

Wege in eine ökologische Machine Economy

Ein systemischer Blick auf die Umweltwirkungen digitaler Technologien

Forschungslinie: Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung

Herausgeber

Daniel Wurm

Autor*innen

Daniel Wurm

Lucas Spreiter

Oliver Zielinski

Philipp Damm

Neeske Lübben

Ralph Hintemann

Stephan Ramesohl

Simon Hinterholzer

Maike Jansen

Tim Grothey

Rebecca Heinz

Bastian Bach

Andreas Moring

Ulrike Dowie

Vanessa Just

Max Schulze

Kurz gesagt

Das Zusammenspiel von aufstrebenden Technologiefeldern eröffnet neue Potenziale für die Nachhaltigkeitstransformation. Gleichzeitig erzeugt es komplexe Umweltbelastungen, die bisher kaum sichtbar und noch weniger gestaltbar sind. Für eine nachhaltige Digitalisierung brauchen wir jetzt ein Verständnis für die ökologischen Wechselwirkungen des zukünftigen Digitalsystems. Am Beispiel der Machine Economy und der ihr zugrunde liegenden Technologien Internet of Things, Künstliche Intelligenz und Distributed Ledger Technologie bzw. Blockchain machen wir in diesem Forschungsbericht Umweltwirkungen transparent und Ansatzpunkte greifbar – damit Digitalisierung ganzheitlich ökologisch gestaltbar wird.

Herausgeber

Daniel Wurm
Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH



Autorinnen

Oliver Zielinski
Neeske Lübben
Deutsches Forschungszentrum für
Künstliche Intelligenz



Stephan Ramesohl
Maike Jansen
Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH



Rebecca Heinz
Germanwatch



Andreas Moring

Vanessa Just
juS.TECH AG

Philipp Damm



Lucas Spreiter
UnetiQ GmbH



Ralph Hintemann

Simon Hinterhölzer
Borderstep Institut

Tim Grothey



Bastian Bach

Ulrike Dowie

Siemens AG



Max Schulze

Sustainable Digital Infrastructure
Alliance



Übersicht der Einzelbeiträge

Roadmap für den Weg in eine ökologische Machine Economy	4
Executive Summary	
Handlungsfelder für Wege in eine ökologische Machine Economy	26
von Daniel Wurm, Oliver Zielinski, Neeske Lübben, Stephan Ramesohl und Maike Jansen	
Das Gewicht der Machine Economy	60
von Rebecca Heinz	
Umweltbelastungen in aufsteigenden Trends der KI	99
von Oliver Zielinski und Neeske Lübben	
KI-Methodenkoffer zur Messung von Umweltbelastungen im Einsatz von KI, sowie IoT und DLT	109
von Andreas Moring, Vanessa Just, Lucas Spreiter und Philipp Damm	
Diffusionsbarrieren in der Umsetzung einer ökologischen Machine Economy	140
von Daniel Wurm und Maike Jansen	
Nachhaltiges Edge Computing im Kontext der Machine Economy	170
von Ralph Hintemann, Simon Hinterholzer und Tim Grothey	
Wie Tech-Unternehmen die Umweltwirkung digitaler Services in der Praxis sichtbar machen können	194
von Daniel Wurm, Bastian Bach und Ulrike Dowie	
Nachhaltige Systemtransformation durch eine unabhängige Allianz	226
von Max Schulze	
Über die Autor*innen	234
Über CO:DINA	239
Impressum	239

Roadmap für den Weg in eine ökologische Machine Economy

Executive Summary

Forschungslinie: Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung

Autor*innen

Daniel Wurm
Oliver Zielinski
Neeske Lübben
Rebecca Heinz
Stephan Ramesohl
Maike Jansen
Andreas Moring
Vanessa Just
Lucas Spreiter
Philipp Damm
Ralph Hintemann
Simon Hinterhölzer
Tim Grothey
Bastian Bach
Ulrike Dowie
Max Schulze

Kurz gesagt

Setzen wir jetzt den Grundstein für eine nachhaltige Digitalisierung in aufstrebenden Technologiefeldern – das Gelegenheitsfenster ist offen. Für eine ökologische Machine Economy müssen Internet of Things, Künstliche Intelligenz und Distributed Ledger Technology bzw. Blockchain in ihren systemischen Wechselwirkungen verstanden und bewusst als Ganzes umweltgerecht gestaltet werden. Dieses Papier überführt die in mehreren Kurzstudien und Kommentaren erarbeiteten Handlungsoptionen in ein übergreifendes Governance-Framework und eine Transformationsroadmap für eine nachhaltige Digitalisierung.

Mit Unterstützung von
Alyssa Gunnemann

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Zielbild	9
3. Handlungsfelder	9
4. Roadmap	14
5. Fazit & Ausblick	24
Literaturverzeichnis	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Handlungsfelder für ein grünes Zusammenspiel der Technologien	10
Abbildung 2: Roadmap für den Weg in eine ökologische Machine Economy	14
Abbildung 3: Machbarkeit und Wirkung der identifizierten Handlungsoptionen.....	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmen zum Handlungsfeld: Grundlegende Wissensbasis schaffen	16
Tabelle 2: Maßnahmen zum Handlungsfeld: „Transparenz der Dinge“ für „Transparenz der Umweltwirkung“ einsetzen	18
Tabelle 3: Maßnahmen zum Handlungsfeld: „Internet of Everything“-Mentalität in der Unternehmenspraxis nachhaltig ausrichten	20
Tabelle 4: Maßnahmen zum Handlungsfeld: Komplexität der Umweltwirkung greifbar machen.....	22
Tabelle 5: Maßnahmen zum Handlungsfeld: Vernetzte Vielfalt grün gestalten	22

1. Einleitung

Die Treiber von Umweltbelastungen digitaler Technologien in den Blick nehmen

Die Debatte um „Nachhaltige Digitalisierung“ steht an einem Scheideweg: Weiter auf die ökologische Gestaltung digitaler Infrastrukturen (wie z. B. Rechenzentren) fokussieren oder die systemischen Wirkungsmechanismen hinter den Umweltbelastungen der Digitalisierung in den Blick nehmen? Die CO:DINA Forschungslinie „Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung“ plädiert dafür, Geschäftsmodelle, Applikationen, Daten sowie die Rolle von Akteur*innen stärker zu adressieren – denn sie sind die Treiber hinter der Umweltwirkung der Digitalisierung.

Heute sehen wir, wie die aufstrebenden Technologien Internet of Things (IoT), Künstliche Intelligenz (KI) sowie Distributed Ledger Technology (DLT) bzw. Blockchain durch eine massive Ausweitung der Datenverwertung neue Infrastrukturbedarfe schaffen und möglicherweise zukünftige Umweltwirkungen befeuern. Gleichzeitig mangelt es an Governance-Frameworks, die basierend auf einem ganzheitlichen Wirkungsverständnis Ansätze für eine nachhaltige Ausrichtung der Technologien für verschiedene Akteure und Akteurinnen bereitstellen.

Diese Forschungslinie soll Handlungsoptionen für Entscheider und Entscheiderinnen erarbeiten. Wir arbeiten dabei explorativ und stellen beispielhaft Thesen in kritischen Handlungsfeldern auf. Dabei haben wir nicht das Ziel die Thematik in Gänze zu erschließen. Wir möchten neue Einblicke schaffen, inspirieren und Debatten anregen. Unsere Ergebnisse bleiben dabei nicht vage, sondern münden bewusst in konkreten Gestaltungsvorschlägen – greifbar, angreifbar und dadurch vorantreibend.

Die „Machine Economy“ kommt: IoT, KI und DLT wachsen zusammen

Unsere Untersuchungen sollen am Beispiel der Vision einer Machine Economy erfolgen. Hier übernehmen Maschinen wesentliche Prozesse des Wirtschaftens. Sie nehmen ihre Umgebung wahr, interpretieren sie und treffen nahezu autonom Entscheidungen. Sie sind untereinander stark vernetzt und stehen im ständigen

Austausch. IoT, KI und DLT sind das technologische Fundament der Machine Economy, über welches der maschinelle Dialog ermöglicht wird (Urbach et al., 2020).

Zwar ist die Idee einer Machine Economy noch eine Zukunftsvision. Dennoch gibt es schon heute weltweit über 10 Milliarden smarte physische „Dinge“ jenseits von Smartphones, Tablets oder Personal Computern – Tendenz steigend (Cisco 2020). Kurzfristig werden sie zukünftige Zustände vorhersehen und Unterstützungsleistungen (z. B. Reparaturen) anfragen können. Längerfristig könnten sie sogar finanzielle „Unabhängigkeit“ mit eigenen Konten und Bezahlssystemen erhalten (Rajasingham 2017).

Heute und in naher Zukunft werden vor allem Einzeltechnologien wie IoT und Edge und Cloud Computing eingesetzt, um Prozessverbesserungen in Produktionsverfahren und Lieferketten umzusetzen. Bis allerdings KI, IoT und DLT integrativ zusammenwirken und neue Geschäftsmodelle hervorbringen werden noch einige Jahre vergehen. Beispielsweise wird für autonome Dinge in der Produktion oder die Integration von IoT und DLT bzw. Blockchain mit einem Zeitraum von 5-10 Jahren bis zu einem hohen Grad an Marktdurchdringung gerechnet. Für „Konsumierende Dinge“ (engl. „Machine Customers“) wird dagegen ein Zeitraum von über 10 Jahren angegeben (Bremild, 2021; Garnter, 2020a; Gartner, 2020b; Goasduff, 2021).

Das Gelegenheitsfenster nutzen: Schon jetzt den Weg in eine ökologische Machine Economy ebnen

Daher eröffnet sich jetzt ein Gelegenheitsfenster, um IoT, KI sowie DLT von Beginn an integrativ nachhaltig auszurichten und damit den Weg in eine ökologische Machine Economy zu ebnen. Dieses Papier fügt die in diversen Kurzstudien explorativ erarbeiteten Handlungsoptionen in einer Roadmap als Rahmen für eine grüne Governance der Machine Economy zusammen. Hier werden Akteure bzw. Akteurinnen und Technologien auf verschiedenen Ebenen der Wertschöpfung hinweg erfasst, um die Umweltbelastungen durch die technologischen Infrastrukturen der Machine Economy zu minimieren. Als grobe Eingrenzung versuchen wir – wenn möglich – die digital-ökologische Industrietransformation

in den Fokus zu stellen. Hier ist schon heute z. B. IoT stark verbreitet und es lässt sich auch für die Zukunft eine intensive Technologieintegration erahnen.

2. Zielbild

Unsere Roadmap ist auf das folgende Zielbild ausgerichtet. Die erarbeiteten Maßnahmen sollen dazu beitragen, (Tech-)Unternehmen zu befähigen, ausgewählte Kerneffekte der Umweltwirkung von IoT, KI und DLT transparent machen zu können und Prozesse rund um den Technologieeinsatz ökologisch zu gestalten. Als Voraussetzung hierfür sollten die folgenden Aspekte bis zum Jahr „2030+“ angestrebt werden:

- Wesentliche systemische Treiber von Umweltbelastungen der Machine Economy sind verstanden (Zusammenwirken von Akteur*innen & Technologien in der Wertschöpfung)
- Eine grundlegende Wissensbasis zur übergreifenden Umweltwirkung der Machine Economy (Energie- & Ressourcenbedarfe, Impact der Technologiefelder usw.) befruchtet Governance-Mechanismen von Politik und Unternehmen
- Die Politik verfügt über Instrumente, Prozesse, Strukturen und Zugänge, um die Machine Economy im Sinne der Nachhaltigkeit auszusteuern und gestalterisch aktiv werden zu können
- Akteure und Akteurinnen arbeiten gemeinsam d.h. inter- bzw. transdisziplinär und in einem „operativen“ Modus an einer ökologischen Machine Economy
- Umweltleistungen des Digitalsystems werden durch die Aussteuerung der genannten Technologien nicht behindert

3. Handlungsfelder

Im Rahmen der Studie „Handlungsfelder für Wege in eine ökologische Machine Economy“ wurden sechs kritische Handlungsfelder identifiziert. Jedes Hand-

lungsfeld wurde im Sinne thematischer „Deep Dives“ jeweils durch eine Kurzstudie oder einen kurzen Kommentar beispielhaft „angeforscht“. Sie alle explorierten Herausforderungen und Handlungsoptionen zu einer ausgesuchten Fragestellung, die letztlich in diese Roadmap einfließen. Im Folgenden werden die Handlungsfelder kurz umrissen.



Abbildung 1: Handlungsfelder für Wege in eine ökologische Machine Economy (eigene Darstellung)

Grundlegende Wissensbasis schaffen

Dieses Handlungsfeld erkennt einen Mangel an grundlegendem Wissen an der Schnittstelle Machine Economy und Umweltbelastungen. Wir haben zu wenige Erkenntnisse, die eine grobe Orientierung zu ökologischen Kerneffekte aufstrebender Technologien d.h. IoT, KI, sowie DLT bzw. Blockchain zulassen. Andererseits stehen in der gesamten Debatte um „Nachhaltige Digitalisierung“ vor allem

Energiebedarfe im Vordergrund. Der Ressourcenaufwand hinter z. B. infrastrukturintensiven Industrial IoT Anwendungen ist kaum erforscht.

Deep Dives:

Die Kurzstudie „Das Gewicht der Machine Economy“ wertet den bisherigen Forschungsstand über die ressourcenpolitischen Implikationen der Machine Economy am Beispiel der Industrie 4.0 (I4.0) aus.

Der Kommentar „Umweltbelastung in aufsteigenden Trends der Künstlichen Intelligenz“ analysiert in Kürze die drei Trendthemen „data-centric AI“, „self-supervised learning“ sowie „dritte Welle der KI“ und gibt eine erste Indikation bezüglich ihrer Umweltwirkung.

„Transparenz der Dinge“ für „Transparenz der Umweltwirkung“ einsetzen

In der Machine Economy verschmilzt die physische mit der virtuellen Welt. Vernetzte Maschinen erzeugen ubiquitäre Datenströme und machen damit Produktion „digital greifbar“. Wir wissen zu wenig darüber, wie wir diese transparenten Dinge im Sinne der Nachhaltigkeit nutzen können. Im Mittelpunkt steht hier die Frage, wie dedizierte Services sowie KI selbst dafür eingesetzt werden können, Umweltwirkungen im maschinellen Dialog zu erkennen.

Deep Dive:

Die Kurzstudie „KI-Methodenkoffer zur Messung von Umweltbelastungen im Einsatz von KI, sowie IoT und DLT“ bringt die Ansätze des digitalen Zwillings und des digitalen Lebenszyklus zusammen, um mit KI-Methoden den Umweltbelastungen im maschinellen Dialog auf die Spur zu kommen.

„Internet of Everything“- Mentalität in der Unternehmenspraxis nachhaltig ausrichten

Hinter dem „Internet of Everything“-Narrativ steht das implizite oder explizite Streben danach, nahezu alle Menschen, Prozesse, Daten und Dinge zu virtualisieren und miteinander zu vernetzen, was aufgrund ihrer Implikationen für Energie- sowie Ressourcenaufwände kritisch hinterfragt werden sollte. Wissenslücken bestehen hier in Bezug auf die Barrieren, die einer Verbreitung (zum Teil bereits bestehender) grüner Technologien in Unternehmen im Wege stehen. Zudem gibt es nur wenige konkrete Ansätze für eine Umsetzung der Suffizienzstrategie („weniger ist mehr“) z. B. zur Beantwortung der Fragen „Welche Daten müssen Unternehmen nicht sammeln, was nicht analysieren, nicht wissen, nicht automatisieren, um Energie und Ressourcen einzusparen?“

Deep Dive:

Die Kurzstudie „Diffusionsbarrieren in der Umsetzung einer ökologischen Machine Economy“ skizziert verschiedene Ebenen digitalisierter Industrieunternehmen und schlägt praxisnahe Handlungsoptionen für die Verbreitung grüner Alternativen vor.

Komplexität der Umweltbelastung greifbar machen

Komplexität entsteht in der Machine Economy vor allem durch die Vielzahl an ständig (nahezu) eigenständig entscheidenden Maschinen. Um dadurch entstehende Dynamiken steuern zu können, müssen wir die zugrunde liegenden digitalen Architekturen greifbar machen. Dazu zählt zum einen der Trend des Edge-Computing, durch den Rechenleistung dezentralisiert wird und in Verbindung mit Algorithmen „Intelligenz“ direkt zu Endgeräten, Anlagen usw. gebracht wird. Zum anderen greifen intelligente Maschinen auf vielschichtige Architekturen von Infrastruktur, Daten und Applikationen zurück, die in kontinuierlichen Entwicklungsschleifen weiterentwickelt werden. In diesem Kontext Lebenszyklen und Umweltwirkung zu verstehen, stellt eine weitere Herausforderung dar.

Deep Dives:

Die Kurzstudie „Nachhaltiges Edge Computing im Kontext der Machine Economy“ erschließt das Themenfeld „Edge Computing“ im Kontext des maschinellen Dialogs und gibt einen Überblick über nachhaltigkeitsrelevante Fragestellungen.

Die Kurzstudie „Wie Tech-Unternehmen die Umweltwirkung digitaler Services in der Praxis sichtbar machen können“ identifiziert Eckpfeiler für die Erstellung von Umweltbilanzen für komplexe digitale Services, um Umweltbelastungen, aber auch -leistungen in Tech-Unternehmen sichtbar machen zu können.

Vernetzte Vielfalt grün gestalten

Die Machine Economy basiert auf einer Landschaft an unterschiedlichen Technologien, Akteur*innen mit diversen Bedürfnissen, Marken sowie Standards und mehr. Aber es gibt kaum Forschung über die Knotenpunkte, die Vielfalt verbinden und damit als Multiplikatoren für eine ökologische Gestaltung dienen können. Dazu zählen z. B. Organisationen hinter M2M-Plattformen, Open Source Frameworks oder Allianzen.

Deep Dive:

Der Kommentar „Nachhaltige Systemtransformation durch eine unabhängige Allianz“ beschreibt in Kürze, wie eine unabhängige Allianz für nachhaltige Digitalisierung in einer Vermittlungsrolle zwischen Akteur*innen die nachhaltige Gestaltung digitaler Technologien vorantreiben kann.

4. Roadmap

Die in den Deep Dives (d.h. in Kurzstudien und Kommentaren) explorativ erarbeiteten Handlungsoptionen wurden im Rahmen eines Roadmapping-Workshops mit allen Autor*innen diskutiert, auf der Zeitachse in einer Roadmap visualisiert (Abbildung 2) und bezüglich ihrer Machbarkeit sowie Wirkung in einer Matrix verortet (Abbildung 3). Im Folgenden stellen wir die Ergebnisse dar, die beispielhaft Handlungsspielräume eröffnen, als Diskussionsgrundlage dienen und im gemeinsamen Austausch der Community an der Schnittstelle Digitalisierung und Nachhaltigkeit validiert werden sollten.



Abbildung 2: Roadmap für den Weg in eine ökologische Machine Economy

Machbarkeit und Wirkung der identifizierten Handlungsoptionen

Erfahrungsschatz
(Beteiligte Akteure bzw. Akteurinnen)

