

Nachhaltigkeit und Digitale Transformation

Bericht zum
Forschungsmodul B1
Wechselwirkungen des Ziel- und
Indikatorensystems

*Projekt: Umsetzungserfahrungen mit
Landesnachhaltigkeitsstrategien –
Fallstudie Nachhaltigkeitsstrategie NRW*

Dr. Holger Berg

Dr. Stephan Ramesohl

*unter Mitarbeit von
Phillip Bendix, Jannik Hänseler
und Franziska Nagel*

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Förderung des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Berg, Holger; Ramesohl, Stephan (2019): Nachhaltigkeit und digitale Transformation. Bericht zum Forschungsmodul B1 im Forschungsprojekt „Umsetzungserfahrungen mit Landesnachhaltigkeitsstrategien – Fallstudie Nachhaltigkeitsstrategie NRW“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.)

Projektlaufzeit: Oktober 2016 – Dezember 2020

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Oscar Reutter, Dr. Dorothea Schostok

Supervision: Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick

Autoren:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH:

Dr. Holger Berg

Dr. Stephan Ramesohl

Weitere Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen:

Phillip Bendix

Jannik Hänseler

Franziska Nagel

Impressum

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Dr. Holger Berg

Abteilung Kreislaufwirtschaft

Forschungsbereich Digitale Transformation

holger.berg@wupperinst.org

Tel. +49 202 2492-179

Fax +49 202 2492-250

Stand:

30. November 2019

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einführung	5
2 Digitale Transformation – Skizze des Megatrends und Relevanz für die nachhaltige Entwicklung	6
2.1 Digitale Transformation – Begriffsbestimmung und Beschreibung des Megatrends	6
2.2 Digitale Transformation und nachhaltige Entwicklung	11
3 Transformationsarenen nachhaltiger Digitaler Transformation: “Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft” und “Dezentrale Erneuerbare Energiesysteme”	13
3.1 Transformationsarena Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - von der linearen Ökonomie zu ressourceneffizienten Kreisläufen durch digitale Anwendungen	13
3.1.1 <i>Beschreibung der Transformationsarena</i>	13
3.1.2 <i>Beitrag der Arena zu einer nachhaltigen Entwicklung</i>	14
3.1.3 <i>Ansatzpunkte der Digitalen Transformation zum Realisierungserfolg</i>	16
3.1.4 <i>Risiken der Digitalen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung in der Transformationsarena</i>	19
3.1.5 <i>Hemmnisse der digitalen Erschließung</i>	20
3.2 Transformationsarena Digitale Erneuerbare Energiesysteme – digitale Steuerung für neue Formen der Energieversorgung	21
3.2.1 <i>Beschreibung der Transformationsarena</i>	23
3.2.2 <i>Beitrag der Arena zu einer nachhaltigen Entwicklung</i>	24
3.2.3 <i>Ansatzpunkte der Digitalen Transformation zum Realisierungserfolg</i>	26
3.2.4 <i>Risiken der Digitalen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung in der Transformationsarena</i>	27
3.2.5 <i>Hemmnisse der digitalen Erschließung</i>	28
4 Digitale Transformation zur Umsetzung der Sustainable Development Goals	29
5 Schlussfolgerungen	41
Literaturverzeichnis	45
Weitere Internetquellen	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zentrale Technologien der Digitalen Transformation. Quelle: Eigene Darstellung -----	8
Tabelle 2: Verbindung ausgewählter SDG zur Kreislaufwirtschaft. Quelle: Bahn-Walkowiak/Wilts (in Vorbereitung) auf Basis von Destatis (2018). -----	15
Tabelle 3: Nutzung digitaler Technologien zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft. Quelle: Eigene Darstellung. -----	18
Tabelle 4: Zentrale Möglichkeiten der SDG-Erreichung durch Digitale Transformation. Quelle: Eigene Darstellung. -----	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Datenvolumen des privaten IP-Traffics weltweit nach Verbindungstyp in den Jahren 2014 bis 2017 sowie eine Prognose bis 2022 (in Exabyte pro Monat). Quelle: Eigene Darstellung nach Statista (2019a). -----	7
Abbildung 2: Wachstum des Internet of Things. Quelle: Eigene Darstellung nach Statista (2014). -----	8
Abbildung 3: Vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft für Material und Energie. Quelle: Wilts/Berg (2017, S. 2) auf Basis von Reichel et al. (2016, S. 10). -----	14
Abbildung 4: Barrieren in der Kreislaufwirtschaft. Quelle: Eigene Darstellung. -----	17
Abbildung 5: In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten bei Elektroaltgeräten. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (o. J.). -----	20
Abbildung 6: Von traditionellen zu dezentralen Wertschöpfungsketten. Quelle: Eigene Darstellung. -----	24
Abbildung 7: Aufgaben für Politik und Gesellschaft. Quelle: Eigene Darstellung. -----	28
Abbildung 8: Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung. Quelle: United Nations (2015b). -----	29

1 Einführung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, Ansatzpunkte und Verbindungen der Digitalen Transformation für die Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie NRW aufzuzeigen. Dies erfolgt unter Rückbezug auf den Strukturentwurf für die aktuelle Novellierung der Strategie und deren zukünftige Indikatorik. Da diese jeweils an den Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen orientiert sind, werden diese als weitere wesentliche Grundlage der hier vorgenommenen Analyse verwendet. Diese Vorschläge beziehen sich dabei nicht auf den aktuellen Entwurf zur Aktualisierung der Nachhaltigkeitsstrategie die für 2020 vorgesehen ist), sondern zielen auf die dritte, folgende Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie.

Die Nachhaltigkeitsstrategie NRW hatte in ihrer bisherigen Fassung die Digitale Transformation zwar zur Kenntnis genommen, aber noch nicht als tiefer zu behandelndes strategisches Moment integriert

(<https://www.nachhaltigkeit.nrw.de/themen/nachhaltigkeitsstrategie-fuer-nordrhein-westfalen/>). Aufgrund des schnellen Voranschreitens der Digitalen Transformation, ihrer Chancen aber auch Problemstellungen für nachhaltige Entwicklung (Ramesohl/Berg 2019) wird dies jedoch für die Zukunft angestrebt. Diese Studie will durch die Identifikation von Ansatzpunkten, die Beschreibung von Handlungsnotwendigkeiten und die Herstellung des Bezugs zu den bereits für die Nachhaltigkeitsstrategie NRW aufgezeigten Handlungsräumen zu diesem Einbezug beitragen.

Die Untersuchung ist zu diesem Zweck wie folgt gegliedert: Zunächst wird die Digitale Transformation definiert, als "Megatrend" beschrieben und ihre Bezüge zur nachhaltigen Entwicklung werden dargestellt, wobei diese zu den Zwecken dieses Beitrags die ökologisch-ökonomischen Zusammenhänge fokussiert. Wie oben erwähnt, erfolgt aufgrund des aktuellen Strukturentwurfs und der geplanten Indikatorik (unveröffentlicht, liegen den Autoren jeweils in der Entwurfsfassung vor) eine Bezugnahme auf die SDGs. Zu diesen liegen bereits Studien und Annahmen zu ihrer Verbindung mit den Instrumenten und Anwendungen der Digitalen Transformation vor. Derartige Studien werden in Kapitel 3 ausgewertet. Es wird gezeigt, welche Möglichkeiten die Digitale Transformation aus der jeweiligen Sicht für die Umsetzung der SDGs bietet. Dies ermöglicht später einen Übertrag auf die Nachhaltigkeitsstrategie NRW.

Im folgenden Kapitel erfolgt eine vertiefende Darstellung zu den Chancen und Risiken der Digitalen Transformation zu zwei wesentlichen Transformationsarenen einer digital-gestützten nachhaltigen Entwicklung. Behandelt werden die Etablierung einer umfänglichen Kreislaufwirtschaft und die Transformation von dezentralen Energiesystemen auf Basis erneuerbarer Energien. Beide Arenen können beispielhaft aufzeigen, wie digitale Anwendungen wirken können, um nachhaltige Ansätze zu ermöglichen, welche Hemmnisse zu ihrer Anwendung (noch) vorliegen und auch welche Risiken in ihrer Anwendung liegen können.

Auf Basis der vorgenommenen Analysen werden im letzten Kapitel Handlungsempfehlungen für die Berücksichtigung der Digitalen Transformation in der folgenden Novellierung der Nachhaltigkeitsstrategie NRW unter Bezugnahme auf die identifizierten Chancen und Risiken entwickelt.

2 Digitale Transformation – Skizze des Megatrends und Relevanz für die nachhaltige Entwicklung

2.1 Digitale Transformation – Begriffsbestimmung und Beschreibung des Megatrends

Kaum eine Entwicklung hat das Leben und Wirtschaften in den letzten Jahrzehnten auf globaler Ebene derart beeinflusst wie die Digitalisierung. Die ubiquitäre Verfügbarkeit digitaler Technologien in Hardware und Software beinahe überall auf dem Globus, die rasante Beschleunigung technologischer Entwicklungen wie Künstlicher Intelligenz (KI), dem Internet of Things oder autonomer Systeme führen dazu, dass inzwischen von der 4. industriellen Revolution (auch “4IR”) gesprochen wird (<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>). Sie hat u.a. zu neuen Schüben von Automatisierung (z.B. durch fortgeschrittene Robotik), neuen Arten der Geschäftsanbahnung und -ausführung (E-Commerce und Plattformökonomie) sowie neuen Arten der Finanzierung (Crypto Currencies und Mobile Payment) geführt.

Die Allgegenwärtigkeit des Megatrends und die hohe Aufmerksamkeit, die er genießt, haben allerdings dazu geführt, dass der Begriff selbst an Schärfe verloren hat und einer Definition bedarf, zumal viele ähnliche Idiome wie “Digitale Transformation”, “Digitale Revolution” und “Digitalisierung” zum Teil synonym, zum Teil in Abgrenzung zueinander verwendet werden. Der vorliegende Text schlägt die Verwendung des Begriffs “Digitale Transformation” als Terminus für die oben beschriebene Entwicklung vor, da ihre Wirkung tatsächlich wie beschrieben eine weitgehende Veränderung ökonomischer und sozialer Gegebenheiten und Prozesse bewirkt. Pousttchi definiert Digitale Transformation wie folgt:

„Der Begriff Digitale Transformation bezeichnet erhebliche Veränderungen des Alltagslebens, der Wirtschaft und der Gesellschaft durch die Verwendung digitaler Technologien und Techniken sowie deren Auswirkungen. Typischerweise wird der Begriff im engeren Sinne für die Teilmenge entsprechender Veränderungen von Unternehmen und Branchen verwendet, wobei zwischen den Dimensionen Leistungserstellung, Leistungsangebot und Kundeninteraktion unterschieden werden kann“ (Pousttchi 2017).

Eine die Digitale Transformation begleitende Entwicklung und zum Teil ureigenes Ergebnis dieses Megatrends ist eine kontinuierliche Beschleunigung vieler Entwicklungen in Technologie und Wirtschaft. In Anlehnung an ein Werk von Kurzweil sprechen Brynjolfsson und McAfee in diesem Zusammenhang von der “zweiten Hälfte des Schachbretts” (“second half of the chessboard”, Brynjolfsson/McAfee 2016, S. 46), um zu zeigen, dass es sich nicht nur um einen exponentiellen Prozess handelt, sondern dieser auch so weit fortgeschritten ist, dass alle folgenden Schritte zu massiven Auswirkungen führen. Die Digitale Transformation und ihre Beschleunigung ist durch vielerlei Indikatoren mess- und nachweisbar. Dies betrifft beispielsweise die exponentielle Entwicklung der Rechnerleistung in einem Zeithorizont von 18 bis 24 Monaten (Moore’s Law), die bereits seit fünf Jahrzehnten fast konstant anhält. Datenakkumulation ist ein weiterer Indikator (siehe Abb. 1). So führen GeSi/Accenture (2016) an, dass 90 % der weltweit bis zum Jahr 2015 generierten Daten im Zeitraum zwischen 2013 und 2015 entstanden sind.

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Datenvolumens in Form des IP-Traffics als Ist-Daten für die Zeit zwischen 2014 bis 2017 und als Prognose bis zum Jahr 2022. Die dargestellten Zahlen entsprechen einer Verachtfachung in einem Zeitraum von acht Jahren.

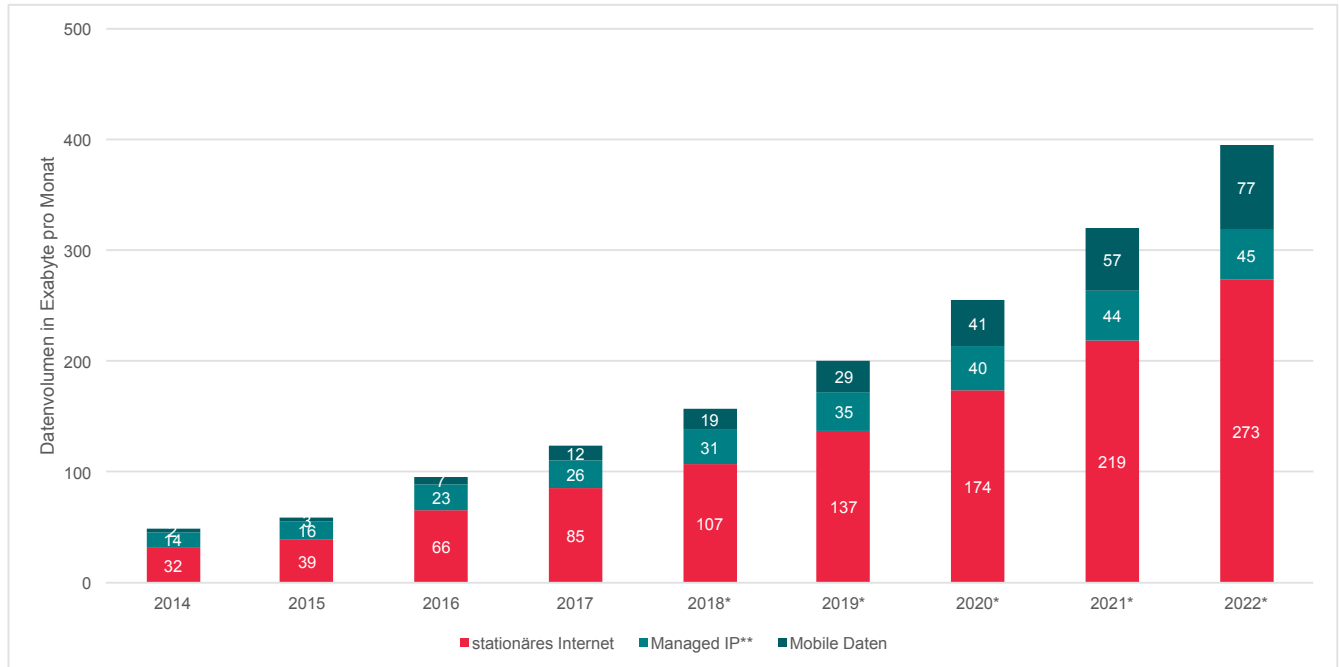


Abbildung 1: Datenvolumen des privaten IP-Traffics weltweit nach Verbindungstyp in den Jahren 2014 bis 2017 sowie eine Prognose bis 2022 (in Exabyte pro Monat). Quelle: Eigene Darstellung nach Statista (2019a).

Ebenso entwickelt sich die Nutzung des Internet of Things exponentiell, sodass in Zukunft beinahe jedes elektronische Gerät eine Verbindung zum Internet aufweisen wird. Nach Statista (2019b) wird daher für das Jahr 2020 mit ca. 25 Milliarden verbundener Endgeräte aller möglicher Form vom Computer über das Smartphone bis hin zu Maschinen, Anlagen aber auch bspw. Küchengeräten und Spielzeug gerechnet (siehe Abbildung 2).

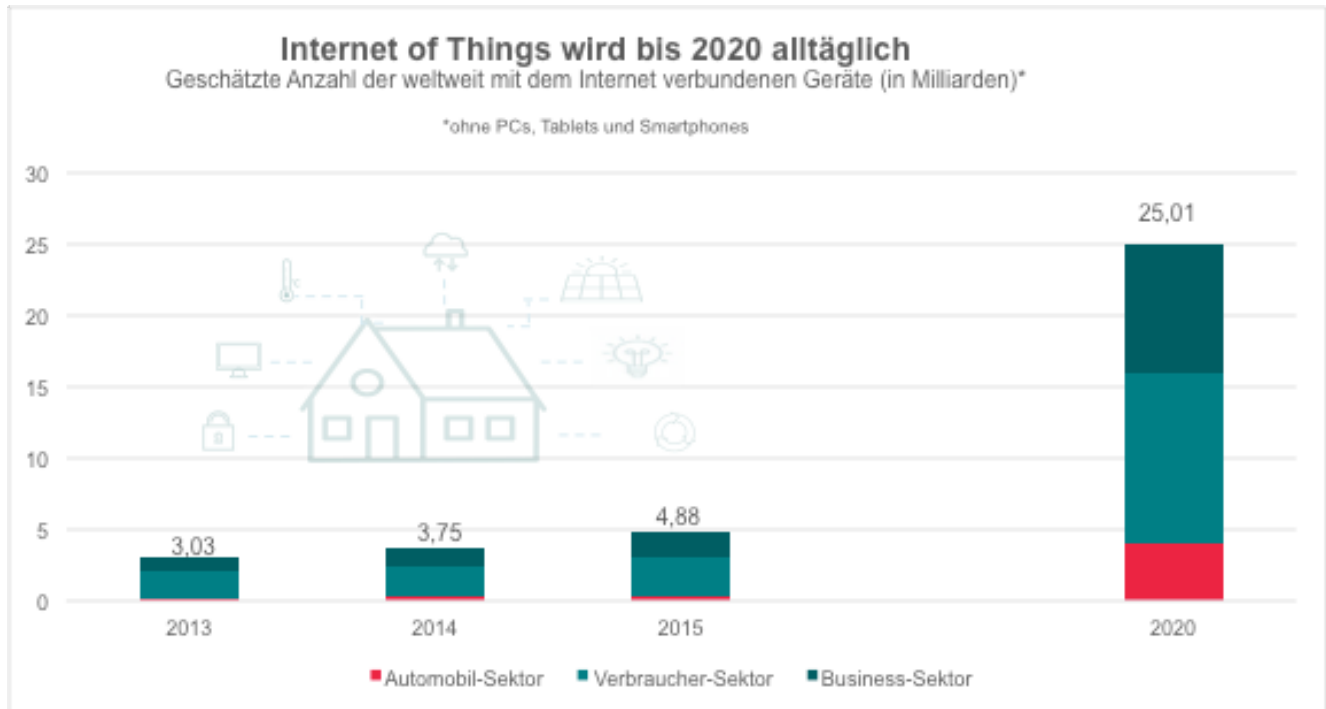


Abbildung 2: Wachstum des Internet of Things. Quelle: Eigene Darstellung nach Statista (2014).

