstützen (Pagoropoulos et al., 2017): Datenerfassung, Datenintegration und Datenanalyse (siehe Abbildung 2). In jedem dieser Bereiche sehen wir innovative Technologien, die das Potenzial haben, den Sektor radikal zu verändern.

Im Bereich der Datenerfassung sehen wir Fortschritte bei den Anwendungen der Radiofrequenz-Identifikation (RFID), um Materialflüsse einfach und kostengünstig zu verfolgen oder Wertstoffkreisläufe zu schließen (Chowdhury & Chowdhury, 2007). Auch für die Rückwärtslogistik spielt die Informationstechnologie eine essentielle Rolle (Lee & Chan, 2009). Mittels RFID können umfassende Produktinformationen an Marktteilnehmer weitergeleitet werden. Über das Internet der Dinge (IoT) können Informationen durch Sensoren gesammelt und mittels Netzwerk der gesamten Wertschöpfungskette zur Verfügung gestellt werden. Damit ließen sich zirkuläre Wirtschaftsmodelle als dynamische Regelkreise mit Rückkopplung entwerfen (Reuter, 2016). IoT bietet die nötige Datenbasis, um Bewertungen der Folgen der Handlungen verschiedener Akteure während der gesamten Lebensdauer von Produkten anzustellen. Leistungsfähigere und kostengünstigere Sensorsysteme erlauben es vernetzten Herstellern, exakte Informationen über bestimmte Materialbestände zu bekommen und Analysen anzustellen. Damit lassen sich auch Daten in Echtzeit realisieren und detaillierte

Informationen über den exakten Ort der Abfallprodukte sowie deren Menge und Zusammensetzung können entlang der Lieferkette an Recyclingunternehmen oder andere potentielle Käufer übermittelt werden.

Für die Datenintegration stehen mittlerweile Relationale Datenbankmanagementsysteme (RDBMS) zur Verfügung. Diese erlauben die Integration heterogener Datenquellen und ermöglichen effiziente Entscheidungsfindung (Shmelev & Powell, 2006). Der branchenweite Einsatz von RDBMS setzt allerdings Datenstandardisierung voraus, die noch nicht gegeben ist. Das Product-Lifecycle-Management (PLM) beschreibt ein Konzept zur nahtlosen Integration sämtlicher Informationen, die im Verlauf des Produktlebenszyklus anfallen. PLM erleichtert den Übergang zur Kreislaufwirtschaft, da es die Integration von Informationen über mehrere Lebenszyklen und verschiedene Akteure der Wertschöpfungskette hinweg erlaubt. Beispielsweise könnten so Lager- und Materialflüsse effizient gestaltet werden. Durch Implementierung von cyber-physischen Systemen lassen sich Informationen über den gesamten Lebenszyklus durchreichen (Monostori et al., 2016). Die mitgeführten Informationen können umweltbezogene Informationen (z.B. Materialzusammensetzung, ökologische Fußabdrücke) enthalten, die Wiederverwendung von Materialien erleichtern.

Im Bereich der Datenanalyse wird zukünftig zur Förderung der Zirkularität maschinelles Lernen eingesetzt werden (Witten et al., 2016). Mittels Algorithmen können Künstliche-Intelligenz-Anwendungen auf große Datensätze angesetzt werden, um etwa Muster zu erkennen oder Vorhersagen zu treffen. Im Kontext einer zirkulären Ökonomie könnte Maschinelles Lernen Fertigungsprozesse und Systemoptimierung unterstützen, die auf einer großen Menge von Daten basieren und mit traditionellen Instrumenten und Verfahren nicht analysiert werden können. Der Big-Data-Analyse wird eine bedeutendere Rolle zukommen, um Informationen aus verschiedenen Datensystemen (Sensoren, IoT) zu analysieren und Materialkreisläufe zu schließen (Lieder & Rashid, 2016).

### III. Deutschlands Weg zur Kreislaufwirtschaft

Die Europäische Union (EU) hat das enorme Potential einer Kreislaufwirtschaft erkannt und mit dem im Dezember 2015 verabschiedeten *Paket zur Kreislaufwirtschaft* Maßnahmen initiiert, um Unternehmen wie Verbraucher dabei zu unterstützen, den Übergang zu einer stärker zirkulären Wirtschaft zu vollziehen. Dem Paket folgten ein *Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft*<sup>4</sup> sowie Vorschläge, die den gesamten Lebenszyklus von Produkten umfassen, von Design, Produktion und Verbrauch bis hin zum Abfallmanagement und der Entwicklung eines stärkeren Sekundärrohstoffmarktes. Auch wurden Zielvorgaben für Recycling und ein Deponierverbot für getrennt gesammelten Abfall festgelegt. Man verspricht sich neben einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit (Andersen, 2007) auch die Schaffung zwischen 1,2 Millionen und 3 Millionen neuer Arbeitsplätze bis 2030 (Europäisches Parlament, 2017). Das europäische Bruttoinlandsprodukt (BIP) könnte um drei Prozent erhöht und die Rohstoffnachfrage um etwa 20 % verringert werden (Europäisches Parlament, 2017). Durch Materialeinsparungen könnte man nicht nur die Importabhängigkeit senken, sondern auch industriebedingte Emissionen bis 2050 um mehr als die Hälfte reduzieren (Materialeconomics, 2018).