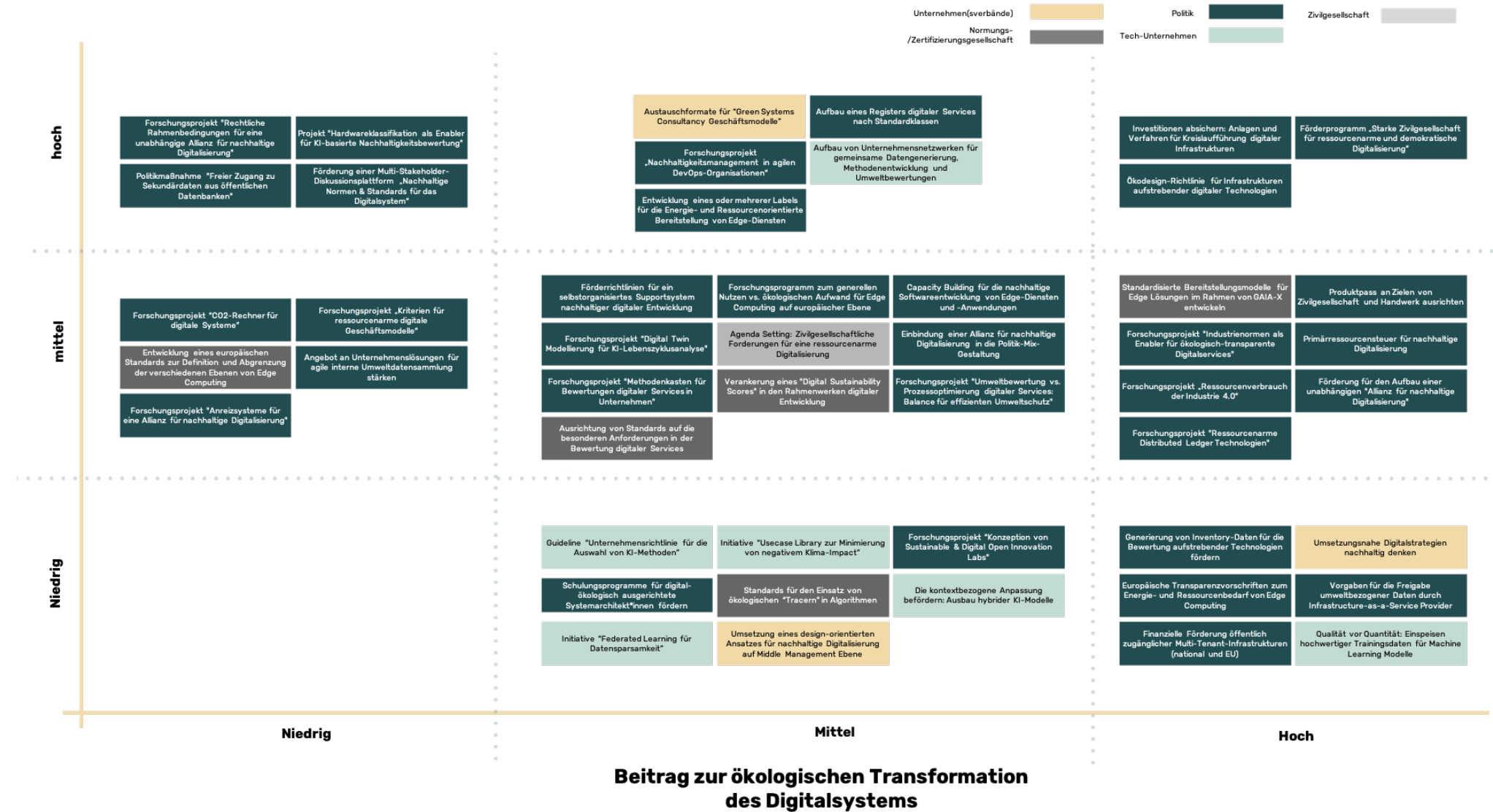


Abbildung 3: Machbarkeit und Wirkung der identifizierten Handlungsoptionen

Maßnahmen im Handlungsfeld: Grundliegende Wissensbasis schaffen

Deep Dive	Titel	Beschreibung	Akteure und Akteurinnen
„Das Gewicht der Machine Economy“	Forschungsprojekt "Ressourcenarme Distributed Ledger Technologien"	In einem durch die Politik geförderten Forschungsprojekt sollten dediziert die derzeitigen sowie zukünftigen ökologischen Auswirkungen von DLT beleuchtet werden. Das Feld ist im Wandel. Bisher lässt sich nicht klar bestimmen, welche Technologievarianten ("Blockchain vs. DAG") und Mechanismen ("Proof-of-Work" vs. "Proof-of-Stake" (u. a.)) sich durchsetzen werden. Das Projekt soll unter diesen Bedingungen mögliche Szenarien für den Ressourcenverbrauch der Technologievariationen ermitteln.	Politik
	Forschungsprojekt „Kriterien für ressourcenarme digitale Geschäftsmodelle“	Im Rahmen eines durch die Politik geförderten Forschungsvorhabens sollten aktuelle Entwicklungen rund um Geschäftsmodelle der I4.0 untersucht und Nachhaltigkeitskriterien im Sinne der Kreislaufwirtschaft identifiziert werden. I4.0 verbessert die Kommunikation zwischen den an der Entwicklung und Produktion beteiligten Akteur*innen, ermöglicht eine beschleunigte Anpassung von Produktionsverfahren und eine bessere Kundenbindung - wodurch Time-to-Market sinkt und Individualisierungsmöglichkeiten wachsen. Risiken durch neue ressourcenintensive Bedürfnisfelder sollen hier erschlossen werden.	Politik
	Produktpass an Zielen von Zivilgesellschaft und Handwerk ausrichten	In der Entwicklung des digitalen Produktpasses sollte die EU-Kommission darauf achten, auch wissenschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteure und Akteurinnen sowie das Reparaturgewerbe einzubinden. Denn im Rahmen politischer Standardisierungsprozesse muss der Zugang zu Informationen nicht nur systemkompatibel, sondern transparent entlang von Wertsöpfungsstrukturen geregelt werden. Insbesondere kann so gesichert werden, dass der Zugang zu Reparaturinformationen und Konstruktionsanforderungen an Ersatzteile im Sinne eines freien Rechts auf Reparatur für alle Nutzer und Nutzerinnen gewährleistet wird.	Politik
	Agenda Setting: Zivilgesellschaftliche Forderungen für eine ressourcenarme Digitalisierung	Zivilgesellschaftliche Organisationen sollten die Digitalisierung sowie Ressourcenfragen stärker thematisieren. Sie sollten dazu beitragen Digitalisierung als Hebel für die sozial-ökologische Transformation und ressourcenarme Lebensweisen zu begreifen und umzusetzen. Diese Fragestellungen sollten in künftigen Projektanträgen stärker aufgegriffen werden. Die Schaffung von Kapazitäten in diesem Bereich ist Voraussetzung, um eine Wissensbasis zu schaffen, sich mit anderen Akteur*innen zu vernetzen und Einfluss auf gesellschaftliche und politische Diskussionen zu nehmen.	Zivilgesellschaft
	Förderprogramm „Starke Zivilgesellschaft für ressourcenarme und demokratische Digitalisierung“	Aktuell gibt es nur wenige zivilgesellschaftliche Akteure und Akteurinnen, die in Tiefe zu Digitalisierungsthemen, insbesondere zu I4.0, arbeiten. Auch sind in derzeitigen I4.0 Initiativen kaum zivilgesellschaftliche Akteure und Akteurinnen vertreten oder ihre Teilnahme ist explizit nicht erwünscht (z.B. Gaia-X). Daher sollte die Regierung/Politik auch hier sowohl Teilhabe- als auch Förderungsmöglichkeiten schaffen, damit der Aushandlungsprozess um die digitale Transformation nicht einseitig von der Industrie dominiert wird. Dies ist von besonderer Relevanz, da von dieser Transformation auch der Erfolg der Kreislaufwirtschaft maßgeblich abhängt.	Politik
	Forschungsprojekt „Ressourcenverbrauch der Industrie 4.0“	Die Ressourcenintensität bzw. -effizienz der Industrie 4.0 wird in Studien fast ausschließlich für den Produktionsprozess selbst ermittelt. Die Politik sollte ein Forschungsprojekt fördern, das den tatsächlichen Ressourcenaufwand anhand des gesamten Lebenszyklus digitaler Technologien und Infrastrukturen erfasst, eine Nachhaltigkeitsbewertung sowohl für die einzelnen Technologien der I4.0, als auch für ihr Zusammenspiel durchführt, Ressourcenbedarfe Geschäftsmodellen zuweisbar macht und bisherige LCA zu dynamischen Modellen weiterentwickelt.	Politik

	Förderung einer Multi-Stakeholder-Diskussionsplattform „Nachhaltige Normen & Standards für das Digitalsystem“	Die Politik sollte Plattformen fördern, über die Informationen zum Ressourcenverbrauch der I4.0 verbreitet und in Zusammenspiel mit Politik, Industrie und Zivilgesellschaft geeignete politische Instrumente diskutiert werden. Neben Industrieakteur*innen sollten insb. unabhängige Forschungsinstitute sowie die Zivilgesellschaft aktiv eingebunden werden. Darüber hinaus sollten Dialogplattformen für das Recycling und die Umsetzung I4.0 zusammengeführt, statt weiterhin getrennt behandelt zu werden.	Politik
	Ökodesign-Richtlinie für Infrastrukturen aufstrebender digitaler Technologien	Ein möglicher Weg, den Aufbau der I4.0 im Sinne der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben und die Zirkularität von technologiemetallhaltigen Produkten zu gewährleisten ist eine Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie auf digitale Infrastrukturen der I4.0. I4.0 Anlagen müssen von Anfang an systemisch gedacht und demontagegerecht gebaut werden. Dem sollte eine Standardisierung recyclinggerechter Konstruktionen spezifisch für den Maschinen- und Anlagenbau (z.B. im Bereich Robotik, 3D Druck) zur Konstruktion zirkulärer Anlagen und ihren digitalen Schnittstellen vorangehen.	Politik
	Primärressourcensteuer für nachhaltige Digitalisierung	Um der Preisvolatilität von Rohstoffen entgegenzuwirken, die Investitionen in Recycling-Infrastruktur erschwert, sollte die Politik eine auf die Digitalisierung ausgerichtete primäre Ressourcensteuer in Erwägung ziehen. Sie stabilisiert den Rohstoffpreis insoweit, als dass sie die externen Kosten des primären Rohstoffabbaus einpreist. Hierdurch könnten recycelte Technologiemetalle als Sekundärrohstoffe dauerhaft konkurrenzfähig auf den Markt gelangen.	Politik
	Investitionen absichern: Anlagen und Verfahren für Kreislaufführung digitaler Infrastrukturen	Langfristige Investitionen in die Entwicklung von Recyclingverfahren und den Aufbau von Verwertungsanlagen sowie die Unsicherheit der künftigen Preisentwicklung bei Technologiemetallen stellen ein hohes Risiko für Investor*innen dar. Die Investitionsbanken (KfW, EIB) könnten dazu beitragen, die Risiken für die Investor*innen zu reduzieren. (Die zuvor vorgeschlagene Ressourcensteuer auf Input-Niveau könnte zur Gegenfinanzierung genutzt werden, womit die Herstellerverantwortung Berücksichtigung finden würde).	Politik
„Umweltbelastung in aufsteigenden Trends der Künstlichen Intelligenz“	Qualität vor Quantität: Einspeisen hochwertiger Trainingsdaten für Machine Learning Modelle	Im Gegensatz zu alleiniger algorithmischer Optimierung sollten Unternehmen den Schwerpunkt bei der Entwicklung leistungstarker ML-Modelle auf das Einspeisen qualitativ hochwertiger Trainingsdaten legen, die gezielt gegenüber Inkonsistenzen wirken. Dies reduziert die Modelltrainingszeit, den Bedarf großer Datenmengen sowie deren Speicherung und ermöglicht eine effiziente Datenbeschaffung. Die Modellgenauigkeit wird verbessert, die Skalierbarkeit erweitert, und in der Folge die Nachfrage nach Energie und Ressourcen verringert.	Tech-Unternehmen
	Die kontextbezogene Anpassung befördern: Ausbau hybrider KI-Modelle	Unternehmen sollten bei dem Design von KI-Architekturen vorhandenes Wissen mit den Stärken statistischer Verfahren vereinen, um Modelle aufzubauen, die Zusammenhänge erkennen und nutzen. Dies birgt die Chance KI-Systeme transparenter, performanter und nachhaltiger zu machen. Bessere Ergebnisse statistischer Verfahren, trotz geringerer Datenmengen, nachvollziehbar und effizient durch das Inkorporieren bestehenden Wissens, erspart das Anlernen über große Datensätze und somit hohe Rechen- und Umweltkosten.	Tech-Unternehmen

Tabelle 1: Maßnahmen im Handlungsfeld „Grundlegende Wissensbasis schaffen“

Maßnahmen im Handlungsfeld: „Transparenz der Dinge“ für „Transparenz der Umweltwirkung“ einsetzen

Deep Dive	Titel	Beschreibung	Akteure und Akteurinnen
„KI-Methodenkoffer zur Messung von Umweltbelastungen im Einsatz von KI, sowie IoT und DLT“	Projekt "Hardwareklassifikation als Enabler für KI-basierte Nachhaltigkeitsbewertung"	Die Politik sollte ein Projekt fördern, dass eine Klassifikation von digitaler Hardware für Nachhaltigkeitsbewertungen auf der Software-Ebene erlaubt. Damit KI-Methoden für die Bewertung von Umweltbelastungen in IoT-, KI- sowie DLT-Systemen eingesetzt werden können, braucht es eine nachhaltigkeitsrelevante Klassifizierung der zugrunde liegenden Hardware.	Politik
	Forschungsprojekt "CO2-Rechner für digitale Systeme"	Die Politik sollte ein Forschungsprojekt fördern, in dem ein CO2-Rechner entwickelt wird, durch den CO2-Äquivalente und damit Teile der Umweltwirkung digitaler Systeme transparent werden. Nutzer und Nutzerinnen erhalten darüber wesentliche Kennzahlen zur Umweltwirkung ihrer Anwendungen der IoT, KI und DLT. Gleichzeitig können anonymisiert Daten für Forschungsprojekte gesammelt sowie bereitgestellt werden.	Politik
	Forschungsprojekt "Digital Twin Modellierung für KI-Lebenszyklusanalyse"	In diesem durch die Politik geförderten Forschungsprojekt, sollen Digital Twins entwickelt werden, die die virtuelle Abbildung des gesamten KI, IoT, DLT Lifecycles in einem digitalen systemischen Modell erlauben. Mit "unüberwachtem Lernen" können diese Daten dann explorativ auf Nachhaltigkeitspotentiale analysiert werden.	Politik
	Politikmaßnahme "Freier Zugang zu Sekundärdaten aus öffentlichen Datenbanken"	Die Politik sollte freien Zugang zu Sekundärdaten aus öffentlichen Datenbanken schaffen. Besonders für die Nachhaltigkeitsberechnung in der Anwendungsphase von Produkten und Dienstleistungen sind diese Daten notwendig, um möglichst zielgerichtete Auswertungen umsetzen zu können. Ziel ist es, eine höhere Genauigkeit und Verlässlichkeit im Training für KI/Machine Learning-Modelle zu erhalten.	Politik
	Initiative "Federated Learning für Datensparsamkeit"	Federated Learning (FL) ist in der Lage Datenbestände z. B. in IoT-Systemen über Silogrenzen hinweg zu analysieren. Dadurch erreichen wir eine Steigerung der Effizienz im Umgang mit umweltrelevanten Daten bei gleichzeitiger Sicherheit. Um den Einsatz in der Praxis attraktiv zu gestalten, ist es denkbar, dass z. B. Tech-Unternehmen über eine gemeinsame Initiative Anreize zur gemeinsamen Umsetzung von Federated Learning für Datensparsamkeit in komplexen digitalen Systemen schaffen.	Tech-Unternehmen
	Initiative "Usecase Library zur Minimierung von negativem Klima-Impact"	Hier soll eine "Application Reference Datenbank" entwickelt werden, um eine Übersicht über die bekannten KI-Lösungen zu geben, welche zur Identifizierung und Optimierung der Umweltbelastungen in IoT-, KI- sowie DLT-Anwendungen in praktischen Problemstellungen verwendet werden können. Das Ziel ist, Wissen über bestehende Methoden mit anderen Entwicklern bzw. Entwicklerinnen zu teilen. Somit können immer die ökologisch sinnvollsten Modelle direkt bei der Entwicklung ausgewählt werden.	Tech-Unternehmen
	Guideline "Unternehmensrichtlinie für die Auswahl von KI-Methoden"	Hier soll eine Unternehmensrichtlinie skizziert werden, die definiert, bei welchem Anwendungsszenario von KI, IoT oder DLT welche KI-Methode zur Anwendung kommen soll, um den ökologischen Fußabdruck der Anwendung zu identifizieren und zu minimieren. Initiiert werden können diese Richtlinie Unternehmen, die sich als Vorreiter nachhaltiger Digitalisierung positionieren möchten.	Tech-Unternehmen
	Standards für den Einsatz von ökologischen "Tracern" in Algorithmen	Durch das Implementieren von Tracern kann beispielsweise die entstehende Menge an CO2 direkt im Algorithmus ersichtlich gemacht werden. Die so geschaffene Transparenz eines Modells kann z. B. durch Entwickler bzw. Entwicklerinnen bewertet werden. Initiiert werden kann dies u. a. durch Standards, die von Normierungsgesellschaften aufgesetzt werden und entsprechende Zertifizierungen, sowie dem Aufbau eines öffentlichen Datensets.	Normungs- & Zertifizierungsgesellschaften

Tabelle 2: Maßnahmen im Handlungsfeld „Transparenz der Dinge“ für „Transparenz der Umweltwirkung“ einsetzen“

Maßnahmen im Handlungsfeld: „Internet of Everything“-Mentalität in der Unternehmenspraxis nachhaltig ausrichten

Deep Dive	Titel	Beschreibung	Akteure und Akteurinnen
„Diffusionsbarrieren in der Umsetzung einer ökologischen Machine Economy“	Austauschformate für "Green Systems Consultancy Geschäftsmodelle"	Über Austauschformate (wie Konferenzen o.ä.) könnten sich Beratungshäuser, Software- und Infrastrukturprovider, Organisationen angewandter Forschung und weitere externe Unterstützer und Unterstützerinnen nähern. Dabei sollten neue Beratungskonzepte für digital-ökologische Umsetzungsstrategien, Prozesse und Organisationsstrukturen, Architekturen usw. diskutiert werden. Voraussetzungen oder Bedürfnisse von digital-getriebenen Unternehmen könnten zudem in den Blick genommen werden und neue Partnerschaften entstehen.	Unternehmen(s-verbände)
	Forschungsprojekt „Nachhaltigkeitsmanagement in agilen DevOps-Organisationen“	Die Politik sollte gezielt ein Forschungsprojekt anstoßen, in dem ein Framework für Nachhaltigkeitsmanagement in agilen DevOps-Organisationen erarbeitet wird. Dabei sollte insbesondere die Verortung der Nachhaltigkeitsverantwortlichen (z. B. dedizierte Abteilung, Mitglieder in Service-Teams usw.) sowie die prozessuale Einbindung (z. B. im Scrum Ansatz oder der strategischen Planung) angestrebt werden. Wesentlich ist auch, individuelle Unternehmenskontexte, Prozesslandschaften sowie Organisationsstrukturen zu berücksichtigen und z. B. durch eine Typologisierung mit entsprechenden Empfehlungen abzubilden.	Politik
	Umsetzungsnahe Digitalstrategien nachhaltig denken	Anstatt digitale und nachhaltige Umsetzungsstrategien getrennt voneinander zu behandeln, sollten Unternehmen direkt beide Seiten integrativ aufsetzen. Auf diesem Wege können übergreifende Nachhaltigkeits- und Digitalstrategien schneller in die Umsetzung gebracht werden und Middle Manager bzw. -Managerinnen sowie Entwickler bzw. Entwicklerinnen erhalten zeitnah Orientierung in der Auseinandersetzung mit den voranschreitenden Transformationsfeldern der Digitalisierung und Nachhaltigkeit.	Unternehmen(s-verbände)
	Forschungsprojekt "Konzeption von Sustainable & Digital Open Innovation Labs"	Über ein Forschungsprojekt sollte die Politik die Konzeption eines "Digital Open Innovation Lab" fördern. Ähnlich Reallaboren, sollen Möglichkeiten im digitalen Raum geschaffen werden, um digitale Bausteine aus der unternehmensinternen Entwicklung kollaborativ und mit verschiedenen Stakeholdern und Stakeholderinnen im Sinne von "plug-and-play" zu testen und die ökologische Wirkung zu optimieren. Ziel ist, die Fähigkeiten der Community für nachhaltige digitale Entwicklung zu bündeln.	Politik
	Umsetzung eines design-orientierten Ansatzes für nachhaltige Digitalisierung auf Middle Management Ebene	Unternehmen sollten agile DevOps Strukturen über design-orientiertes Management aussteuern. Um das "Frozen Middle (Management)" in Richtung nachhaltige digitale Innovation zu bewegen, braucht es einerseits die starke Einbeziehung von Kundenfeedback in der Aussteuerung des Service-Portfolios. Andererseits sollten Menschen mit Design-Hintergrund stärker in Management-Rollen aufgenommen werden. Die Design-Orientierung ersetzt das Streben nach konstanten Outputs mit "Lernen durch Scheitern".	Unternehmen(s-verbände)
	Verankerung eines "Digital Sustainability Scores" in den Rahmenwerken digitaler Entwicklung	Umwelteffekte können in der Praxis häufig nicht transparent gemacht werden. Als "Best Guess" Ansätze sollten sich Entwicklungs-Teams die Frage stellen "Ist diese digitale Lösung nachhaltig?". Um dies zu erreichen, sollten Zertifizierungseinrichtungen agile Frameworks u. a. um eine entsprechende "Definition of Done" erweitern und Schulungshäuser dazu bringen die neuen Ansätze zu vermitteln. So wird nachhaltige digitale Entwicklung auch ohne dedizierte Datenbasis zu spezifischen Umweltwirkungen angeregt.	Normungs- & Zertifizierungsgesellschaften

	Förderrichtlinien für ein selbstorganisiertes Supportsystem nachhaltiger digitaler Entwicklung	Organisationen, die neue Projekte an der Schnittstelle Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Unternehmenskontext fördern sollten ihre Förderrichtlinien dahingehend anpassen, dass Forschungsergebnisse proaktiv in ausgewählten Social-Media-Kanälen (z. B. Fachforen) geteilt werden. Die damit angestoßenen Diskussionen sollen ein dezentrales System von Anlaufstellen für Fragen rund um nachhaltige digitale Entwicklung befeuern. Anstatt zentralisierte Plattformen aufzubauen, werden damit die Selbstorganisationskräfte der Entwicklungsszene genutzt.	Politik
	Schulungsprogramme für digital-ökologisch ausgerichtete Systemarchitekt*innen fördern	Die Politik sollte mit einem Förderprogramm gezielt Digitalunternehmen sowie Schulungsanbieter, die Programme für Systemarchitekt*innen an der Schnittstelle zur Nachhaltigkeit aufbauen möchten, unterstützen. Dabei soll die ökologische Gestaltung über Architekturebenen (Infrastruktur, Daten, Applikationen) hinweg vermittelt werden. Zu empfehlen wäre eine Unterscheidung nach Anwendungsgebieten. Die geschulten Personen füllen eine wesentliche Wissenslücke in der Unternehmenspraxis rund um Treiber von Umweltbelastungen komplexer Digitalssysteme.	Politik

Tabelle 3: Maßnahmen im Handlungsfeld: „Internet of Everything“-Mentalität in der Unternehmenspraxis nachhaltig ausrichten