Die Digitale Transformation selbst ist wiederum zusammengesetzt aus einer Fülle einzelner technologischer Ansätze, die einander zum Teil ergänzen und aufeinander aufbauen. Im Folgenden sind Technologien kurz porträtiert, die als zentrale Anwendungen in der Digitalen Transformation gelten können:

Tabelle 1: Zentrale Technologien der Digitalen Transformation. Quelle: Eigene Darstellung

Robotik

Roboter sind technische Systeme, die mit der physischen Welt interagieren, indem Sie Objekte manipulieren. Um Informationen über ihre Umwelt zu erhalten, sind sie mit Sensoren ausgestattet. Viele routinemäßige manuelle Aufgaben, die von Menschen durchgeführt wurden, können inzwischen von Robotern ausgeführt werden (WBGU 2019, S. 86). Außerdem finden Roboter in Bereichen Verwendung, in denen der Einsatz von Menschen riskant oder teuer wäre (Murphy et al. 2008).

Sensorik

Zur Erfassung von physikalischen Größen in digitalen Systemen verwendet man Sensoren. Sie sind grundlegend für die Abbildung der Außenwelt in einem digitalen System. Die Miniaturisierung sowie die stetig sinkenden Produktionskosten erlauben den Einsatz von immer mehr Sensoren in alltäglichen Anwendungen wie Mobiltelefonen, Autos oder Sportgeräten (Statista o. J.).

Machine-to-Machine (M2M)

Die Kommunikation von Maschinen untereinander wird als Machine-to-Machine Kommunikation bezeichnet. Maschinen können darauf aufbauend interagieren und ihre Handlungen abstimmen (Othman 2018). Da kein zentraler Server nötig ist, spricht man von dezentraler Kommunikation. M2M-Kommunikation ist ein wichtiger Schritt hin zur weiterführenden Autonomie von digitalen Anwendungen. Ein aktuelles Beispiel ist die Übermittlung von Ort und Route zwischen autonom fahrenden Fahrzeugen, so können Kollisionen vermieden werden (Glanz 2013).

Edge Computing

Wenn Berechnungen direkt am Entstehungsort der Daten, also meist am Sensor, verarbeitet werden, spricht man von Edge Computing. Statt von einem zentralen Computer wird die Rechenleistung von dedizierten, spezialisierten Mikrochips erbracht. Positive Aspekte sind hierbei die kurzen Latenzzeiten und geringen Bandbreitenanforderungen (Cao et al. 2018). Die hierfür vorgehaltene Rechenleistung steht allerdings normalerweise nicht für andere Teile des Systems zur Verfügung.

Internet of Things (IoT)

Die Einbindung vieler Sensoren, Aktuatoren in ein großes Netzwerk oder ihre Anbindung an das Internet bezeichnet man als Internet of Things (IOT). Dieses Phänomen entsteht vor allem aus der Masse an produzierten Sensoren für verschiedenste Anwendungen und deren Anbindung an Netzwerke. Mit den großen im IOT anfallenden Datenmengen wird erwartet, dass sich mit Hilfe von automatisierter Datenanalyse Trends ableiten lassen und Ereignisse frühzeitig vorhergesagt werden können (Müller 2016).

Data Analytics

Unter Data Analytics versteht man die Aufbereitung, Verarbeitung und Visualisierung von Daten. Um einen Mehrwert aus den digitalen Daten zu ziehen und Entscheidung auf Basis von Informationen fällen zu können, ist es entscheidend, die Masse an verfügbaren Informationen aufzubereiten und zu analysieren. Dafür stehen verschiedenste Methoden und Programme zur Verfügung (Irizarry 2019).

Künstliche Intelligenz/ Machine Learning

Künstliche Intelligenz (KI, engl. AI) bezeichnet das Erbringen von Intelligenzleistung durch digitale Systeme. Der Begriff wird oft synonym mit Machine Learning verwendet. Machine Learning hat in den letzten Jahren große Fortschritte durch die Anwendung neuronaler Netzwerke gemacht, was Anwendungen wie Sprach- oder Bilderkennung ermöglicht. Auch wenn diese Systeme Aufgaben erfüllen, die Intelligenz benötigen, sind sie auf spezielle Gebiete begrenzt und nicht abstrahierbar und damit nicht menschenähnlich. Für menschenähnliche KI spricht man von Artificial General Intelligence (AGI) (WBGU 2019, S. 75).

Kryptographie/ Authentifizierung

Verschlüsselung sowie Identifizierung und Authentifizierung sind zentral für die Sicherheit digitaler Systeme. Hierfür stehen eine große Auswahl an kryptographischen Verfahren zur Verfügung. Die Sicherheit kann allerdings

nur bei korrekter Implementierung und Anwendung gewährleistet werden, was selten der Fall ist (WBGU 2019, S. 80).

Distributed Ledger Technology (Blockchain)

Der Kern der Blockchain-Technologie besteht aus einem sogenannten „Distributed Ledger“. Hier werden Informationen, z. B. über Transaktionen, nicht wie üblich in einer zentralen Datenbank gespeichert, sondern (asymmetrisch verschlüsselt) an eine Blockchain angehängt, die jedem User zur Verfügung steht. Jede weitere gespeicherte Transaktion verifiziert über eine Prüfsumme alle Vorherigen. Eine bestehende Blockchain unbemerkt zu verändern ist damit fast nicht möglich, denn einschränkend ist zu sagen, dass mit entsprechend hoher Beteiligung am System und adäquater Rechenleistung ein Distributed Ledger durchaus manipuliert werden kann (WBGU 2019, S. 89).

Social Media

Kanäle, Plattformen und Anwendungen, die der Kommunikation im Internet dienen, werden als Social Media bezeichnet. Im Gegensatz zu normalen Medien wird der Inhalt hier von den Benutzern selbst generiert. Durch die große Benutzerzahl hat die Information hier eine potentiell hohe Reichweite und wird deswegen nicht nur zur privaten Kommunikation, sondern auch von Unternehmen oder anderen Organisationen verwendet, um Informationen oder Meinungen zu verbreiten (Böker 2013, S. 9).

E-Commerce

Der Online-Handel mit Produkten und Dienstleistungen sowie die dazugehörigen elektronischen Transaktionen werden als E-Commerce bezeichnet. Die digitalen Möglichkeiten gewähren eine hohe Markttransparenz, besonders bei der Verwendung von marktbeherrschenden Plattformen. Das forciert den Wettbewerb der Anbieter, gleichzeitig wird ein Marktzugang außerhalb der Plattform erschwert. Die Ortsungebundenheit des Einkaufsvorgangs ermöglicht aber auch Nischenanbietern den Zugang zu einer breiten Käuferschaft (WBGU 2019).

Augmented Reality und Virtual Reality

Virtual Reality (VR) bezeichnet eine komplett virtuelle, simulierte Umgebung, z. B. zu Trainings- oder Unterhaltungszwecken. Augmented Reality (AR) überlagert digitale Eindrücke wie z. B. Bilder oder Geräusche mit der realen Welt. AR wird z. B. als Head-Up Display zur Routenfindung verwendet oder um ergänzende Informationen zu realen Objekten darzustellen. Die Anwendungen reichen von relativ einfachen Fällen wie der Live-Text-Übersetzung bis hin zu Spezialanwendungen in Medizin, Militär und Industrie (Dörner 2019).

Quantum Computing

Quantum Computing nutzt die Möglichkeit der Darstellung von Information mit Qbits. In Analogie zu normalen Bits werden Qbits als Quantensysteme mit zwei messbaren Zuständen realisiert. Durch die Verschränkung mehrerer Qbits lassen sich spezielle Probleme schnell berechnen, die für konventionelle digitale Systeme nur unter immensem Zeitaufwand zu berechnen sind (Homeister 2018). Die Technologie des Quantum Computing befindet sich zurzeit noch im Stadium früher Erprobung.

Digital Twins und Cyber Physical Systems

Als "Digital Twin" wird die digitale Repräsentation eines realen Gegenstandes mit allen für die Anwendung notwendigen Informationen bezeichnet. Veränderungen am realen Gegenstand werden auch im Digital Twin abgebildet. Cyber Physical Systems (CPS) beschreiben dagegen ein vollständiges, real-vernetztes System, die Interaktion zwischen den Komponenten, und bietet auch die Möglichkeit Einfluss auf die Komponenten zu nehmen. CPS dienen z. B. dem Monitoring oder der Prozesssteuerung und sind eine grundlegende Technologie für die als Industrie 4.0 bezeichnete Digitalisierung der Produktion (Tao 2019).

Die vorhergehenden Ausführungen zeigen schlaglichtartig die große Bandbreite und Wirkmächtigkeit der Digitalen Transformation auf. Sie ist aufgrund ihrer Reichweite, Geschwindigkeit und der damit verbundenen Auswirkungen sowie Potentiale - positiv wie negativ - äußerst relevant für eine nachhaltige Entwicklung (siehe ausführlich z. B. WBGU 2019 sowie Umweltbundesamt 2019). Dieser Zusammenhang wird im folgenden Abschnitt näher dargestellt.

2.2 Digitale Transformation und nachhaltige Entwicklung

Die Definition und das Verständnis des Nachhaltigkeitsbegriffs wurde geprägt durch die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung ("Brundtland-Kommission"), welche den Begriff wie folgt bestimmte:

„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“

Zwei Schlüsselbegriffe sind wichtig:

- Der Begriff „Bedürfnisse“, insbesondere der Grundbedürfnisse der Ärmsten der Welt, die die überwiegende Priorität haben sollten;
- der Gedanke von Beschränkungen, die der Stand der Technologie und sozialen Organisation auf die Fähigkeit der Umwelt ausübt, „gegenwärtige und zukünftige Bedürfnisse zu befriedigen.“ (World Commission on Environment and Development 1987).

Dieser Gedanke wurde im weiteren Verlauf durch die besondere Herausstellung der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziale weiter präzisiert, welche in ihrem Zu-

sammen- und Aufeinanderwirken in Gegenwart und Zukunft die relevanten Felder der nachhaltigen Entwicklung bilden. Er wurde auch in der aktuellen Nachhaltigkeitsstrategie des Landes NRW aufgegriffen und dem dort verwendeten Nachhaltigkeitsverständnis zu Grunde gelegt: „Unser Nachhaltigkeitsverständnis beinhaltet selbstverständlich die Beachtung der Grenzen der Regenerationsfähigkeit des Planeten (planetarische Grenzen), geht aber auch davon aus, dass nur eine wirtschaftliche und soziale Entwicklungsperspektive die Sicherung der ökologischen Nachhaltigkeit ermöglichen kann.“ (Landesregierung NRW 2016, S. 7).

Bereits die Definition der Brundtland-Kommission hebt die Bedeutung von Technologien für die nachhaltige Entwicklung hervor. Diese Bedeutung ist aber als Dualität zu begreifen und muss so auch auf die Digitale Transformation bezogen werden. Digitale Technologien sind sowohl in der Lage Nachhaltigkeit zu ermöglichen und zu erschließen, können aber ebenso eine massive Bedrohung für die nachhaltige Entwicklung in mehreren Dimensionen darstellen (WBGU 2019; Ramesohl/Berg 2019).

Chancen ergeben sich unter anderem durch die Möglichkeit, durch IoT und Sensorik Daten in nie zuvor gekannter Art und Menge zu erheben und mit Hilfe von Data Analytics und Künstlicher Intelligenz aufeinander zu beziehen und analysieren. Zusammenhänge in komplexen Entwicklungen lassen sich auf diese Weise erkennen und besser nachvollziehen, nachhaltige Entwicklung wird mess- und steuerbar. Hierdurch lassen sich Lernprozesse anschieben, die im Folgenden die weitere Entwicklung effektiver gestalten lassen. Digitale Technologien können zudem dazu dienen, Produktions- und Austauschsysteme effizienter zu gestalten und nachhaltige Produktionssysteme zum Teil erst zu ermöglichen (Umweltbundesamt 2019). Dies wird detailliert in den Beschreibungen der Transformationsarenen “Kreislaufwirtschaft” und “Dezentrale Energiesysteme” in Kapitel 3 dargestellt.

Risiken resultieren u. a. aus dem Ressourcen- und Energiebedarf der Digitalen Transformation selbst und zwar sowohl für die Erzeugung digitaler Technologien und Infrastrukturen als auch für deren Betrieb (Vgl. bspw. Hintemann/Hinterholzer 2018; Richard et al. 2017; Marscheider-Weidemann 2016) wobei die Einschätzung des Endenergieverbrauchs nicht immer eindeutig ausfällt (Deutscher Bundestag 2017), sondern in der Bewertung stark von den Grenzen und Annahmen der jeweiligen Untersuchung abhängt. So bestehen bspw. alarmierende Meldungen zum Stromverbrauch einzelner Technologien wie der Cryptocurrency Bitcoin, siehe

- <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/digital-bezahlen/bitcoin-stromverbrauch-bei-herstellung-enorm-hoch-15876893.html>
- <https://www.cbeci.org> eher optimistische Betrachtungen für IKT gegenüber
- <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/133/1813304.pdf>

Ein bedeutendes Risiko können zudem Rebound-Effekte darstellen, in deren Folge Effizienzgewinne durch Überkompensation konterkariert werden (Näheres siehe Ausführungen zur Transformationsarena digitale Kreislaufwirtschaft in Kapitel 3.1 sowie Santarius 2012). Ein solcher Effekt kann zum Beispiel durch stark erhöhten Energieverbrauch oder massiv ausgeweitete Ressourcennutzung durch digitale Technologien entstehen.

3 Transformationsarenen nachhaltiger Digitaler Transformation: "Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft" und "Dezentrale Erneuerbare Energiesysteme"

Um die Wechselwirkung zwischen Digitaler Transformation und Nachhaltigkeit greifbar zu machen, werden im Folgenden zwei zentrale Transformationsarenen der "Großen Transformation" zu einer nachhaltigen Entwicklung (WBGU 2011; Schneidewind 2018) beschrieben und in ihrer Beziehung zur Digitalen Transformation ausgewertet. Bei den hierzu herangezogenen Arenen handelt es sich um die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ("Transformationsarena Ressourcenwende") und erneuerbare Energiesysteme ("Transformationsarena Energiewende"). Beide Arenen befinden sich in der Entstehungsphase mit unterschiedlichem Fortschritt. Es wird gezeigt, dass beide Arenen zu einer erfolgreichen Umsetzung jeweils auf die Nutzung digitaler Anwendungen angewiesen sind.

Zur Analyse der Arenen werden diese skizziert und ihr potenzieller Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung beschrieben. Sodann wird aufgezeigt, an welchen Ansatzpunkten und zu welchem Zweck digitale Anwendungen genutzt werden können, um die Ziele der jeweiligen Arenen zu ermöglichen. Aufgrund der Ambivalenz der Beziehung von Nachhaltigkeit und Digitaler Transformation werden auch Risiken dargestellt, die sich ergeben können oder jetzt schon vorhanden sind.

3.1 Transformationsarena Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - von der linearen Ökonomie zu ressourceneffizienten Kreisläufen durch digitale Anwendungen

3.1.1 Beschreibung der Transformationsarena

Der Begriff Kreislaufwirtschaft folgt in der Bundesrepublik Deutschland derzeit zwei unterschiedlichen Bedeutungen. Ein engeres, in Deutschland traditionell verwandtes Verständnis, bezeichnet mit diesem Begriff die Tätigkeiten und Aufgaben der Abfallwirtschaft, wie dies u. a. auch im Kreislaufwirtschaftsgesetz zum Tragen kommt.

Eine zweite Begriffsauffassung folgt einem erweiterten Verständnis. Es definiert Kreislaufwirtschaft wie folgt: „Eine Kreislaufwirtschaft ist ein industrielles System, das durch Absicht und Design restaurativ oder regenerativ ist [...]. Es ersetzt das Konzept des "End-of-Life" durch Wiederherstellung, beinhaltet die Umstellung auf die Nutzung erneuerbarer Energien, verzichtet auf den Einsatz giftiger Chemikalien, welche die Wiederverwendung beeinträchtigen und zielt auf die Beseitigung von Abfällen durch eine überlegene Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und, in diesem Zusammenhang, Geschäftsmodellen“ (Ellen MacArthur Foundation 2013, S. 7). Diese zweite Begriffsverwendung findet sich vor allem im internationalen Diskurs - siehe bspw. Ellen MacArthur Foundation (2013) und Reichel et al. (2016). Er ist u. a. Grundlage für die Kreislaufwirtschaftsstrategien der EU.