Auch in Deutschland hat das Konzept der Kreislaufwirtschaft die Aufmerksamkeit verschiedener Akteure auf sich gezogen. Im Juni 2012 trat in Deutschland das Kreislaufwirtschaftsgesetz in Kraft, das die Vorgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) in nationales Recht umsetzt. Die Bundesregierung hat erkannt, dass der deutsche Umweltsektor seine führende Position auf den Weltmärkten nur behaupten kann, wenn er sich den digitalen Wandel zunutze macht. Auch die Erreichung des Ziels einer Klimaneutralität wird nur auf der Grundlage innovativer Systemansätze möglich sein, die auf gründerter Datenbasis und klug eingesetzter Digitalisierung beruhen.

Mit der *Digitalen Agenda 2014–2017* hat die Bundesregierung ein Programm initiiert, das zwar nicht explizit auf eine digitale Kreislaufwirtschaft eingeht, aber einen generellen

---

<sup>4</sup> Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=DE>.

Rahmen für die Entwicklung der Digitalisierung in Deutschland absteckt. Neben dem Ausbau der Infrastruktur galt auch die Förderung von Normen und Standards für Schnittstellen der traditionellen und digitalen Wirtschaft zu schaffen, um die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und Dienstleistungen zu unterstützen.

Im Jahr 2018 hat die Bundesregierung seine *Digitale Strategie* für die folgenden Jahre vorgelegt und dargestellt, dass mittels Digitalisierung die Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger verbessert, die soziale Stabilität und der soziale Zusammenhalt verbessert, aber auch das wirtschaftliche und ökologische Potenzial des Landes entwickelt werden soll (Bundesregierung, 2018). Das Paket besteht aus Maßnahmen, die in einer Umsetzungsstrategie auf fünf Handlungsfeldern aufgebaut sind: Digitale Kompetenz, Infrastruktur und Ausstattung, Innovation und digitale Transformation, Gesellschaft im digitalen Wandel und Moderner Staat (siehe Abbildung 3).

**Abbildung 3:**



Quelle: Bundesregierung, 2018

Seit 2019 unterstützt das Bundesforschungsministerium (BMBF) mit der Fördermaßnahme *Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)* die Weiterentwicklung digitaler Technologien, welche in der Kreislaufwirtschaft Einsatz finden könnten. Dabei wird vor allem auf Anwendungsmöglichkeiten der digitalen Technologien zur Kreislaufschließung fokussiert (z.B. sensorische Erfassung für automatisierte Entscheidungsprozesse, Werkzeuge für das Closed-Loop Supply Chain Management oder Blockchain-Anwendungen).

Ende 2019 hat das BMBF seinen Aktionsplan *Natürlich.Digital.Nachhaltig*.<sup>5</sup> vorgestellt, der unter anderem darauf abzielt, den Energie- und Ressourcenverbrauch von IT-Infrastrukturen zu reduzieren. Unter der Initiative *Green ICT – Grüne IKT* sollen ab 2021 technologische Lösungen zur Verringerung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen von informationsverarbeitenden und -speichernden Komponenten entwickelt werden. Mit Fokus auf die Bereiche Sensorik, Digitalelektronik, Prozessoren und Serverfarmen werden Schlüsselemente einer digitalen Kreislaufwirtschaft angesprochen. Um Ressourcen effizient zu nutzen, ist auch der Einsatz Künstlicher Intelligenzen (KI) im Bereich der Logistik und des Mobilitätssektors vorgesehen. Leider verabsäumt es der Aktionsplan, konkrete Fördervolumen zu benennen. Ob also der Aktionsplan einen entscheidenden Impuls setzen kann, wird sich zeigen.

Schließlich wurde im Februar 2020 vom Bundesumweltministerium die *Umweltpolitische Digitalagenda* vorgestellt.<sup>6</sup> Vier Maßnahmenpakete sollen den Schutz der Umwelt in der Digitalpolitik langfristig stärken:

- Zukunftsprogramm Umweltgerechte Digitalisierung
- Transparenzinitiative
- Digitale Innovationen für den sozial-ökologischen Umbau
- Umweltpolitik 4.0

---

<sup>5</sup> Abrufbar unter [https://www.bmbf.de/upload\\_filestore/pub/Natuerlich\\_Digital\\_Nachhaltig.pdf](https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Natuerlich_Digital_Nachhaltig.pdf).

<sup>6</sup> Abrufbar unter <https://www.bmu.de/digitalagenda/>.

Das Zukunftsprogramm umweltgerechte Digitalisierung legt den Schwerpunkt auf Reduktion des Energiebedarfes und den Ressourcenverbrauches digitaler Technologien und soll sicherstellen, dass die EU-Ökodesign-Richtlinie greift und elektronische Produkte langlebiger gestaltet werden. Weiters soll mit einem Register für Rechenzentren der Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur überprüfbar gemacht werden.

Die Transparenzinitiative versucht durch Bereitstellen von Informationen neue Gestaltungs-, Steuerungs- und Handlungsmöglichkeiten zu schaffen. Dies umfasst auch die Förderung digitaler Plattformen, um sekundäre Rohstoffe zu handeln. Geplant ist auch ein digitaler Produktpass (Lebenszyklusakte), der für Transparenz und mehrfaches Recyclen sorgen soll.