Maßnahmen im Handlungsfeld: Komplexität der Umweltbelastung greifbar machen

Deep Dive	Titel	Beschreibung	Akteure und Akteurinnen
„Nachhaltiges Edge-Computing im Kontext der Machine Economy“	Standardisierte Bereitstellungsmodelle für Edge Lösungen im Rahmen von GAIA-X entwickeln	Wir brauchen einen internationalen Standard, der dabei unterstützt, die Bereitstellung von Edge-Computing herstellerübergreifend zu automatisieren, um eine flexiblere Nutzung der Hardware zu ermöglichen. Damit ließe es sich vermeiden, dass verschiedene Dienstanbieter jeweils eigene Edge-Infrastrukturen aufbauen. Da sich die Anforderungen an die Edge-Infrastruktur dynamisch entwickeln werden, wäre hierfür ein internationaler Standard sinnvoll, der z. B. im Rahmen von GAIA-X entwickelt und kontinuierlich an die technischen Bedarfe angepasst wird.	Normungs- & Zertifizierungsgesellschaften
	Forschungsprogramm zum generellen Nutzen vs. ökologischen Aufwand für Edge Computing auf europäischer Ebene	Edge Computing bringt viele Versprechen mit sich, insbesondere aufgrund sehr lokaler Datenspeicherung und Verarbeitung. Im Rahmen von Forschungsprojekten soll auf verschiedenen Ebenen untersucht werden, inwiefern diese Versprechen durch die Technik tatsächlich erbracht werden können und welche ökologischen sowie sonstigen Mehrwerte diese für die Anwender und Anwenderinnen bedeuten. Gleichzeitig soll untersucht werden, welche negativen Auswirkungen die Umsetzung eines Cloud-Edge-Kontinuums bedeutet, z.B. welche Material- und Energiebedarfe daraus resultieren.	Politik
	Entwicklung eines europäischen Standards zur Definition und Abgrenzung der verschiedenen Ebenen von Edge Computing	Die Diskussionen um Edge Computing leiden derzeit darunter, dass kein einheitliches Begriffsverständnis besteht. Mit einem Standard sollen sprachliche und technische Eigenschaften des Edge Computing definiert werden, vergleichbar mit dem Standard NIST-SP 500-291 (Cloud Computing). Dafür wäre mindestens ein Industriestandard durch Branchenverbände wie der Linux Foundation sinnvoll, ggf. ein internationaler Standard einer Normungsorganisation.	Normungs- & Zertifizierungsgesellschaften
	Finanzielle Förderung öffentlich zugänglicher Multi-Tenant-Infrastrukturen (national und EU)	Ausgehend von der multi-tenant-fähigen Public-Cloud-Infrastruktur sollte auch im Bereich der dezentralen Edge-Rechenzentren eine für alle Dienste zugängliche Hard- und Software-Infrastruktur geschaffen werden. Dies würde redundante Edge-Infrastrukturen vermeiden und eine bessere Auslastung sowie Skalierbarkeit ermöglichen. Dazu müsste neben der Verfügbarkeit von einheitlichen Bereitstellungsmodellen auch die tatsächliche Verbreitung und Nutzung solcher Bereitstellungsmodelle gefördert werden - z. B. durch ökonomische Förderung, gezielte öffentliche Beschaffung und regulatorische Maßnahmen (z.B. Mindestanforderungen).	Politik

	Capacity Building für die nachhaltige Softwareentwicklung von Edge-Diensten und -Anwendungen	Um die Potenziale einer effizienten gestalteten Software zu heben, müssen Entwickler bzw. Entwicklerinnen und Softwareunternehmen das Ziel der Softwareeffizienz stärker berücksichtigen. Hierzu wird Capacity Building im Rahmen von durch die Politik geförderten Programmen zur Aus- und Weiterbildung von Software Entwicklerinnen vorgeschlagen. Da Hardware-Ressourcen insbesondere im Bereich von Cloud Anwendungen nahezu unbegrenzt und verhältnismäßig günstig verfügbar sind, ist eine solche Software-Effizienz bisher kein primäres Ziel bei der Entwicklung von Anwendungen.	Politik
	Europäische Transparenzvorschriften zum Energie- und Ressourcenbedarf von Edge Computing	Die Umweltwirkungen von digitalen Systemen in der Fläche beruhen vor allem auf Berechnungen (z. B. mittels Marktzahlen und Geräteinventar) und weniger auf tatsächlichen Messungen. Digitale Technik ist häufig bereits in der Lage den eigenen Energiebedarf zu erfassen, zum Teil sogar bezogen auf einzelne Anwendungen. Für das großteils neu entstehende Edge-Computing Ökosystem sollten daher vornherein recht klare Transparenzanforderungen gelten, um eine Erfassung der Auswirkungen auf Umwelt und Klima besser zu quantifizieren.	Politik
	Entwicklung eines oder mehrerer Labels für die Energie- und Ressourcenorientierte Bereitstellung von Edge-Diensten	Auf Basis der hier vorgeschlagenen Transparenzvorschriften und des internationalen Standards sollten Umweltlabel aufgesetzt werden. Hierüber sollen Unternehmen u. a. die Möglichkeit erhalten, sich von Wettbewerbern zu differenzieren.	Politik
„Wie Tech-Unternehmen die Umweltwirkung digitaler Services in der Praxis sichtbar machen können	Forschungsprojekt "Methodenkasten für Bewertungen digitaler Services in Unternehmen"	Die Politik sollte die Entwicklung dedizierter Methoden für die Analyse von Umweltwirkungen digitaler Services fördern - als Hilfestellung für Praktiker und Praktikerinnen und Input bei der Entwicklung von Standards. Die Methoden sollten die jeweiligen Anforderungen in der Praxis berücksichtigen und Orientierung für verschiedene Kontexte liefern (z. B. KMU vs. Enterprise, versch. Branchen, usw.).	Politik
	Forschungsprojekt "Industrienormen als Enabler für ökologisch-transparente Digitalservices"	Die Politik sollte ein umfassendes Forschungsprojekt fördern, das erarbeitet, wie Anforderungen von Bewertungsmethoden in Standards und Normen digitaler Services eingebracht werden können. Diese Anforderungen sollten "by-design" in der Entwicklung digitaler Services berücksichtigt werden indem sie durch Normungsgesellschaften einerseits in bestehende (z. B. ISO/IEC 30141 für IoT), aber auch in neue Normen (z. B. im Bereich KI) und Richtlinien (z. B. Ökodesign) direkt mit eingebunden werden.	Politik
	Forschungsprojekt "Umweltbewertung vs. Prozessoptimierung digitaler Services: Balance für effizienten Umweltschutz"	Die Politik sollte Forschung fördern, die untersucht, wie Unternehmenskapazitäten am effektivsten zur Reduzierung von Umweltbelastungen digitaler Services eingesetzt werden können. Vor dem Hintergrund hoher Dynamik und Individualität komplexer Services mag eine Fokussierung auf Prozessoptimierung (z. B. anhand von Green Coding Standards) in Verbindung mit wenigen vereinfachten Performance-Indikatoren gegenüber ausführlichen Umweltbilanzierungen in der Unternehmenspraxis zu bevorzugen sein.	Politik
	Aufbau eines Registers digitaler Services nach Standardklassen	Die Politik sollte die Umsetzung eines Registers finanzieren, durch das die Umweltwirkung digitaler Services dargestellt wird. Innerhalb von Standardklassen können hier Kunden Services vergleichen und Anbieter Wettbewerbsvorteile generieren. Das Register muss einen Weg finden, neben den Gemeinsamkeiten der Services innerhalb von Klassen, individuelle Unterschiedlichkeit und Leistungen einzubeziehen.	Politik
	Generierung von Inventory-Daten für die Bewertung aufstrebender Technologien fördern	Die Politik sollte über ein Forschungsprojekt die Generierung dedizierter Datensätze für die Bewertung digitaler Services und insb. aufstrebender Technologien (KI, IoT, DLT) initiieren. Die Daten sollten in bestehende Datenbanken (z. B. ecoinvent) integriert werden. Damit sind sie - neben der unternehmensinternen Produktion von Umweltdaten - ein wesentliche Grundlage für eine Verbreitung von Bilanzierungen digitaler Services.	Politik
	Angebot an Unternehmenslösungen für agile interne Umweltdatensammlung stärken	Über Startup-Förderung sollte die Politik Mittel für die Entwicklung dedizierter Lösungen für das interne Sammeln von umweltbezogenen Daten bei Tech-Providern bereitstellen. Solche Lösungen müssen den Anforderungen digitaler Services, u. a. der selbstständigen Produktion von Umweltdaten in dynamischen Kontexten gerecht werden (z. B. in der agilen Entwicklung von Big Data Anwendungen). Damit wird eine Grundlage für kontinuierliche Bewertungsprozesse geschaffen.	Politik

	Aufbau von Unternehmensnetzwerken für gemeinsame Datengenerierung, Methodenentwicklung und Umweltbewertungen	Tech-Provider sollten sich für den Aufbau unternehmensübergreifender Netzwerke unter Einbeziehung von kommerziellen und freien Anbietern von Umweltdatenbanken und Bewertungssoftware einsetzen, um gemeinsam Umweltdaten auszutauschen, Methodenentwicklung voranzutreiben und aufwendige Bewertungen (z. B. indirekter Effekte) gemeinschaftlich durchzuführen. Insb. braucht es den Zusammenschluss von Tech-Providern mit ähnlichen Service-Portfolios, um Vergleichbarkeit und Synergien wahrzunehmen.	Tech-Unternehmen
	Vorgaben für die Freigabe umweltbezogener Daten durch Infrastructure-as-a-Service Provider	Die Politik sollte über Regulierung große Infrastructure-as-a-Service (IaaS) Provider in die Pflicht nehmen, wesentliche Daten bezüglich der Energie- und Ressourcenbeanspruchung der darauf zugreifenden Services ihrer Kunden für diese bereitzustellen. In einem ersten Schritt könnten dies stark vereinfachte Datensätze, als Grundlage für Umweltbilanzierungen sein. Über die freiwillige Bereitstellung von Echtzeitdaten können sich darüber hinaus differenzierungs- bzw. Wettbewerbsvorteile für IaaS Provider ergeben.	Politik
	Ausrichtung von Standards auf die besonderen Anforderungen in der Bewertung digitaler Services	Normungsgesellschaften sollten Standards (z. B. ETSI ES 203 199) für die Anforderungen in der Bewertung digitaler Services passgenauer auf den Unternehmenskontext zuschneiden. Dazu zählen u. a. Ansätze für die Bemessung indirekter Effekte, von Dynamik oder die Orientierung unterschiedlicher zeitlicher (Echtzeit vs. jährlich) oder organisatorischer (Team- vs. Unternehmensebene) Ausprägungen sowie die Sicherstellung der Vergleichbarkeit funktionaler Einheiten. Dadurch steigt die Akzeptanz und Anwendbarkeit von Umweltbewertungen digitaler Services für Praktiker und Praktikerinnen insb. bei Tech-Providern.	Normungs- & Zertifizierungsgesellschaften

Tabelle 4: Maßnahmen im Handlungsfeld „Komplexität der Umweltbelastung greifbar machen“

Maßnahmen im Handlungsfeld: Vernetzte Vielfalt grün gestalten

Deep Dive	Titel	Beschreibung	Akteure und Akteurinnen
Nachhaltige Systemtransformation durch eine unabhängige Allianz	Förderung für den Aufbau einer unabhängigen "Allianz für nachhaltige Digitalisierung"	Die Politik sollte den Aufbau einer gemeinnützigen, unabhängigen Organisation fördern mit dem Ziel eine Plattform zu schaffen, die es Akteure*innen aus der Wertschöpfungskette, Forschung und Politik ermöglicht eine Nachhaltigkeitsroadmap zu entwickeln, Missionen abzuleiten und die Umsetzung zu begleiten. Die Politik sollte dabei die Schirmherrschaft übernehmen, um die Unabhängigkeit von den Interessen einzelner Branchen oder Akteure zu gewährleisten und die Gemeinwohlorientierung der Organisation zu sichern.	Politik
	Forschungsprojekt "Anreizsysteme für eine Allianz für nachhaltige Digitalisierung"	Das Projekt sollte die Frage nach formellen und informellen Anreizen für das Mitmachen in der Allianz durch Akteure und Akteurinnen aus verschiedenen Teilen der Wertschöpfungskette beantworten (insb. Hersteller von digitalen Services und Anbieter von digitaler Infrastruktur). Hier könnte es insbesondere um die Unterscheidung zwischen freiwilliger Mitarbeit und Zwang je nach Bereich und Aufgabe gehen.	Politik
	Forschungsprojekt "Rechtliche Rahmenbedingungen für eine unabhängige Allianz für nachhaltige Digitalisierung"	Die Politik sollte ein Projekt fördern, das rechtliche Rahmenbedingungen für eine gestaltungsfähige Allianz für nachhaltige Digitalisierung schafft. Hier sollen insb. ihre Befugnisse und Schnittstellen im Kontext verschiedener Akteure und Akteurinnen definiert werden.	Politik
	Einbindung einer Allianz für nachhaltige Digitalisierung in die Politik-Mix-Gestaltung	Die Allianz sollte durch die Politik in wesentliche Prozesse des Policy-Designs eingebunden werden. Hier kann sie die Bedürfnisse einer nachhaltigen Digitalisierung sowie die Bedürfnisse der Stakeholder einbringen und Feedback aus dem Politikprozess in Richtung privater Akteure kommunizieren.	Politik

Tabelle 3: Maßnahmen im Handlungsfeld „Vernetzte Vielfalt grün gestalten“

5. Fazit & Ausblick

In der Forschungslinie „Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung“ sollte explorativ und beispielhaft der Weg in eine ökologische Machine Economy aufgezeigt werden. Anhand von wesentlichen Handlungsfeldern und Deep Dives wurden Vorschläge für eine grüne Governance von IoT, KI sowie DLT bzw. Blockchain zusammengetragen. Zusammenfassend halten wir fest: Der Weg in eine ökologische Machine Economy muss jetzt gestaltet werden. Einige Herausforderungen konnten im Rahmen dieser Forschungslinie skizziert werden. Und erste Gestaltungsinstrumente stehen für verschiedene Akteure und Akteurinnen bereit –dennoch stehen wir noch am Anfang.

Damit das komplexe Zusammenspiel aufstrebender digitaler Technologien tatsächlich ökologisch ausgerichtet wird, braucht es jetzt ein entschlossenes Vorgehen:

Die hier vorgeschlagenen Maßnahmen sollten in der Praxis erprobt werden.

Hierüber schaffen wir nachhaltige Realitäten in den identifizierten Themenbereichen und Herausforderungen. Wir schlagen vor, einige Maßnahmen direkt umzusetzen und andere für eine experimentelle Erprobung auszuwählen.

Das hier erarbeitete Governance-Framework sollte inhaltlich erweitert werden.

Dazu gehört zum einen eine weitere Auffächerung der Handlungsfelder d.h. das Erschließen neuer, hier nicht dargestellter Problembereiche. Zum anderen braucht es weitere Deep Dives in den bereits beschriebenen Handlungsfeldern, um diese in Gänze zu erschließen.

Das Governance-Framework sollte um eine Steuerungslogik ergänzt werden.

Unser Rahmenwerk entstand entlang inhaltlicher Dimensionen an der Schnittstelle aufstrebender Technologien und Nachhaltigkeit. Für eine Steigerung seiner Effektivität wäre eine Integration mit bestehenden Governance-Ansätzen bzw. -Theorien sinnvoll, um von ihren Steuerungslogiken, -instrumenten und -prozessen zu profitieren.

Die Geschwindigkeit, mit der digitale Technologien geformt, Marktlogiken auf den Kopf gestellt und neue Nachhaltigkeitsherausforderungen aufgeworfen werden, fordert entschlossenes Handeln vielfältiger Akteure und Akteurinnen. Dieser Bericht soll wachrütteln, aktivieren und Perspektiven aufzeigen, damit der Grundstein für eine ökologische Machine Economy gesetzt werden kann.

Für uns steht fest: Überlassen wir IoT, KI und DLT bzw. Blockchain sich selbst, müssen wir möglicherweise dabei zusehen, wie angepriesene Potenziale für die sozial-ökologische Transformation gegenüber wachsenden Umweltbelastungen verblassen. Das Gelegenheitsfenster ist offen – Jetzt!

Literaturverzeichnis

- Bremild, M. (2021). What Happened to the IoT Hype? <https://www.linkedin.com/pulse/what-happened-iot-hype-morten-bremild/>
- Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report 2018–2023). <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Garnter. (2020a). Gartner 2020 Hype Cycle for Supply Chain Strategy Shows Internet of Things is Two to Five Years Away from Transformational Impact. Gartner. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-09-gartner-2020-hype-cycle-for-supply-chain-strategy-shows-internet-of-things-is-two-to-five-years-away-from-transformational-impact>
- Gartner. (2020b). Hype Cycle for Manufacturing Operations Strategy, 2020. <https://www.optessa.com/wp-content/uploads/2021/04/Gartner-Hype-Cycle-August-2020-with-Optessa.pdf>
- Goasduff, L. (2021). The 4 Trends That Prevail on the Gartner Hype Cycle for AI, 2021. Gartner. <https://www.gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021>
- Rajasingham, D. (2017). Welcome to the machine-to-machine economy, Opportunities and challenges in a connected world. <https://www.commbank.com.au/content/dam/caas/newsroom/docs/Commbank-Whitepaper-Machine-to-Machine-economy.pdf>
- Urbach, N., Albrecht, T., Guggenheimer, T., Jöhnik, J., Gebert, J., Jelito, D., Lämmermann, L., Schweizer, A., & qbound GmbH. (2020). The Advance of the Machines – Vision und Implikationen einer Machine Economy. <https://www.fim-rc.de/Paperbibliothek/Veroeffentlicht/1175/wi-1175.pdf>

Handlungsfelder für Wege in eine ökologische Machine Economy

Autor*innen

Daniel Wurm

Oliver Zielinski

Neeske Lübben

Maike Jansen

Stephan Ramesohl

Kurz gesagt

Wir brauchen eine "Grüne Governance der Machine Economy", die Akteure bzw. Akteurinnen und Technologien über alle Ebenen der Wertschöpfung hinweg erfasst, um die Umweltbelastungen durch die technologischen Infrastrukturen der Machine Economy zu minimieren.

Dieser Beitrag stellt eine abgeänderte Version des CO:DINA Positionspapiers „Wege in eine ökologische Machine Economy“ von August 2021 dar. Insbesondere die erarbeiteten Handlungsfelder wurden leicht angepasst. Es wurde eine andere Darstellung gewählt, um die Kurzstudien des Forschungsberichts zu „Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung“ einzuleiten und zu rahmen.

Kernthesen

1. Im Zeitalter der Machine Economy ist der maschinelle Dialog allgegenwärtig – das bietet neue Chancen für Nachhaltigkeit, erhöht gleichzeitig aber durch die zugrundeliegenden Technologien auch den Druck auf unsere Umwelt
2. Internet of Things (IoT), Künstliche Intelligenz (KI) und Distributed Ledger Technologien (DLT) sind das technologische Fundament der Machine Economy – damit verbunden sind Infrastrukturen, Datenströme und Anwendungen, die hohe Energie- sowie Ressourcenaufwände erzeugen
3. Der derzeitige politische Diskurs sowie die Nachhaltigkeitsforschung fokussieren sich auf Umweltwirkungen durch digitale Infrastrukturen – Daten, Applikationen sowie die Rolle von Akteuren als Treiber der Umweltwirkung werden zu wenig beleuchtet
4. Eine “Grüne Governance der Machine Economy” adressiert systemübergreifende Treiber von Umweltbelastungen und ihre Wirkung – Ziel ist ein Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen und ein ökologisches Zusammenspiel aller beteiligten Technologien in der Wertschöpfung

Inhaltsverzeichnis

1. Wir betreten das Zeitalter der selbstständigen Maschinen	32
2. Der maschinelle Dialog und sein technologisches Fundament.....	34
3. Wertschöpfung und Akteurslandschaften werden neu konstruiert.....	35
4. Umweltbelastungen müssen im Gesamtsystem verstanden werden.....	37
5. Wir brauchen eine „Grüne Governance der Machine Economy“	42
6. Fazit und Ausblick.....	51
Literaturverzeichnis	53

Danksagung

Für ihre Kommentare und Unterstützung danken wir:

Dr. Ralph Hintemann

(Gesellschafter und Senior Researcher am Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit)

Simon Mundorf

(Community Manager der Sustainable Digital Infrastructure Alliance)

Max Schulze

(Executive Chairman der Sustainable Digital Infrastructure Alliance)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entstehung von Umweltwirkung im Gesamtsystem der Machine Economy	38
Abbildung 2: Handlungsfelder für ein grünes Zusammenspiel der Technologien	10
Abbildung 3: Gestaltungsraum für eine "Grüne Governance der Machine Economy"	52

1. Wir betreten das Zeitalter der selbstständigen Maschinen

In der Machine Economy übernehmen Maschinen wesentliche Prozesse des Wirtschaftens. Sie sind in der Lage ihre Umgebung und Umwelt wahrzunehmen, zu verstehen und Entscheidungen zu treffen. Sie sind vernetzt und nehmen nahezu autonom am Marktgeschehen teil. Schon heute sehen wir weltweit über 25 Milliarden vernetzte Endgeräte und davon über 10 Milliarden smarte physische „Dinge“ jenseits von Smartphones, Tablets oder Personal Computern. Es wird erwartet, dass der Anteil dieser "Smart Things" schon innerhalb der nächsten zwei bis drei Jahre mehr als die Hälfte aller vernetzten Endgeräte ausmachen wird, d.h. dann bis zu 15 Milliarden Geräte (Cisco 2020). Auch wenn sich Prognosen zur weiteren Entwicklung der Anzahl vernetzter Endgeräte bis 2030 stark unterscheiden – hier werden z. B. Werte zwischen 50 Milliarden (Statista 2021) oder 125 Milliarden Einheiten (IHS Markit 2017) angegeben – ist von einem starken Wachstum über die kommenden Jahre auszugehen. Mit ihrer Anzahl steigt auch das Volumen an neuen bzw. transferierten Daten. Manche Studien gehen von einem produzierten Datenvolumen von ca. 160 Zettabytes schon im Jahr 2025 aus. Davon könnten mehr als ein Viertel Echtzeitdaten sein, die fast ausschließlich zwischen smarten Dingen entstehen, transferiert und prozessiert werden (IDC 2017).

Der maschinelle Dialog wird sektorenübergreifend die Wertschöpfung transformieren. Bedeutende Veränderungen sind u. a. in den Bereichen Connected und Autonomous Driving, Smart Home und Buildings, Smart Energy und Grids, Digital Banking und Insurance sowie Smart Farming zu erwarten (Crisp Research 2019a, Wolfert et al. 2017). Im Vergleich der Anwendungen hat gegenwärtig die Vernetzung von intelligenten Produktions- und Logistikketten große Bedeutung. Unternehmen investieren dabei insbesondere in Prozessoptimierungen und setzen zukünftig auf die Entwicklung neuer, aus der Welt der Maschinen gespeister Geschäftsmodelle (Crisp Research 2019a, 2019b). Daher werden wir in diesem Papier unsere Überlegungen anhand von Produktionsprozessen und Logistikketten erläutern d.h. den maschinellen Dialog insbesondere in industriellen Business-to-Business (B2B) Beziehungen untersuchen.