Ziel dieses Ansatzes ist die Steigerung nachhaltiger, ressourceneffizienter Praktiken in Produktion und Konsum. Der Wert von Produkten und ihrer Bestandteile soll dazu möglichst lange aufrechterhalten werden und auch Materialien sollen so oft wie möglich weitere Verwendung finden (Wilts/Berg 2017). Die Abfallwirtschaft inklusive des Konzepts der Abfallhierarchie, wie im Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgesehen, kann daher als Teil dieses erweiterten Ansatzes angesehen werden. Abbildung 3 stellt

das Konzept der Kreislaufwirtschaft graphisch dar. Deutlich wird, dass Kreislaufwirtschaft in diesem Verständnis den gesamten Stoff- und Produktlebenszyklus umfasst und gleichzeitig über eine Reihe verschiedener Instrumente wie Reparatur, Wiederaufbereitung und Wiederverwertung verfügt. Es ist dieses zweite Verständnis, welches für die vorliegende Kurzstudie verwendet wird. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Kreislaufführung in diesem Ansatz kein Allheilmittel darstellt. Die Einschränkung "so oft wie möglich" gibt zum Ausdruck, dass sowohl Produkte als auch Materialien zuweilen nicht wiederverwertbar sind oder ihre Wiederverwertung mehr ökologischen Schaden anrichtet, als durch diese gewonnen würde. Letzteres ist immer dann der Fall, wenn die Energie- und/ oder Ressourcenaufwendungen zur Wiederverwendung die Äquivalenzwerte der wiedergewonnenen Produkte oder Materialien übersteigt. Vor diesem Hintergrund sind Primärressourcen und die Entsorgung auch weiterhin Teil des Wirtschaftsgeschehens, sollten jedoch jeweils minimiert werden.

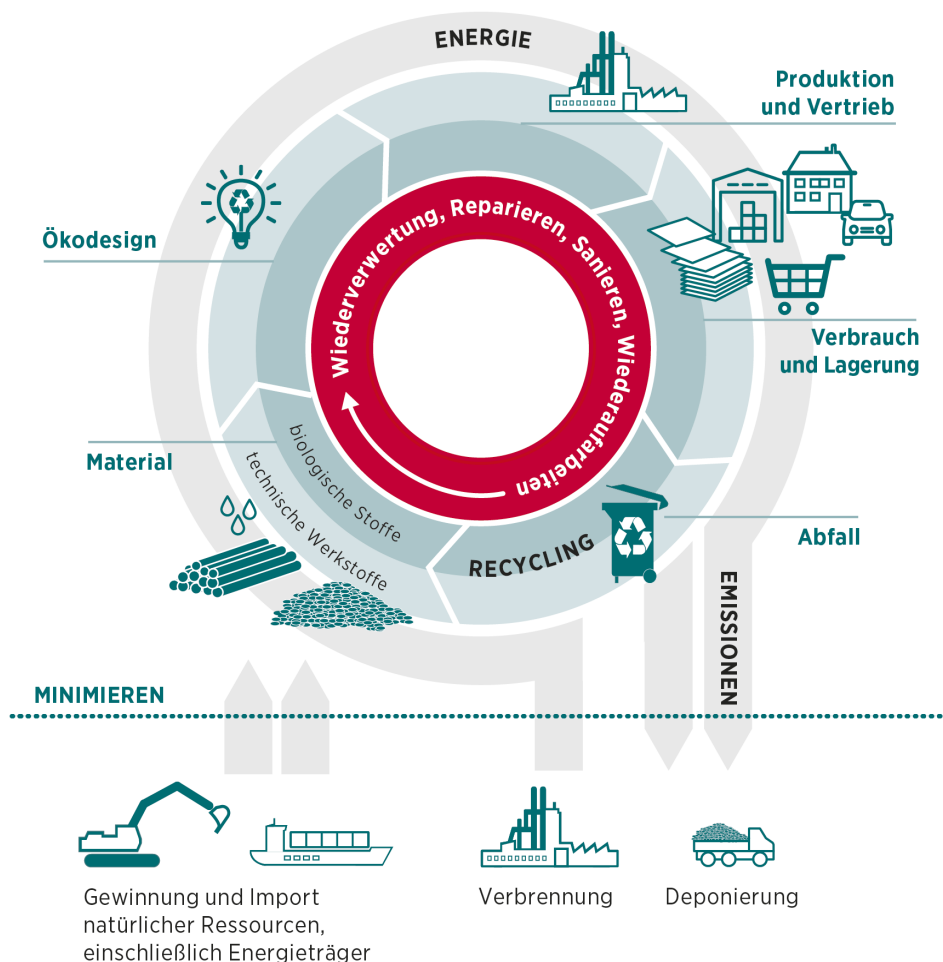


Abbildung 3: Vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft für Material und Energie. Quelle: Wilts/Berg (2017, S. 2) auf Basis von Reichel et al. (2016, S. 10).

3.1.2 Beitrag der Arena zu einer nachhaltigen Entwicklung

Aufgrund der geschilderten Ansprüche wird von ressourceneffizienter Kreislaufwirtschaft eine breite Palette positiver Wirkungen erwartet. So werden auch in den SDGs Aspekte von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Zielen be-

rücksichtigt. Tabelle 2 gibt dies wieder. Es wird deutlich, dass diese Konzepte einen breiten Zielkorridor abdecken, der letztlich ökonomische, ökologische und auch soziale Zielsetzungen betrifft.

Tabelle 2: Verbindung ausgewählter SDG zur Kreislaufwirtschaft. Quelle: Bahn-Walkowiak/Wilts (in Vorbereitung) auf Basis von Destatis (2018).

SDG	Zieldefinition	Indikator 1	Indikator 2
Ziel 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum	Ziel 8.4: Verbesserung der Ressourceneffizienz und Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung bis 2030	8.4.1: Materieller Fußabdruck, Materielle Fußabdruck pro Kopf und BIP	8.4.2: Inländischer Materialverbrauch, inländischer Materialverbrauch pro Kopf und pro BIP
Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion	Ziel 12.2: Nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen bis 2030	12.2.1: Materieller Fußabdruck pro Kopf / BIP	12.2.2: DMC (Inlandsmaterialverbrauch)
Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion	Ziel 12.3: Halbierung der globalen Lebensmittelabfälle in Handel und Konsum bis 2030	12.3.1: Globaler Index für den Verlust von Nahrungsmitteln	
Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion	Ziel 12.4: Umweltgerechtes Management von Chemikalien und Abfällen und Minimierung der Umweltwirkungen bis 2020	12.4.2: Gefährliche Abfälle pro Kopf und Anteil, nach Art der Behandlung	
Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion	Ziel 12.5: Substanzielle Verringerung des Abfallaufkommens durch Vermeidung, Wiederverwertung und Wiederverwendung bis 2030	12.5.1: Nationale Recyclingquote	

Das Leitbild einer Kreislaufwirtschaft in der hier verwendeten Definition erhält derzeit starke Aufmerksamkeit und Unterstützung von vielen Seiten (u. a. verschiedene Organe der Vereinten Nationen, der EU, dem World Economic Forum) und wird zum Teil sehr enthusiastisch behandelt.

Wilts (2016) fasst dazu vier zentrale positive Dimensionen und Perspektiven der Kreislaufwirtschaft für eine nachhaltige Entwicklung zusammen:

1 | Vorteile der Ressourcenverfügbarkeit

Die Wieder- und Weiterverwendung von Ressourcen verbreitert die Ressourcenbasis. Sie führt dazu, dass weniger Primärressourcen gefördert werden müssen. Dies

senkt Importabhängigkeiten und Risiken durch geopolitische Unwägbarkeiten und kann die Anfälligkeit der Industrie für Schwankungen auf den Rohstoffmärkten reduzieren.

2 | Ökologische Vorteile

Praktiken wie Reparatur, Wiederaufbereitung etc. führen im Verhältnis zur Neufertigung und der Verwendung von Primärressourcen in der Regel zu deutlichen Material- und Energieeinsparungen. So erfordert die Herstellung von Kunststoffrecycling aus den gängigsten Kunststoffen einen vier- bis sechsmal geringeren Ausstoß von CO₂ im Verhältnis zu Primärmaterial. Auch die Verringerung von Abfallmengen durch diese Instrumente aber auch durch Abfallvermeidung führt zu deutlichen Einsparungen.

3 | Ökonomische Vorteile

Hier werden u. a. beträchtliche Möglichkeiten zur Einsparung von Materialkosten für Hersteller durch Lebensdauerverlängerung angeführt. Dies verbindet sich mit einem hohen Innovationspotential u. a. bedingt durch neue Geschäftsmodelle und Technologien, da die gängigen Modelle der linearen Ökonomie in einem Kreislaufwirtschaftsszenario durch neue Ansätze ersetzt werden.

4 | Soziale Vorteile

Soziale Vorteile entstehen nach Wilts (2016) zum einen durch eine Vielzahl von sozialen Innovationen u. a. in den Bereichen Abfallvermeidung, Sharing Economy und Recycling, die vor allem mit Verhaltensänderungen der Verbraucherinnen und Verbraucher verbunden seien. Zum anderen führt Wilts (2016) eine beträchtliche Zahl möglicher neuer Arbeitsplätze an, die durch die Umsetzung und Einführung der Kreislaufwirtschaft entstehen könnten.

Die statistische Basis ist hingegen noch unzureichend, so dass nach Auffassung der Autoren exakt quantifizierte Nutzenbeiträge und ökonomischen Chancen, welche für das Konzept genannt werden, zurzeit noch vorsichtig betrachtet werden müssen. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.

3.1.3 Ansatzpunkte der Digitalen Transformation zum Realisierungserfolg

Die Idee der Kreislaufführung sowohl von Produkten als auch von Materialien ist in hohem Maße auf eine zuverlässige Informationsbereitstellung angewiesen (OECD 2005; Wilts/Berg 2017). So ist bspw. das Fehlen von Informationen hinsichtlich der Qualität, verfügbarer Mengen und zukünftiger Versorgungsmöglichkeiten mit Produkten ein wesentliches Hindernis zu einem qualitativ hochwertigen Kunststoffrecycling (vgl. EUPC 2017).

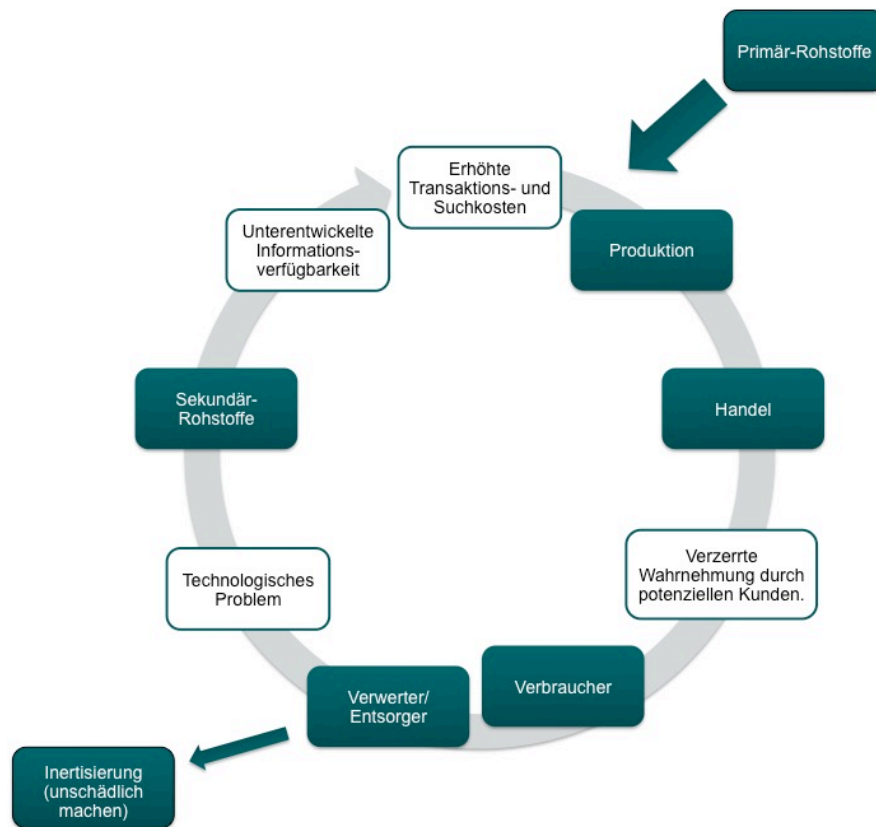


Abbildung 4: Barrieren in der Kreislaufwirtschaft. Quelle: Eigene Darstellung.

Ebenso fehlen in vielen Produkten präzise Hinweise zu den in ihnen verbauten Teilen und Materialien. Abbildung 4 zeigt diese Problematik auf: Das Fehlen von Informationen zu Produkt- oder Materialqualität und -verfügbarkeit erhöht Such- und Transaktionskosten, da geeignete Angebote gefunden und dann sorgfältig geprüft werden müssen. Die bekannt hohen Schwierigkeiten führen zu Vorbehalten auf Seiten potentieller Kunden, die in der Folge Primärmaterial bevorzugen. Hinzu kommen technologische Probleme in Form mangelnder Reparierbarkeit oder fehlender Recyclingfähigkeit, welche die Kreislaufführung zusätzlich erschweren (Wilts/Berg 2017; OECD 2006).

Geeignete, langfristige Instandsetzungs- und Wiederverwertungssysteme sind jedoch auf sehr präzise Informationen zu bspw. Gebrauchsverhalten, Verschleiß sowie Sorten- und Farbreinheit angewiesen. Das Erheben, Auswerten, Mitführen und Weitergeben solcher Informationen, ebenso wie die Analyse von Verbrauchs- und Nutzungsmustern zur Vorhersage sind wichtige Ansatzpunkte für die Digitale Transformation in der Kreislaufwirtschaft (Wilts/Berg 2017). Tabelle 3 zeigt Anwendungsmöglichkeiten digitaler Technologien für einzelne Ansätze der Kreislaufwirtschaft.

Tabelle 3: Nutzung digitaler Technologien zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft. Quelle: Eigene Darstellung.

Ansätze der Kreislaufwirtschaft	Wie Kreislaufwirtschaft durch digitale Anwendungen unterstützt werden kann (Beispiele)	Digitale Technologien zur Unterstützung (Auswahl)
Reuse	Signalling zu Qualitäten und Verfügbarkeiten, Monitoring, Anbahnung von Transaktionen, Bewertung von Produkteigenschaften und -zuständen	Internet of Things, Cyber Physical Systems, Social Media, E-Commerce, Data Platforms, Block Chain
Redistribute	Signalling, Monitoring, Sensoring, Digitale Marktplätze/ Austauschplattformen, Geschäftsanbahnung, Sammlung, Bewertung	Social Media, Data Platforms, Artificial Intelligence, Big Data, Block Chains, Industry 4.0, IoT, E-Commerce
Remanufacturing	Überwachung von Produktnutzung und -eigenschaften, Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten und Materialverschleiß, Durchführung bzw. Assistenz bei komplexen Wiederinstandsetzungsvorgängen, Weiterverkauf	Plattformökonomie, Künstliche Intelligenz, IoT, Industry 4.0, E-Commerce, Big Data, Advanced Robotics
Refurbishment	Predictive Maintenance, Überwachung von Produktnutzung und -eigenschaften, Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten und Materialverschleiß, Weiterverkauf	Plattformökonomie, Künstliche Intelligenz, IoT, Industry 4.0, E-Commerce, Big Data, Advanced Robotics
Recycling	Überwachung und Signalling von Material- und insbesondere Rezyklatqualitäten sowie -verfügbarkeiten, Prozessüberwachung, Anbahnung von Transaktionen, Bewertung von Materialeigenschaften und -zuständen, Sortierung	Sensorik, Advanced Robotics, IoT, Industrie 4.0, Plattformökonomie, Künstliche Intelligenz, Data Analytics, Block Chain
Sharing	Signalisierung und Organisation von Verfügbarkeit, Überwachung der bestimmungsgemäßen Nutzung, internetgestützte Communities, Organisation und Abwicklung von Transaktionen, Bewertung des Zustandes	Sensorik, Social Media, Plattformökonomie, Block Chain, E-Commerce
Lebensdauerverlängerung	Predictive Maintenance, Vorberechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, computerunterstütztes Design	Künstliche Intelligenz, Data Analytics, IoT, Industrie 4.0
Nutzer- und Verbraucheraufklärung	Apps zur Produktorientierung bzgl. Inhaltsstoffen und Abfalltrennung, Kundenportale und Anwendungen in der Abfallwirtschaft zum Entsorgungsverhalten	Kundenportale, interaktive Apps, Augmented Reality, Virtual Reality
Abfallwirtschaft	Tourenoptimierung, Wertstoff-/Abfallsortierung, Nachweissysteme, digitale Wertstoffhöfe	Telematik, Künstliche Intelligenz, Robotik, Sensorik/IoT

3.1.4 Risiken der Digitalen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung in der Transformationsarena

Gerade im Bereich der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist die Digitale Transformation auch mit Risiken verbunden. Hierbei haben sich in den letzten Jahren drei Bereiche als besonders relevant herauskristallisiert: Rebound-Effekte, steigende Rohstoff- und Energieverbräuche durch digitale Technologien sowie Elektroabfälle und die Induzierung von Sorglosigkeit auf Seiten der Verbrauchenden (Unternehmen und Privatpersonen).