Mit digitalen Innovationen als Werkzeug für den sozial-ökologischen Umbau soll der gezielte Einsatz künstlicher Intelligenz zur Lösung ökologischer Probleme gefördert werden. Die Bundesregierung versucht, die Potenziale künstlicher Intelligenz für nachhaltige Entwicklung zu nutzen und *KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen*<sup>7</sup> einzurichten. Da Künstliche Intelligenzen (KI) allerdings enorme Rechenleistung beanspruchen, müssen auch Kriterien zur Bewertung von Umweltwirkungen von KI geschaffen werden. Das Maßnahmenpaket Umweltpolitik 4.0 zielt darauf ab, eine datenbasierte und transparente Umweltpolitik der Zukunft zu formen. Insgesamt beinhaltet die Umweltpolitische Digitalagenda über 70 Maßnahmen.

Das mittlerweile dritte Ressourceneffizienzprogramm *ProgRessIII* (2020-2023) - beschlossen im Juni 2020 - umfasst Effizienzmaßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, also von der Rohstoffgewinnung, über Produktgestaltung, Produktion und Konsum bis hin zur Kreislaufwirtschaft. ProgRessIII betont den Beitrag der Ressourceneffizienz zur Erreichung der Klimaschutzziele und soll auch die Wechselwirkungen von Digitalisierung und Ressourceneffizienz untersuchen. Digitalisierung bietet zwar Chancen, die Ressourceneffizienz zu steigern und die führende Position im Bereich von Umweltschutz und -technologie zu stärken, allerdings

---

<sup>7</sup> Siehe: <https://www.z-u-g.org/aufgaben/ki-leuchttuerme/>.

ist der Ausbau der notwendigen IT-Infrastruktur (Netze, Knoten, Rechenzentren) mit enormen Ressourceneinsatz und massiven Umweltauswirkungen verbunden.

Die wirtschaftlichen Potenziale der Digitalisierung sind unumstritten. Bei erfolgreicher Umsetzung der Digitalstrategie könnte das deutsche BIP schätzungsweise um €82 Mrd. Euro wachsen (BMW, 2016). Allerdings ist in Deutschland die Skepsis gegenüber der Digitalisierung weit verbreitet, besonders beim Datenaustausch. Das könnte sich als große Hürde herausstellen, denn vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) zeigen große Zurückhaltung bei der Digitalisierung. Aber gerade sie bilden das Rückgrat der deutschen Wirtschaft und des deutschen Umwelttechniksektors. Immerhin erwirtschaften sie mehr als die Hälfte des inländischen BIP, stellen mehr als 60 % der Beschäftigung und mehr als 80 % der Berufsausbildung der Arbeitskräfte. Um die Zurückhaltung bei der Digitalisierung zu überwinden, hat die Regierung landesweit Kompetenzzentren eingerichtet. Seit 2018 gibt es 17 regionale Kompetenzzentren (Mittelstand Kompetenzzentrum 4.0) und sechs weitere mit spezifischer Ausrichtung (Mittelstand 4.0 Agenturen). Diese Zentren stellen KMUs kostenlos Fachwissen zur Verfügung und informieren sie über bereichsübergreifende Entwicklungen und Trends. Ein Schwerpunkt der finanziellen Unterstützung für KMUs liegt bei der Einführung von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie zur Digitalisierung und Vernetzung ihrer Prozesse (BMW, 2018b).

### **Stand der Kreislaufwirtschaft in Deutschland**

Deutschland besitzt ein solides Abfallmanagementsystem und einen umfangreichen Umwelttechniksektor. Auf den globalen Umwelttechnikmärkten sind deutsche Umwelttechnikunternehmen stark vertreten, vor allem KMUs. Das Marktvolumen für Umwelttechnologien und Ressourceneffizienz belief sich im Jahr 2016 auf €347 Mrd. (BMU, 2017). Dabei stellt der Bereich Energieeffizienz den größten Sektor dar (€83 Mrd.), gefolgt von umweltfreundlicher Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung (€79 Mrd.) und nachhaltiger Mobilität (€74 Mrd.). Auch der Sektor Kreislaufwirtschaft ist zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor herangewachsen. Die etwa 11.000 Unternehmen mit 290.000 Beschäftigten erwirtschaften einen Umsatz von rund €76

Milliarden. Der Sektor zeigt sich aufgrund der sich ständig erhöhenden Standards als äußerst innovativ.

In Bezug auf Kreislaufwirtschaft gilt Deutschland in Europa als führend, gefolgt von Großbritannien und Frankreich (Hervey, 2018). Diese drei Länder verfügen nicht nur über umfassende Abfallwirtschafts- und Recyclingsysteme, sondern zeigen auch hohe Innovationskraft (siehe Tabelle 1). Deutschland belegt nicht nur bei der Recyclingrate von Kommunalabfällen (66%) den ersten Rang, sondern auch bei Patenten der Kreislaufwirtschaft (1260). An zweiter Stelle folgt Frankreich mit 542 Patenten. Sieht man sich die Investitionen in die Kreislaufwirtschaft an, ist Deutschland führend. Mit einer gesamten Materialwiederverwendungsrate von elf Prozent gibt es allerdings noch reichlich Raum für Verbesserungen. Hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität <sup>8</sup> liegt Deutschland weltweit abgeschlagen auf Platz 114 (EPI, 2018). Während Deutschland bis 2017 insgesamt 347 Millionen Tonnen CO<sub>2e</sub> (-27%) gegenüber 1990 einsparen konnte, hat sich der Gesamtemissionsausstoß in den letzten Jahren kaum verändert.