Natürlich werden im Jahr 2030 nicht alle vernetzten Maschinen gänzlich eigenständig handeln und eine konkrete Prognose zur Anzahl wirklich autonomer Maschinen lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht erstellen. Derzeit wird davon ausgegangen, dass sich der Wandel hin zu Maschinen als eigenständige Marktteilnehmer in Schritten vollziehen wird und schon längst begonnen hat. Bereits

heute können vernetzte Maschinen Daten über sich und ihre Umgebung sammeln. In naher Zukunft werden sie in der Lage sein, zukünftige Zustände vorherzusehen und benötigte Unterstützungsleistungen (z. B. Reparaturen) anzufragen. Längerfristig können Maschinen zu autonomen Marktteilnehmern mit finanzieller „Unabhängigkeit“, eigenen Konten und Bezahlssystemen werden (Rajasingham 2017). Wir nehmen an, dass sich in den beschriebenen Evolutionsstufen unterschiedliche Formen von Maschinen und ihrer Fähigkeiten wiederfinden werden. Zunächst werden Maschinen nicht gemeinschaftlich Probleme lösen, sondern zuerst Selbstständigkeit erlangen, um autonom Problemlösungen zu identifizieren und umzusetzen. Vernetzung wird zu Beginn eher durch datenbasierte Interaktion und erst später monetär-transaktional geprägt sein. Das bedeutet auch, dass Transaktionen weiterhin über die dahinterstehenden Unternehmen abgewickelt werden. Auch werden Maschinen nicht nur in Form von smarten physischen Objekten existieren und Wertschöpfungsprozesse durchführen. Sie werden auch im Sinne selbstständig entscheidender, virtuell abgebildeter Rechenprozesse agieren.

Maschinen treten in dieser Transformation mit anderen Maschinen, wie auch mit Menschen, in den Dialog. Stehen sie mit anderen Maschinen im Austausch, muss zwischen Interaktionen bezüglich der direkten Wertschöpfungsprozesse auf der einen und unterstützenden Leistungen auf der anderen Seite differenziert werden. Bei ersterem führen Maschinen Aufgaben in der Herstellung von Komponenten, der Verarbeitung zu Produkten und dem Transport von Waren durch. Beispielsweise könnte dies autonome Transportroboter betreffen, die ihre Lieferung in intelligenten Empfängerboxen abstellen. Der Empfang wird registriert und die Transaktion automatisch durchgeführt (zu diesem Beispiel siehe Prause 2019). Unterstützende Leistungen können dagegen z. B. „Insurance as a Service“, „Bandwidth as a Service“ oder „Storage and Computing as a Service“ Angebote sein (Rajasingham 2017), die eine Fertigungsanlage autonom nach Bedarf bestellt und transaktional abwickelt.

Zudem wird sich die Interaktion zwischen Menschen und Maschinen immer weiter verstärken bis in Teilen die Grenzen zwischen beiden verschwimmen. Menschen wandeln Rechenleistung in maschinelle Intelligenz um, indem sie Algorithmen entwickeln, die auf Rechnern ausgeführt werden. Sie bringen ihre Normen, Werte und Anforderungen an Wertschöpfung in Maschinen ein, ohne dabei alle ihre Aktionen bzw. Reaktionen vorhersehen oder steuern zu können. Letztlich interagieren Maschinen in reflexiver Art und Weise mit ihren Gestaltern und Gestalterinnen. Roboter unterstützen Menschen in der Fertigung oder über

Virtual Reality Anwendungen bei Reparaturen. Entsprechend deutet sich auch in der Industrie die Verschmelzung zwischen Menschen und Maschinen an, die der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) mit den Begriffen "Machina sapiens" einerseits und "Homo digitalis" andererseits benennt (WBGU 2019).

In diesem Papier widmen wir uns der Frage, wie die beschriebenen Transformationsprozesse im Zeitalter der selbstständigen Maschinen ökologisch gestaltet werden können. Während die Vision der Machine Economy bereits eine Vielzahl ökonomischer Gedankenspielen anregt, werfen potentielle Energie- sowie Materialaufwände Schatten auf die Chancen einer ökologischen Wende. Aus einer Governance-Perspektive möchten wir akteursübergreifend Wege aufzeigen, wie maschineller Dialog grün, d.h. ökologisch nachhaltig, angesteuert werden kann. Unsere Analysen basieren auf ersten Interviews mit ausgewählten Experten, aktuellen Debatten in wissenschaftlichen Zeitschriften und sonstigen Medien. Die aufgestellten Hypothesen sollen zur gemeinsamen Diskussion anregen und inspirieren.

2. Der maschinelle Dialog und sein technologisches Fundament

Die unterschiedlichen Formen des maschinellen Dialogs gewinnen an Intensität, getrieben durch die rasante Entwicklung neuer Technologiefelder. IoT (deutsch "Internet der Dinge"), KI (einschließlich Big Data Analytics) sowie DLT (deutsch "Verteiltes Kontenbuch"), bilden das Fundament der Machine Economy (in Anlehnung an Urbach et al. 2020):

IoT beschreibt die digitale Vernetzung von physischen Objekten, die über Sensoren und Rechenkapazitäten zu „intelligenten“ Dingen werden. Diese Dinge könnten z. B. autonome Vehikel in großen Lagereinrichtungen, die Container, die sie transportieren, die Produkte, die sie beinhalten und sogar deren Verpackung sein. Über Netzwerktechnologien, wie WLAN, LTE oder 5G, können sie miteinander im Austausch stehen.

Unter KI verstehen wir Computersysteme, die in der Lage sind Muster in komplexen Datenmengen zu erkennen und, die anhand von Daten darauf trainiert werden, Probleme (auch in unbekanntem, veränderlichen Situationen) selbstständig zu lösen und Strategien anzupassen, d.h. zu "lernen". In Fertigungssystemen

können sie z. B. Kosten reduzieren und Output steigern, indem sie eine Vielzahl an Variablen zielgerichtet aufeinander abstimmen.

DLT ermöglicht dezentrale Datenverwaltung und verlässliche Transaktionen. Über alle dezentralen Einheiten hinweg können Aktionen transparent gemacht und über Konsensmechanismen ihre Richtigkeit sichergestellt werden. DLT bestätigt also, dass Daten vertrauenswürdig bzw. nicht manipuliert sind. Beispielsweise können komplexe Lieferketten von Produkten und Komponenten im Sinne einer dezentral organisierten „Single Source of Truth“ verfolgt werden. Bekannte Varianten von DLT sind z. B. Blockchain oder Directed Acyclic Graphs (DAG, deutsch „Gerichtete Azyklische Graphen“).

In einer Machine Economy wirken nun IoT, KI und DLT synergetisch zusammen. Sensordaten aus IoT können als Trainingsgrundlage in KI-Algorithmen dienen, die wiederum smarte Dinge intelligenter machen, indem sie Geschehnisse vorhersehen und passende Entscheidungsoptionen vergleichen und umsetzen. DLT kann sichere Identitäten von Maschinen (intelligente Dinge, z. B. aber auch Edge-Rechnern) bereitstellen und ermöglicht transparente und manipulationssichere Interaktionen zwischen Maschinen. KI und DLT können sich ergänzen bspw. durch KI-getriebene Konsensmechanismen zwischen dezentralen Einheiten und einer potenziellen Distribution von Rechenleistung für das sog. „Federated Learning“ (d.h. dezentrale Lernprozesse künstlicher Intelligenz auf verteilten Maschinen).

3. Wertschöpfung und Akteurslandschaften werden neu konstruiert

In der Machine Economy wird die Wertschöpfung auf drei Ebenen neu konstruiert. An ihrer Basis steht die *physische Produktions- und Lieferkette*. Hier werden aus Rohstoffen neue Güter produziert, an ihren Ort der Bestimmung geführt und dort genutzt. Die steigende Intelligenz der Maschinen ermöglicht neue Produktions- und Logistiksysteme zum Beispiel mit höherer Produktivität und Flexibilität.

Mit den Produktions- und Logistikprozessen sowie dem Strom der hergestellten Güter verwoben ist die *digitale Infrastruktur*. Dazu zählen Sensoren, die massenweise Daten zum Zustand der einzelnen Maschine, dem Ort von Waren wie auch Umgebungsinformationen erzeugen. Netzwerke verbinden Menschen, Produkte und Maschinen durch ein Geflecht von Daten- und Informationsströmen. Über

Cloud- Fog- und Edge-Computing wird zentralisiert ("Cloud"), in dezentralen Knotenpunkten ("Fog", d.h. nahe der Maschine) oder direkt an smarten Objekten ("Edge", d.h. „an oder in der Maschine“) Rechenleistung bereitgestellt. Allerdings ist anzumerken, dass diese Technologien stärker miteinander verschmelzen, z. B. wenn Cloud-Lösungen dezentral an der Edge eingesetzt werden.

Der materiellen digitalen Infrastruktur gegenüber steht ein virtuelles Ebenbild physischer Objekte und Prozesse d.h. die *virtuelle Produktions- und Lieferkette*. KI und Big Data Analytics übersetzen gewaltige Datenmengen in Informationen und Wissen, worüber nahezu eigenständige Entscheidungsfindung möglich wird. Zudem können digitale Zwillinge von Dingen oder Prozessen die physische Welt virtuell abbilden.

Die Wertschöpfung in einer Machine Economy wird also durch ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von technologischen Bausteinen innerhalb und zwischen den einzelnen Ebenen transformiert, wodurch neue Interaktionen entstehen. Zum Beispiel wurde im "Genesis of Things" Projekt eine Machbarkeitsstudie erarbeitet, die beschreibt, wie über DLT nach einer Kundenbestellung die Maschinen untereinander Konstruktionsdokumente austauschen, Material bestellen, Produkte fertigen und Transaktionen zwischen einander über „Smart Contracts“ abwickeln (Blechschmidt & Stöcker 2016).

Den direkten Wertschöpfungsprozessen stehen neue Akteure und Akteurinnen in der Machine Economy gegenüber. Sie kommen aus der Wirtschaft, Politik, Zivilgesellschaft sowie der Forschung und koordinieren die Ausrichtung der Wertschöpfung auf den jeweiligen Ebenen. Neben den klassischen Akteur*innen rund um die physische Produktion und Logistik von Gütern, konnten sich insbesondere neue Akteure bzw. Akteurinnen etablieren, die den maschinellen Dialog forcieren. Durch das diverse Feld an Marktteilnehmern sind heute "kaum zwei IoT-Architekturen wirklich identisch" (Crisp Research 2019b). Hier kommen Chipproduzenten, Sensorenhersteller, Cloud-/Edge-Computing-Provider, diverse Data-Analytics-Provider und Full-Stack-Software-Plattformen, Anbieter von Security-Lösungen, Payment Provider, Anbieter von Anwendungsapplikationen, Beratungsunternehmen und viele andere zusammen (Turck 2018). Sie sind häufig in mehreren Produkt- bzw. Service-Kategorien aktiv. Die genannten Anbieter sind darüber hinaus eng verbunden mit zum Teil dezentral organisierten Entwicklern und Entwicklerinnen- bzw. Open Source Communities. Das Verständnis neuer Wertschöpfungsprozesse sowie einer sich wandelnden Akteurslandschaft ist die Basis der folgenden ökologischen Bewertung der Machine Economy.

4. Umweltbelastungen müssen im Gesamtsystem verstanden werden

Die neue Architektur der Machine Economy bietet große Chancen und Lösungsmöglichkeiten – ist wie andere digitale Systeme aber gleichzeitig immer auch Teil des Problems, denn sie belastet die Umwelt. Um die Mechanismen hinter diesen Umweltbelastungen zu verstehen, müssen die dafür verantwortlichen Systembausteine und ihre Abhängigkeiten im Gesamtsystem beleuchtet werden. Die physische Wertschöpfung in der Prozesskette und die digitale Infrastruktur können als Erzeuger der Umweltwirkung verstanden werden, da sie unmittelbar Material- und Energieaufwände verursachen. Umweltforschung sowie -politik haben sich bezüglich der Digitalisierung in den vergangenen Jahren insbesondere auf die Optimierung dieser digitalen Infrastrukturen fokussiert, z. B. im Rahmen der „Green IT“ Debatte.

Aber: Infrastrukturen werden nicht zum Selbstzweck betrieben. Es sind die von Akteur*innen geschaffenen Geschäftsmodelle, Datenströme und Applikationen, die Anforderungen an die digitale Infrastruktur stellen. Sie definieren letztlich Art, Umfang und Nutzungsintensität dieser Infrastruktur und erhöhen so mittelbar den Druck auf die Umwelt. Deshalb bezeichnen wir sie als Treiber der Umweltwirkung. Beide Dimensionen, Erzeuger und Treiber, müssen in ihren Wechselwirkungen gemeinsam gedacht und adressiert werden – in der ganzheitlichen Optimierung beider Aspekte liegt daher der Schlüssel für eine effektive ökologische Wende in der Digitalpolitik. Das wollen wir im Folgenden am Beispiel der Machine Economy ausführen.

4.1. Wir haben kein genaues Bild der Umweltwirkung der Infrastruktur

Die Umweltwirkungen durch Material- und Energieaufwände sowie deren Emissionen werden im Gesamtsystem der Machine Economy insbesondere auf zwei Ebenen erzeugt: Auf der einen Seite benötigt die digitale Infrastruktur Ressourcen für die Hardware, die als Rohstoffe abgebaut, zu Komponenten für Sensoren, Rechner, Netzwerke usw. verarbeitet sowie letztlich entsorgt werden. Und die für Rechenleistung und Betrieb benötigte Energie schlägt sich (in Abhängigkeit der verwendeten Energiequelle) in ausgestoßenen Emissionen nieder. Diese Effekte können wir als die „Direkte Umweltwirkung durch die Nutzung von IoT, KI und DLT“ bezeichnen.

Auf der anderen Seite ermöglicht diese Infrastruktur neue Produktions- und Logistikprozesse, die ihrerseits neue Umweltbelastungen hervorrufen können. Beispielsweise wäre das der Fall, wenn KI die nötige Intelligenz für autonome Lieferroboter bereitstellt, die dann selbst einen zusätzlichen Stromverbrauch induzieren. Diese Effekte nennen wir „Indirekte Umweltwirkung durch die Nutzung von IoT, KI und DLT“. In diesem Papier fokussieren wir uns auf die direkte Umweltwirkung der Technologienutzung (mehr zu den indirekten Effekten z. B. in Pohl & Santarius 2020).

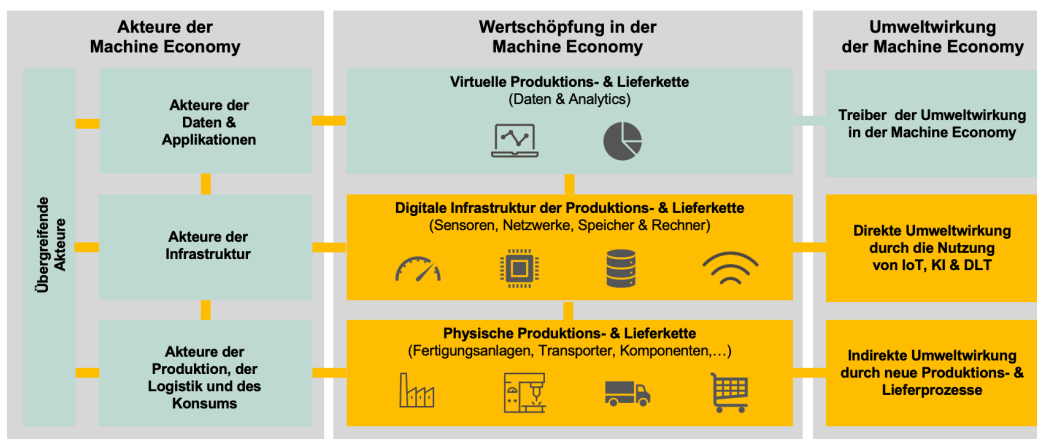


Abbildung 4: Entstehung von Umweltwirkung im Gesamtsystem der Machine Economy (eigene Darstellung)

Der Gesamteffekt der direkten Umweltwirkung durch die digitale Infrastruktur wird seit längerem diskutiert. Es ist davon auszugehen, dass schon heute zwischen 1,8% und 3,2% der globalen Treibhausgas-Emissionen auf das Digitalsystem zurückzuführen sind (Bieser et al. 2020). Im Bereich der Rechenzentren sorgen zwar Effizienzgewinne sowie eine steigende Versorgung mit erneuerbaren Energien für bedeutende Einsparungen an Emissionen (Hintemann & Hinterholzer 2020). Allerdings macht der Betrieb von Rechenzentren nur einen Teil der globalen Treibhausgas-Emissionen des Digitalsystems aus. Der größte Teil entfällt auf die Produktion und Nutzung von digitalen Endgeräten (Bieser et al. 2020). Auch bezüglich des Ressourcenverbrauchs ist bei dem momentanen Trend von einem anhaltenden Wachstum auszugehen, was sich beispielsweise im steigenden Aufkommen an Elektronikschrott (E-Waste) niederschlägt. Alleine das E-Waste-Volumen durch kleinere digitale Endgeräte, wie Smartphones oder PCs, ist zwischen 2014 und 2019 global um ca. 2% auf insgesamt 4,7 Millionen Tonnen gestiegen (Forti et al. 2020). Es liegen damit erste grobe Abschätzungen für die Umweltwirkung des Digitalsystems als Ganzes vor.

Detaillierte Daten für neue und sich dynamisch entwickelnde Anwendungsgebiete wie die Machine Economy fehlen dagegen. Nahezu selbstständig handelnde Maschinen benötigen einen vielfältigen Unterbau an Endgeräten, Sensoren, zentralen und dezentralen Rechnern, Speichermedien und Netzwerken. Die digitale Infrastruktur der Machine Economy ist in sich ein komplexes Teilsystem mit vielen abhängigen Bausteinen wie am Beispiel von modernen Cloud- und Edge-Systemen deutlich wird (siehe hierzu das Cloud-Computing Modell von Montevecchi et al. 2020). Für die Schnittstelle von IoT, KI und DLT steht eine differenzierte Analyse der zugrunde liegenden Komponenten, Infrastruktur(en) und deren Umweltwirkung bis heute aus. Ohne dieses Orientierungswissen kann eine nachhaltige Gestaltung der Machine Economy jedoch nicht gelingen.

4.2. Die Treiber der Umweltwirkung sind nicht ausreichend adressiert

Als Treiber der Umweltwirkung sind die Systemkomponenten zu verstehen, deren Anforderungen letztlich die Auslastung von Infrastrukturen steuern sowie neue, umweltbelastende Produktions- und Logistikprozesse hervorrufen. Darunter fallen einerseits die Nutzung und das Handling von Daten sowie Applikationen (insbesondere Analytics Anwendungen) – andererseits sind es die Akteure bzw. Akteurinnen, die auf den jeweiligen Ebenen ihre Interessen vorantreiben, die Wertschöpfung, Use Cases bzw. Geschäftsmodelle gestalten.

Die entlang von Produktions- und Logistikketten ablaufenden digitalen Transformationsprozesse bringen einen rasanten Anstieg generierter Datenmengen und Informationsflüsse mit sich, für deren Verwertung es Analysetools und -lösungen bedarf. Daten sind eine elementare Grundlage für die Machine Economy. Die Erzeugung, der Transfer, die Verarbeitung sowie die Speicherung von Daten verlangt, neben einer Steigerung der Rechenleistung, eine Infrastruktur aus Endgeräten und Rechenzentren, deren Nachfrage nach Energie und Ressourcen sich – bisher trotz Effizienzgewinnen – in negativen Umweltwirkungen widerspiegelt (Jones 2018). So lassen sich auf der Ebene der virtuellen Produktions- und Lieferketten die Speicherung und Verarbeitung von Daten als Treiber von Umweltwirkungen verstehen.

Was die Treiber von Umweltwirkungen sind und wie sie ökologisch gestaltet werden können, lässt sich in diesem Kontext beispielhaft anhand von datenintensiver KI beschreiben. So ist die Verarbeitung von großen Datenmengen mittels KI-Methoden in Zusammenhang mit intensiven Trainingsläufen tiefer neuronaler

Netze (Deep Learning als Teilaspekt des Machine Learning) und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen (Strubell et al. 2019; Henderson et al. 2020) ein viel diskutiertes Problemfeld und es lassen sich bereits neue, umweltschonendere Ansätze erkennen.

Zukünftig könnten z. B. in IoT-Netzen "gepulste" neuronale Netze (Spiking Neural Networks, SNNs), d.h. neuronale Netze bestehend aus mehreren Subnetzwerken, eingesetzt werden, die bei ähnlicher Leistung mehr als 100-mal energieeffizienter als klassische Ansätze sein können (Yin et al. 2020). Basierend auf den Green IT-Bestrebungen (Murugesan 2008; Faucheux & Nicolai 2011) setzen jüngst veröffentlichte Ansätze, wie „Green AI“ (Schwartz et al. 2019) oder „Green Data Mining“ (Schneider et al. 2018), erste Impulse zur Reduzierung der negativen Umwelteinwirkungen durch eine verstärkte Ausrichtung auf effiziente Algorithmen statt des traditionellen Strebens nach immer höherer Genauigkeit. Auch gewinnen standardisierte Messungen und die Benennung von Rechenoperationen als Maßzahl in der systematischen Bewertung von KI-Methoden an Bedeutung. Diskussionen, nicht nur zum nachhaltigen Einsatz von KI-Anwendungen, sondern auch zur nachhaltigen Gestaltung von KI-Anwendungen (Sustainable AI) selbst, finden immer mehr Anklang.

Trotz dieser Bemühungen stehen im Fokus aktueller Studien zumeist die großen und rechenintensiven KI-Modelle, während eine systemische, d.h. ganzheitliche Einschätzung der Umweltwirkung der gesamten KI-Landschaft noch fehlt. Ein Hauptproblem besteht damit weiter: Aufgrund von fehlender Transparenz und dem Mangel an standardisierten Messmethoden, ist aktuell der Einfluss von KI-Anwendungen, z. B. auf das Klima durch Emissionen, gar nicht bis nur sehr schwer zu quantifizieren (Dhar 2020).

Für die Machine Economy heißt das, dass es aktuell noch nicht möglich ist ein umfassendes und differenziertes Bild der Treiber der Umweltwirkung zu zeichnen. Die Datenbasis muss systematisch erweitert und im Sinne eines übergreifenden Systemverständnisses aller Einflussfaktoren ergänzt werden.