Hinsichtlich der Rebound-Effekte (Santarius 2012) besteht die Befürchtung, dass das Einspeisen zusätzlicher Ressourcen in die Märkte bspw. durch Recycling, nicht nur eine Verdrängung bzw. Substitution von Primärressourcen bewirkt, sondern durch eine Verbreiterung der Ressourcenbasis zu weiterer, nicht-nachhaltiger Marktausdehnung führt. Die zuvor zum Einsatz gekommenen Primärressourcen werden dann weiterhin gefördert und umgewandelt, ggf. erfolgt sogar eine Umleitung der zusätzlichen Ressourcen in ineffizientere Anwendungen, da eine breitere Ressourcenbasis mit sinkenden Preisen verbunden sein dürfte. Das benannte Phänomen wird auch als "Jevons-Effekt" bezeichnet, da es erstmals von Thomas Jevons (1865) für Kohle beobachtet und nachgewiesen wurde. Inzwischen gilt es als eine grundlegende Ursache von Rebound-Effekten (Santarius 2012). Die Digitale Transformation ist hier nicht unmittelbarer Verursacher des adversen Effekts. Als "Technologiebereitstellerin" im obigen Sinne, ermöglicht sie jedoch dessen Auftreten, u. a. durch das Herstellen von Markttransparenz und den Handel über digitale Plattformen.

Die Digitale Transformation hat zum Teil zu einer erheblichen Steigerung direkter Ressourcen- und Energieverbräuche geführt. Gerade bei einer durch Digitale Transformation realisierten Kreislaufwirtschaft können diese weiter steigen. Dies bezieht sich zum einen auf Verbräuche für die Herstellung von Hardware und Infrastruktur (funk- bzw. kabelgestützte Netze, Datenzentren usw.) in Form von Metallen, Kunststoffen und seltenen Erden und zum anderen auf die zum Teil immensen Energieverbräuche, welche digitale Technologien inzwischen aufweisen (Reger/Kosch 2017). Eine erwartbare direkte Folge der Digitalen Transformation ist die Zunahme von Elektroabfällen, wobei Abbildung 5 aufzeigt, dass die in Verkehr gebrachten Mengen von Elektrogeräten seit 2013 kontinuierlich steigt, während die Menge gesammelter Geräte weniger stark zunimmt. Da nicht anzunehmen ist, dass sich Nutzungsdauern für Elektrogeräte verlängert haben, weist dies darauf hin, dass größere Mengen von Elektroaltgeräten noch Teil des anthropogenen Lagers sein könnten, also in Haushalten und Unternehmen gelagert sind. Hinzu kommt, dass viele in Elektrogeräten verbaute Ressourcen nicht oder nur schwierig wiedergewinnbar sind, da die pro Gerät verbauten Mengen häufig sehr klein sind und sie sehr fest mit anderen Materialien verbunden werden (Überschaar 2017).

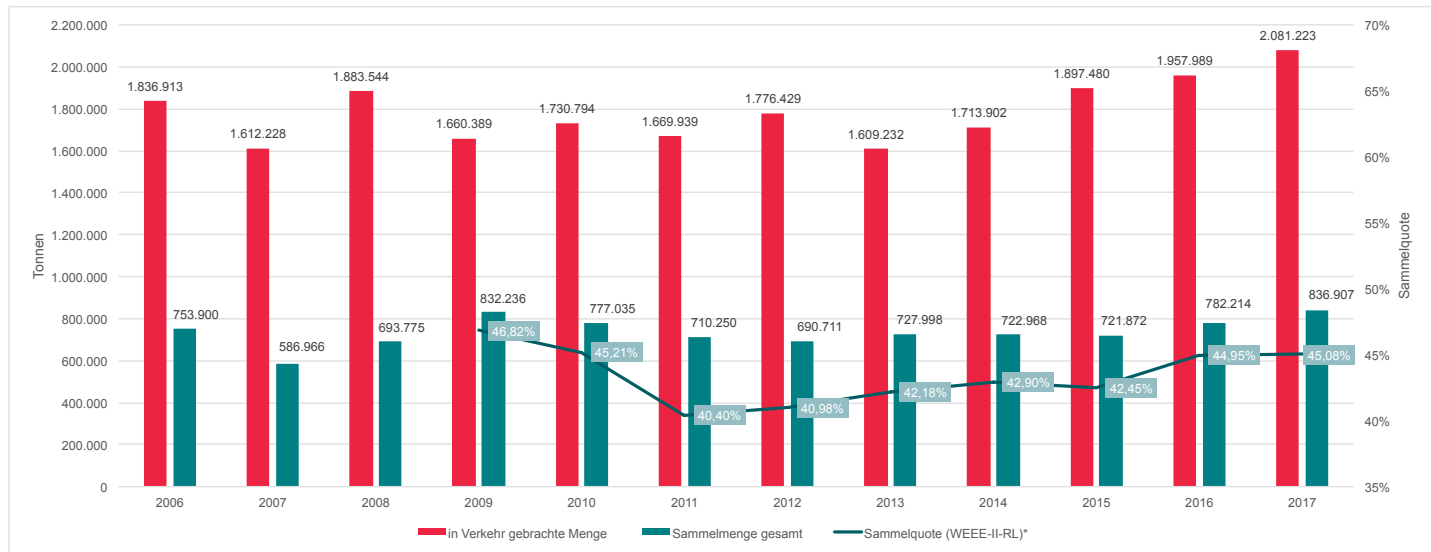


Abbildung 5: In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten bei Elektroaltgeräten. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (o. J.).

Ein weiteres Risiko einer sich durch Digitale Transformation durchsetzenden Kreislaufwirtschaft ist die Gefahr, dass bei den Verbrauchenden der Eindruck entsteht, Abfallvermeidung und Minderung des Ressourcenverbrauchs könnte außer Acht gelassen werden, da die Ressourcenfrage gelöst sei bzw. die regelmäßige Wiederverwertung von Produkten und Materialien unmittelbar die Nachhaltigkeit des Ge- und Verbrauchs impliziert. Dies könnte zu höheren Verbräuchen und damit zu weiteren Formen von Rebound-Effekten führen.

3.1.5 Hemmnisse der digitalen Erschließung

Das Wuppertal Institut erforscht seit dem Jahr 2017 intensiv Chancen und Möglichkeiten, Kreislaufwirtschaft durch Instrumente der Digitalen Transformation zu ermöglichen. Das Vorgehen ist dabei problemorientiert. Ziel ist es, digitale Lösungen für vorhandene Barrieren (s. o.) zu identifizieren und nicht Digitale Transformation als Selbstzweck zu betrachten. In diesem Zuge haben sich verschiedene Hemmnisse der Umsetzung herauskristallisiert, die sich den drei Bereichen Unternehmen, Technologie und Hemmnisse, welche aktuell durch Politik/Gesetzgebung hervorgerufen werden, zuordnen lassen. Diese drei Bereiche werden im Folgenden als Übersicht pointiert.

Ein **Haupthemmnis bei Unternehmen** sind unklare Renditeerwartungen und mithin die Angst vor Fehlinvestitionen bei einem Einstieg in digitale Anwendungen und Kreislaufwirtschaftskonzepte. Schnelle Innovationszyklen und neue Geschäftsmodelle sorgen diesbezüglich für geringe Transparenz gerade bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Zudem bedürfen viele dieser Modelle einer kritischen Masse an Teilnehmenden. Digitale Handelsplattformen für Rezyklate können bspw. nur unter Beteiligung einer ausreichend großen Menge von Anbietern und Käufern aussichtsreich operieren (Berg/Wilts 2019).

Ein **technologisches Hemmnis** bildet die schnelle und zuweilen unklare Technologieentwicklung der Digitalen Transformation. Viele digitale Technologien unterliegen einem Hype-Cycle (Fenn 1995). Es ist bei ihrer Einführung trotz und gerade wegen starker Aufmerksamkeit häufig schwierig einzuschätzen, welche Technologien tatsächlich einen zukünftigen Nutzen stiften werden und bei welchen es sich um langfristig wenig hilfreiche Ansätze handelt. Unternehmen zögern daher häufig bei der Anschaffung und warten, bis eine Technologie auf breiter Basis diffundiert. Dies verzögert Investitionszyklen. Zwar sind sich Unternehmen, auch KMU, der Notwendigkeit zu einem vertieften Einstieg in die Digitale Transformation bewusst und auch für Ansätze der Kreislaufwirtschaft besteht eine große Offenheit. Die Vielfalt der Möglichkeiten und die Gefahr sich zu verzetteln, führt jedoch zu einem Verhalten, das als "Pilot Paralysis" beschrieben wird: Aufgrund der hohen wahrgenommenen Unsicherheit und der zahlreichen Wahlmöglichkeiten unterbleiben digitale Aktivitäten. Das Unternehmen verharrt im Status quo (Lacy/Rutqvist 2015).

Eine weitere Barriere liegt darin, dass Digitale Transformation und Kreislaufwirtschaft bisher häufig nicht zusammengedacht werden. Digitale Innovationen bspw. im Rahmen von Industrie 4.0 wurden z. B. nicht mit Berücksichtigung ihrer Potenziale zur Schließung von Informationsdefiziten zu Gunsten der Kreislaufführung entwickelt. Technologien wie Cyber Physical Systems nutzen "digitale Zwillinge" bisher nicht oder kaum zur Weiterverfolgung von Produkten und Materialien über den gesamten Lebenszyklus. Dies wäre für eine digital unterstützte Kreislaufführung jedoch sehr förderlich. Auf diese Weise könnten Informationen zu Verschleiß, erfolgten Wartungen, Möglichkeiten zur Reparatur, zur Demontage und mithin auch zur Wiederverwendung von Teilen und Materialien mitgeführt werden. Damit könnte genau jene Transparenz erreicht werden, deren Fehlen oben als ein zentrales Hindernis auf dem Weg zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft identifiziert wurde.

Hinsichtlich **politischer Hemmnisse** wird von Unternehmen häufig die Unsicherheit des politischen Prozesses beklagt. Da die Kreislaufwirtschaft aktuell hohe politische Aufmerksamkeit erfährt und zahlreiche neue Regelungen bspw. auf EU- und Bundesebene entstehen, verhalten sich viele Unternehmen hinsichtlich Investitionen in kreislaufwirtschaftliche (digitale) Instrumente aktuell zaghafte. Hier wartet man vielfach darauf, welche Regelungen Bestand haben werden bzw. noch zu erwarten sind, bevor proaktiv Maßnahmen eingeleitet werden. Langfristige, strategische Perspektiven, die den Unternehmen höhere Investitionssicherheit durch überprüfbarere, längerfristige Business Cases gewähren, werden daher häufig von Unternehmensseite eingefordert.

3.2 Transformationsarena Digitale Erneuerbare Energiesysteme – digitale Steuerung für neue Formen der Energieversorgung

Die Transformation der Energiesysteme ist eine der wichtigsten Zukunftsaufgaben des 21. Jahrhunderts – in Deutschland wie weltweit sind Politik, Gesellschaft und Wirtschaft gefordert, die Voraussetzungen für Wohlstand und nachhaltiges Wirtschaften zu schaffen. Dieser Wandel hat längst begonnen und gerade in Deutschland wurde in den vergangenen Jahren viel erreicht, insbesondere beim Umbau der Stromwirtschaft durch den Atomausstieg und den forcierten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung.

Die größten Herausforderungen sind allerdings noch nicht gemeistert. Den Weg weist das völkerrechtlich verbindliche Klimaschutzabkommen von Paris und die geschärften nationalen Minderungsziele für Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050, um die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen. Für Deutschland bedeutet dies eine Reduktion von 95 % und damit die **nahezu vollständige Dekarbonisierung von Gesellschaft und Wirtschaft bis zum Jahr 2050**. Hinzu kommen Anforderungen aus dem Ressourcenschutz, zur Luftreinhaltung oder geopolitische Risiken, die ebenfalls eine Transformation des Energiesystems nötig machen.

Der bisherige Ansatz der Energiewende reicht hierzu allerdings nicht aus – ein "weiter so wie bisher" ist keine Option. In den nächsten Jahren bis 2030 müssen die entscheidenden Weichen gestellt und insbesondere bei Gebäuden und im Verkehr eine Trendwende erreicht werden. Angesichts der Vorlaufzeiten der Planung bei Gebäuden, Anlagen und Infrastrukturen sowie der Umsetzungsdauer z. B. aufgrund limitierter Ressourcen des Handwerks kann damit nicht länger gewartet werden. Auch stößt die heutige Energiepolitik mit ihren bisherigen Strategien zum Umbau des Stromsystems an ihre Grenzen hinsichtlich der Finanzierbarkeit der erneuerbaren Energien über den Strompreis, der Geschwindigkeit beim Ausbau von Stromnetzen sowie der Akzeptanz in Bevölkerung und Wirtschaft.

Die nächste Phase der Transformation des Energiesystems muss jetzt eingeleitet werden.

Dezentrale Energiesysteme sind der Schlüssel für eine nachhaltige Energiezukunft

Die Zukunft des Energiesystems braucht sowohl zentrale als auch dezentrale Strukturen. In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, die zentralen Strukturen des Energiesystems und vor allem der Stromwirtschaft umzubauen. Große Windparks auf Land und auf See sowie die dazugehörigen Netze für den Stromtransport sind wichtige Bausteine eines nachhaltigen Energiesystems und müssen wie geplant erweitert werden.

Bis zum Jahr 2030 wird es allerdings darauf ankommen, die weitreichenden, derzeit immer noch brachliegenden Potenziale für klimaverträgliche dezentrale Energieerzeugung und Energieeffizienz zu nutzen. Die Zukunft entscheidet sich also dort, wo lokale Erzeugung aus erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf flexible Nachfrage in Privathaushalten, Gewerbe und Industrie trifft, wo hocheffiziente Gebäude- und Verkehrslösungen interaktiv ins System einbezogen sind, wo intelligent gesteuerte Netze das Potenzial von neuen Speichertechnologien nutzen können. Dieser zelluläre Ansatz muss die zentralen Komponenten eines nachhaltigen Energiesystementwurfs ergänzen.

Alle absehbaren Trends und technologischen Entwicklungen zeigen, dass die Bedeutung dezentraler Lösungen und dezentraler Systeme weiter steigen wird. Um die Klimaschutzziele bis 2050 zu erreichen, führt kein Weg an dem massiven Ausbau dezentraler Energiesysteme bis 2030 vorbei.

Dies gilt umso mehr, als dass für den kritischen Zeitraum der nächsten Dekade schlicht keine alternative Klimaschutzoption erkennbar ist, die in großem Maßstab

technisch verfügbar und von Gesellschaft, Kapitalmärkten und Investoren akzeptiert wäre.

3.2.1 Beschreibung der Transformationsarena

Dezentrale Energiesysteme zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit, Flexibilität und die Fähigkeit aus, unterschiedlichste Einzelbeiträge in Gesamtlösungen zu integrieren und lokal zu optimieren. Diese Einzelbeiträge werden durch vielfältige Akteure vom Privathaushalt über Industriebetriebe, Energiedienstleister oder Energieversorgungsunternehmen bereitgestellt, gesteuert oder genutzt. Völlig neue Aufgaben, Rollen und Transaktionen entstehen, die sich permanent weiterentwickeln und Raum für Innovationen bieten.

- Dezentrale Energiesysteme werden damit zum einen durch **neue Akteursbeziehungen** beschrieben, die sich deutlich von der klassischen Struktur der traditionellen Stromwirtschaft "Versorger-Netzbetreiber-Endkunden" unterscheidet.
- Dezentrale Energiesysteme werden weiterhin durch die **gestiegene Bedeutung der elektrischen Verteilnetze** charakterisiert. Der größte Teil der Interaktionen zwischen Stromerzeugung, Stromnutzung und Lastmanagement sowie der Systemsteuerung und Flexibilisierung zum Beispiel durch Speicher findet zwischen den Akteuren vor Ort und damit auf Ebene der Mittel- und Niederspannung statt.
- Ein weiteres infrastrukturelles Merkmal von dezentralen Energiesystemen ist die Chance zur Optimierung des Energieeinsatzes in Gebäuden durch die **Integration in lokale Wärme-/ Kältenetze**, die Gebäudegruppen, Quartiere oder größere Stadtteile verbinden.

Im dezentralen Energiesystem vollzieht sich der disruptive Wandel der Energiewirtschaft von der traditionellen Wertschöpfungskette (Value Chain) zum Wertschöpfungsnetzwerk (Value Network). Die entstehende Energiewelt des Jahres 2030 wird einen bislang ungekannten, vielfältigen Mix zeigen von Lösungen und neuen Interaktionen zwischen Technologien bzw. deren Nutzern als Marktakteure.

Die Value Networks der Zukunft werden sich aus neuen Teilnehmern, Rollen und Transaktionen entwickeln wie z. B.:

- Dezentrale Erzeugung beim Endnutzer (Prosumer)
- Intelligentes, reaktionsfähiges Lastmanagement
- Direkte Geschäfte zwischen Endkunden (sog. Peer-to-Peer Lösungen)
- Direkte Kapitalbeteiligung an Anlagen vor Ort wie z. B. bei Bürgerenergieprojekten
- Aggregatoren und Vermarkter von Erzeugung, Lasten und Flexibilität, z. B. im virtuellen Kraftwerk (VPP)
- Dienstleister als Anbieter für Lösungen zur Sicherung der Systemstabilität, z. B. für das Engpassmanagement im Energienetz
- Lokale Märkte und Handelsplattformen für Systemdienstleistungen.