---

<sup>8</sup> Emissionen bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt.

Tabelle 1: Zirkularität im EU-Vergleich.

Kreislaufwirtschaft in Europa						
Land	Siedlungsabfälle (pro Jahr und Person)	Lebensmittelabfälle (pro Jahr und Person)	Kommunale Recyclingrate	Material- wiederverwendungsrate	Patente für Kreislaufwirtschaft (seit 2000)	Investitionen in Kreislaufwirtschaft (in Mio. €)
Belgien	420 kg	345 kg	54%	17%	105	2,8
Bulgarien	404 kg	105 kg	32%	3%	10	0,5
Dänemark	777 kg	146 kg	48%	10%	53	2,3
Deutschland	627 kg	149 kg	66%	11%	1260	28,7
Estland	376 kg	265 kg	28%	11%	3	k.A.
Finnland	504 kg	189 kg	42%	7%	111	2
Frankreich	511 kg	136 kg	42%	18%	542	21,3
Griechenland	498 kg	80 kg	17%	1%	5	0,6
Irland	563 kg	216 kg	41%	2%	38	k.A.
Italien	497 kg	179 kg	45%	19%	294	17,8
Kroatien	403 kg	91 kg	21%	5%	4	0,6
Lettland	410 kg	110 kg	25%	3%	11	0,2
Litauen	444 kg	119 kg	48%	4%	19	0,4
Luxemburg	614 kg	175 kg	48%	11%	24	k.A.
Malta	621 kg	76 kg	7%	10%	1	k.A.
Niederlande	520 kg	541 kg	53%	27%	169	5,2
Österreich	564 kg	209 kg	58%	9%	122	3,5
Polen	307 kg	247 kg	44%	13%	298	4,7
Portugal	461 kg	132 kg	31%	2%	22	1,4
Rumänien	261 kg	76 kg	13%	2%	34	1,1
Schweden	443 kg	212 kg	49%	7%	49	4,1
Slowakei	348 kg	111 kg	23%	5%	10	0,6
Slowenien	466 kg	72 kg	58%	8%	8	0,5
Spanien	443 kg	135 kg	30%	8%	210	11
Tschechische Republik	339 kg	81 kg	34%	7%	72	k.A.
Ungarn	379 kg	175 kg	35%	5%	36	0,9
Vereinigtes Königreich	483 kg	236 kg	44%	15%	292	31
Zypern	640 kg	327 kg	17%	3%	4	0,1

Quelle: Ü bernommen und verändert von Hervey, 2018

Die Industrie stieß rund 193 Millionen Tonnen CO<sub>2e</sub> aus. Zwar schafft Berlin überraschend die Klimaziele für 2020 (-40 % im Vergleich zu 1990), allerdings sind diese Rückgänge der Covid-19 Krise zuzuschreiben und nicht den umweltpolitischen Maßnahmen. Grundsätzlich basiert der deutsche Klimaschutzansatz auf einer Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sowie auf einer Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und einer verbesserten Ressourceneffizienz. Die Bruttostromerzeugung<sup>9</sup> aus erneuerbaren Energien liegt bei etwa 40 % (2019).

### **Digitalisierung als Treiber der Kreislaufwirtschaft**

Deutschland ist zwar gut aufgestellt im Bereich Umwelttechnologie und Kreislaufwirtschaft, allerdings könnte dieser Vorteil schnell verschwinden, wenn deutsche Unternehmen Digitalisierung nicht nutzen. Derzeit basieren nur 24 % der gesamten Wirtschaftsleistung in Deutschland auf digitalen Investitionen. Im DIGITAL Economy Index 2020, der den Stand der Digitalisierung von Volkswirtschaften abbildet, erreicht Deutschland im Jahr 2020 mit 56,1 Punkten europaweit lediglich Rang 12.<sup>10</sup> Besonders schlecht schneidet Deutschland bei der Integration von Digitaltechnik ab. Aber eine digitale Kreislaufwirtschaft beruht nicht nur auf der Verfügbarkeit der digitalen Infrastruktur sondern auch Fachleuten mit digitalen Kompetenzen. Auch hier hinkt man anderen Ländern hinterher. Die deutsche Abfallwirtschaft ist immer noch sehr analog geprägt und viele Geschäfte werden über Telefon, Email, Fax oder gar persönlich abgewickelt. Ungenaue oder unvollständige Daten, ineffiziente Abholungen, veraltete Prozesse erhöhen die Kosten und stellen eine Hürde für das Entstehen einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft dar.

Berlin verspürt also Druck, seine Digitalisierungsbestrebungen zu intensivieren, damit sein Umwelttechniksektor auch in Zukunft wettbewerbsfähig bleibt (Wilts & Berg, 2018). Zwei Schlüsselbereiche sind für die Stärkung der Digitalisierung in der Wirtschaft von großer Bedeutung: Künstliche Intelligenz (KI) und Transfer von FuE-Ergebnissen in den Geschäftsbetrieb (BMW, 2018a). Derzeit setzen etwa fünf Prozent der Unternehmen KI im Geschäftsbetrieb ein, aber etwa 31 % planen den Einsatz von KI-basierten Lösungen

---

<sup>9</sup> Insgesamt erzeugte elektrische Energie.