Auf der Akteursseite spielen dabei vor allem die Steuerungssysteme der Politik und der politiknahen Organisationen als übergreifende Akteure sowie die auf den jeweiligen Ebenen der Wertschöpfung aktiven Unternehmen und ihre Branchenvertretungen eine Rolle. Deutsche Politik ist im internationalen Vergleich im Umgang mit Energie- sowie Ressourceneffizienz des Digitalsystems sicherlich unter den führenden Nationen. Allerdings zielen die meisten Maßnahmen – ebenso wie international – bislang vor allem auf die Optimierung der digitalen Infrastruktur ab, d.h. die "Hardware" der Digitalisierung. Beispielsweise wurden im Rahmen der

"Nationalen Klimaschutzinitiative" Förderprogramme für grüne Rechenzentren aufgesetzt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021a), das Effizienzlabel "Blauer Engel" für Rechenzentren" entwickelt (Umweltbundesamt (UBA) 2021), über die "Green IT Initiative" die Effizienz der IT-Beschaffung der Bundesverwaltung optimiert (BMU 2021b) oder im Rahmen der "Umweltpolitischen Digitalagenda" die Erweiterung der Ökodesign-Richtlinie um zusätzliche Produktgruppen wie Smartphones angeregt (BMU 2020b).

Erst in der jüngeren Vergangenheit werden schrittweise erste Aktivitäten zur ökologischen Gestaltung von Daten und Applikationen umgesetzt. Der Blaue Engel wurde z. B. um ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte ergänzt (UBA 2020), die "Umweltpolitische Digitalagenda" schlägt "Grünes Coden" im Studienplan der Informatik zu verankern (BMU 2020a), die KI-Strategie der Bundesregierung unterstützt die Umweltfolgenabschätzung der Technologie (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2018) und im "Ressourceneffizienzprogramm ProgRess III" wird die nachhaltige Gestaltung von DLT angestrebt (BMU 2020b). Insgesamt scheinen die politischen Bemühungen allerdings schwerpunktmäßig die Umweltwirkung selbst und weniger die dahinterliegenden Treiber und Dynamiken im Blick zu haben. Insbesondere die Maßnahmen bezüglich Künstlicher Intelligenz und Big Data Analytics sind aktuell noch nicht ausreichend und gehen nicht dediziert auf die zukünftigen Herausforderungen durch den maschinellen Dialog im Kontext kommerzieller B2B-Anwendungen ein.

Auch in der Privatwirtschaft zeigen mehr und mehr Unternehmen Interesse an einem nachhaltigen Digitalsystem. Zum Beispiel haben sich Microsoft, Salesforce, Netflix u. a. in der Business Alliance to Scale Climate Solutions (BASCS) zusammengesetzt, um, neben anderen ökologischen Initiativen, die eigenen Emissionen zu senken (BASCS 2021). Oder in der Deklaration zur European Green Digital Coalition erklären sich die CEOs von 26 digitalen Schwergewichten bereit, die Entwicklung grüner Technologien und Services voranzutreiben (European Commission 2021). Zudem haben sich im EU-Pakt für nachhaltige Rechenzentren Digitalverbände und Anbieter von Rechenleistung dazu entschlossen, Rechenzentren bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu betreiben (Climate Neutral Data Centre Pact 2021). Jenseits dessen ist jedoch noch zu wenig darüber bekannt, welche Rolle die Vielzahl an Digitalunternehmen auf den jeweiligen Ebenen der Machine Economy für die Entstehung von Umweltbelastungen spielen.

5. Wir brauchen eine „Grüne Governance der Machine Economy“

Ein nachhaltiges Steuerungssystem für eine ökologische Machine Economy setzt an diesen blinden Flecken der aktuellen Debatte an. Sie versteht, wie neuartige Mechaniken und Regeln im Gewerk der Machine Economy auf die Nachhaltigkeitstransformation ausgerichtet werden können. Im Moment orientiert sich die Gestaltung neuer Wertschöpfungsprozesse und die Ausrichtung der Akteursbeziehungen vorrangig an ökonomischen Zielen. Die Aussicht auf Leistungssteigerungs- und Kosteneinsparungspotentiale lässt die ökologischen Konsequenzen des maschinellen Dialogs in den Hintergrund treten. Hier entsteht ein Gestaltungsraum für eine „Grüne Governance der Machine Economy“. Die Aufgabe ist, die übergreifenden Dynamiken der Machine Economy transparent zu machen, ökologisch-schädliche Wirkmuster zu erkennen und Anreize für nachhaltige Alternativen zu setzen. Dafür sind die folgenden Punkte relevant:

Erstens brauchen wir ein übergreifendes *nachhaltiges Zielsystem*, dass alle Wertschöpfungsprozesse und Akteure bzw. Akteurinnen auf gemeinsame Ziele von Klima- und Ressourcenschutz ausrichtet und ausbalanciert. Zweitens muss in den direkten Wertschöpfungsprozessen das *grüne Zusammenspiel von Technologien* forciert werden. Dabei werden die anpassungsfähigen Maschinen, schnell wachsende Infrastrukturen, Datenströme, Datenstrukturen und Applikationen sowie die Vielfalt der verbundenen Elemente (Entitäten) im Sinne der ökologischen Zielfunktionen koordiniert. Und drittens müssen alle beteiligten Akteure bzw. Akteurinnen mit ihren Abhängigkeiten, Machtfragen und Interessen, Strategien und Geschäftsmodellen in ein *Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen* eingebunden werden.

5.1. Zielsystem

Die „Grüne Governance der Machine Economy“ adressiert die Umweltbelastungen im maschinellen Dialog. Allerdings handelt sie nicht im leeren Raum. Ökologische, soziale und ökonomische Abhängigkeiten müssen mitberücksichtigt und in ihren Trade-offs balanciert werden.

Erstens muss sichergestellt werden, dass die maschinen-gestützten Nachhaltigkeitspotentiale bewahrt bleiben. Zum Beispiel zeigt sich im Einsatz von KI für die Erreichung der „Sustainable Development Goals“ (SDGs), dass die Chancen der KI ihre Risiken übersteigen – vorausgesetzt die Technologie wird im Sinne der

Nachhaltigkeit ausgesteuert (Vinuesa et al. 2020). Die Forderung bspw. nach grünen „Lean Data“ Ansätzen oder suffizienten Infrastrukturen muss vorsichtig mit den positiven Implikationen der Anwendung (d.h. Einsparungspotentialen in Energie- oder Material) abgewogen werden.

Zweitens müssen negative soziale Auswirkungen vermieden werden. Zum Beispiel könnte es aus ökologischer Sicht vorteilhaft sein, leistungsorientierte „rote“ KI-Modelle durch effizientere „grüne“ KI-Modelle zu substituieren. Wenn aber bei Letzteren der maschinelle Rechenaufwand durch globale „Clickworker“ mit unverantwortbaren Arbeitsbedingungen externalisiert wird, kann dieser Ansatz nicht nachhaltig sein.

Und drittens müssen auch ökonomische Zielgrößen in die Betrachtung einbezogen werden. Breite Akzeptanz von ressourcen- und energieschonenden Technologien in der Wirtschaft können – jenseits von staatlichen Regulierungsmaßnahmen – nur erreicht werden, wenn die Kosten grüner Technologien selbst vertretbar sind, die Kostensenkungspotentiale durch grüne Technologien (z. B. durch Material- und Energieeinsparungen) erhalten bleiben und grüne Technologien in Geschäftsmodelle integriert werden können.

5.2. Handlungsfelder

Um ein grünes Zusammenspiel von Technologien in der Machine Economy zu etablieren, müssen wir uns den folgenden Herausforderungen und Wissenslücken stellen (siehe Abbildung 5).

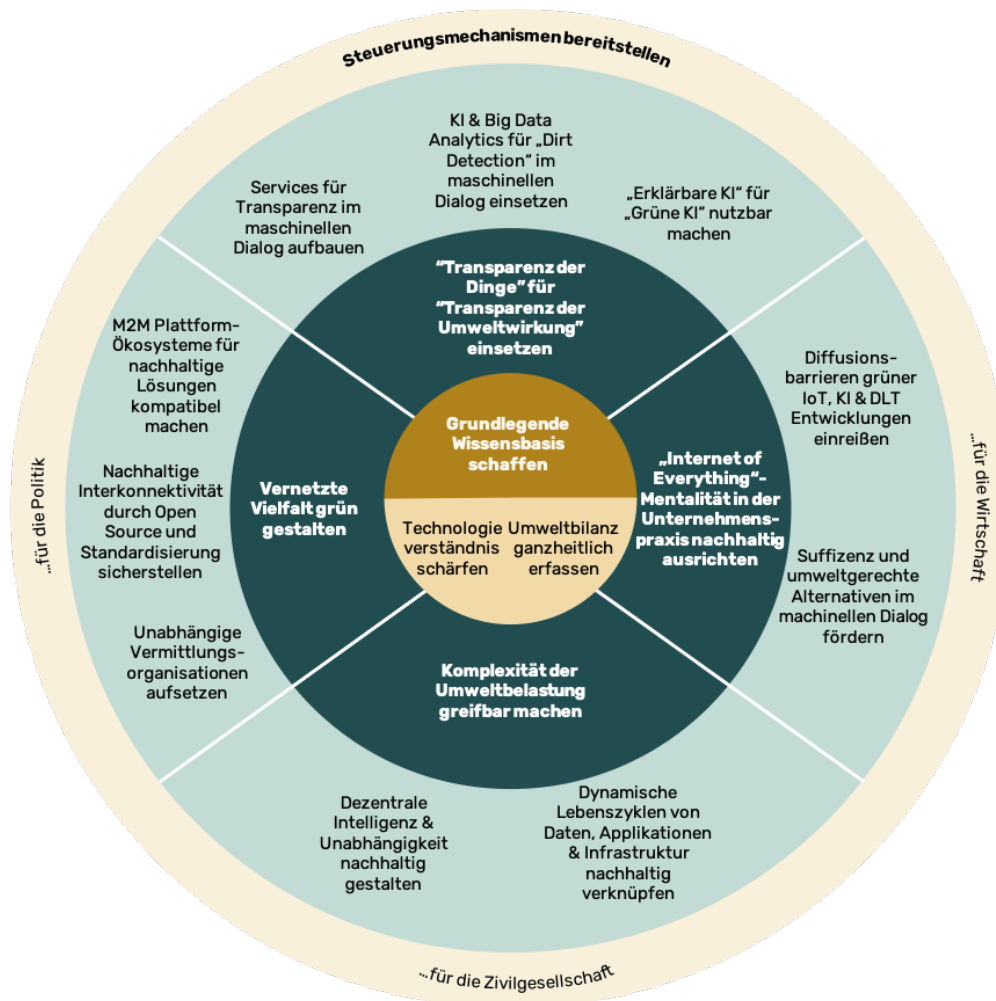


Abbildung 5: Handlungsfelder für ein grünes Zusammenspiel der Technologien (eigene Darstellung)

Grundlegende Wissensbasis schaffen

Als erstes Handlungsfeld verstehen wir die Schaffung einer grundlegenden Wissensbasis. Einerseits zählt hierzu eine Schärfung des Verständnisses des technologischen Fundaments der Machine Economy d.h. insbesondere KI bzw. Big Data Analytics, IoT sowie DLT. In allen diesen Feldern muss Umweltwirkung detailliert werden, damit letztlich ökologische Gestaltung stattfinden kann. Zu nennen sind hier z. B. die derzeitigen sowie zukünftigen ökologischen Auswirkungen von DLT. Das Feld befindet sich im Wandel, wobei unklar bleibt, welche Technologievarianten ("Blockchain vs. DAG") und Mechanismen ("Proof-of-Work" vs. "Proof-of-Stake" (u. a.)) sich durchsetzen werden (siehe dazu z. B. Cao et al. 2020).

Zweitens brauchen wir ein umfassenderes Verständnis der Umweltwirkung der Machine Economy. Bisher ist die Debatte rund um nachhaltige Digitalisierung auf Energieaufwände fokussiert. Zukünftig müssen wir aber auch in der Lage sein, im voranschreitenden Wachstum vernetzter Maschinen Ressourcenaufwände im Sinne des „ökologischen Gewichts der Machine Economy“ zu bestimmen – ein Bereich der in derzeitigen Debatten rund um IoT, KI oder DLT zu kurz kommt. Hier bedarf es z. B. einer nach Anwendungsfällen und Industrien differenzierten Projektion, einer kausalen Verknüpfung mit Rohstoffquellen und Folgen des potentiell steigenden Abbaus von kritischen Rohstoffen und eine Übersicht über „End-of-Life“-Vorgänge genutzter Materialien.

“Transparenz der Dinge” für “Transparenz der Umweltwirkung” einsetzen

Zwar bieten größere IoT-Middleware-Plattformen erste Einblicke bezüglich der Nachhaltigkeit ihrer Cloud-Dienste. Über den “Sustainability Calculator” können z. B. Kunden von „Microsoft Azure IoT“ (Microsoft 2021) die Emissionen ihrer Anwendungen sichtbar machen. Allerdings greifen bei industriellen IoT-Lösungen meist Komponenten von vielen Anbietern und Frameworks ineinander, die eine End-to-End-Analyse von Umweltbelastungen des maschinellen Dialogs häufig noch nicht zulassen. Wir brauchen Services, die anbieterübergreifend Umweltwirkung transparent machen und damit nachhaltige Geschäftsmodelle ermöglichen.

Daneben müssen Big Data Analytics und KI neu ausgerichtet werden. Sie könnten Umweltbelastungen im Sinne von „Dirt Detection“ Ansätzen aufspüren und optimieren. Allerdings sind Ansätze noch selten, die speziell auf die Nachhaltigkeitsanalyse des maschinellen Dialogs (Daten, Applikationen und Infrastruktur) entlang von Produktions- und Logistikketten ausgerichtet sind. Und auch der Einsatz von KI selbst muss kritisch auf ökologische Externalitäten untersucht werden. “Erklärbare KI” könnte die Entscheidungswege der KI ans Licht bringen und Umweltbelastungen in der Funktionsweise der Technologie selbst aufzuspüren.

“Internet of Everything”-Mentalität nachhaltig ausrichten

Bereits im Jahr 2013 wies Cisco daraufhin, dass zukünftig die zunehmende Vernetzung in einem “Internet of Everything” münden würde, in dem nahezu alle Menschen, Prozesse, Daten und Dinge digital miteinander verbunden sind. Cisco

verwies auf privatwirtschaftliche Umsatzpotentiale in der Vernetzung und Nutzung der damals auf über 99% geschätzten unverbundenen physischen Objekte (Cisco 2013). Bis heute scheint die "Internet of Everything"-Mentalität in der Praxis Anklang zu finden, da die Anzahl der vernetzten Endgeräte ungebrochen wächst (Cisco 2020) und entsprechende Technologien in der Breite der Unternehmen ankommen sind (McKinsey & Company 2019). Gleichzeitig wird ein großer Teil der gesammelten Daten gar nicht (Seagate 2020) oder ineffektiv (Du et al. 2021) verwendet. Wenn daher in der unternehmerischen Praxis die Vernetzung von Dingen ökonomisch nicht ausgenutzt wird und gleichzeitig ökologische Externalitäten erzeugt werden, dann muss die "Internet of Everything"-Mentalität kritisch hinterfragt, neu justiert und nachhaltig ausgerichtet werden.

Zum einen stehen wir diesbezüglich vor der Herausforderung, dass zwar grüne Ansätze für den Einsatz von Technologien des maschinellen Dialogs in der Forschung bereitstehen, aber häufig entweder nicht in die Praxis diffundieren oder nur solche mit geringer positiver Umweltwirkung übernommen werden. Zum Teil sind die Diffusionsbarrieren bekannt. So sind z. B. nachhaltige digitale Geschäftsmodelle noch nicht erschlossen. Unter Entscheidern bzw. Entscheiderinnen und Entwicklern bzw. Entwicklerinnen mangelt es zudem an einem Bewusstsein für die Relevanz von Nachhaltigkeit in der voranschreitenden Vernetzung von Maschinen. Größtenteils wissen sie bei der Umsetzung ihrer Projekte auch nicht, dass grüne Alternativen zur Verfügung stehen. Auch falsche Preisvorstellungen, wonach nachhaltige Technologien kostenintensiver seien als ihre weniger umweltfreundlichen Gegenstücke, verhindern ein Umdenken. Es fehlen System-Architekt*innen und Programmierer bzw. Programmiererinnen die entscheidenden Fähigkeiten und Wissen in der Umsetzung nachhaltiger Entwicklungen. Und letztlich mangelt es an einem ausreichenden Unterstützungsnetzwerk z. B. an Beratungen, die mit Nachhaltigkeitsexpertise in der Planung und Umsetzung helfen können. Bekannte Diffusionsbarrieren müssen zukünftig ausgehebelt werden. Doch es braucht auch eine tiefgreifende Untersuchung weiterer Barrieren, wie z. B. den technologischen Grenzen der Ökosysteme von Plattformen oder den intensiven Marketingaktivitäten größerer Anbieter. In der Literatur wurden schon diverse Diffusionsbarrieren nachhaltiger Innovationen identifiziert, die im Rahmen des Digitalsystems noch in der Tiefe diskutiert werden müssen (siehe z. B. Fichter & Clausen 2021).

Zum anderen braucht es mehr Forschung für ein "rechtes Maß" im Umgang mit Daten, Applikationen und Infrastruktur. Es gibt wenige Hinweise darauf, wie Suffizienz in einer technologisch-deterministisch wachsenden Machine Economy

tatsächlich gelebt werden kann. Wie gehen wir bspw. damit um, dass Unverständnis über Datenbedarfe und Übersetzungsmöglichkeiten in Anwendungsfälle den Energie- und Ressourcenaufwand erhöht? Oder gibt es Bereiche entlang der digitalisierten Wertschöpfungskette, die in ein industrielles Internet of Things eingebunden werden sollen, aber mit einem sinkenden Kosten-Nutzen-Verhältnis oder stark erhöhten ökologischem Fußabdruck einhergehen? Auch im Kontext des Rollouts des 5G-Standards sollten Suffizienzperspektiven einbezogen werden. Die Technologie könnte – neben potentiellen Effizienzgewinnen – durch erhöhte Datentransfers neue Anwendungsfälle in der Machine Economy erschließen und Umweltbelastungen mit sich bringen. Allerdings ist es essentiell im Kontext von Suffizienzfragen durch Eingriffe nicht die möglichen positiven Implikationen (Energie- oder Materialeinsparungen) aus dem Blick zu lassen. Letztlich müssen wir uns fragen, wie wir besonders unvorteilhaften Technologieeinsatz vermeiden oder über intelligent gedachte Lösungen umgehen können.

Komplexität der Umweltwirkung greifbar machen

Kommunikation obliegt in der Machine Economy insbesondere den Maschinen. Sie entscheiden im Rahmen von gesetzten Leitplanken eigenständig, wobei kontinuierlich gesammelte Daten aus der Maschine selbst und ihrer Umgebung als Futter für aufwendige Analysen dienen. Je nach Aufgabenbereich der Maschine müssen diese Daten einerseits in Echtzeit erhoben und verzögerungsfrei ausgewertet werden. Das könnte z. B. der Fall sein, wenn KI-unterstützte Augmented Reality-Anwendungen Produktionsmitarbeiter und-mitarbeiterinnen durch Reparaturarbeiten lotsen (Sahu et al. 2020). Andererseits sollen die Daten aus Sicherheitsgründen in der Fabrik bzw. auf den Servern des produzierenden Unternehmens verbleiben und nicht über das Internet in die Cloud geladen werden. Beispielsweise könnte dies sensible Daten des Produktionsprozesses betreffen, in dem intelligente Fertigungsanlagen Daten über Produktionsmengen usw. sammeln. In diesen Fällen werden Rechenkapazitäten aus zentralisierten Cloud-Rechenzentren in dezentrale Fog-Knotenpunkte und Edge-Rechner verlagert. Bisher bleibt in der Forschung ungeklärt, ob eine breite Verlagerung in Fog- bzw. Edgesysteme im Sinne des Energieverbrauchs Effizienzvorteile mit sich bringt. Zwar müssen weniger Daten in zentralisierte Rechenzentren übertragen werden, jedoch ist die dezentrale Datenverarbeitung wahrscheinlich weniger effizient (Montevecchi et al. 2020). Und auch die Frage des Ressourcenaufwands im Einsatz von dezentralen Rechensystemen muss weiter

beforscht werden, um Transparenz zu schaffen und Handlungsoptionen aufzeigen zu können.

Dynamische Anpassungsfähigkeit stellt zudem in besonderem Maße Anforderungen an Daten, Applikationen und Infrastrukturen. So entstehen komplexe, teilweise miteinander verzahnte Lebenszyklen, in denen sich Spannungsfelder zwischen ökonomischen Leistungskriterien und ökologischen Effizienzanforderungen aufbauen. Daten sollen zum Beispiel ständig aktuell sein, wodurch Modularität eingeschränkt und Wiederverwendungsoptionen dezimiert werden. Applikationen müssen durch häufiges Training auf sich ändernde Umgebungs-situationen eingestellt werden, wobei häufige Trainings den Energieaufwand erhöhen. Zudem mangelt es an zirkulären Konzepten, die auf Sensoren und dezentrale Recheneinheiten ausgerichtet sind. Diese werden häufig nach Ermüdung der Batterie entsorgt und modulare, besser wartbare Bauteile, sind nicht die Regel. Oft ist die digitale Infrastruktur fest mit dem Endgerät verschmolzen. Letztlich fordern immer anspruchsvollere Applikationen ständige Updates und Rechenkapazitäten in bestehenden Infrastrukturen.

Eine „Grüne Governance der Machine Economy“ muss also die Anforderungen des komplexen Zusammenspiels der unterschiedlichen Lebenszyklen im System verstehen – und auf dieser Basis das Gesamtportfolio der Anwendungen und Technologien über die Lebensdauer ökologisch optimieren.

Vernetzte Vielfalt grün gestalten

Angetrieben wird die Machine Economy durch die Kombinationen vielfältiger Elemente bestehend aus Daten, Applikationen, Infrastrukturen wie auch Verhaltensweisen bzw. Routinen. Eine nachhaltige Governance kann steuern, welche Verbindungen sich zwischen ihnen etablieren, welche Abhängigkeiten wirken. Nachhaltigkeitskriterien finden derzeit lediglich in einzelnen Systemkomponenten Anwendung, z. B. in der E-Waste Debatte bezüglich der Entsorgung von elektronischen Endgeräten. Die entscheidenden Wechselwirkungen und Beziehungen werden dabei jedoch noch zu selten berücksichtigt. Beispielsweise bündeln Middleware- und Analytics-Plattformen einen bunten Mix an Technologien. Bisher sind sie nur begrenzt kompatibel mit dem Einsatz grüner Alternativen und weit entfernt vom Zielzustand „sustainable-by-design“. Zum Beispiel finden hier effiziente KI-Modelle, wie Spiking Neural Networks (Strubell et al. 2019), zurzeit noch weniger Beachtung als leistungsorientierte Modelle.