Von traditionellen Wertschöpfungsketten zu dezentralen (digitalen) Wertschöpfungsnetzwerken (decentral value networks)

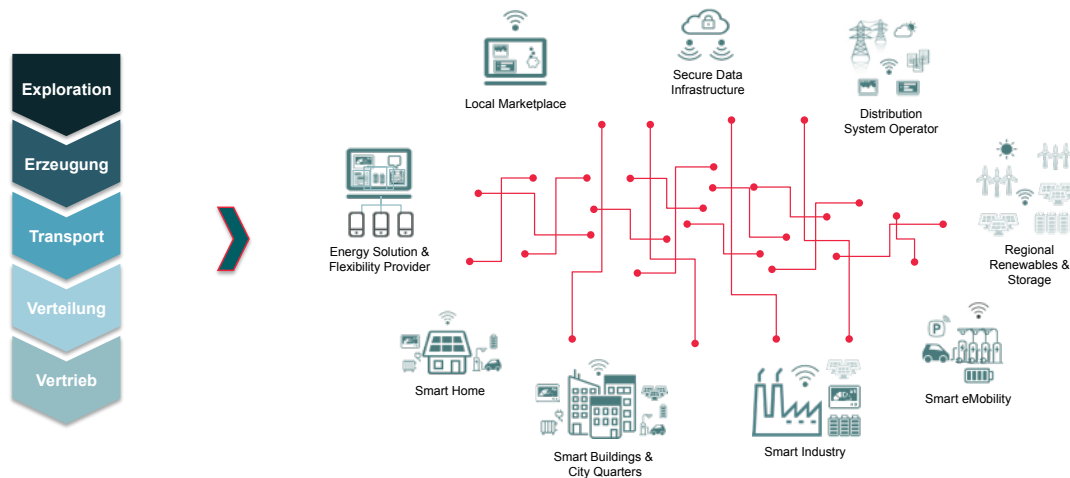


Abbildung 6: Von traditionellen zu dezentralen Wertschöpfungsketten. Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.2 Beitrag der Arena zu einer nachhaltigen Entwicklung

Der Ausbau erneuerbarer Energien treibt dezentrale Erzeugung und lokale Speicherlösungen voran

Der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist zweifelslos eine prioritäre Maßnahme zur Dekarbonisierung des Energiesystems. Um bis zum Jahr 2050 die notwendige vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien zu erreichen, muss der mittelfristig absehbare Ausbaupfad bis zum Jahr 2030 zu einer Deckung von gut der Hälfte des Strombedarfs durch erneuerbare Energien führen. Bis 2050 muss diese Produktion dann nochmals verdoppelt werden, u. a. um die neuen Einsatzfelder in der Wärmeversorgung und im Verkehr zu bedienen. Mit Ausnahme von Offshore-Windenergie werden diese Kapazitäten fast vollständig im Verteilnetz installiert. Oder anders formuliert: der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung findet in dezentralen Energiesystemen auf regionaler und lokaler Ebene statt.

Perspektivisch wird die Windenergie zu Land und auf See mit rund 65-75 % Erzeugungsanteil im Jahr 2050 den größten Beitrag leisten (dena 2018). Die Kombination von PV und Batterien spielt jedoch eine besondere Rolle für die dezentrale Erzeugung direkt beim Kunden. Wenn sich die heute schon absehbare Dynamik der Kostensenkung bei Solaranlagen und Batterien weiter beschleunigt, könnte der Beitrag zu Stromerzeugung nach 2025 noch schneller steigen als bisher angenommen.

Neue Rollen für das Verteilnetz im zukünftigen Energiesystem

Historisch wurde elektrische Energie aus zentralen, konventionellen Kraftwerken über Hochspannungstransportnetze in Verteilnetze eingespeist. Um eine hohe Betriebs- und Versorgungssicherheit zu gewährleisten wurden die Mittel- und Niederspannungsnetze radial, d. h. sternförmig aufgebaut. Mit zunehmender Anzahl dezentraler Erzeugungseinheiten und neuer Verbraucher wie Elektromobilität kann die Energieversorgung und Sicherheit in den bestehenden klassischen Netzstrukturen langfristig nicht mehr sichergestellt werden.

Aus diesem Grund sollten Verteilnetze zukünftig als regionale oder lokale Verbundnetze aufgebaut werden. Bei diesem Ansatz bilden sich zellulare Netzstrukturen, bei denen der Verteilnetzbetreiber in der Lage ist, innerhalb der Zellen die elektrische Energie flexibel zu lenken und zu steuern. Ziel ist es dabei, soweit wie möglich Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch innerhalb der Zelle zu regeln und lokale Lastspitzen im übergeordneten Transportnetz weitestgehend zu vermeiden. Der Transportnetzbetreiber kann so die überregionale Übertragung von großen Energiemengen effizienter und zuverlässiger planen. Die zukünftige Erzeugungs- und Netzstruktur entwickelt sich somit in Richtung dezentraler Systeme, in denen wesentliche Aufgaben der Systemsteuerung und -stabilität direkt vor Ort wahrgenommen werden.

Gebäudeeffizienz und Integration von Wärme- und Kältenetze

Die Senkung des Energiebedarfs zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden ist ein zentrales Handlungsfeld für jede Klimaschutzstrategie. Sowohl bei privaten Wohngebäuden wie bei Gebäuden im Gewerbe, Handel und Dienstleistungen – den sogenannten Nichtwohngebäuden – müssen sowohl die Gebäudehülle wie auch die Anlagentechnik energetisch saniert und optimiert werden.

Für dezentrale Energiesysteme ist dabei relevant, dass bei privaten Wohngebäuden unter heute absehbaren Bedingungen elektrische Heizsysteme (Wärmepumpen) bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus kontinuierlich an Bedeutung gewinnen werden. Diese zusätzliche Nachfrage mit der typischen Lastspitze im Winter wird die Verteilnetze vor neue Herausforderungen stellen und integrierte Lösungen erfordern, z. B. durch Koordination mit KWK-Anlagen oder intelligenten Steuerungen und Wärmespeichern.

Bei den Nichtwohngebäuden werden elektrische Systeme ebenfalls an Bedeutung gewinnen, wie z. B. reaktionsschnelle elektrische Flächenheizungen, die in gut sanierten Bürogebäuden ihre Vorteile ausspielen können. Für effektiven Klimaschutz sind in dieser Kategorie jedoch lokale Wärme- und Kältenetze von noch größerer Bedeutung. Sie erlauben die Optimierung der Effizienz- und Synergiepotenziale von größeren Gebäudegruppen und Verbrauchern mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen. Gleichzeitig können hier Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplungsanlagen sinnvoll eingebunden werden und einen Beitrag zur Deckung der nennenswerten Erhöhung des Stromverbrauchs in den Wintermonaten durch elektrische Heizsysteme leisten.

Dezentrale Energiesysteme werden örtliche Cluster mit Wärme-/ Kältenetzen daher vor allem in städtischen Gebieten mit verdichteter und gemischter Bebauung aufweisen. Diese Gebäude werden dabei gleichzeitig mit einer intelligenten Steuerung versehen, sodass sowohl lokale Laststeuerungen als auch ein Clusterbetrieb im Sinne virtueller Kraftwerke möglich werden.

Integration der Elektromobilität in das Stromsystem

Der weitere Ausblick für die Dekarbonisierung des Verkehrs ist eindeutig: Elektrizität aus erneuerbaren Quellen muss bis zum Jahr 2050 der dominierende Energieträger im Straßenverkehr werden, sowohl im direkten Einsatz in Elektrofahrzeugen wie indirekt über strombasierte synthetische Kraftstoffe (sogenannte Power-to-Liquids

oder P2X-Fuels). Letztere bieten sich zum Beispiel im Frachtverkehr oder insbesondere im Luftverkehr an, wo batterieelektrische Lösungen an ihre Grenzen stoßen.

Im dezentralen Energiesystem des Jahres 2030 müssen daher im Fall einer erfolgreichen Elektromobilitätsstrategie deutschlandweit Millionen Elektrofahrzeuge als ein neues Systemelement eingeführt und integriert werden. Bei dieser Größenordnung müssen schon alle wesentlichen systemtechnischen Voraussetzungen für Infrastrukturen und Systemintegration der Ladevorgänge vorliegen, bevor bis 2050 die eigentliche Skalierung auf die gesamte Fahrzeugflotte in Gang kommt.

3.2.3 Ansatzpunkte der Digitalen Transformation zum Realisierungserfolg

Die digitale Transformation der Energiewirtschaft hat begonnen (Roth 2018; vgl. auch Edelmann 2018, Edelmann/Fleischle 2018, Doleski 2017). Eine Vielzahl von unterschiedlichsten Anwendungsfällen und heute schon verfügbaren Lösungen unterstreichen das enorme Potenzial digitaler Technologien zur Ermöglichung der Energiewende – von der Sektorenkopplung bis zur automatisierten Nachfrageflexibilisierung (Weigel/Fischedick 2018). In vielen Bereichen ist dies dazu erst der Anfang, die ungebremste und globale Dynamik digitaler Innovationen lassen immer weitere Lösungsbeiträge erwarten.

Die Fähigkeit zur digitalen Steuerung von komplexen Systemen ist damit heute schon vorhanden und verbessert sich rapide durch die anhaltenden Fortschritte in allen relevanten Technikfeldern:

- Revolution der Sensortechnik im Internet of Things (IoT) liefert Daten über alles, überall, zu jeder Zeit und fast kostenlos;
- Neue Mobilfunk-Standards wie z. B. 5G bieten unbegrenzte Connectivity und Echtzeit-Interaktion;
- Cloud Computing eröffnet Zugang zur ganzen Intelligenz des Internets überall und jederzeit;
- Künstliche Intelligenz steigert die Fähigkeit zur Verarbeitung und Nutzung stetig wachsender Datenmengen.

Übergreifende Technologietrends und Innovationsdynamiken

Im Bereich der elektrischen Stromnetze konzentriert sich die Forschung derzeit stark auf die Verteilnetze, wo aufgrund des steigenden Anteils von erneuerbaren Stromerzeugern und der voranschreitenden Elektrifizierung der Bereiche Mobilität und Gebäudeenergie-technik zukünftig neue Konzepte des Netzbetriebs inkl. Optionen der Sektorenkopplung und der Integration von Speichertechnologien benötigt werden. Durch eine konsequente digitale Vernetzung dezentraler Systeme können schneller Verbesserungspotenziale erkannt werden, Anlagen können besser gesteuert, geregelt und betrieben werden. Außerdem werden anlagen- und gebäudeübergreifende Energiekonzepte wirtschaftlich umsetzbar.

Ein Schwerpunkt der kommenden Jahre ist die gezielte Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G im Bereich der dezentralen Energietechnik (Dumitrescu et al. 2018; Galus et al. 2018), wobei die extrem niedrigen Latenzen der 5G Technologie neue Möglichkeiten für die Netzautomation und -regelung eröffnen. Hierbei liegt aktuell der Fokus vor allem auf den Aspekten des Network-Slicing (Erstellung mehrerer

logischer Netzwerke auf einer gemeinsamen physischen Netzwerkinfrastruktur), der Netzwerkvirtualisierung, des Software Defined Networking (SDN) und der End-to-End Sicherheit.

Um im smarten Netz alle Beteiligten zusammenzubringen und Daten zu verknüpfen, verfolgen zunehmend mehr Unternehmen und Forschungsakteure Ansätze cloudbasierter Konzepte. Darunter z. B. die im EU-FP7-Projekt FINESCE entwickelte erste Version einer cloudbasierten service-orientierten Open-Source-Middleware-Plattform (finesce.eu) auf Basis der europäischen Future Internet Initiative FIWARE (fiware.org). Darüber hinaus werden spezifische Cloud-Architekturen (Stichwort Edge Cloud) für dezentrale Energiesysteme untersucht, die redundant aufgebaut sind und somit die heutige Versorgungsqualität erhalten können. Hierbei können neue Telekommunikationstechniken wie 5G die benötigte Rechenleistung an die Edge bewegen und so notwendige Daten und Entscheidungsalgorithmen räumlich nah der überwachten und benutzten elektrischen Infrastruktur bereitstellen.

Durch Konzepte und Entwicklungen z. B. im Rahmen der Industrie 4.0 zur Verwendung digitaler Zwillinge, kann die Qualität aller eingesetzten Komponenten und Systeme eines Energiesystems im gesamten Lebenszyklus des Energiesystems abgesichert werden. Die Digitalisierung aller begleitenden Prozesse in Cyber Physical Systems (CPS) erfordert neue, noch nicht etablierte Formen der Zusammenarbeit aller Beteiligten, die zu mehr Transparenz im Aufbau und im Betrieb eines Energiesystems führen.

Auch in anderen Anwendungsbereichen sind neue Innovationspotenziale und potenziell disruptive Lösungsbeiträge durch digitale Technologien aus anderen Sektoren zu erwarten, z. B. mit Blick auf die theoretischen Potenziale von Blockchain-Anwendungen, die seit längerem im Kontext der Energiewirtschaft diskutiert und in allerersten Pilotanwendungen getestet werden (dena 2016; BDEW 2017; WSW 2019). Verfahren der künstlichen Intelligenz (Machine Learning, Deep Learning) werden derzeit ebenfalls in anderen Anwendungen schwerpunktmäßig entwickelt (z. B. autonomes Fahren, Bild-/ Spracherkennung, CPS.HUB NRW 2018). Sie bieten jedoch große Potenziale für intelligente und stärker automatisierte Energielösungen (z. B. PolyEnergyNet 2017) wie auch Agent Based Solutions.

3.2.4 Risiken der Digitalen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung in der Transformationsarena

Es ist das übergeordnete Ziel der Digitalisierung im Energiesystem, zu **Klimaschutz und Ressourcenschonung** beizutragen. Daher müssen digitale Prozesse und Infrastrukturen für dezentrale Energiesysteme selbst hinsichtlich ihrer Umwelt- und Ressourcenwirkungen bewertet werden, um einen ganzheitlich positiven Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung sicherzustellen. Die Aussagen in Kap. 3.1.4 zu den ökologischen Wirkungen und Rebound-Effekten am Beispiel der Transformationsarena Kreislaufwirtschaft treffen hier in gleicher Weise zu (vgl. Kap. 3.1.4).

Als grundsätzlicher Risikoaspekt ist bei der Digitalisierung von dezentralen Energiesystemen der Schutz der Energie-Infrastruktur vor Cyberangriffen zu nennen. Wie in Fällen anderer kritischer Infrastrukturen der Verkehrs-, Energie- und Wasserversorgung gelten hier besondere Anforderungen an die Abwehr von terroristischen und

kriminellen Attacken. Hierfür werden Strategien und Lösungen in enger Kooperation von Behörden, Energiewirtschaft und IT-Branche entwickelt, die dann den übergeordneten Rahmen für die Realisierung von innovativen Geschäftsmodellen definieren.

3.2.5 Hemmnisse der digitalen Erschließung

In den letzten Jahren wurden durch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die technologischen Voraussetzungen für die Transformation dezentraler, stark digitalisierter Energiesysteme geschaffen (Löschel et al. 2018; Schneiders et al. 2018). Dieser technologische Möglichkeitsraum wird genutzt - gerade in einem neuen, lebendigen Ökosystem von Start-ups entstehen kontinuierlich neue Geschäftsmodell-Innovationen.

Trotz dieser Ansätze ist gleichzeitig immer noch ein **Defizit in der praktischen Umsetzung** zu beobachten und die tragfähige, skalierbare Kommerzialisierung von digitalen Lösungen steht häufig erst noch aus (Fidan et al. 2016). So fehlt weiten Teilen der deutschen Energieversorger noch die Phantasie, mit dem neuen Werkzeugkasten tragfähige Geschäftsmodelle zu entwickeln. Dieses Defizit wiegt umso schwerer, da die Digitale Ökonomie durch eine extrem **hohe Innovationsdynamik und disruptive Potenziale neuer Technologien und Geschäftsmodelle** gekennzeichnet ist. Diese globale Dynamik wird maßgeblich durch andere Sektoren außerhalb der Energiewirtschaft getrieben. Neue Optionen müssen entsprechend zügig für die Energiewende nutzbar gemacht werden, um die Umsetzungslücke nicht noch weiter zu verschärfen (Edelmann 2018).

Die Gründe dafür sind vielfältig, neben mangelnder Akzeptanz der Anwenderinnen und Anwender, Informationsdefiziten und fehlenden Kompetenzen können ebenso unzureichende oder sogar explizit kontraproduktive marktliche und regulatorische Rahmenbedingungen die weitere Verbreitung und Skalierung von digitalen Lösungen behindern.

Es ist daher zwingend erforderlich diese Umsetzungslücke durch die Weiterentwicklung des energiepolitischen und regulatorischen Rahmens zu schließen, um das volle Potenzial digitaler Lösungen für die Energiewende nutzen zu können. Kurzfristig bieten sich hierfür Ansatzpunkte in sechs Themenfeldern, die die zentralen Aufgaben für die nächsten Jahre definieren.



Abbildung 7: Aufgaben für Politik und Gesellschaft. Quelle: Eigene Darstellung.

4 Digitale Transformation zur Umsetzung der Sustainable Development Goals

Die aktuelle Novelle der Nachhaltigkeitsstrategie NRW richtet sich strukturell und inhaltlich an den Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) der Vereinten Nationen aus. Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung wurden 2015 in New York verabschiedet und stellen die politische Zielsetzung der Vereinten Nationen zu einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, ökologischer und sozialer Ebene bis zum Jahr 2030 dar. Beinhaltet sind u. a. die Beendigung der Armut, Förderung von wirtschaftlicher Entwicklung, Abdeckung einer Reihe sozialer Bedürfnisse, darunter Bildung, Gesundheit und menschenwürdige Beschäftigungsmöglichkeiten, während gleichzeitig Klima-, Umwelt- und Naturschutz als weitere Zielsetzungen enthalten sind (United Nations 2015a). Viele dieser Ziele werden in den SDGs nicht nur einzeln formuliert, sondern in unterschiedlichen Haupt- und Teilzielen übergreifend eingebunden (siehe beispielhaft Seite 18 für die Umsetzung von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft).



Abbildung 8: Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung. Quelle: United Nations (2015b).