<sup>10</sup> Abrufbar unter [https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc\\_id=66943](https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=66943).

im nächsten Jahrzehnt. Angesichts der Größe und Relevanz des Umwelttechniksektors, schreitet die Politik behutsam voran. Denn die Digitalisierung hat verschiedene Märkte mit ungemeiner Wucht und innerhalb kürzester Zeit völlig umgestaltet (z.B. Musik, Film und TV, Reisen, Banken, Versicherungen). Mit einer Strategie der kontrollierten Disruption ist man bemüht, einen politischen Rahmen zu schaffen, der das Entstehen digitaler Lösungen ermöglicht, ohne die bestehende Infrastruktur der Abfallwirtschaft zu schädigen oder zerstören. Dafür ist es unerlässlich, sich auf Bereiche zu konzentrieren, in denen durch die Schließung von Materialkreisläufen tatsächlich relevante Umweltwirkung erzielt wird. Da der Kreislaufwirtschaftssektor in Deutschland vergleichsweise gut entwickelt ist, wird weiterer Fortschritt weniger durch spezifische Einzelinnovationen als vielmehr durch die Verknüpfung einzelner Komponenten und die Entwicklung von Systemlösungen erzielt werden. Digitalisierung bietet wesentliche Schlüsseltechnologien für diesen Wandel.

Jedoch sind für die Realisierung digitaler Möglichkeiten Rahmenwerke und staatliche Förderprogramme erforderlich. Für viele kleine und mittlere Unternehmen - die Hauptträger des Umweltsektors - stellt Digitalisierung eine schwer zu meisternde Herausforderung dar. Für große Unternehmen ist es vergleichsweise einfacher, Digitalisierungsstrategien umzusetzen und zu finanzieren. Außerdem müssen aufgrund schneller Innovationszyklen Systeme stets angepasst werden, was wiederum Folgekosten verursacht. Dass sich trotzdem Unternehmen auf digitale Kreislaufwirtschaft spezialisieren, lässt sich als Zeichen für die Weiterentwicklung des Sektors sehen.

### **Beispiele innovativer Neugründungen der Kreislaufwirtschaft**

Der Bereich digitale Kreislaufwirtschaft ist äußerst dynamisch und hat sowohl das Interesse großer Konzerne als auch innovativer Start-ups geweckt. Mercedes-Benz hat gemeinsam mit Circulor ein Pilotprojekt zur Transparenz von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Kobalt-Lieferkette initiiert. Basierend auf Blockchain-Technologie werden die Emissionen klimarelevanter Gase sowie die Menge an Sekundärmaterial entlang der Lieferketten der Batteriezellenhersteller überwacht. Damit kann der Konzern seine Zulieferer auf Einhaltung der Nachhaltigkeitsstandards drängen und die Transparenz in der Lieferkette erhöhen. Die Blockchain-Technologie bietet dazu Vorteile, denn sie

verknüpft digitale Datensätze durch Verschlüsselung und lässt keine unbemerkten Veränderungen zu. Alle Teilnehmer der Lieferkette sind in der Lage, die Integration, Übertragung und Bestätigung von Informationen nachzuvollziehen und trotzdem bleiben vertrauliche Informationen geschützt.

*Grover* bietet Privatkunden und Unternehmen für ein monatliches Abonnement den Zugang zu mehr als 2.000 technischen Produkten, wie Smartphones, Laptops, Router, VR-Ausrüstung etc. Nutzern verschafft es die Möglichkeit, Produkte je nach individuellen Bedürfnissen zu behalten, zu wechseln, zu kaufen oder zurückzugeben. Der Vorteil liegt nicht nur in der Flexibilität sondern auch in niedrigeren Kosten. Aus jedem Produkt wird maximaler Wert gezogen und Elektroschrott vermieden. *Grover* hat im Jahr 2019 fast 100.000 Geräte wieder in Umlauf gebracht und Abonnementzahlen steigen rasant.

Das Start-up *RMF* hat eine eigene Technologie zum Recycling vom kritischen Rohmaterial Indium entwickelt. Das Rohmaterial wird für die Produktion von Elektronikgeräten sowie Klimaschutztechnik benötigt, muss aber importiert werden. Die Recyclingraten bei fast allen Hochtechnologie-Metallen liegen unter 1%. Mit seiner entwickelten Technologie kann Indium sowohl aus primären Quellen (Schlacke und Erz) als auch sekundären Quellen (Elektronikmüll) gewonnen werden. Das so gewonnene Indium wird in die Herstellung von LEDs, Displays, und Photovoltaikzellen rückgeführt.

*SunCrafter* hat sich zum Ziel gesetzt, durch Upcycling gebrauchter PV-Solarmodule Materialschleifen aufzubauen. Mittels eigenem, patentiertem Wiederaufbereitungsprozess verwandelt das Unternehmen ausgeschiedene Solarmodule in extrem robuste Plug-and-Play-Solargeneratoren und verlängert somit die Lebensdauer von Solarmodulen drastisch.

*binee* ist in Leipzig beheimatet und fokussiert auf Problemstoffe, bei denen eine saubere Entsorgung und Kreislaufwirtschaft bisher nicht funktioniert. Mit einem Netzwerk an Sammelstellen wird versucht, das Entsorgen von Sondermüll zu vereinfachen, z.B. Elektrogeräte. Die abgegebenen Produkte werden auf Reparaturfähigkeit überprüft und Wertstoffe werden wieder in neue Fertigungsprozesse rückgeführt.