Eine in ähnlicher Weise verknüpfende Aufgabe übernehmen Open Source-Anwendungen. Im IoT Developer Survey von 2020 gaben 65% der IoT Entwickler bzw. Entwicklerinnen an, Open Source zu nutzen (Eclipse Foundation 2020). Sie beschleunigen, z. B. über standardisierte Schnittstellen und niedrige Einstiegsinvestitionen, die Vernetzung von Maschinen und damit die Intensivierung des maschinellen Dialogs. Allerdings sind bestehende Frameworks häufig zu wenig auf Nachhaltigkeit ausgerichtet und in der schwer zu fassenden, dezentralen Entwicklung durch viele Einzelakteure bzw. -akteurinnen (inkl. Privatpersonen) hat nachhaltiges Software-Design noch nicht die notwendige Bedeutung. Open Source könnte daher derzeit noch wie eine Verstärkung für ökologisch unvorteilhafte M2M-Kommunikation wirken. Eine wesentliche Aufgabe einer „Grünen Governance der Machine Economy“ ist dementsprechend der Aufbau von grünen Verknüpfungsbausteinen zwischen allen beteiligten Systemelementen und der Anstoß neuer, nachhaltiger Entwicklungsdynamiken – auch bei Open Source.

Letztlich könnten auch unabhängige Organisationen als Vermittler zwischen vielfältigen Akteur*innen auftreten. Zwar gibt es bereits derartige Ansätze, wie am Beispiel der Sustainable Digital Infrastructure Alliance (SDIA) deutlich wird (Sustainable Digital Infrastructure Alliance, 2022). Allerdings könnten diese Organisationen deutlich mehr erreichen, wenn sie mit den nötigen Berechtigungen, Instrumenten sowie Schnittstellen ausgestattet wären bzw. intensiver gefördert würden.

5.3. Herausforderungen an ein Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen

Bei der voranschreitenden Verbreitung von intelligenten und vernetzten Maschinen müssen die unterschiedlichen technisch-infrastrukturellen Herausforderungen mit den vielfältigen Akteur*innen zusammengebracht werden. Innerhalb und zwischen den Ebenen der Wertschöpfung der Machine Economy müssen die Bedürfnisse, Interessen und Abhängigkeiten von Akteur*innen im Sinne der Nachhaltigkeit orchestriert werden. Hier bieten sich eine Reihe von Ansatzpunkten.

Digitalakteure bzw. -akteurinnen in den Blick nehmen

Zunächst gilt es die Rolle von Digitalakteur*innen zu verstehen. Offen ist beispielsweise, wie Tech-Giganten, z. B. Amazon, Google und Microsoft, noch mehr

für eine nachhaltige Open Source Entwicklung beitragen könnten. Zwar vermarkten sie auf der einen Seite eigene IoT-Middleware-Plattformen – auf der anderen Seite gründen bzw. unterstützen sie auch bedeutende Open Source-Initiativen. Über diesen Weg könnten sie in der Lage sein, positive Impulse in der Open Source-Community anzuregen und so ökologische Standards setzen. Auch stellt sich die Frage, welche Implikationen sich aus diesen Entwicklungen für ihre Plattformen selbst ergeben, in die an vielen Stellen Open Source-Lösungen integriert sind.

Ein anderes Beispiel wäre ein ebenenübergreifendes Lebenszyklusmanagement. Applikationen, Daten und Infrastruktur stehen in einem direkten Abhängigkeitsverhältnis. Ein übergreifendes, nachhaltiges Lebenszyklusmanagement stellt daher eine gewaltige Organisationsaufgabe dar, die nur unter Beteiligung diverser Akteure bzw. Akteurinnen gelöst werden kann. Vor allem müssten solche Organisationen zusammengebracht werden, die jeweils die physischen Objekte, digitale Infrastruktur, Daten und Applikationen verwalten. Insbesondere die Tatsache, dass Akteure bzw. Akteurinnen häufig je nach Kunde bzw. Kundin verschiedene Rollen einnehmen, könnte nachhaltige Lebenszyklen blockieren. Zum Beispiel liefern größere Player in einem Anwendungsfall Infrastruktur, IoT Middleware sowie Analytics-Software, während sie in einem anderen Fall nur Software-Komponenten bereitstellen, wobei die Infrastruktur von Konkurrenzunternehmen bereitgestellt wird. Hier lässt sich ein übergreifendes Lebenszyklusmanagement schwieriger umsetzen.

Forschung stärker auf den ökologischen maschinellen Dialog ausrichten

Es wird deutlich, dass rund um das Thema einer nachhaltigen Machine Economy noch umfangreiche Forschungsfragen und Wissenslücken bestehen. Die Frage ist damit, wie wir in Deutschland die bestehenden starken Forschungskompetenzen zur Umweltwirkung der Digitalisierung um das spezifische Wissen im Bereich einer ökologischen Machine Economy ausbauen können. Bestehende Kompetenzen umfassen u. a. Themenbereiche wie Rechenzentren und Cloud-Computing (Hintemann 2021), die Produktion und Nutzung von digitalen Endgeräten (Gröger 2021), Rohstoffgerechtigkeit (Sydow 2020), nachhaltige Software (Naumann et al. 2020) oder grünes Wachstum und Rebound-Effekte (Santarius et al. 2020). Aber viele der aktuellen Beiträge zur Umweltwirkung der Machine Economy sowie ihrer Treiber werden noch immer im Ausland erarbeitet. Dies betrifft bspw., bis auf wenige Ausnahmen, die Debatten rund um "Grüne IoT" (u. a. Varjovi & Barbaie 2020, Albreehm et al. 2019, Zhu et al. 2015), sowie nachhaltige

KI (Schwartz et al. 2019, Yin et al. 2020) oder nachhaltiges Data-Mining (Schneider et al. 2018). Hier braucht es die Entwicklung einer umfassenden Forschungsagenda, um die deutsche Nachhaltigkeitsforschung um die Perspektive auf einen ökologischen maschinellen Dialog zu ergänzen und mit der traditionell starken Wissensbasis rund um Anwendungen der Industrie 4.0 zu verknüpfen.

Rahmen für eine nachhaltige Digitalpolitik bereitstellen

Die Verbindung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit rückt immer stärker in den Fokus des politischen Handelns, aber es mangelt an belastbaren Rahmenwerken für eine nachhaltige Steuerung der Machine Economy. Aufgrund der mehrdimensionalen Abhängigkeiten und Komplexität im industriellen Digitalsystem empfiehlt sich ein ganzheitlicher Politikansatz. Hierzu zählen wir (in Anlehnung an Rogge & Reichardt 2016 und Edmondson et al. 2019) 1. eine klare strategische Zielsetzung, 2. einen Mix an ökonomischen, regulativen und informatorischen Politikinstrumenten, die angebots-, nachfrageseitige sowie grundlegende infrastrukturelle Aufgaben erfüllen, 3. Organisationsmodelle für Verwaltungsorgane und 4. Prozesse für das Monitoring und die Evaluierung sowie für experimentelles Ausprobieren und Anpassungen im Zeitverlauf.

Im Instrumentenmix könnten z. B. ökologisch „wahre“ Preise angestrebt und um andere Maßnahmen, wie z. B. verbindliche Vorgaben zu ökologischen oder auch sozialen Standards, etc. ergänzt werden. Nur mit einem solch umfassenden Ansatz kann die Politik sicher durch die Herausforderungen einer expandierenden Machine Economy manövrieren.

6. Fazit und Ausblick

Eine „Grüne Governance der Machine Economy“ versteht sich als eine systemisch-optimierende Gestaltungsaufgabe, die Umweltbelastungen reduziert ohne wesentliche Zieldimensionen aus dem Blick zu verlieren. Sie berücksichtigt die Zusammenhänge zwischen technologiebasierten Nachhaltigkeitsherausforderungen auf den unterschiedlichen Ebenen der Wertschöpfung und orchestriert die komplexen Bedürfnisse und Abhängigkeiten von und zwischen Akteur*innen.

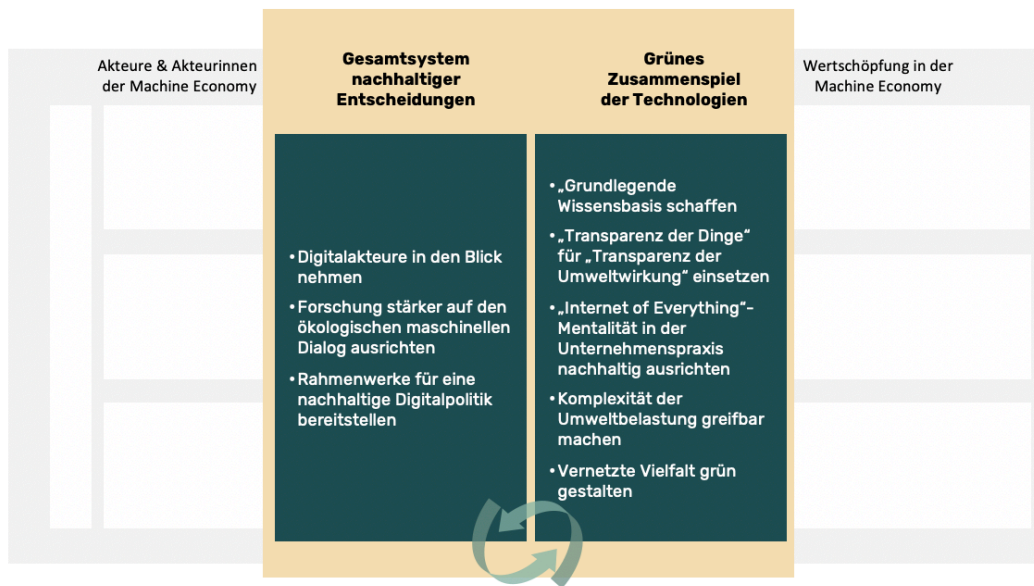


Abbildung 6: Gestaltungsraum für eine "Grüne Governance der Machine Economy"

Nun ist es an der Zeit, die beschriebenen Eckpunkte und Ideen weiter auszuarbeiten und das Konzept einer "Grünen Governance der Machine Economy" in einen wegweisenden, handlungsorientierten Rahmen zu überführen. Hierzu werden wir die aufgezeigten Herausforderungen und Wissenslücken in dedizierten und methodisch diversen Teilprojekten weiter beforschen. Die Ergebnisse werden wir in Form einer Forschungs- und Transformationsroadmap zusammentragen.

Das Ziel ist, den beteiligten Akteur*innen der Machine Economy ganzheitlich und umfassend die Möglichkeiten einzuräumen, die Umweltbelastungen durch den maschinellen Dialog zu verstehen und nachhaltig auszusteuern. Im Übergang in eine grüne Machine Economy soll unsere Roadmap die Umweltwirkungen durch IoT, KI und DLT erklären und Herausforderungen und Maßnahmen bis zum Jahr 2030+ verorten und Entscheider und Entscheiderinnen im dynamischen digitalen Wandel handlungsfähig machen.

Literaturverzeichnis

- Albreem, M. A., Sheikh, A. M., Alsharif, M. H., Jusoh, M., & Mohd Yasin, M. N. (2021). Green Internet of Things (GloT): Applications, Practices, Awareness, and Challenges. *IEEE Access*, 9, 38833–38858. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061697>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., & Hilty, L. (o. J.). Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Bitkom e.V. https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf
- Blechs Schmidt, B., & Stöcker, C. (2016). How Blockchain Can Slash the Manufacturing “Trust Tax”. <https://www.cognizant.com/whitepapers/how-blockchain-can-slash-the-manufacturing-trust-tax-codex2279.pdf>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2020a). Umweltpolitische Digitalagenda. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Digitalisierung/digitalagenda_bf.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2021
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2020b). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm ProgRess III 2020 – 2023 Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2021
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2021a). Können Kommunen für gutes Klima sorgen? Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums. Online verfügbar unter: <https://www.klimaschutz.de/k%C3%B6nnen-kommunen-f%C3%BCr-gutes-klima-sorgen>, zuletzt geprüft am 01.08.2021

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2021b). Green-IT-Initiative des Bundes. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/europa-internationales-nachhaltigkeit-digitalisierung/digitalisierung-und-umwelt/green-it-initiative>, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Business Alliance to Scale Climate Solutions. (2021). Business Alliance to Scale Climate Solutions—Home. Business Alliance to Scale Climate Solutions. Online verfügbar unter: <https://scalingclimatesolutions.org/>, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Cao, B., Zhang, Z., Feng, D., Zhang, S., Zhang, L., Peng, M., & Li, Y. (2020). Performance analysis and comparison of PoW, PoS and DAG based blockchains. *Digital Communications and Networks*, 6(4), 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.12.001>
- Cisco. (2013). The Internet of Everything—Cisco IoE Value Index Study. Online verfügbar unter: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/business-insights/docs/ioe-value-index-faq.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report 2018–2023). Online verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>, zuletzt geprüft am 20.07.2021
- Climate Neutral Data Centre Pact. (2021). Climate Neutral Data Centre Pact – The Green Deal need Green Infrastructure. Online verfügbar unter: <https://www.climateutraldatacentre.net/>, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Crisp Research. (2019). Erfolgreiche Geschäftsmodelle mit IoT-Plattformen und Eco-Systemen. Online verfügbar unter: <https://de.cloudflight.io/reports/erfolgreiche-geschaeftsmodelle-mit-iot-plattformen-und-eco-systemen-38870/>, zuletzt geprüft am 20.07.2021
- Dhar, P. (2020). The carbon impact of artificial intelligence. *Nature Machine Intelligence*, 2(8), 423–425. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0219-9>

- Du, R. Y., Netzer, O., Schweidel, D. A., & Mitra, D. (2021). Capturing Marketing Information to Fuel Growth. *Journal of Marketing*, 85(1), 163–183. <https://doi.org/10.1177/0022242920969198>
- Edmondson, D. L., Kern, F., & Rogge, K. S. (2019). The co-evolution of policy mixes and socio-technical systems: Towards a conceptual framework of policy mix feedback in sustainability transitions. *Research Policy*, 48(10), 103555. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.03.010>
- Eclipse Foundation. (2020). 2020 IoT Developer Survey. Online verfügbar unter: <https://iot.eclipse.org/community/resources/iot-surveys/assets/iot-developer-survey-2020.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2021
- European Commission. (2021). Companies take action to support the green and digital transformation of the EU. Shaping Europe’s digital future. Online verfügbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/companies-take-action-support-green-and-digital-transformation-eu>, zuletzt geprüft am 20.07.2021
- Faucheux, S., & Nicolai, I. (2011). IT for green and green IT: A proposed typology of eco-innovation. *Ecological Economics*, 70(11), 2020–2027. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.05.019>
- Fichter, K. & Clausen, J. (2021). Diffusion of environmental innovations: Sector differences and explanation range of factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 38, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.10.005>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). E-Waste Monitor 2020, Quantities, flows, and the circular economy potential. Online verfügbar unter: http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM_2020_def_dec_2020-1.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2021
- Gröger, J. (2020). Der CO₂-Fußabdruck unseres digitalen Lebensstils/ The carbon footprint of our digital lifestyles [deu/eng]. Öko-Institut e.V.: Blog. Online verfügbar unter: <https://blog.oeko.de/digitaler-co2-fussabdruck/>, zuletzt geprüft am 02.07.2021

- Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. arXiv:2002.05651 [cs]. <http://arxiv.org/abs/2002.05651>
- Hintemann, R. (2021). Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an. Online verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2021
- Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). Rechenzentren in Europa—Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung. Borderstep Institut. Online verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/publikation/hintemann-r-hinterholzer-s-2020-rechenzentren-in-europa-chancen-fuer-eine-nachhaltige-digitalisierung-berlin-borderstep-institut/>, zuletzt geprüft am 02.07.2021
- IDC. (2017). Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical, Don't Focus on Big Data; Focus on the Data That's Big. Online verfügbar unter: <https://www.import.io/wp-content/uploads/2017/04/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2021
- IHS Markit. (2017). The Internet of Things: A movement, not a market. <https://studylib.net/doc/25225693/iot-ebook>, zuletzt geprüft am 15.08.2021
- Jones, N. (2018). The information factories—Data centres are chewing up vast amounts of energy—So researchers are trying to make them more efficient. Springer Nature Limited. Online verfügbar unter: <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-018-06610-y/d41586-018-06610-y.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2021
- McKinsey & Company. (2019). Growing opportunities in the Internet of Things. Online verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/private-equity-and-principal-investors/our-insights/growing-opportunities-in-the-internet-of-things>, zuletzt geprüft am 09.07.2021
- Montevecchi, F., Therese Stickler, Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-

- friendly Cloud Market. Online verfügbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market>, zuletzt geprüft am 23.07.2021
- Murugesan, S., & Gangadharan, G. R. (2012). *Harnessing Green IT - Principles and Practices* (1. Aufl.). John Wiley & Sons, Inc.
- Naumann, S., Guldner, A., & Kern, E. (2021). The Eco-label Blue Angel for Software—Development and Components. In A. Kamilaris, V. Wohlgemuth, K. Karatzas, & I. N. Athanasiadis (Hrsg.), *Advances and New Trends in Environmental Informatics* (S. 79–89). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61969-5_6
- Pohl, J., & Santarius, T. (2020). Vernetzte Nachhaltigkeit oder nicht-nachhaltige Vernetzung? Ökologische Chancen und Risiken des Internet der Dinge. In M. Göpel, H. Leitschuh, A. Brunnengräber, P. Ibisch, R. Loske, M. Müller, J. Sommer, & E. U. von Weizsäcker (Hrsg.), *Die Ökologie der digitalen Gesellschaft*. S. Hirzel Verlag.
- Prause, G. (2019). Smart Contracts for Smart Supply Chains. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2501–2506. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.582>
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. (2018). *Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung*. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1550276/3f7d3c41c6e05695741273e78b8039f2/2018-11-15-ki-strategie-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 03.08.2021
- Rajasingham, D. (2017). Welcome to the machine-to-machine economy, Opportunities and challenges in a connected world. Online verfügbar unter: <https://www.commbank.com.au/content/dam/caas/newsroom/docs/Commbank-Whitepaper-Machine-to-Machine-economy.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2021
- Rogge, K. S., & Reichardt, K. (2016). Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45(8), 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>

- Sahu, C. K., Young, C., & Rai, R. (2020). Artificial intelligence (AI) in augmented reality (AR)-assisted manufacturing applications: A review. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–57. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1859636>
- Santarius, T., Pohl, J., & Lange, S. (2020). Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? *Sustainability*, 12(18), 7496. <https://doi.org/10.3390/su12187496>
- Schneider, J., Basalla, M., & Seidel, S. (2018). Principles of Green Data Mining. Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Hawaii.
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2019). Green AI. arXiv:1907.10597 [cs, stat]. <http://arxiv.org/abs/1907.10597>
- Seagate Technology. (2020). Rethink Data—Bessere Nutzung von mehr Unternehmensdaten – vom Netzwerkrand bis hin zur Cloud. Online verfügbar unter: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/rethink-data/files/rethink-data-report-2020-de-de.pdf>, zuletzt geprüft am 20.07.2021
- Statista. (2021). Number of internet of things (IoT) connected devices worldwide in 2018, 2025 and 2030. Online verfügbar unter: <https://www-statista.com/statistics/802690/worldwide-connected-devices-by-access-technology/>, zuletzt geprüft am 10.07.2021
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. arXiv:1906.02243 [cs]. <http://arxiv.org/abs/1906.02243>
- Sustainable Digital Infrastructure Alliance. (2022). The European platform for the creation of a sustainable digital economy. <https://sdialliance.org//>
- Sydow, J. (2020b). Digitalisierung & Ressourcengerechtigkeit. In M. Göpel, H. Leitschuh, A. Brunnengräber, P. Ibisch, R. Loske, M. Müller, J. Sommer, & E. U. von Weizsäcker (Hrsg.), *Die Ökologie der digitalen Gesellschaft*. S. Hirzel Verlag.
- t3n. (2019). Ethereum: Kryptowährung will hohen Energieverbrauch um 99 Prozent reduzieren. t3n Magazin. Online verfügbar unter:

- <https://t3n.de/news/ethereum-energieverbrauch-senken-1135664/>,
 zuletzt geprüft am 15.07.2021
- Turck, M. (2018). Growing Pains: The 2018 Internet of Things Landscape. Online verfügbar unter: <https://mattturck.com/iot2018/>, zuletzt geprüft am 09.07.2021
- Umweltbundesamt. (2020). Umweltzeichen „Blauer Engel“ für vier neue Produktgruppen. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/umweltzeichen-blauer-engel-fuer-vier-neue>, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Umweltbundesamt. (2021). Der Blaue Engel steht für umweltverträgliche Rechenzentren. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/der-blaue-engel-steht-fuer-umweltvertraegliche>, zuletzt geprüft am 02.08.2021
- Urbach, N., Albrecht, T., Guggenheimer, T., Jöhnk, J., Gebert, J., Jelito, D., Lämmermann, L., & Schweizer, A. (2020). The Advance of the Machines – Vision und Implikationen einer Machine Economy. <https://www.fim-rc.de/Paperbibliothek/Veroeffentlicht/1175/wi-1175.pdf>
- Varjovi, A. E., & Babaie, S. (2020). Green Internet of Things (GloT): Vision, applications and research challenges. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100448. <https://doi.org/10.1016/j.sus-com.2020.100448>
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S. D., Tegmark, M., & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, 11(1), 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>
- Walsh, N. (2020). Microsoft Sustainability Calculator: Analyse der CO2-Emission der IT-Infrastruktur von Unternehmen. Online verfügbar unter: <https://azure.microsoft.com/de-de/blog/microsoft-sustainability-calculator-helps-enterprises-analyze-the-carbon-emissions-of-their-it-infrastructure/>, zuletzt geprüft am 01.08.2021
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale & Umweltveränderungen. (2019). Unsere gemeinsame digitale Zukunft.

https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/wbgu_hg2019.pdf

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Yin, B., Corradi, F., & Bohté, S. M. (2020). Effective and Efficient Computation with Multiple-timescale Spiking Recurrent Neural Networks. arXiv:2005.11633 [cs]. <http://arxiv.org/abs/2005.11633>

Zhu, C., Leung, V. C. M., Shu, L., & Ngai, E. C.-H. (2015). Green Internet of Things for Smart World. *IEEE Access*, 3, 2151–2162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2497312>

Das Gewicht der Machine Economy

Eine ressourcenpolitische Analyse am Beispiel der Industrie 4.0

Autor*innen

Rebecca Heinz

Kurz gesagt

Die vorliegende Kurzstudie wertet den bisherigen Forschungsstand über die ressourcenpolitischen Implikationen der *Machine Economy* am Beispiel der Industrie 4.0 (I4.0) aus. I4.0 birgt sowohl Chancen als auch Risiken für den Ressourcenverbrauch. Es werden Empfehlungen gegeben, damit die Implementierung von I4.0 komplementär zu der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erfolgt.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Laut Politik und Unternehmensverbänden wird die Digitalisierung einen entscheidenden Beitrag zur Ressourceneffizienz der Industrie leisten. Unklar ist jedoch, unter welchen Voraussetzungen sie die absolute Reduktion des Ressourcenverbrauchs befähigen kann und welche potentiellen Risiken mit dem Ressourcenverbrauch der digitalen Infrastruktur in Zusammenhang stehen. Um sich dem Ressourcenverbrauch der *Machine Economy* zu nähern, fokussiert die Studie auf Entwicklungen der Industrie 4.0 (I4.0), welche hier als Vorstufe der *Machine Economy* verstanden wird.