Die Digitale Transformation kann zur Erreichung der SDGs einen wesentlichen Beitrag leisten. Eine Reihe von Institutionen hat die enormen Potenziale digitaler Technologien sowie deren Verknüpfung untereinander zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele herausgestellt. Darunter unter anderem der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), die Global e-Sustainability Initiative (GeSI), das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ, im Zuge der Realisierung unterschiedlicher Projekte) aber auch internationale Großkonzerne wie Huawei sowie die Vereinten Nationen selbst in Form ihrer Organisation ITU (International Telecommunication Union). Diese vier Organisationen haben Veröffentlichungen publiziert, welche sich ausdrücklich der Frage widmen, wie die Instrumente der digitalen Transformation zur

Realisierung der SDGs genutzt werden können. Aufgrund des direkten Bezugs zu einer Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie NRW wurden diese Veröffentlichungen untersucht und ausgewertet. Tabelle 4 stellt die wichtigsten Bezüge zu den 17 Zielen dar und gibt die zugehörige Quelle an. Der Kurzstudie wird zudem eine Tabelle mit ausführlicher Aufschlüsselung je Ziel beigelegt.

Tabelle 4: Zentrale Möglichkeiten der SDG-Erreichung durch Digitale Transformation. Quelle: Eigene Darstellung.

SDGs	Zentrale Möglichkeiten zur Erreichung der SDGs durch die Digitale Transformation
SDG 1 Keine Armut	<ul style="list-style-type: none"> • Konnektivität - Verbesserung der Möglichkeiten, sich von Armut zu befreien und wirtschaftliche Teilhabe zu ermöglichen; auch Erweiterung der Stimme und des Empowerments (WGBU, GeSI, ITU) • Überwindung mangelnder institutioneller Rahmenbedingungen (Mikrofinanzdienstleistungen, Identitätsnachweis durch Blockchain, Ersatzteile durch 3D-Druck etc.) (WGBU) • Neue Planungs- und Koordinationsmöglichkeiten durch Monitoring, Datenauswertung und Informationszugang (in Landwirtschaft, medizinischer Versorgung, humanitärer Hilfe usw.) (WGBU) • Handlungsbedarf sichtbar und umsetzbar machen (WGBU, ITU)
SDG 2 Kein Hunger	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Agriculture - Präzisionslandwirtschaft, automatisierte Bewässerungssysteme, Bodensensoren, Satelliten, Drohnen, Echtzeit-Wetterdaten etc. → steigert die landwirtschaftliche Produktivität und Qualität und verringert den Bedarf an knappen Betriebsmitteln wie bspw. Wasser (WGBU, GeSI, BMZ, ITU) • Sharing-Konzepte über Smartphone-Apps (z. B. Agri-Share) ermöglichen es Kleinbauern bspw. Maschinen und Services zu nutzen (WGBU) • Verbesserte Informationsverfügbarkeit; sowohl für Landwirte als auch für Regierungen und Entwicklungsorganisationen und deren Möglichkeiten zum Austausch (WGBU, GeSI, BMZ, ITU)
SDG 3 Gesundheit und Wohlergehen	<ul style="list-style-type: none"> • eHealth (inklusive Mobile Health, Telemedizin, Health Information System etc.) verbessert den Zugang und die Erreichbarkeit von Gesundheitsleistungen und die Qualität; ermöglicht bzw. erleichtert Diagnose,

	<p>Therapie, Erfahrungsaustausch, Schulung von Personal, Krankheitsmeldung, Kosteneinsparungen für Transport und Gesundheitseinrichtungen, ergänzende, dezentrale Beratung, Patientenfernüberwachung (WGBU, GeSI, Huawei, ITU)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Big-Data-Analysen z.B. zu medizinischen Zusammenhängen, globalen Krankheitsentwicklungen, Voraussagen von Epidemien (WGBU, GeSI) • Blockchain-Technologien zur Rückverfolgbarkeit von Medikamenten und Vermeidung von Medikamentenfälschung (WGBU) • Schutz vor Schadstoffen, z. B. durch digitale Luft- oder Wassersensoren (WGBU) • Neue Möglichkeiten durch medizinischen 3D-Druck (Prothesen, Orthesen, Organe) (WGBU) • Information und Prävention (z. B. HIV-Aufklärung via Internet und Apps) (WGBU, BMZ, Huawei, ITU)
SDG 4 Hochwertige Bildung	<ul style="list-style-type: none"> • E-Learning: verbesserte Teilhabe an Bildung durch finanzielle und räumliche Unabhängigkeit der Nutzung, z. B. digitale Weiter- und Ausbildungsangebote für Lehrpersonen und Lernende wie Massive offene Online-Kurse (MOOCs) etc. → verbessert den Zugang zu Bildung, die Effizienz, die Erschwinglichkeit und die Qualität (WGBU, GeSI, BMZ, Huawei, ITU) • Aktiver Einbezug und Mitgestaltung von Bildung bzw. Partizipation. Inklusive Entwicklung neuer Technik und Schaffung effektiver, sicherer, gendersensitiver, gewaltfreier (digitaler) Lernumwelten, besonders für benachteiligte Gruppen (WGBU, BMZ, Huawei, ITU)
SDG 5 Geschlechtergleichstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Emanzipatorisches Potenzial digitaler Technologien; etwa durch erhöhten Zugang zu Informationen, Bildung und dem Arbeitsmarkt sowie Vernetzungsmöglichkeiten (WGBU, GeSI, Huawei, ITU) • Verbesserte Messbarkeit und Sichtbarmachen von Geschlechterungleichheiten und Diskriminierung (z. B. in kollektiven, digital unterstützten Entscheidungsprozessen) (WGBU) • Sensibilisierung für Gleichstellung und Geschlechtervielfalt durch digitale Experimentierräume sowie flexible und diverse digitale Identitäten (WGBU, BMZ) • Mobile Mikrokredite, die den Zugang zu finanziellen Ressourcen ermöglichen (Huawei)

<p>SDG 6 Sauberes Wasser und Sanitärversor- gung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Smartes Wassermanagement → verbessertes, gegebenenfalls kostengünstigeres und effizienteres Management von Wasserver- und -entsorgungssystemen (WGBU, GeSI, ITU) • Verbesserung des Kundenservices und damit erleichteter Zugang zu Wasserver- und -entsorgung für alle Bevölkerungsgruppen (WGBU, GeSI, ITU) • Besseres saisonales Wassermanagement durch frühzeitiges Erkennen von Dürren oder Starkniederschlagsrisiken (WGBU, ITU) • Verbesserte Regenwasserernte (WGBU) • Besseres Qualitätsmanagement von Trinkwasser (WGBU, ITU) • Bildung zu nachhaltigem Umgang mit Wasser (ITU)
<p>SDG 7 Bezahlbare und saubere Energie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ermöglichung des Zugangs zu stabiler Elektrizität in netzfernen Regionen (z. B. mit Mini Grids auf Basis erneuerbarer Energien) (WGBU) • Digitale Technologien erlauben einen hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromnetz. Zudem können weitere Sektoren elektrifiziert und auf Erneuerbare Energien umgestellt werden (WGBU, GeSI, Huawei) • Smart Energy (z. B. Smart Grid, Smart Appliances, Energiespeicher, Predictive Analytics, Sensoren und Demand-Response-Technologie); durch Monitoring, Optimierung und Steuerung können Effizienzpotenziale erschlossen werden (WGBU, GeSI, Huawei) • Digitalisierung kann zu Durchbrüchen bei Schlüsseltechnologien wie etwa Batteriespeichern beitragen, z. B. durch Materialforschung oder Batteriemangement (WGBU, ITU)
<p>SDG 8 Menschenwürdige Arbeit und Wirt- schaftswachstum</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Fertigungstechnologien, Virtualisierung, Monitoring und Informationsbereitstellung eröffnen Potenziale für steigende Ressourceneffizienz und damit zur Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Produktion und Konsum (WGBU, GeSI) • E-work (z.B. Augmented Reality, Cloud-basierte Plattformen ("Platform as a Service"), Telearbeit und virtuelle Geschäftstreffen) kann den Zugang zu Arbeit verbessern und ebenfalls dazu beitragen, Wirtschaftswachstum von CO₂-Emissionen zu entkoppeln (GeSI, ITU)

	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Technologien können weiteres (Produktivitäts-)Wachstum anstoßen, Kosten senken und neue Produkte und Arbeitsplätze schaffen. Höhere Produktivität und Automatisierung können der Verbreitung menschenwürdiger Arbeitsumfelder dienen sowie Räume für neue Leitbilder nachhaltiger Arbeit schaffen (WGBU, GeSI, ITU) • Es können sich neue Zugänge zu (Arbeits-)Märkten sowie zu Gütern und Dienstleistungen (Banken, finanzielle Mittel, Bildung) ergeben. So erweitern sich Möglichkeiten wirtschaftlicher Teilhabe, insbesondere auch in Entwicklungs- und Schwellenländern (WGBU, ITU) • Ein genaueres Monitoring von Arbeitsmärkten und insbesondere der Einhaltung sozialer Mindeststandards wird möglich (WGBU)
<p>SDG 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur</p>	<p style="text-align: center;">Industrie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entstehung neuer Jobs, einschließlich neuer Tätigkeitsfelder (WGBU) • Gesteigerte ökonomische Teilhabe für Individuen durch verbesserten Zugang zu Finanzdienstleistungen und für Entwicklungsländer als Ganzes durch besseren Marktzugang (WGBU) • Dematerialisierung, Steigerung der Produktivität und Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 bzw. Smart Manufacturing und Smart Logistics (WGBU, GeSI, Huawei, ITU) <p style="text-align: center;">Innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitale Innovationen für gesellschaftliche und ökologische Herausforderungen (WGBU, ITU) • Steigende Beschäftigungszahlen im IKT-bezogenen F&E-Bereich (WGBU) • Förderung von Innovationen durch Konnektivität, Bildung, virtuelle digitale Zentren etc. (BMZ, Huawei, ITU) <p style="text-align: center;">Infrastruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Resilienz gegenüber Klimaveränderungen durch breiteren Informationszugang mittels IKT (WGBU, BMZ) • Ressourcenschonende IT-Infrastrukturen (Green IT) (WGBU, BMZ) • IKT trägt dazu bei, den Zugang zu Informationen zu ermöglichen, die Verwaltung, Überwachung und Op-

	<p>timierung wichtiger globaler und lokaler Infrastrukturen wie Energie-, Wasser-, Kommunikationsnetze und Verkehrssysteme unterstützen (WGBU, Huawei)</p>
<p>SDG 10 Weniger Ungleichheiten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Leapfrogging: Aufholen von Entwicklungsrückständen durch Technologiesprünge (WGBU, GeSI) • Neue Formen der Beschäftigung (z. B. über Plattformen) und steigende räumliche und zeitliche Flexibilität durch mobiles Internet und mobile Endgeräte (WGBU) • Erleichterter Zugang zu Informationen über Beschäftigung sowie zu Finanzdienstleistungen und Förderung von Partizipation generell durch digitale Technologien (WGBU, GeSI) • Zugang Aller zu digitaler Infrastruktur stärkt Bildung und Gesundheit (WGBU) • Konnektivität bietet auch eine Plattform für innovative, zielgerichtete Programme von Regierungen und Organisationen (ITU) • IKT helfen humanitären Akteuren, Bedürfnisse und Schwachstellen zu erkennen und Reaktionen auf eine Krise festzulegen (ITU) • Offenlegung bestehender Ungleichheiten durch Schaffung von Transparenz (WGBU, ITU)
<p>SDG 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Effizientere Energieerzeugung und Versorgung mit Strom und Trinkwasser; Verbundene Sensor- und Smart Meter-Netzwerke für Versorgungsunternehmen und die Umwelt- und Abfallwirtschaft → Energie- und Ressourceneinsparung, Minderung von Treibhausgasausstoß und Luftverschmutzung (u. a. auch mittels Smart Building) (WGBU, GeSI, ITU) • Smart City Mobility z. B. mobile Mitfahrgelegenheiten, E-Mobilität, fahrerloser Verkehr, intermodaler Verkehr und angeschlossene Infrastruktur/IoT, Intelligente Verkehrssteuerungssysteme → weniger Unfälle, verbesserte Luftqualität etc. (WGBU, GeSI) • Verbesserte kommunale Verwaltung, inklusive partizipative Stadtplanung und Management (WGBU) • Verbesserte urbane Kreislaufwirtschaft (WGBU) • Erleichterte Selbstorganisation der Stadtbewohner durch kommunale Plattformen und Kommunikationsmöglichkeiten (WGBU)

<p>SDG 12 Verantwortungsvolle Konsum- und Produktionsmuster</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteigertes Weltumweltbewusstsein durch mehr Informationen über Nachhaltigkeit von Produkten sowie Produktions- und Konsumweisen (WGBU) • Effizientere Ressourcennutzung durch vollständigere Informationssysteme, plattformbasierte Geschäftsmodelle und (virtuelle) Unternehmensnetzwerke; Dematerialisierung durch Virtualisierung bzw. die Ergänzung von Produktion durch Dienstleistung (Servitization), z. B. Sharing (WGBU) • Smart Manufacturing z. B. Industrielles Internet der Dinge (IoT) und Machine-to-Machine (M2M), 3D-Druck, Cyber-Physical Systems (CPS), Datenanalyse und Cloud-Computing, Drohnen und Robotik etc. (WGBU, GeSI) • Smart Agriculture, z. B. optimiertes Farmmanagement und automatisierte Bewässerungssysteme; Präzisionslandwirtschaft, inkl. M2M / IoT, Bodensensoren und Satelliten sowie integrierte Echtzeit-Wetterinformationen, Rückverfolgbarkeits- und Verfolgungssysteme (WGBU, GeSI) • Schließen von Kreisläufen durch digital unterstützte Kreislaufwirtschaft (WGBU) • Bessere Überwachung von Verschmutzungen, Schadstoffen etc. (ITU)
<p>SDG 13 Maßnahmen zum Klimaschutz</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Anwendungen haben Potenzial, in vielen Sektoren zu Emissionsminderungen beizutragen (z. B. mittels Smart Agriculture, Smart Building, Smart Energy, Smart Manufacturing und Smart Mobility) (WGBU, GeSI) • Frühwarnsysteme bei Naturkatastrophen, bessere Beobachtungssysteme, bessere Prognosesysteme hinsichtlich Wetter- und Klimaveränderungen, optimierte Entscheidungsfindung, z.B. hinsichtlich Klimaschutz und -anpassung (climate services) (WGBU, ITU)
<p>SDG 14 Leben unter Wasser</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Technologien können Kontrolle, Überwachung und Durchsetzung von Ökosystemschutz verbessern sowie gegen Überfischung, illegale und zerstörerische Fischerei helfen (Smart Conservation) (WGBU, GeSI, ITU) • Wissenschaft, Forschung und Technologieentwicklung sowie die Weitergabe ihrer Ergebnisse profitieren von digitalen Möglichkeiten und Vernetzung (WGBU)

	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Technologien bieten Möglichkeiten zur Umsetzung von Kreislaufwirtschaft und gegen Abfälle in den Meeren (WGBU) • IKT kann es Schiffen ermöglichen, weniger Treibstoff zu verbrauchen, Routen zu optimieren, die Ozeane zu kartieren und Unfälle zu vermeiden (ITU)
<p>SDG 15 Leben an Land</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Agriculture/ Präzisionslandwirtschaft (Apps, Sensoren usw.) kann Umweltschutz, Ressourceneffizienz und Produktivität steigern (WGBU, GeSI) • Digital unterstütztes Monitoring von Ökosystemen und Bodenzustand (inklusive Wälder und Wildbeständen) stärken den Schutz von Landökosystemen und Biodiversität - Smart Conservation (WGBU, GeSI, ITU) • Sicherung der Landrechte von Kleinbauern z. B. über Blockchain-Technologien (WGBU) • Kleinbauern profitieren durch Mobiltelefone von der Beratung für Verbesserungen in der Produktionsplanung und dem Management wetterbedingter Risiken. Auch andere landwirtschaftliche Risiken, z. B. Schädlinge, Pflanzenkrankheiten oder Bodenerosion lassen sich mittels Mobiltelefon und digitaler Fotos erkennen, Beratung vermitteln und so abschwächen bzw. verhindern (WGBU)
<p>SDG 16 Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen</p>	<p style="text-align: center;">Frieden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbessertes Monitoring und Datenanalyse zur Aufspürung illegaler Finanzflüsse und Waffenhandel (WGBU, ITU) • Globale Vernetzung und VR bergen Chancen für mehr Empathie (WGBU) <p style="text-align: center;">Kriminalitätsbekämpfung/Gerechtigkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Softwarelösungen unterstützen die Arbeit von Strafverfolgungs-, Nachrichten-, Anti-Korruptions- und Drogenkontrollbehörden; Straftaten können durch Monitoring bzw. Tracking aufgedeckt und verhindert werden (WGBU, GeSI, BMZ, ITU) • Politische Teilhabe und mehr Transparenz (u.a. durch E-Regierungsangebote wie E-Voting) (WGBU, GeSI, BMZ, ITU) <p style="text-align: center;">Starke Institutionen</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Digitales Monitoring der Zielerreichung kann zu einer erhöhten Rechenschaft von Institutionen führen (WGBU, GeSI, ITU) • Digitale Datenerfassung und -verarbeitung kann zu mehr Politikkohärenz und guter Regierungsführung (Governance) beitragen (WGBU, ITU) • IKT-gestützte Lösungen können die Kosten öffentlicher Dienste senken, den Zugang zu und die Qualität dieser Dienste verbessern, die Einhaltung von Vorschriften verbessern und dazu beitragen, die Transparenz und Rechenschaftspflicht öffentlicher Stellen zu verbessern (WGBU, ITU)
SDG 17 Partnerschaften zur Erreichung der Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Wissens- und Technologietransfer zur Unterstützung der Umsetzung der SDGs (WGBU, GeSI, BMZ) • Konnektivität und Förderung strategischer Partnerschaften (GeSI, BMZ) • Ausbau von Kapazitäten für Datenauswertung und Monitoring sowie für die konkrete Ausarbeitung nationaler Umsetzungspläne (WGBU, GeSI) • Einsatz digitaler Lösungen für Entwicklungsfinanzierung, Schuldenabbau und offenen, regelgeleiteten Welthandel (WGBU)

Es ist augenfällig, dass für alle Ziele Anwendungen der Digitalen Transformation als unterstützende Instrumente identifiziert wurden.