*Mein Recycling-App* ermöglicht es Unternehmen und Verwertern, Recyclingvorgänge online zu organisieren, zu verfolgen und zu überprüfen - basierend auf Echtzeitdaten. Durch die Bereitstellung von Informationen über die Verfügbarkeit von Mengen bestimmter Abfallströme werden Such- und Transaktionskosten reduziert und Skaleneffekte ermöglicht.

*Resourcify* mit Sitz in Hamburg ist eine Cloud-basierte Software mit der Unternehmen ihre Abfall- und Recyclingprozesse einfach und unkompliziert online verwalten können. Ziel ist es, den Aufwand bei der Entsorgung und Trennung von Abfall zu senken, Erlöse bei Wertstoffen zu erzielen und die Recyclingquote zu erhöhen. Mittlerweile stehen über 100 Entsorger unter Vertrag und die Transaktionen übersteigen 5.000 monatlich.<sup>11</sup> Der Wert der verwalteten Abfälle beläuft sich auf gut €19 Mio. jährlich. Dass die Software auch Verwaltungs- und Abrechnungsaufgaben übernimmt, kommt den Kunden zugute.

Mit *scrappel* wurde 2018 eine digitale B2B-Plattform gegründet, die Teilnehmer der Kreislaufwirtschaft digital vernetzt und Transaktionskosten der Geschäftsanbahnung und -abwicklung reduziert. Das Service des Unternehmens umfasst auch Warenkreditversicherung oder ein Treuhandverfahren für Zahlungen. Mit derzeit rund 650 Inseraten erfreut sich die Plattform steigender Beliebtheit.

*restado* ist eine Verkaufsplattform aus Stuttgart, wo übrig gebliebene Baumaterialien digital ge- und verkauft werden (z.B. Beton, Fliesen, Fenster, Holzbalken, Dämmmaterial etc.) Damit rettet *restado* Materialien, die aufgrund von Fehlbestellungen oder zu großen Mindestabnahmemengen sonst entsorgt worden wären.

*FarmInsect* ist im Bereich tierischer Landwirtschaft angesiedelt. Gegenwärtig sind Soja- und Fischmehl die wichtigsten Proteinfuttermittel der Fleischindustrie, aber über 90 % müssen von außerhalb Europas importiert werden. Das Unternehmen produziert Futtermittel aus Insektenlarven und zwar nachhaltig und klimaschonend. Das Unternehmen, dass auf Verwendung regionaler Rückstände und vollständige Rückverfolgbarkeit setzt, hat dazu eine IT-Plattform entwickelt, die den Landwirten ein vollautomatisches Maschinensystem mit Sensoren zur Verfügung stellt, das sie durch den

---

<sup>11</sup> Siehe <https://www.basichthinking.de/blog/2020/02/19/resourcify-start-up-check/>.

Prozess der Insektenproduktion führt - auch ohne Vorkenntnisse in der Insektenzucht. Der Anteil der Landwirtschaft am Treibhausgasausstoß liegt in Deutschland bei etwa 7 % und global bei rund 25 %.

#### **IV. Digitale Kreislaufwirtschaft und ihr Potenzial für Klimaschutz**

Im Kontext einer kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft gelten die Reduktion der Rohstoffmenge, eine verbesserte Ressourceneffizienz und eine stärkere Wiederverwertung und Wiederverwendung als Hauptstützen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Digitalisierung kann durch eine Kombination aus verbessertem Materialmanagement, Dematerialisierung und systemischem Wandel einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten (Coroama et al., 2015). In der EU könnten mit einer Kreislaufwirtschaft bis 2050 jährlich rund 296 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden werden. In Bezug auf Klimaschutz sind Sekundärrohstoffe den Primärrohstoffen jedenfalls überlegen, da sie mit weniger Energieaufwand hergestellt werden können. Das Recycling von Aluminium erfordert 90 % weniger Energieeinsatz im Vergleich zur Herstellung aus Primärrohstoffen.

Die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft erfordert jedoch umfangreiche Informationssysteme über den verfügbaren Materialbestand, Materialflüsse und Qualität der Recyclate. Deutschland befindet sich erst am Anfang der Entwicklung solcher Systeme, nur wenige existieren derzeit, aber ihr Einsatz schreitet voran. So steht zu befürchten, dass die Digitalisierung den Energiebedarf in die Höhe treiben wird. Angesichts des aktuellen Energiemix ist Deutschland noch weit davon entfernt, seinen Strom komplett aus erneuerbaren Energien zu gewinnen. Der Ausbau der digitalen Infrastruktur und der verstärkte Einsatz von digitalen Geräten wird demnach Treibhausgasemissionen in die Höhe treiben. Aus Klimaschutzperspektive stellen nicht die Rechenzentren die größten Probleme dar, sondern die immense Zahl der Kleingeräte (Smartphones, Smart-Sensoren und andere vernetzte Geräte). Deren Anteil wird in nächster Zeit steigen und auch wenn neue digitale Geräte immer weniger Elektrizität verbrauchen (Morley et al., 2018) werden die Emissionen steigen (Rebound Effekt). Derzeit sind digitale Technologien sind für 4 % der weltweiten Treibhausgasemissionen

verantwortlich. Eine Verdopplung bis zum Jahr 2025 wird erwartet. Geopart mit der Tatsache, dass in die Herstellung digitaler Geräte viele Materialien aus Primärquellen eingehen, und die Recyclingquote bei den meisten Materialien (z.B. seltene Erden) unter 1 % liegt, müssen wir von einem massiven Anstieg ökologischer Belastungen ausgehen.