Zielsetzung:

Die Studie liefert im Rahmen einer qualitativen Literaturanalyse Antworten auf folgende Fragen: Was ist über den Ressourcenverbrauch der I4.0 bekannt und wo liegen Wissenslücken? Welchen Beitrag kann I4.0 zur Ressourcenreduktion leisten? Was sind aktuelle Treiber von Industrie 4.0 und wo liegen politische Stellschrauben für die Gestaltung von I4.0 zum Ziele der Ressourcenreduktion?

Ergebnisse:

Die unzureichende Datenlage erlaubt nur unbefriedigende Rückschlüsse über die Auswirkungen von I4.0 auf die unterschiedlichen ökologischen Nachhaltigkeitsbelange. Die aktuelle Transition ist unzureichend an den Zielen der Kreislaufwirtschaft und den hierfür dringend notwendigen neuen Geschäftsmodellen ausgerichtet. Dabei bietet die I4.0 hierfür massives Potential.

Handlungsempfehlung:

Um Informationslücken über den Ressourcenverbrauch der digitalen Infrastruktur von I4.0 zu schließen, sollten Forschungsvorhaben initiiert werden – eine wichtige Voraussetzung, um politische Steuerungsinstrumente für eine ressourcenschonende I4.0 zielgerichtet entwickeln und auf den Weg bringen zu können. Damit Investitionen in I4.0 in zukunftsfähige Geschäftsmodelle fließen, sollte die Bundesregierung Maßnahmen und Instrumente zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft schnell auf den Weg bringen (z.B. digitaler Produktpass, Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie).

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	65
2. Der Rohstoffbedarf der Digitalisierung als blinder Fleck der sozial- ökologischen Transformationsforschung	67
3. Das Gewicht der Machine Economy am Beispiel der Industrie 4.0	73
4. Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen.....	83
Literaturverzeichnis	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Szenario für Rohstoffbedarfe einzelner digitaler Technologien nach DERA (2021).....72

1. Einleitung

Die Digitalisierung ist ein transformativer Prozess, der zu einer tiefgreifenden Umstrukturierung gesellschaftlicher und ökonomischer Verhältnisse führt. Hierbei wird die Digitalisierung auch den maschinellen Dialog durch Technologien und Anwendungen im Bereich Distributed Ledger Technologies (DLT), Internet of things (IoT), Big Data und Künstliche Intelligenz (KI) revolutionieren und damit das Verhältnis von industrieller Produktion und Konsum neu strukturieren, z.B. durch neue Geschäftsmodelle und Konsumweisen. In diesem Kontext setzt sich aktuell auch der Begriff der Machine Economy durch. Hierunter wird ein Wirtschaftssystem verstanden, in der Maschinen wesentliche Prozesse und Funktionen übernehmen sowie nahezu autonom am Marktgeschehen teilnehmen. Digitale Technologien befähigen schon heute Maschinen ihre Umgebung und Umwelt wahrzunehmen, zu verstehen und Entscheidungen zu treffen. Die Machine Economy ist zwar noch weitestgehend eine Zukunftsvision, im Kontext von Industrie 4.0 (I4.0) und den aufstrebenden Technologien KI, IoT, DLT existieren entsprechende Systeme jedoch bereits heute auf der Produktionsebene. I4.0 ist damit eine mögliche Vorstufe einer Machine Economy. Daher wird im weiteren Verlauf die ressourcenpolitische Analyse am Beispiel der I4.0 umgesetzt.

Diskurse und Narrative über die digitale Transformation beinhalten zumeist das Versprechen, dass sich die Digitalisierung positiv auf die ökologische Nachhaltigkeit auswirkt. Hierunter fallen Annahmen über eine tiefgreifende Dematerialisierung und die Reduktion des Ressourceneinsatzes in unterschiedlichen gesellschaftlichen Bedürfnisfeldern. Auch den aktuellen Emissions-Reduktions-Szenarien liegt die Annahme zu Grunde, dass die Digitalisierung durch intelligente Energiesteuerung zu einer Reduktion der globalen Energienachfrage beitragen wird (Grubler et al., 2018; Purr et al., 2019). Digitalisierung gilt daher als zentraler Baustein und Voraussetzung für ein nachhaltiges und treibhausgasneutrales Wirtschaftssystem.

Wissenschaftler:innen aus der Nachhaltigkeitsforschung kritisieren jedoch, dass die Umweltaufwendungen der digitalen Infrastruktur selbst, d.h. Energie- und Rohstoffaufwendungen für Betrieb und Bau sowie nicht-intendierte Rebound-Effekte¹, in aktuellen Bewertungen und politischen Zielsetzungen nur unzu-

¹ Der Rebound-Effekt beschreibt das Phänomen, wenn erwartete Einsparpotentiale durch Effizienzsteigerungen nicht erreicht werden.

reichend Beachtung finden. Insbesondere mit Blick auf die Verbreitung und Anwendung der Kommunikationstechnologien (IKT) befasste man sich in den letzten Jahren sowohl aus wissenschaftlicher wie zivilgesellschaftlicher Sicht vermehrt mit den negativen Umweltauswirkungen der Digitalisierung (Santarius & Lange, 2021). Im Fokus der Debatte standen besonders die Energieaufwendungen digitaler Dienstleistungen (z.B. im Bereich von Streamingdiensten, vgl. Sühlmann-Faul & Rammler, 2018) und die negativen menschenrechtlichen und umweltbezogenen Auswirkungen, die bei der Förderung der Rohstoffe für die digitalen Endgeräte sowie bei der Entsorgung letzterer entstehen (Pilgrim et al. 2017).

Dennoch mangelt es sowohl im wissenschaftlichen wie öffentlichen Diskurs weiterhin an einer Auseinandersetzung mit den Auswirkungen auf Ressourcen und hierbei insbesondere mit der metallischen Rohstoffintensität als Folge der fortschreitenden Digitalisierung. Kapitel zwei bietet daher eine erste Einordnung über den Wissens- und Forschungsstand zur Rohstoffintensität der Digitalisierung im Allgemeinen, bevor sich Kapitel drei den daraus ableitenden und spezifischen Rohstoff- und Ressourcenanforderungen der I4.0 widmet. Dieses Vorgehen ist relevant, da die bisherige Studienlage zu Ressourcen- und Rohstofffragen im Kontext der I4.0 zu unausgereift und undifferenziert ist, um konkrete Rückschlüsse für diesen Teilbereich der Digitalisierung zu zulassen. Kapitel 2 zeigt daher die allgemeinen blinden Flecken der Transformationsforschung im Bereich der Digitalisierung auf, auf denen im weiteren Schritt Forderungen für Forschung und politische Rahmensetzung der I4.0 folgen.

Mit Blick auf die I4.0 spielen Ressourcenfragen in öffentlichen Strategie- und Positionspapieren über I4.0 vor allem mit Blick auf ressourceneffiziente Produktionsweisen und die Verbesserung des Stoffstrommanagements eine Rolle. Es mangelt jedoch, wie die vorliegende Kurzstudie zeigt, an einer Auseinandersetzung mit den Ressourcenaufwendungen, welche a priori für die Bereitstellung und Instandhaltung digitaler Infrastrukturen aufgewandt werden müssen.

Dennoch gilt in industrienahen Berichten und politischen Strategien der positive Umwelteffekt der I4.0 als gesetzt. So spricht die Plattform Industrie 4.0 (eine gemeinsame Initiative der Bundesregierung und Industrieunternehmen) von „einer natürlichen Überschneidung von Effizienz und Ressourcenschonung, die mit Digitalisierung erstmals umfänglich möglich ist“ (Plattform Industrie 4.0, 2021, S. 4).

Die vorliegende Kurzstudie möchte vor diesem Hintergrund eine Einordnung der I4.0 zu folgenden Fragen geben:

- Was ist bekannt über den Ressourcen- und Rohstoffverbrauch der Digitalisierung im Allgemeinen und der I4.0 im konkreten, wo liegen derzeitige Forschungslücken? (Kapitel 2 und 3.1)
- Inwieweit und unter welchen Bedingungen kann I4.0 einen Beitrag zur absoluten Reduktion des primären Ressourcen- und Rohstoffverbrauchs leisten? (Kapitel 3.2)
- Was sind aktuelle Treiber für die Umsetzung von I4.0 und inwieweit spielen ökologische Nachhaltigkeitsaspekte hierbei eine Rolle? (Kapitel 3.3)
- Welche politischen Leitplanken braucht es, damit I4.0 einen effektiven Beitrag zur Ressourcenreduktion leisten kann? (Kapitel 4)

Zur Beantwortung der Fragen wurde eine qualitative Literaturanalyse von wissenschaftlichen Artikeln und grauer Literatur (insbesondere von Industrieinitiativen, also Zusammenschlüssen von Industrieakteur:innen zur Setzung gemeinsamer Standards und Entwicklung politischer Forderungen) durchgeführt. Die Studie ist in vier Kapitel unterteilt. Auf die Einleitung folgt in Kapitel 2 eine allgemeine Einordnung der Digitalisierung vor dem Hintergrund der Transformationsforschung unter besonderer Berücksichtigung des Verbrauchs metallischer Rohstoffe. In Kapitel 3 erfolgt eine differenzierte Auseinandersetzung mit dem umwelt- und ressourcenpolitischen Potentialen und Risiken der I4.0 und ihrer aktuellen Treiber. Kapitel 4 fasst die Kernaussagen zusammen und leitet politische Empfehlungen und Maßnahmen ab.

2. Der Rohstoffbedarf der Digitalisierung als blinder Fleck der sozial-ökologischen Transformationsforschung

2.1. Digitalisierung steigert Bedarf an umweltkritischen Technologiemetallen

Die Digitalisierung ist einer der aktuellen Megatrends für den Verbrauchsanstieg metallischer und mineralischer Rohstoffe. Die digitale Infrastruktur umfasst Endgeräte, Datenübertragungsnetze sowie Datenspeicher- und Verarbeitungszentren (Rechenzentren) (Hilbert & López, 2011). Während der direkte und massenmäßige Anteil digitaler Technologien am Gesamtverbrauch einzelner Metalle – insbesondere bei den Massenmetallen – relativ bescheiden ist (z.B. Kupfer, Platin, Gold), ist die Digitalisierung bereits heute Haupttreiber für den Verbrauch kritischer Technologiemetalle darunter Gallium, Indium, Tantal, Ruthenium und

Germanium (Ferreboeuf et al., 2019). In einem Smartphone beispielsweise sind mindestens vierzig Metalle enthalten, jedes in Mengen von einigen Milligramm bis zu mehreren zehn Gramm. Trotz dieser vergleichsweise geringen mengenmäßigen Konzentrationen bezogen auf die einzelnen Endgeräte, summieren sich die für die gesamte digitale Infrastruktur benötigten Metalle und Mineralien auf eine ökologisch kritische Masse. Denn digitale Geräte sind insbesondere auf Metalle angewiesen, die selten und/oder kritisch sind, da ihre zugänglichen Reserven sowohl unter ökologischen wie ökonomischen Gesichtspunkten begrenzt sind (Dehoust et al., 2020). Die ökologischen Grenzen ihrer Verfügbarkeit hängen auch damit zusammen, dass diese Rohstoffe in besonders niedriger Konzentration in den Erzen gebunden und die Umweltkosten der Förderung daher aufgrund des proportional zur Rohstoffmenge hohen Chemie- und Wassereinsatzes sowie der zu bewegendenden Gesteinsmenge besonders hoch sind (vgl. auch Pilgrim et al., 2017). Die ökologische Kritikalität der Rohstoffe führt auch zu Menschenrechtsverletzungen, u. a. da im Rahmen des Abbaus Wasserressourcen übernutzt oder chemisch stark belastet werden. Zudem ist bei vielen dieser Metalle in den kommenden Jahrzehnten mit Produktionsspitzen zu rechnen, die unterhalb derzeitiger Nachfrageszenarien liegen.

Basierend auf derzeitigen Annahmen zu Technologie- und Marktentwicklungen hat die deutsche Rohstoffagentur (DERA) 2016 und 2021 Szenarien für den Rohstoffbedarf einzelner Zukunftstechnologien veröffentlicht. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf kritischen Rohstoffen, d.h. Rohstoffen, bei denen ein hohes Versorgungsrisiko für Deutschland besteht. Im Vergleich zu 2016 stehen 2021 digitale Technologien verstärkt im Fokus der Studie. Hierbei ist insbesondere für Technologien der I4.0 (Robotik und IoT) auffällig, dass sowohl die Datengrundlage für künftige Rohstoffbedarfe als auch Annahmen zur Technologie- und Marktdurchsetzung im Vergleich zu anderen in der Studie behandelten Zukunftstechnologien wenig ausgereift sind, weswegen Szenarien für künftige Rohstoffbedarfe dieser Technologien nicht erarbeitet werden konnten (ausgenommen additive Druckverfahren, siehe Kapitel 3). Für Technologien im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) konnten Verbrauchsszenarien für einzelne, besonders kritische Rohstoffe ermittelt werden. Tabelle 1 zeigt, dass die geschätzten Rohstoffbedarfe für einzelne digitale Technologien 2040 teils über den derzeitigen weltweiten Produktionskapazitäten liegen könnten. Dies ist insbesondere für Tantal (auch bekannt als Coltan) der Fall, während Indium und Gallium in 2040 bereits nur für die Bereitstellung einzelner Technologiekomponenten einen beträchtlichen Anteil der 2018 global produzierten Rohstoffmenge einnehmen könnten.

2.2. Mangelnde Berücksichtigung der Digitalisierung in Szenarien zur zukünftigen und globalen Entwicklung der Ressourcen- und Rohstoffnutzung

Die DERA (2021) verweist in ihrer Studie darauf, dass die Erarbeitung übergreifender Rohstoffszenarien für 2040 insbesondere durch die fehlende oder unzureichende Integration künftiger Digitalisierungseffekte in den für die Studie verwendeten Basis-Szenarien des IPCC und des *World Energy Outlooks* erschwert wurde (DERA, 2021; Riahi et al., 2017).

Auch die Ende 2019 vom Umweltbundesamt vorgestellte RESCUE-Studie, in der erstmals ein Szenario für die Reduktion des Ressourcenverbrauchs unter Berücksichtigung des 1,5°C-Limits für Deutschland erarbeitet wurde, vernachlässigt die Digitalisierung als Größe in ihren Modellen zum Ressourcen- und Rohstoffverbrauch weitestgehend (außer im Kontext der Energieaufwendungen) (Purr et al., 2019). Auch der *Material Outlook 2060* der OECD (2019) bildet die Materialintensität der Digitalisierung unzureichend ab. Die Digitalisierung wird hier als zentraler Treiber für einen zukünftig wachsenden Dienstleistungssektor bewertet, der im Modell zu einem relativen Bedeutungsverlust der rohstoff- und ressourcenintensiveren Industrie- und Landwirtschaftssektoren und, dieser Logik folgend, so zu einer relativen Abnahme des Ressourcenverbrauchs führt. Ob die Digitalisierung durch die Befähigung der Sharing Economy (Geschäftsmodelle die das Teilen von Gütern ermöglichen) tatsächlich zu einem reduzierten Rohstoffverbrauch einzelner Bedürfnisfelder beitragen kann, wird aktuell jedoch noch kontrovers diskutiert (Acquier et al., 2017; Santarius et al., 2020; Warming-ton-Lundström & Laurenti, 2020; Wruk et al., 2019). Eine zentrale Herausforderung ist hierbei die große Unsicherheit bezüglich des Umfangs und der Art der sich durchsetzenden Technologien (und damit einhergehende Rohstoffzusammensetzungen und Potentiale für Substitutionen) sowie Rückkopplungen mit Energieverbräuchen und dem Verbrauch weiterer Ressourcen, die durch mögliche Rebound-Effekte ausgelöst werden könnten.

Darüber hinaus fokussieren bisherige Studien über die Umweltwirkungen der Digitalisierung zum einen meist auf die Potentiale, die die Digitalisierung für die Energie- und Mobilitätswende mit Blick auf eine smarte Energiesteuerung und dadurch verbesserte Energieeffizienz hat. Die Chancen und Risiken werden hierbei jedoch wissenschaftlich durchaus kontrovers diskutiert (Malmodin & Coromama, 2017). Zum anderen wurden in den letzten Jahren vermehrt Studien über die negativen Umweltfolgen der Informations- und Kommunikationstechnolo-

gien durchgeführt (Pohl & Finkbeiner, 2017). Hierbei stehen zumeist die Auswirkungen des Energieverbrauchs und das damit einhergehende Treibhausgaspotential im Vordergrund, weniger jedoch Schätzungen zum Verbrauch abiotischer Ressourcen und dem damit assoziierten metallischen Rohstoffaufwand (Gensch et al., 2017). Dabei kommt eine jüngst von den EU-Parlamentsabgeordneten Kim van Sparrentak und David Cormand in Auftrag gegebene Studie zu dem Schluss, dass die Rohstoffnutzung von Mineralien und Metallen für die Geräte der IKT die mit Abstand bedeutendste Größe bei den Umweltauswirkungen der IKT einnimmt – weit vor den in der Studie ebenfalls untersuchten Kriterien „Klimawandel“ und „fossile Ressourcennutzung“ (Benqassem et al., 2021). Die Autor:innen der EU-Studie plädieren dafür, dass Fragen der Rohstoffinanspruchnahme im speziellen und Umweltauswirkungen der Digitalisierung und digitaler Dienstleistungen im Allgemeinen besser im Rahmen von Lebenszyklusanalysen erfasst werden sollten, um eine differenzierte Aussage über das tatsächliche Nachhaltigkeitspotential der Digitalisierung treffen und den politischen Rahmen dahingehend anpassen zu können. Auch Castorani et al. (2018) haben im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse von Dunstabzugshauben dargelegt, dass der Nachhaltigkeitseffekt durch die digitalisierte Nutzungssteuerung von Gebrauchsgegenständen im Rahmen des IoT zu unterschiedlichen Umwelteffekten je nach untersuchter Umweltkategorie führt. Während der gesamte Energieverbrauch durch die digitale Schnittstelle verbessert werden konnte, stiegen der Metallverbrauch und Parameter der humanen Toxizität in der Produktion an. Eine Digitalisierung, die sich nicht an Nachhaltigkeitskriterien orientiert, könnte sich aufgrund der Begrenztheit einzelner Rohstoffe langfristig selbst im Wege stehen oder aber einen Rohstoffabbau befeuern, der besonders negative Auswirkungen auf den Schutz von Menschenrechten und die Biodiversität hätte. Von besonderer Bedeutung ist dabei auch, dass ein unregulierter Rohstoffhunger der Digitalisierung gravierende Folgen für die dringend nötige Energie- und Mobilitätswende haben könnte. Denn auch der Wandel weg von einem fossilen hinzu einem erneuerbaren Energie- und Mobilitätssystem geht mit einem starken Verbrauchsanstieg metallischer und mineralischer Rohstoffe einher (IPIS 2021). So könnte die Digitalisierung ohne einen geeigneten politischen Steuerungsrahmen mit der Energie- und Mobilitätswende in Konkurrenz um wertvolle Rohstoffe treten (Ferreboeuf & et al., 2019) oder aber der ausgelöste Verbrauchsanstieg zu einer massiven Ausbreitung von Bergbauprojekten in sensible Ökosysteme führen (Sonter et al., 2020). Ein weiteres Risiko stellt zudem ein möglicher steigender Energieverbrauch durch die Digitalisierung selbst dar, wie er derzeit im Bereich der IKT zu beobachten ist. Hieraus folgen sich gegenseitig

verstärkende Wechselwirkungen zwischen dem Energie- und Digitalisierungssektor (steigende Anzahl digitaler Infrastruktur und Energieanlagen führt zu höherer Rohstoffnutzung), der den Druck auf die primäre Rohstoffförderung weiter verstärkt.

2.3. Unzureichende Recycling-Strategien für Technologiemetalle

Die fortschreitende Digitalisierung setzt auch den Miniaturisierungstrend von Elektronikkomponenten fort, d.h., dass diese bei gleichbleibender oder höherer Leistung kleiner und hierdurch rohstoffeffizienter werden. Dies wiederum hat nachteilige Effekte für das Rohstoffrecycling, da die Miniaturisierung die Zerlegung von Geräten in ihre einzelnen Bestandteile und Rohstoffe erschwert und hierdurch die Energieaufwendung in Relation zur Menge recycelter Rohstoffe überproportional steigt (Behrendt, 2018). Dabei haben von den 60 Metallen, die derzeit in digitalen Geräten eingesetzt werden, 34 Rohstoffe eine Rückgewinnungsquote von unter einem Prozent – hierunter auch die kritischen Rohstoffe Indium, Gallium, Lithium, Germanium und Tantal, die Seltenen Erden Scandium, Dysprosium/Terbium und Neodym/Praseodym und die gesamte Gruppe der Lanthanoide (EU-Recycling, 2016). Eine zentrale Herausforderung stellt hierbei aktuell die fehlende Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses dar, welche Investitionen in und den Ausbau von Rückgewinnungsanlagen derzeit behindert. Das Umweltbundesamt rät dazu, dass staatliche Recyclingstrategien stärker die vermiedenen ökologischen Kosten der primären Rohstoffförderung sowie prospektive Versorgungssicherheit in den Fokus rücken und durch entsprechende Politikinstrumente flankieren sollten (Sander et al., 2017).