Als zentrale Möglichkeiten digitaler Technologien zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung lassen sich folgende Funktionalitäten identifizieren:

- **Konnektivität** erlaubt eine breitflächige **Vernetzung** und **Kommunikation**. Dies gestattet unter anderem auch eine Vereinfachung der **Teilhabe**.
- **Bildung** und **Information** können zeit- und ortsungebunden erfolgen.
- **Analyse** bestehender Daten zur Verbesserung der Wissensbasis.
- **Forecasting** zukünftiger Entwicklungen bspw. zur Folgenabschätzung.
- **Monitoring** erlaubt Kontrolle und Steuerung von Prozessen und vorgegebenen Indikatoren.
- Schaffen von **Transparenz**.
- **Optimierung** und **Effizienzsteigerung** einer breiten Palette von Prozessen.

Digitale Anwendungen können auch über den Erfolg einer SDG-Strategie informieren. Inzwischen existieren bspw. Informationsportale, welche über die SDG-Zielerreichung auf unterschiedlichen föderalen Ebenen unterrichten. Das Land NRW berichtet unter <http://www.nachhaltigkeitsindikatoren.nrw.de/sdgs/> über die Indikatorenentwicklung auch in Bezug auf die SDGs. Das "SDG-Portal" ([Wuppertal Institut | 37](https://sdg-</p>
</div>
<div data-bbox=)

portal.de) klärt über den Stand der SDG-Indikatoren für Kommunen mit mehr als 5.000 Einwohnern auf der Basis allgemein zugänglicher Statistiken auf.

Im Hinblick auf die Transformationsarenen nachhaltiger Digitaler Transformation “Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft” sowie “Dezentrale Energiesysteme” werden auf Basis der Publikationen und Projekte der aufgeführten Institutionen im Folgenden beispielhaft die Potenziale der Digitalen Transformation zur Erreichung der SDGs 7 (“Bezahlbare und saubere Energie”) sowie 8 (“Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum”) und 12 (“Verantwortungsvolle Konsum- und Produktionsmuster”) herausgestellt.

Digitale Technologien können den Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und zeitgemäßer Energie für alle (SDG 7) maßgeblich verbessern. In netzfernen Regionen können digitale Technologien bspw. genutzt werden, um den Zugang zu stabiler Elektrizität zu ermöglichen (z. B. mit Mini Grids auf Basis erneuerbarer Energien). Neue Geschäftsmodelle bieten Armutsgruppen in Entwicklungsländern in diesem Kontext die Möglichkeit, Elektrizität zu beziehen, z. B. durch die Nutzung mobiler Bezahlungssysteme für Off-Grid-Elektrizitätssysteme (WBGU 2019, S. 341). Mini Grids erlauben einen hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromnetz. Außerdem können mit Hilfe digitaler Technik weitere Sektoren elektrifiziert und damit ebenfalls auf erneuerbare Energien umgestellt werden (WBGU 2019, S. 341).

Durch Monitoring, Optimierung und Steuerung mittels Smart Energy Lösungen (z. B. Smart Grid, Smart Appliances, Energiespeicher, Predictive Analytics, Sensoren und Demand-Response-Technologie) können Effizienzpotenziale erschlossen und der Zugang zu erschwinglicherer Energie verbessert werden. Außerdem unterstützen Smart Energy Lösungen die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Energiemix (WBGU 2019, S. 341; GeSI 2016, S. 26). In diesem Kontext kann die Digitale Transformation außerdem zu Durchbrüchen bei Schlüsseltechnologien wie etwa Energiespeichern beitragen (z. B. durch Materialforschung oder Batteriemangement) und dadurch SDG 7 weiter vorantreiben (WBGU 2019, S. 341). IKT-Lösungen bieten auch einzelnen Unternehmen und Haushalten die Möglichkeit, das Energiemanagement und die Energieeffizienz zu verbessern und die Risikoexposition gegenüber steigenden Kosten und Energieengpässen zu verringern (im Kontext Zugang zu erneuerbarer Energie bspw. durch: erweiterte Datenanalyse zur Bestimmung der Realisierbarkeit von erneuerbaren Energiequellen in einem bestimmten Bereich; Online-Ressourcen für Anwohner und Unternehmen, die an der Beschaffung sauberer Energie interessiert sind) (Huawei 2018, S. 30).

Eine höhere Effizienz durch die Verbesserung der IKT-Infrastruktur kann den Energieverbrauch erheblich senken, indem diese dieselben Aufgaben besser erfüllt und gleichzeitig Energie spart und Kosten senkt. Beispiele von digitalen Lösungen zur Steigerung der Effizienz sind Smart Meter und Online-Portale für Privat- und Geschäftskunden zum Zugriff auf Zählerdaten und Tools zur Steuerung des Energieverbrauchs sowie Big Data Analytics für die Modellierung und Szenarioentwicklung (Huawei 2018, S. 30). Des Weiteren kann IKT in allen Phasen des Lebenszyklus einer Anlage angewendet werden und damit Potenzial für die Rationalisierung historisch fragmentierter Abläufe schaffen - Power Plant Information Model (PIM). Außerdem bietet IKT mit modernen Systemen des Computer-Aided Engineering (CAE) und

Computer-Aided Design (CAD) Unterstützung bei der Planung, Beschaffung und Konstruktion neuer Kraftwerke (ITU 2017, S. 50f.).

Neben SDG 7 können Digitale Technologien auch zur Entwicklung und Umsetzung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft beitragen. In den 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung finden Aspekte von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Einzelzielen Berücksichtigung, insbesondere in den Zielen 8 (“Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum”) und 12 (“Verantwortungsvolle Konsum- und Produktionsmuster”). Tabelle 2 in Abschnitt 4.1.2 gibt einen Überblick über die relevanten Zieldefinitionen und die einzelnen Indikatoren zur Messung der Umsetzung von Ressourceneffizienz. Nachfolgend soll auf Basis dieser Tabelle dargelegt werden, wie die Digitalisierung zur Erreichung der, für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft relevanten, Teilziele der Nachhaltigkeitsziele 8 und 12 beitragen kann.

SDG 8 soll dauerhaftes, inklusives und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern. Teilziel 8.4 “Verbesserung der Ressourceneffizienz und Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung bis 2030” beinhaltet dabei explizit Aspekte der Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Die Digitalisierung kann zur Umsetzung dieses Teilziels einen wesentlichen Beitrag leisten.

Neue Fertigungstechnologien, Virtualisierung, eine gesteigerte Konnektivität, Monitoring und eine verbesserte Informationsbereitstellung eröffnen Potenziale für eine steigende Effizienz im Umgang mit natürlichen Ressourcen und damit zur Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Produktion und Konsum (GeSI 2016, S. 18; ITU 2017, S. 54-67; WGBU 2019, S. 342). Darüber hinaus kann E-Work (z. B. Augmented Reality, Cloud-basierte Plattformen, “Platform as a Service”, Telearbeit und virtuelle Geschäftstreffen) den Zugang zur Arbeit verbessern und ebenfalls dazu beitragen, wirtschaftliches Wachstum von den CO₂ Emissionen zu entkoppeln (GeSI 2016, S. 18). IKT haben zudem direkte Vorteile für den internationalen Handel, z. B. die Zoll-Automatisierung und die Einführung moderner Zollpraktiken wie Single Window, Importwarnsysteme und Pre-Ankunftsabwicklung, die Transit- und Abfertigungszeiten deutlich verkürzen, Handelsströme erleichtern und die Ressourceneffizienz steigern (ITU 2017, S. 54-67).

In Nachhaltigkeitsziel 12 (Nachhaltiger Konsum und Produktion) werden die Themen Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft insbesondere im Rahmen der Teilziele 12.2 (Nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen bis 2030), 12.3 (Halbierung der globalen Lebensmittelabfälle in Handel und Konsum bis 2030), 12.4 (Umweltgerechtes Management von Chemikalien und Abfällen und Minimierung der Umweltwirkungen bis 2020) und 12.5 (Substanzielle Verringerung des Abfallaufkommens durch Vermeidung, Wiederverwertung und Wiederverwendung bis 2030) adressiert.

Hier können digitale Lösungen zum Smart Manufacturing (z. B. Industrielles Internet der Dinge (IoT) und Machine-to-Machine (M2M), 3D-Druck, Cyber-Physical Systems (CPS), Datenanalyse und Cloud-Computing, Drohnen und Robotik, Produktionstechnologie für eingebettete Systeme) und einer Smart Agriculture (optimiertes Farmmanagement und automatisierte Bewässerungssysteme; Präzisionslandwirt-

schaft, inkl. M2M/ IoT, Bodensensoren und Satelliten sowie integrierte Echtzeit-Wetterinformationen, Rückverfolgbarkeits- und Verfolgungssysteme) die Ressourceneffizienz in der Produktion steigern, Konsummuster ressourcenleichter gestalten und den Übergang zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ermöglichen (GeSI 2016, S. 26). Mehr Informationen über die Nachhaltigkeit von Produkten sowie Produktions- und Konsumweisen und zunehmende Transparenz kann zu einem gesteigerten Weltumweltbewusstsein beitragen. Digitale Technologien ermöglichen zudem ein umfassendes Monitoring von Umweltwirkungen durch "intelligente" Produkte, ermöglicht bspw. durch Sensorik und Big Data sowie deren Übersetzung in ökonomische Anreize für nachhaltiges Unternehmenshandeln und Wettbewerbsvorteile (ITU 2017, S. 98ff.; WGBU 2019, S. 343). Des Weiteren ist eine effizientere Ressourcennutzung durch vollständigere Informationssysteme, plattformbasierte Geschäftsmodelle und (virtuelle) Unternehmensnetzwerke möglich. Hierzu trägt auch die Dematerialisierung durch Virtualisierung bzw. die Ergänzung von Produktion durch Dienstleistungen (Servitization), z. B. Sharing, bei. Verbessertes Produktions- und Lieferkettenmanagement mittels digitaler Lösungen reduziert zudem z. B. Lebensmittelverluste (12.3) und digitale Technologien können - auch jenseits des Abfallmanagements - z.B. durch eine verbesserte Informationsbereitstellung und Monitoring zur Schließung von Kreisläufen beitragen. Überdies birgt der 3D-Druck Potenziale zur Ersatzteilherstellung, wodurch die Reparatur von Produkten erleichtert und die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft ebenfalls vorangetrieben wird (WGBU 2019, S. 343).

5 Schlussfolgerungen

Als industriell geprägtes, bevölkerungsreichstes Bundesland ist Nordrhein-Westfalen längst durch die Digitale Transformation geprägt. Sie findet in NRW überall statt und ist allgegenwärtig. Industrielle Fertigung, Erbringung von Dienstleistungen und die Landwirtschaft, aber auch die Alltagswelten und Haushalte der Bürgerinnen und Bürger sind bereits stark digital geprägt oder auf dem Wege dorthin.

Eine zukünftig fortzuschreibende Nachhaltigkeitsstrategie für NRW muss sich vor diesem Hintergrund mit den Einflüssen, Bedingungen und Sachverhalten der Digitalen Transformation beschäftigen. Es bestehen drei Themenfelder, in denen jeweils ihre Chancen und Risiken betrachtet werden können:

- 1 | **Digitale Transformation als Querschnittsthema:** Behandelt den schon erwähnten Einsatz digitaler Technologien in einer Vielzahl nachhaltigkeitsrelevanter Felder. Die Art und Weise, wie digitale Technologien in NRW in unterschiedlichen Branchen und Lebenswelten Einzug halten bzw. dort genutzt werden, fällt in diese Kategorie.
- 2 | **Digitale Transformation als eigenes Themenfeld:** Beschäftigt sich mit der Digitalen Transformation und digitalen Technologien selbst. Digitale Produkte und Dienstleistungen werden auch in NRW hergestellt und angeboten. Elektronikabfälle, welche durch digitale Produkte entstehen bilden aufgrund ihrer Zusammensetzung eine eigene Herausforderung. Die Digitale Transformation benötigt vor diesem Hintergrund eine eigene Umweltpolitik und eine spezifische Berücksichtigung in der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik (Ramesohl/Berg 2019).
- 3 | **Digitale Transformation als Instrument der Nachhaltigkeits- und Politikgestaltung:** Die technischen Möglichkeiten der Digitalen Transformation erlauben auch ihre Nutzung zur Entwicklung nachhaltiger Politik und Strategie. Sie sind ferner geeignet, ihren Vollzug vorzubereiten, zu überwachen und zu steuern.

Implikationen für diese Themengebiete zur Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie NRW werden im Folgenden schlaglichtartig betrachtet und die in den Augen der Autoren wichtigsten Gesichtspunkte werden hervorgehoben.

Die Analyse der SDGs und ihrer Verbindungen zur Digitalen Transformation hat gezeigt, dass alle dort behandelten Ziele durch die Digitale Transformation betroffen sind bzw. von dieser profitieren können. Für die Nachhaltigkeitsstrategie NRW zeigt dies die Notwendigkeit eines direkten Abgleichs mit den Berührungspunkten zur Digitalen Transformation. Die Einflusspunkte der Digitalisierung auf die Zieldimensionen der Nachhaltigkeitsstrategie NRW sollten für die Spezifika NRWs ausführlich herausgearbeitet werden. Dies muss vor dem Hintergrund erwarteter Wechselwirkungen erfolgen. Zu fragen ist bspw. wie digitale Technologien die Zielerreichung der einzelnen Ziele und ihrer Messgrößen quantitativ und qualitativ beeinflussen bzw. wie sie zur Zielerreichung beitragen können. Umgekehrt ist zu untersuchen, inwieweit die Ziele einer nachhaltigen Entwicklung für NRW der Digitalen Transformation eine Richtung bzw. leitende Rahmenbedingungen für das Bundesland geben sollten. Beide Analyserichtungen können jeweils auf Ebene der Auswirkungen, Chancen,

Möglichkeiten der Einflussnahme, der strategischen Entwicklung und operativer Maßnahmen verfolgt werden.

Besondere Beachtung sollte in diesem Zuge auch der **Zusammenhang zur Gesamtstrategie erfahren**. Es sollte mithin nicht nur eine Analyse und Einwirkung auf der Ebene einzelner Ziele erfolgen, sondern insbesondere auch die Wechselwirkung zwischen sozialen, ökonomischen und ökologischen Zielen untersucht und im Folgenden gemessen werden. Zielsysteme, die nach den SDGs orientiert sind, laufen aufgrund der Strukturierung dieses Systems Gefahr, gerade diese entscheidenden mitunter komplementären, mitunter konkurrierenden Wechselwirkungen außer Acht zu lassen.

Der Prozess der Digitalen Transformation, ihre Technologien sowie die sie ermöglichenden Infrastrukturen stellen zusammen mit den hervorgebrachten Auswirkungen - positive wie negative - ein Themenfeld dar, welches aus Sicht der Autoren einer eigenen **Betrachtung als Themenfeld im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie** bedarf. Im Unterschied zum vorhergehenden Punkt soll es dabei nicht um die Wirkung des Digitalen in anderen Themengebieten gehen, sondern die Digitale Transformation, die digitale Wirtschaft in NRW und auch das "digitale Leben" sollten als eigener Bereich fokussiert betrachtet werden. Eine solche Analyse muss sich mit den Chancen und Risiken beschäftigen, die der digitalen Transformation zu eigen sind sowie ihre Wirkungen auf eine nachhaltige Entwicklung in und für NRW nachvollziehen.

In den Bereich der **Chancen** fallen bspw. verbesserte Gelegenheiten zur Teilhabe aufgrund der (beinahe) ubiquitären Verfügbarkeit digitaler Technologien, insbesondere von Smart Phones. Dies bietet die Möglichkeit, Zugänge zu nachhaltigkeits- und gesellschaftsrelevanten Informationen und Diskursen durch digitale Kommunikation barrierefrei zu gestalten. Diese Ubiquität erlaubt es zudem, gezielt und proaktiv zu nachhaltigen Gesichtspunkten zu informieren, auszubilden und anzuhalten. Digitale Geschäftsmodelle, die als "as-a-service"-Angebote besonders ressourcen- oder energieeffizient gestaltet sein können oder weitgehend dematerialisiert sind, stellen ebenfalls eine Chance dar.

Risiken entstehen u. a. aus dem Bedarf digitaler Technologien nach seltenen und zum Teil nur schwer erhältlichen Ressourcen und zum anderen aus dem hohen Energiebedarf. E-Commerce als konsumbeschleunigende Technologie ist aus ökologischer Perspektive ebenso zu problematisieren wie digitalisierungsbedingte Elektroabfälle, die eine Wiedergewinnung enthaltener Wertstoffe durch Recycling aufgrund einer Vielzahl dicht verbundener Materialien (diverse Kunststoffe und Metalle) sowie Miniaturisierung stark erschweren bzw. zu einem hohen Exportanteil bei Elektroabfällen führen, aus welchen dann unter höchst problematischen Umständen einzelne Bestandteile wiedergewonnen werden. Die hohe Geschwindigkeit und Dynamik der Digitalen Transformation führt dazu, dass ihre Auswirkungen nur schwierig antizipierbar sind und gleichzeitig schnell eine massive Wirkung erfahren. Aus Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit bedarf dieser Umstand einer besonderen Beachtung und proaktiven Behandlung, um problematischen Entwicklungen so schnell wie möglich begegnen zu können. Digitale Technologien benötigen zudem ein oft aufwendiges, ermöglichendes Umsystem (auch "envelope") wie bspw. geeignete Funknetze, Breitbandverbindungen, eine ausreichende Energieversorgung usw. Diese Infrastrukturen

werden häufig in der nachhaltigkeitspezifischen Betrachtung der Digitalisierung außer Acht gelassen. Sie sind jedoch ökologisch besonders relevant und auch in gesellschaftlicher Hinsicht mitunter konfliktbehaftet (bspw. Funkmasten für 5G-Netze). Digitale Infrastruktur sollte daher unter den Gesichtspunkten ökonomischer Chancen und Notwendigkeit, ökologischer Einflüsse und sozialer Wirkung in der Nachhaltigkeitsstrategie NRW betrachtet werden.