Die Transformation in eine kohlenstoffarme Wirtschaft erfordert eine massive Reduktion unseres primären Materialverbrauches und den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft, die möglichst keine Abfälle generiert. Nur in so einem Szenario würde sich der Treibhausgasausstoß in einem Ausmaß senken lassen, dass wir die Pariser Klimaschutzziele einhalten können. Im Rahmen des *Neuen Grünen Deals* hat die Europäische Kommission 2019 ihren Fahrplan zur Umgestaltung der europäischen Wirtschaft dargelegt. Der Maßnahmenkatalog, der die europäische Wirtschaft nachhaltiger gestalten soll, umfasst ambitionierte Umweltziele. So soll die Union im Jahr 2050 klimaneutral sein. In Deutschland wurden im Jahr 2017 statistisch pro Kopf über 16 Tonnen Rohstoffe konsumiert.<sup>12</sup> Effizientes Materialmanagement gilt als Schlüssel zu einer kohlenstoffarmen Kreislaufwirtschaft. Digitale Technologien können dabei eine essentielle Rolle übernehmen. Allerdings besteht die Gefahr, dass der übermäßige Einsatz von digitaler Technik, den Strombedarf in die Höhe schnellen lässt und mittelfristig Emissionseinsparungen durch Effizienzsteigerungen zunichte macht. Damit würde auch das Ziel einer Klimaneutralität unerreichbar bleiben. Ohne Digitalisierung wird die Klimaneutralität nicht gelingen, mit aber auch nur wenn massiv in den Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Forschung bezüglich grüner Informationstechnik investiert wird. Der am schnellsten wachsende Anteil an Müll ist Elektroschrott. Zwar wurden 2018 laut Umweltbundesamt in Deutschland 853.000 Tonnen Elektroaltgeräte gesammelt, trotzdem wurde die Sammelquote der EU von 45 % nicht erreicht. Wenn sich die Recyclingquoten bei elektronischen Geräten nicht rasch erhöhen, werden sich mittelfristig keine positiven Umweltwirkungen durch Digitalisierung einstellen.

---

<sup>12</sup> Umweltbundesamt (2018), <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/rohstoffkonsum-steigt-wieder-an-auf-161-tonnen-pro>.

## V. Fazit

Die Arbeit geht der Frage nach, inwieweit sich Deutschland in Richtung digitale Kreislaufwirtschaft entwickelt und ob dies mit realen Emissionseinsparungen und Dekarbonisierung der Wirtschaft in Verbindung gebracht werden kann. Die Studie kommt zu keinem klaren Ergebnis. Einerseits zeigt sich, dass Deutschland Fortschritte im Bereich der Kreislaufwirtschaft gemacht hat, andererseits hinkt man im Bereich Digitalisierung anderen Ländern hinterher. Digitalisierung kann die Kreislaufwirtschaft unterstützen. Allerdings wirkt sie in zwei Richtungen, zum einen ist durch die massive Verbreitung von elektronischen Geräten mit einem größeren Ressourcen- und Stromverbrauch zu rechnen, zum anderen kann Digitalisierung neue Geschäftsmodelle hervorbringen, die dazu führen, Ressourcen einzusparen. Solange Deutschland seine Energiewende nicht abgeschlossen hat, wird Digitalisierung zu Mehremissionen im Energiesektor führen. Dem stehen Emissionseinsparungen im Bereich der Ressourceneffizienz gegenüber.

Die Entwicklung einer digitalen Kreislaufwirtschaft benötigt eine politische Führung mit klaren Vorgaben und geeignetem Instrumentenpool. Der Versuch mittels Anreizen, Unternehmen zum schnellen Wandel zu verhelfen, erscheint bislang als unzulänglich. Die zaghaften Versuche der Politik im Bereich der Digitalisierung lassen auf Bedenken im Bereich des Wettbewerbs schließen, denn ein rascher digitaler Umbau gilt nicht nur als teuer sondern auch als risikobehaftet. Somit fokussiert man bislang nur auf die einfach zu realisierenden Ziele, fundamental neue Wege zu beschreiten, wird vermieden. Unterschiede findet man in den zwei existierenden Digitalisierungswelten - dem originären Digitalsektor (IT-Wirtschaft) und den neu digitalisierenden (z.B. Autoindustrie, Abfallbeseitigung). Während der originäre durch Digitalpolitik bereits stärker reguliert wird, finden sich bei letzterem vermehrt Versuche, Digitalisierung innovativ einzusetzen, um neue Geschäftsmodelle aufzubauen bzw. Materialmanagement zu optimieren. Unternehmerische Pioniere wagen sich in den Bereich der digitalen Kreislaufwirtschaft vor, aber noch ist es zu früh, deren Abschneiden und deren Umweltwirkung abzuschätzen. Die Hoffnung liegt aber im innovativen Potenzial der Unternehmen. Eine übergreifende und umfassende Governance des Digitalen in der Form

eines strategisch-politischen Rahmens, der öffentlichen Sektor, Wirtschaft und Gesellschaft überspannt, fehlt größtenteils leider noch.