Wie schon für die SDGs illustriert, bietet die Digitale Transformation zudem die Möglichkeit, ihre **Instrumente zur Planung, Umsetzung, Kontrolle und Steuerung** der Nachhaltigkeitsstrategie NRW zu nutzen. Diese Möglichkeiten sollten jeweils geprüft werden. Diverse Felder bieten sich hierfür an. Dies betrifft zunächst Möglichkeiten zur Informationsbeschaffung im Zuge der Strategieentwicklung und -umsetzung. Die Nutzung digital gewonnener Daten aus IoT, Text-Mining, Umweltmessungen usw. kann, auch im Zusammenhang mit Data Analytics-Anwendungen ("Big Data"), die Nachhaltigkeitsstrategie mit Informationen stützen und durch neue Einsichten zu neuen Schwerpunkten führen. Entscheidend ist hier die Möglichkeit, umfangreiche Datenbestände zu erzeugen, miteinander in Verbindung zu bringen und auch derzeit getrennt verwaltete Daten gemeinsam auszuwerten. Auf diese Weise können die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales in Verbindung gebracht werden, um zu Einschätzungen von Zielbeziehungen und Zielerreichungsgraden zu gelangen.

Eine sich direkt ergebende Folgerung ist die Möglichkeit, Datenbestände speziell und direkt für die Nachhaltigkeitsstrategie zu kompilieren, zu entwickeln und in Form einer Datenbank zu sammeln. Relevante Informationen können als Zeitreihe angelegt werden, um auch im Zuge der Durchführung ein **Prozessmonitoring** zu ermöglichen. Dies könnte als Steuerungs- und Frühwarninstrument sowohl in Intervallen als auch in Echtzeit verwendet werden, um Abweichungen festzustellen und damit entweder ein Gegensteuern zu ermöglichen oder eine Revision der Nachhaltigkeitsstrategie auszulösen.

Im Zuge der Strategieentwicklung können digitale Kommunikationskanäle wie die Sozialen Medien auch genutzt werden, um eine Teilhabe am Entwicklungs- und Umsetzungsprozess zu ermöglichen bzw. zu intensivieren. Expertinnen und Experten, Stakeholdergruppen (Unternehmen, Verbände, Nicht-Regierungsorganisationen) sowie die Bürgerinnen und Bürger könnten direkt am Weiterentwicklungsprozess der Nachhaltigkeitsstrategie beteiligt werden, um bspw. relevante Inhalte und Wünsche einbringen zu können und Feedback zu Planungen zu geben.

Abschließend bleibt zu betonen, dass der Prozess der Digitalen Transformation sich weiter fortsetzt und auch den exponentiellen Grad seiner Entwicklung fortzuführen scheint. Die Zukunft wird also noch digitaler. Dies macht die weitere Entwicklung und die damit verbundenen Auswirkungen nur sehr bedingt vorhersehbar. Diese werden sich aber mit größter Wahrscheinlichkeit auch weiterhin auf alle Dimensionen der Nachhaltigkeit auswirken und es ist davon auszugehen, dass der ökonomische, ökologische und soziale Impact mindestens ebenso massiv sein wird, wie dies jetzt schon der Fall ist. Damit dies auch für die Chancen gilt, welche mit der Digitalen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung verbunden sein können, ist eine **kontinuierliche Beobachtung, Analyse und Auswertung** dieser Entwicklung notwendig, um sich ergebende Gelegenheiten proaktiv zu Nutzen und nachteiligen

Effekten entgegenzusteuern. Vor diesem Hintergrund empfehlen die Autoren, die Digitale Transformation als ein **eigenes Strategiefeld** zu betrachten und dieses dezidiert zu adressieren. Gleichzeitig sollte es als Querschnittsfeld für die einzelnen Ziele in der Nachhaltigkeitsstrategie berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- Bahn-Walkowiak, B. Wilts, C. H. (in Vorbereitung): Fallstudie Nachhaltigkeitsstrategie NRW, Schwerpunktfeld FM E2 Circular Economy – Leitbild und Vision.
- BDEW — Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2017): Block Chain in der Energiewirtschaft. Potenziale für Energieversorger. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW). Abgerufen von https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Blockchain_Energiewirtschaft_10_2017.pdf. Letzter Zugriff am 29.11.2019.
- Berg, H., Wilts, H. (2019): Digital platforms as market places for the circular economy— requirements and challenges. In NachhaltigkeitsManagementForum| Sustainability Management Forum (Vol. 27, No. 1, pp. 1-9). Berlin Heidelberg: Springer.
- Böker, K.H., Demuth, U., Thannheiser, A., Werner, N. (2013): Social Media – Soziale Medien? Neue Handlungsfelder für Interessensvertretungen, Edition Hans Böckler Stiftung.
- Cao, J., Zhang, Q., Shi, W. (2018): Edge Computing: A Primer. Basel: Springer International Publishing.
- CPS.Hub NRW (2018): Eckpunktpapier künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen. Chancen, Potenziale und Herausforderungen in Nordrhein-Westfalen. Competence Center for Cyber Physical Systems. Abgerufen von <https://cps-hub-nrw.de/knowledgebase/publikation/4882-eckpunktpapier-kuenstliche-intelligenz-und-maschinelles-lernen>. Letzter Zugriff 28.10.2019.
- dena (2016): Blockchain in der Energiewende. Eine Umfrage unter Führungskräften der deutschen Energiewirtschaft. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) und ESMT European School of Management and Technology GmbH. Abgerufen von https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9165_Blockchain_in_der_Energiewende_deutsch.pdf. Letzter Zugriff 28.10.2019.
- dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Deutsche Energie-Agentur (dena), Berlin. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf Letzter Zugriff 28.10.2019.
- Destatis (2018): Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele. Für Deutschland verfügbare Indikatoren der globalen UN-Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung . Abgerufen von https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-un-nachhaltigkeitsziele-2018-pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Deutscher Bundestag (2017): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Dr. Julia Verlinden, Dieter Janecek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/13077 – Energieverbrauch durch Digitalisierung – Effizienz statt Rebound-Effekt. Abgerufen von <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/133/1813304.pdf>. Letzter Zugriff 23.10.2019.
- Doleski, O. D. (Hrsg.; 2017): Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert. Wiesbaden: Springer Vieweg. Abgerufen von <https://www.springer.com/de/book/9783658157364>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Dörner, R., Broll, W., Grim, P., Jung, B. (2019): Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Berlin – Heidelberg: Springer Verlag.
- Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Slusallek, P., Cieslik, S., Demme, G., Falkowski, T., Hoffmann, H., Kadner, S., Reinhart, F., Westermann, T., Winter, J. (2018): Studie „Autonome Systeme“. Studien zum deutschen Innovationssystem (No. 13–2018). acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (e.V.) Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM. Abgerufen von <https://www.e->

- fi.de/fileadmin/Innovationsstudien_2018/StuDIS_13_2018.pdf. Letzter Zugriff 29.11.2019.
- Edelmann, D. H. (2018): Stadtwerkstudie 2018 Digitalisierung in der Energiewirtschaft – quo vadis? Ernst&YoungGmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. Abgerufen von https://www.mitteldeutschland.com/sites/default/files/uploads/2018/07/20/eystadtwerk_estudie2018.pdf. Letzter Zugriff 28.10.2019.
- Edelmann, D. H., Fleischle, D. F. (2018): Barometer Digitalisierung der Energiewende. Modernisierungs- und Fortschrittsbarometer zum Grad der Digitalisierung der leitungsgebundenen Energiewirtschaft. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Abgerufen von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=20. Letzter Zugriff 29.11.2019.
- Ellen MacArthur Foundation (2013): Towards the Circular Economy. Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Abgerufen von <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- EuPC – European Plastics Converters (2017): The Usage of Recycled Plastics Materials by Plastics Converters in Europe – A qualitative European industry survey.
- Fenn, J. (1995): When to leap on the hype cycle. Gartner Group, 1.
- Fidan, M., Edelmann, D. H., Fleischle, D. F., Kuhn, P. D. S., Grabow, J., Christiansen, T. (2016): Geschäftsmodelle 2020. Wie in der Energiewirtschaft zukünftig noch Geld verdient werden kann (S. 60). Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. Abgerufen von <https://docplayer.org/82697096-Geschaeftsmodelle-wie-in-der-energiewirtschaft-zukuenftig-noch-geld-verdient-werden-kann.html>. Letzter Zugriff 28.10.2019.
- Finesce.eu. (2019): Abgerufen von <http://www.finesce.eu/>. Letzter Zugriff 13.03.2019.
- Fiware.org. (2019): Abgerufen von <https://www.fiware.org/>. Letzter Zugriff 13.03.2019.
- Galus, D. M., Grigorie, D. M., Hertach, M., Holzner, D. C. (2018): Digitalisierung im Energiesektor. Dialogpapier zum Transformationsprozess. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK). Abgerufen von <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/55398.pdf>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- GeSI – Global e-sustainability initiative (2016): #SystemTransformation - How Digital Solutions will drive Progress towards the sustainable development goals. Accenture Strategy. Abgerufen von http://systemtransformation-sdg.gesi.org/160608_GeSI_SystemTransformation.pdf. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Glanz, A., Büsgen, M. (2013): Machine-to-Machine-Kommunikation, Frankfurt – New York: Campus Verlag.
- Hintemann, R., Hinterholzer, S. (2018): Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourcen- Einsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten, Kurzstudie im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Berlin.
- Homeister, M. (2018): Quantum Computing verstehen, Grundlagen – Anwendungen Perspektiven. Berlin – Heidelberg: Springer Verlag.
- HUAWEI (2018): Accelerating SDGs through ICT. 2018 Huawei ICT Sustainable Development Goals Benchmark. Abgerufen von <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/sustainability/sdg/huawei-2018-sdg-report.pdf?la=en>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- ITU (Hrsg., 2017): Fast-forward progress - Leveraging tech to achieve the global goals. #ICT4SDG. Abgerufen von https://www.itu.int/en/sustainable-world/Documents/Fast-forward_progress_report_414709%20FINAL.pdf. Letzter Zugriff 26.11.2019.

- Irizarry, R. A. (2019): Introduction to Data Science: Data Analysis and Prediction Algorithms with R, Chapman and Hall/CRC. Boca Raton: CRC Press.
- Landesregierung NRW – Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2016): Nachhaltigkeitsstrategie für Nordrhein-Westfalen. Abgerufen von https://www.nachhaltigkeit.nrw.de/fileadmin/user_upload/Nachhaltigkeitsstrategie_PD_Fs/NRW_Nachhaltigkeitsstrategie_Broschuere_DE_Online_Version_22032017.pdf. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Lacy, P., Rutqvist, J. (2015): Waste to wealth: The circular economy advantage. Hampshire: Palgrave Macmillan.
- Löschel, P. D. A., Schneiders, P. D. T., Werthschulte, M., Hilger, L., Feldhaus, D. C., Klockenbusch, L. (2018): Die Erforschung der digitalen Energiewirtschaft in NRW. Das VISE stellt sich vor – Von der Forschungsgruppe zum Virtuellen Institut (VISE Policy Brief No. Q2/2018). Virtuelles Institut Smart Energy (VISE). Abgerufen von https://www.smart-energy.nrw/sites/smartenergy/files/vise_policy_brief_q_2_2018.pdf. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G., Marwede, M. & Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- Müller, S. (2016): Internet of Things (IoT): Ein Wegweiser durch das Internet der Dinge. Nordstedt: Books on Demand.
- Murphy R. R., Tadokoro, S., Nardi, D., Jacoff, A., Fiorini, P., Choset, H., Erkmen, A. M. (2008). Search and Rescue Robotics. In: Siciliano B.; Khatib O. (Hrsg.) Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2006): Improving Recycling Markets. Paris: OECD Publishing.
- Othman, M., Ahmed Amodu, O. (2018): Machine-to-Machine Communication: An Overview of Opportunities, Computer Networks, Volume 145: 255-276.
- PolyEnergyNet. (2017): Resiliente Polynetze zur sicheren Energieversorgung, Forschungsprojekt im Auftrag des BMWi und BMBF (Abschlussbericht). Abgerufen von <https://www.polyenergy.net.de/index.html>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Pousttchi, K. (2017): Digitale Transformation. Abgerufen von <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Informatik--Grundlagen/digitalisierung/digitale-transformation>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Ramesohl, S., Berg, H. (2019): Digitale Transformation in die richtige Richtung lenken: Eckpunkte für Wissenschaft und Politik. Inbrief Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit 09/2019, Wuppertal Institut.
- Reger, J., Kosch, B. (2017): Energieaspekte der Informationstechnologie. In Industrielle Energiestrategie (pp. 549-570). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Reichel, A., De Schoenmakere, M., Gillabel, J. (2016): Circular economy in Europe. Developing the knowledge base. European Environment Agency, Report 2/2016. Abgerufen von <https://eco.nomia.pt/contents/documentacao/thal16002enn-002.pdf>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Richard, P., Limbacher, E.-L. & Engelhardt, T. (2017): Analyse der mit erhöhtem IT-Einsatz verbundenen Energieverbräuche infolge der zunehmenden Digitalisierung, Status Quo und Prognosen. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin.
- Roth, I. (2018): Digitalisierung in der Energiewirtschaft. Technologische Trends und ihre Auswirkungen auf Arbeit und Qualifizierung (Forschungsförderung No. Working Paper, Nr. 73). Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. Abgerufen von https://www.boeckler.de/pdf/p_fofoe_WP_073_2018.pdf. Letzter Zugriff 28.10.2019.
- Santarius, T. (2012): Der Rebound-Effekt: Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.), Impulse zur

- WachstumsWende (5), Wuppertal. Abgerufen von <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/59299/1/716107694.pdf>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Schneiders, P. D. T., Rehm, T., Hilger, L. (2018): SmartHome Rösrath – Feldtest in 120 Haushalten zur Untersuchung von Heizenergieeinsparungen in Bestandsgebäuden. VISE Policy Brief Q3/2018. TH Köln (University of Applied Sciences).
- Schneidewind, U. (2018): Die große Transformation: eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. Berlin: S. Fischer Verlag.
- Statista (2019a): Cisco Systems (26. November, 2018). Datenvolumen des privaten IP-Traffics weltweit nach Verbindungstyp in den Jahren 2014 bis 2017 sowie eine Prognose bis 2022 (in Exabyte pro Monat) [Graph]. Abgerufen von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/169455/umfrage/prognose-zum-weltweiten-datenvolumen-nach-segmenten/> Letzter Zugriff 15.11.2019
- Statista (2019b): Average costs of industrial internet of things (IoT) sensors from 2004 to 2020. Abgerufen von <https://www.statista.com/statistics/682846/vr-tethered-hmd-average-selling-price/> Letzter Zugriff 27.11.2019.
- Statista (2014): Internet of Things wird bis 2020 alltäglich. Abgerufen von <https://de.statista.com/infografik/2937/mit-dem-internet-of-things-verbundenen-geraete/> Letzter Zugriff 27.11.2019.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2019): Digital Twins and Cyber Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison, Engineering, Volume 5 (4): 653-661.
- Überschaar, M. (2017): Assessing recycling strategies for critical raw materials in waste electrical and electronic equipment. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag GmbH.
- Umweltbundesamt (2019): Digitalisierung nachhaltig gestalten - Ein Impulspapier des Umweltbundesamtes. Abgerufen von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/digitalisierung-nachhaltig-gestalten>. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- Umweltbundesamt (o. J.): In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und –quoten bei Elektrogeräten. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#textpart-2> Letzter Zugriff 26.11.2019.
- United Nations (2015a): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Abgerufen von https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Letzter Zugriff 26.11.2019.
- United Nations (2015b): Communications materials. <https://un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/> Letzter Zugriff 26.11.2019.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019): Hauptgutachten. Unsere gemeinsame digitale Zukunft. Berlin: WBGU.
- Weigel, P., Fishedick, M. (2018): Rolle der Digitalisierung in der soziotechnischen Transformation des Energiesystems. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 68 (2018) Heft 5: 10-16.
- Wilts, C. H., Berg, H. (2017): Digitale Kreislaufwirtschaft: die digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. Inbrief Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit, Wuppertal Institut.
- Wilts, C. H. (2016): Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft?. WISO Diskurs 06/2016. Friedrich-Ebert-Stiftung, Abteilung Wirtschafts-und Sozialpolitik.
- World Commission on Environment and Development (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Abgerufen von <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Letzter Zugriff 26.11.2019.

WSW – Wuppertal Stadtwerke (2019): Stadtwerkequartett entwickelt Geschäftsmodelle auf Blockchainbasis: Wuppertaler Stadtwerke. Abgerufen von <https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/meldung/stadtwerkequartett-entwickelt-geschaeftsmodelle-auf-blockchainbasis/>. Letzter Zugriff 13.03.2019.

Weitere Internetquellen

In der Reihenfolge des Erscheinens im Text

<https://www.nachhaltigkeit.nrw.de/themen/nachhaltigkeitsstrategie-fuer-nordrhein-westfalen/>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/169455/umfrage/prognose-zum-weltweiten-datenvolumen-nach-segmenten/>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/133/1813304.pdf>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<https://www.faz.net/aktuell/finanzen/digital-bezahlen/bitcoin-stromverbrauch-bei-herstellung-enorm-hoch-15876893.html>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<https://www.cbeci.org>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<http://www.nachhaltigkeitsindikatoren.nrw.de/sdgs/>
Letzter Zugriff 26.11.2019.

<https://sdg-portal.de>
Letzter Zugriff 26.11.2019.