## Literatur

- Akerlof, G. A. (1978). The market for “lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. In *Uncertainty in Economics* (SS. 235-251).
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science* 2(1):133-140.
- Berg, H., & Wilts, H. (2018). Digital platforms as market places for the circular economy—requirements and challenges. In *NachhaltigkeitsManagementForum/ Sustainability Management Forum* (SS. 1-9). Springer Berlin Heidelberg.
- Berger, R. (2016). *Die Digitalisierung in der GreenTech-Branche*. <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Die-Digitalisierung-in-der-GreenTech-Branche.html> (zugegriffen am 9. Mai 2019).
- BMWi/Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2016). *Digital Strategy 2025*. [www.de.digital](http://www.de.digital). (zugegriffen am 8 Oktober 2019).
- BMWi/Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018a). *State Secretary Hirte: "Clear progress on digitalisation of industry"*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2018/20180612-hirte-clear-progress-on-digitalisation-of-industry.html> (zugegriffen am 12. Mai 2020).
- BMWi/Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018b). *SMEs Digital*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Mittelstand/smes-digital-strategies-for-digital-transformation.html> (zugegriffen am 3. Juli 2020).
- BMU/Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. (2017). *Größe der Leitmärkte Energieeffizienz ist und bleibt der Leitmarkt mit dem größten Marktvolumen*. <https://www.greentech-made-in-germany.de/de/umwelttechnik-deutschland/groesse-der-leitmaerkte/> (zugegriffen am 10. Juli 2020).
- Bundesregierung. 2018. *Die Digitalstrategie der Bundesregierung*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/die-digitalstrategie-der-bundesregierung-1549554> (zugegriffen am 16. Dezember 2019).
- Chowdhury, B., & Chowdhury, M. U. (2007, December). RFID-based real-time smart waste management system. In *Telecommunication Networks and Applications Conference, 2007. ATNAC 2007. Australasian* (SS. 175-180). IEEE.
- Circle Economy. *The Circularity Gap Report*. (2018). Available online: [https://docs.wixstatic.com/ugd/ad6e59\\_c497492e589c4307987017f04d7af864.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/ad6e59_c497492e589c4307987017f04d7af864.pdf) (zugegriffen am on 17 September 2018).

- Circle Economy/Ecofys (2018). *Implementing circular economy globally makes Paris Targets achievable*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Circular%20economy%201.pdf> (zugegriffen am 12. Dezember 2019).
- Coroama, V. C., Moberg, Å., & Hilty, L. M. (2015). *Dematerialization Through Electronic Media?*. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability: Advances in Intelligent Systems and Computing* 310: 71-103. Cham: Springer Int. Publishing AG.
- EPI. (2018). *Environmental Performance Index*. Yale University. <https://epi.envirocenter.yale.edu/epi-country-report/DEU> (zugegriffen am 11. November 2019).
- Europäisches Parlament. (2017). *Towards a circular economy - Waste management in the EU*. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS\\_STU\(2017\)581913\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS_STU(2017)581913_EN.pdf) (zugegriffen am 10. April 2020).
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production*, 114:11-32.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5):765-777.
- Hervey, G. (2018). *Ranking how EU countries do with the circular economy*. POLITICO's circular economy index produces some unexpected results, <https://www.politico.eu/article/ranking-how-eu-countries-do-with-the-circular-economy/> (zugegriffen am 10 Jul 2020).
- IdW/Institut der deutschen Wirtschaft (2010). *Studie im Auftrag des BDE*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143:37-46.
- Lee, C. K. M., & Chan, T. M. (2009). Development of RFID-based reverse logistics system. *Expert Systems with Applications*, 36(5):9299-9307.

- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner production*, 115:36-51.
- Materialeconomics (2018). *The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation*. <https://media.sitra.fi/2018/06/12132041/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf> (zugegriffen am 30. Juni 2020).
- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 23-44.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North point press.
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178:703-722.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., ... & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2):621-641.
- Morley, J., Widdicks, K., & Hazas, M. (2018). Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption. *Energy Research & Social Science*, 38:128-137.
- Pagoropoulos, A., Pigosso, D. C., & McAloone, T. C. (2017). The emergent role of digital technologies in the Circular Economy: A review. *Procedia CIRP*, 64:19-24.
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. JHU Press.
- Reuter, M. A. (2016). Digitalizing the Circular Economy. *Metallurgical and Materials transactions B*, 47(6):3194-3220.
- Shmelev, S. E., & Powell, J. R. (2006). Ecological–economic modelling for strategic regional waste management systems. *Ecological Economics*, 59(1):115-130.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature News*, 531(7595), 435.
- UN/United Nations. (2015). *UN projects world population to reach 8.5 billion by 2030, driven by growth in developing countries*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/07/un-projects-world-population-to-reach-8-5-billion-by-2030-driven-by-growth-in-developing-countries/> (zugegriffen am 10. März 2020)

- Wilts, H. (2017) Key Challenges for Transformations Towards a Circular Economy – The Status Quo in Germany. *International Journal of Waste Resources* 7(1):2-5.
- Wilts, H., & Berg, H. (2018). *The digital circular economy: can the digital transformation pave the way for resource-efficient materials cycles?* Wuppertal Institute. [https://epub.wupperinst.org/files/6978/6978\\_Wilts.pdf](https://epub.wupperinst.org/files/6978/6978_Wilts.pdf) (zugegriffen am 12. May 2020).
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann.
- Weltbank. (2012). *What A Waste: A Global Review of Solid Waste Management* (Washington, D.C.).