Denn heimische Rohstofflager in Form von Elektroschrottbergen bieten hierfür bereits heute ein gutes Potential. Aktuell fallen in Europa jährlich 12 Millionen Tonnen Elektroschrott an, Tendenz steigend (Adrian et al., 2020). Diese steigenden Schrottmengen haben in Deutschland jüngst dazu beigetragen, dass die anteilige Sammelrate von Elektro- und Elektronikgeräten für das Recycling zuletzt wieder von 45% auf 43% sank (Umweltbundesamt, 2020). Dies bedeutet, dass aktuell 57% aller Elektro- und Elektronikgeräte erst gar nicht vom Recycling erfasst werden. Hierbei ist zu beachten, dass die in der WEEE-Richtlinie definierte Sammelquote den für die Industrie 4.0 relevanten Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus (ortsfest installierte industrielle Großwerkzeuge und Großanlagen, bewegliche Maschinen) sowie elektronische Fahrzeuge ausklammert – d.h. die tatsächliche Menge und Recyclingrate metallintensiver digitaler Geräte und Infrastrukturen lässt sich hieraus nicht ableiten, da die Sammelraten den Industrie-

und Automobilsektor nicht erfassen – und damit auch nicht die Wiederverwertungspotentiale der I4.0 berücksichtigt werden.

Technologie/ Hardware	Rohstoff	Weltweite Produktion in 2018 in t	Bedarf 2018 für Technologie in t	Bedarf 2040 für Technologie in t
LCD/OLED-Displays	Indium	808	185	214-297
Mikroelektronische Kondensatoren	Tantal	1.832	740	1.716-2.013
Optoelektronische Bauelemente im Telekommunikationsbereich	Gallium	413	1	2
	Arsen	32.783	1	2
	Indium	808	5	35
RadiofrequenzMikrochips	Gallium	413	38	60-90
	Lithium	95.170	8	15-22
	Niob	68.200	5	22-18
	Tantal	1.832	194	356-531

Tabelle 4: Szenario für Rohstoffbedarfe einzelner digitaler Technologien nach DERA (2021)

Auf den Punkt:

- Die Digitalisierung ist insbesondere bei Industriemetallen der zentrale Treiber für eine steigende Nachfrage. Zugleich fehlt – trotz existenter Verfahren – eine geeignete Recyclinginfrastruktur für diese kritischen Metalle. Der mit dem IoT weiter einhergehende Miniaturisierungstrend von Elektronik wird das Recycling dabei zusätzlich erschweren.
- Trotz der wachsenden Rohstoffnachfrage durch die digitalen Technologien, ist die Rohstoffinanspruchnahme der Digitalisierung ein blinder Fleck in aktuellen wissenschaftlichen Szenarien bezüglich der globalen

Ressourcenentnahme und dem Klimawandel. Dabei läuft eine unregulierte Digitalisierung Gefahr, mit der Energie- und Mobilitätswende in Konkurrenz um wertvolle metallische und mineralische Rohstoffe zu treten.

- Aktuelle Studien über die Umweltauswirkungen der Digitalisierung fokussieren sich insbesondere auf IKT Anwendungen und deren Energieverbrauch. Erste Studienergebnisse legen jedoch nahe, dass die größten Umweltauswirkungen mit dem Rohstoffeinsatz in der digitalen Infrastruktur in Zusammenhang stehen. Die Auswirkungen des Rohstoffverbrauchs auf die Nachhaltigkeit derzeitiger Digitalisierungstrends ist daher ein blinder Fleck. Dies gilt insbesondere für die Betrachtung und ökologische Bewertung einzelner digitaler Entwicklungstrends, wie der I4.0, wie im nächsten Kapitel dargelegt.

3. Das Gewicht der Machine Economy am Beispiel der Industrie 4.0

3.1. Mangelnde Transparenz über Ressourcenverbrauch und Umweltwirkung von I4.0 Anwendungen

Unzureichende Integration von ökologischen Nachhaltigkeitsaspekten in die Bewertung von I4.0 Anwendungen

Der Begriff Industrie 4.0 (I4.0) wurde erstmalig 2011 in einer deutschen Regierungsinitiative erwähnt und hat sich seither international durchgesetzt. Unter I4.0 wird die Vernetzung des Produktionsprozesses verstanden, sowohl entlang des Lieferkettennetzwerkes als auch entlang der internen Betriebs- und Produktionsstrukturen. Die I4.0 umfasst das Zusammenspiel einer Reihe von Technologien, darunter IoT, cyber-physische Systeme (CPS)², KI, DLT, Big Data, Cloud-Computing und additive Fertigung (3-D-Druckverfahren).

Auch wenn Nachhaltigkeitsaspekte in Industrie-Debatten und wissenschaftlichen Diskursen um Industrie 4.0 eine immer wichtigere Rolle spielen (Plattform Industrie 4.0, 2020a), hat eine für diese Kurzstudie durchgeführte Literaturrecherche ergeben, dass kaum holistische Nachhaltigkeitsbewertungen für die

² Cyber-physische Systeme sind über eine Dateninfrastruktur vernetzte softwaretechnische Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen.

Anwendungen und Auswirkungen der Technologien der Industrie 4.0 vorliegen (Bai et al., 2020; Beier et al., 2017; Bonilla et al., 2018; Chen et al., 2020; Esposito, 2018; Feroz et al., 2021; Gebler et al., 2014; Khan et al., 2021a; Raihanian Mashhadi & Behdad, 2018; Stock et al., 2018). So wurden keine aussagekräftigen Studien oder Publikationen gefunden, die Aufschluss über aktuelle oder zu erwartende metallische und mineralische Rohstoffbedarfe rund um die Infrastruktur der Industrie 4.0 und den damit einhergehenden Umweltauswirkungen zulassen. Fokus der ausgewerteten Studien liegt vielmehr auf der Analyse einzelner Umweltparameter des Produktionsprozesses, insbesondere im Bereich der Ressourcen- und Energieeffizienz. So finden in den analysierten Studien Nachhaltigkeitsbewertungen meist auf Fabrikebene statt, konzentrieren sich entweder auf den Fluss der In- und Output-Ressourcen im Produktionsprozess, rücken einzelne Ressourcen oder Umweltparameter in den Vordergrund oder fokussieren auf einzelne Technologien der I4.0 (Chen et al., 2020; Gebler et al., 2014; Junge & Straube, 2020).

Das Potential von I4.0 im Nachhaltigkeitskontext wird in der grauen Literatur insbesondere im besseren Energiemanagement und folglich im Potential zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie in der Ressourceneffizienz verortet (Plattform Industrie 4.0, 2020a). Fritzsche et al. (2018) hingegen kommen in einer Analyse zum Schluss, dass eine Validierung entsprechender Annahmen um Energieeinsparpotentiale der Industrie 4.0 derzeit nicht möglich ist, da Analysen fehlen, die ein umfassenderes Bild der potentiellen Energieeinsparungen, einschließlich möglicher negativer Auswirkungen und Rückkopplungen, vermitteln. Bai et al. (2020) haben in einem Review Nachhaltigkeitsbewertungen für die jeweiligen Kerntechnologien der I4.0 zusammengetragen und plädieren für eine differenzierte Bewertung der jeweiligen Technologien mit Blick auf ihre Nachhaltigkeitsbelange und Potentiale. In ihrer Analyse wird deutlich, dass das Potential von I4.0 für die ökologische Nachhaltigkeit nicht nur von der angewandten Technologie, sondern auch von dem wirtschaftlichen Sektor abhängt, in welchem die Technologie eingesetzt wird. So erzielen IoT-Lösungen im Lebensmittel und Landwirtschaftssektor hohe Nachhaltigkeitswerte, während in der Automobil- und Elektronikindustrie kobotische Systeme (autonome Industrieroboter) die höchste Wirksamkeit für ökologische Nachhaltigkeit entfalten.

Die Analyse von Bai et al. (2020) fußt auf den Daten des 2018 veröffentlichten White Paper des World Economic Forums über das Nachhaltigkeitspotential der Industrie 4.0 (Esposito, 2018). Die Daten und Ergebnisse der Studie basieren auf

einer Expert:innen Befragung und sind daher qualitativer, nicht jedoch quantitativer Art. Dieses Vorgehen ließ sich auch in einer Vielzahl der für diese Kurzstudie analysierten Studien wiederfinden, denn oftmals basiert die Bewertung von Nachhaltigkeitsbelangen digitaler Transformationsprozesse in der Industrie auf einer qualitativen Befragung von Industrieakteur:innen. D.h. die Bewertungen über den Einfluss von I4.0 auf Umweltparameter und Ressourceneinsparungen in der Produktion gehen nicht selten auf die Selbsteinschätzung von Unternehmen zurück, die entsprechende Technologien anwenden. Begründet wird dieses Vorgehen mit einer mangelnden quantitativen Datenbasis (vgl. Beier et al., 2017; Junge & Straube, 2020; Kayikci, 2018; Stock et al., 2018). Diesem Problem sah sich auch das Zentrum für Ressourceneffizienz des Vereins für Ingenieure (VDI) in einer Studie über das Ressourceneinsparungspotential durch I4.0-Anwendungen für Deutschland ausgesetzt. Eine aggregierte Bewertung war nicht möglich, da Angaben über Ressourcen- und Energieeinsparungen in den untersuchten Unternehmen nur als Schätzwerte vorlagen. So konnte kein Unternehmen genaue Angaben zum jährlichen Strombedarf einzelner Maschinen und/oder Produktionslinien sowie Transportdistanzen machen. Hinsichtlich der Schätzung von Ressourcen- und Rohstoffaufwendungen für die digitale Infrastruktur hatten die Betriebe kaum Informationen über die verwendeten Hardware-Komponenten zur Verfügung, so konnten z. B. keine Angaben zu Art und Menge der für eine spezifische Praxisanwendung verwendeten/verbauten Sensoren gemacht werden (VDI, 2017). Durch I4.0 wird die Optimierung der eigenen Fabrik im Rahmen der Datenanalyse und -auswertung oftmals an Business-to-Business-Plattformen, also externe Dienstleister ausgelagert. Den untersuchten Studien zur Bewertung der betrieblichen Ressourceneffizienz konnte nicht entnommen werden, inwieweit diese durch I4.0 ausgelagerten Energieaufwendung in die Umweltbilanzierungen eingeflossen sind. Durch I4.0 verschwimmen die physischen Grenzen einer Fabrik, dies erschwert es auch Ressourcenverbräuche klar zu zuordnen.

Im Rahmen dieser Auswertung wurden nur wenige Studien gefunden, die die Umweltauswirkungen von I4.0-Technologien unter Durchführung von Lebenszyklusanalysen bewerteten. Die Lebenszyklusanalyse ist ein systematischer und methodischer Ansatz zur Erfassung der potentiellen Umweltwirkungen und der Energiebilanzen, die entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer technologischen Anwendung, einschließlich der Produktionsphase, anfallen und hierbei auch Ressourcenverbräuche explizit erfassen. Chen et al. (2020) haben die bisherige Studienlage zur ökologischen Nachhaltigkeit der digitalen Transformation der Industrie im Rahmen eines Lebenszyklusmodells analysiert

und ausgewertet. Die Autor:innen unterteilten die verfügbaren Umweltbewertungen für digitale Technologien in Produktlebenszyklus (Umwelteffekte der unter I4.0 produzierten Produkte) und Technologielebenszyklus (Umwelteffekte der Hardware und digitalen Infrastruktur). Sie kommen zu dem Schluss, dass während der Einsatz von I4.0 zumeist eine positive Umweltbilanz auf den Produktlebenszyklus entfaltet, die Umwelteffekte des Technologielebenszyklus negativ zu bewerten sind. Stock et al. (2018) identifizierten im Rahmen einer qualitativen Studie, z.B. dass potentielle negative Umweltauswirkungen insbesondere aus dem massiven Material- und Energieverbrauch resultieren, die für die Bereitstellung und den Betrieb der digitalen Infrastruktur in der I4.0 anfällt. Vor allem Ausstattung von Maschinen und Anlagen mit zusätzlicher IKT, insbesondere Sensoren, trägt zu einem massiven Verbrauch metallischer Rohstoffe bei (hierbei verweisen die Autor:innen auf die bereits im vorangegangenen Kapitel vorgestellte DERA-Studie von 2016).

3.2. Implementierung von Industrie 4.0 im Kontext umweltpolitischer Ziele

Umweltwirkung der I4.0 hängt vom Anwendungsfall und ihren Spill-Over-Effekten ab

Oláh et al. (2020) schlussfolgern in einem Review über den Beitrag der I4.0 zur Erfüllung der nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs), dass eine Lücke zwischen der aktuellen und gewünschten Situation besteht, da die Implementierung von I4.0-Technologien nicht ausreichend an Nachhaltigkeitskriterien ausgerichtet sei. Insbesondere die ökologischen Auswirkungen der I4.0 seien unter aktuellen Geschäftspraktiken negativ zu bewerten (Oláh et al., 2020). Auch Bonilla et al. (2018) empfehlen in einer szenariobasierten Analyse, die Umsetzung von I4.0 und der sich hieraus ergebenden Geschäftsmodelle stärker an den SDGs auszurichten und einen dahingehend geeigneten politischen Rahmen zu setzen, da die derzeitigen Anwendungsfälle von I4.0 sowohl das Potential für positive wie negative Umweltauswirkungen besitzen.

Ob die Anwendung von I4.0-Technologien eine positive Umweltauswirkung auf den Produktlebenszyklus hat, ist jedoch sehr stark davon abhängig, wie die dahinterliegenden Geschäftsmodelle ausgestaltet sind. So können IoT-Anwendungen das Ökodesign von z.B. Elektronikgeräten verbessern und zu einem effizienteren Ressourceneinsatz im Produktlebenszyklus beitragen (vgl. z.B. Zhang et al., 2019). Hingegen trägt die Individualisierung von Produktdesign und

Vermarktungsstrategien durch das technologische Zusammenspiel von u. a. IoT, Big Data und additiven Druckverfahren zu einem erhöhten Transportaufwand zwischen Lieferant:innen und Kund:innen bei, da für die Beschaffung kleinerer Chargen und personalisierter Module häufigere Transporte anfallen und auch die „just-in-time“-Lieferungen an Kund:innen mit einem höheren Transportaufwand verbunden sind (Zhang et al., 2019). Insbesondere additive Druckverfahren eröffnen dabei Möglichkeiten für hochgradig individuelles Produktdesign, belasten aber mehreren Studien zufolge deutlich die Umwelt, da diese Druckverfahren besonders energieintensiv sind (Annibaldi & Rotilio, 2019; Bonilla et al., 2018; Ford & Despeisse, 2016; Oláh et al., 2020). Auch Druckfehler, die bei 3-D-Druckern derzeit noch häufig auftreten, können sich ungünstig auf den Material- und Energieverbrauch auswirken (Annibaldi & Rotilio, 2019). Nicht nur der Energieverbrauch ist bei additiven Fertigungsprozessen verglichen mit konventionellen Methoden deutlich höher, auch die kumulierte Rohstoffanspruchnahme ist laut einer Vergleichsstudie des Zentrums für Ressourceneffizienz des VDI deutlich höher (Bierdel et al., 2019).

Zugleich könnte der Einsatz von 3D-Druckern global einen wertvollen Beitrag zur Reduktion der absoluten Energienachfrage leisten, wenn sie für die lokale und bedarfsgerechte Produktion von Modulen, Halbleitern und/oder Ersatzteilen eingesetzt werden. Nach Einschätzungen von Verhoef et al. (2018) könnten sich 5-27% der globalen Energienachfrage bis 2050 senken lassen, wenn durch lokale, bedarfsgerechte Produktionsweise und die Förderung des Remanufacturing und der Reparatur die Energieintensität der Transport- und Produktionssektoren gesenkt werden würde. Das Szenario verdeutlicht, dass eine Umweltbewertung von I4.0 auch im Kontext ihrer Spill-Over Effekte auf Ressourcen- und Energieeinsparpotentiale in anderen Sektoren erfolgen und sich nicht nur auf die Fabrik- und Produktebene beschränken sollte.

Potentiale von I4.0 für die Kreislaufwirtschaft ungenutzt

Politische Maßnahmen zur Rahmensetzung einer nachhaltigen I4.0 sollten daher andere Sektoren wirksam adressieren. Youssef (2020) hat in einer qualitativen Analyse vier Bedingungen identifiziert, die Industrie 4.0 erfüllen muss, um einen Beitrag zur klimaneutralen Industrie zu leisten. Demnach muss sie 1) nicht nur an Zielen der Energieeffizienz ausgerichtet sein, sondern wesentliche Energiegewinne erzielen, 2) die Kreislaufwirtschaft durch Maßnahmen zur Schließung von Stoffströmen befähigen, um die Ressourcennutzung zu verbessern, 3) Öko-In-

novationen für eine nachhaltige Entwicklung begünstigen und 4) ein bedeutender Technologietransfer in die am wenigsten entwickelten Länder gewährleistet werden. Insbesondere die hier identifizierten Bedingungen 1-3 machen deutlich, dass Regulierungsmaßnahmen für eine nachhaltige I4.0 besonders in den Bereichen Energie, Kreislaufwirtschaft und Innovation eine hohe Wirkung entfalten können.

Aus ressourcenpolitischer Sicht ist der Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Stoffkreisläufen und einem gesenkten Verbrauch primärer Rohstoffe von besonderer Relevanz. Die Kreislaufwirtschaft verfolgt u. a. die Prinzipien Reduce, Reuse, Remanufacture and Recycle (Reduzieren, Wiederverwenden, Wiederaufbereiten und Wiederverwerten). Entsprechende Strategien sind beispielsweise verlängerte Nutzungszeiten von Produkten, deren Instandhaltung durch Reparatur, Nutzungskonzepte mit verstärkter Nutzungsintensität, bspw. über Sharing-Ansätze, sowie die Verwendung wiederverwendbarer und recyclingfähiger Materialien. Übergeordnetes Ziel ist es, den Verbrauch von primären Rohstoffen und Energie auf ein Minimum zu reduzieren.

Leider befassen sich aktuell nur wenige Studien mit dem Zusammenspiel und den Wechselwirkungen der Umsetzung von I4.0 und Kreislaufwirtschaft, obwohl Industrie 4.0 eine zentrale Rolle in der Umsetzung aktueller Kreislaufwirtschaftsmodelle spielt (Sahu et al., 2021). Auch Piscitelli et al. (2020) kamen in einem Review zu dem Schluss, dass sich das Forschungsthema noch in einem frühen Stadium der Aufmerksamkeit befindet. Tatsächlich ist die Anzahl der gefundenen Studien immer noch begrenzt und deutet darauf hin, dass das Potential der und die notwendigen Rahmenbedingungen für die Umsetzung der I4.0 zur Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend erfasst wurden. Dabei diskutiert ein Großteil der I4.0-Studien im Kontext der Kreislaufwirtschaft vor allem die Frage, wie sich zirkuläre Ansätze auf Fabrikebene umsetzen lassen, um den Ressourcenbedarf zu reduzieren und Abfälle zu vermeiden (ebd.). Seltener hingegen wird der Frage nachgegangen, inwieweit I4.0 gezielt zur Implementierung zirkulärer Geschäftsmodelle genutzt werden könnte (Khan et al., 2021b). Auch ein systematisches Review von Furstenau et al. (2020) stützt diese Einschätzung. In Rahmen einer bibliometrischen Datenanalyse der zwischen 2010 und 2019 in englischer Sprache veröffentlichten wissenschaftlichen Artikel zum Thema Nachhaltigkeit und I4.0, fanden die Autor:innen heraus, dass der zentrale Fokus der veröffentlichten Studien auf Datenflussanalysen zum verbesserten betrieblichen Energie- und Ressourcenmanagement lag. Ein Randthema hingegen

stellen Fragen zur Verankerung von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen und Lebenszyklusanalysen zur holistischen Optimierung der Ressourcenaufwendungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus inklusive der Produktionsphase dar.

Zugleich wird den Technologien der I4.0 ein großes Potential zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft beigemessen. Yang et al. (2018) beispielsweise sehen hierin große Chancen für den Wiederaufbereitungssektor (Remanufacturing), da die digitale Informationsübertragung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, additive Druckverfahren und die cyber-physische Intelligenz die wichtigsten Herausforderungen des Sektors wirksam adressieren könnten und daher großes Potential für die Kostenreduktion von Produkten und Dienstleistungen in diesem Kontext hat. Zugleich gibt es derzeit kaum praktische Anwendungsfälle von I4.0 Technologien im Wiederverwendungssektor und auch ist derzeit unklar, ob additive Druckverfahren wirklich kosteneffizient für die Wiederaufbereitung von Maschinenteilen eingesetzt werden können (Kerin & Pham, 2019).

3.3. Treiber für I4.0 Umsetzung: Ökologische Nachhaltigkeitsbelange und Kreislaufwirtschaftsprinzipien kaum von Bedeutung

Ökologische Nachhaltigkeit ist für Unternehmen derzeit ein unzureichendes Motiv bei der Implementierung von I4.0 Technologien. Feroz et al. (2021) berichten, dass die digitale Transformation ein wichtiges Diskussionsthema auf der obersten Führungsebene ist, während ökologische Nachhaltigkeitsziele und -praktiken nur unzureichend in strategische Entscheidungsprozesse einfließen. Unternehmen neigen eher dazu, I4.0 als Mittel zur Verbesserung des Produktionsprozesses, anstelle eines Hebels zur Transformation des eigenen Geschäftsmodells in Richtung ökologische Nachhaltigkeit zu verstehen (ebd.). Ghobakhloo (2020) identifizierte die ökonomische Nachhaltigkeitsdimension als relevantesten Treiber für die Integration von I4.0 Technologien.

Stentoft et al. (2020) verweisen darauf, dass die wissenschaftliche Studienlage über die Treiber der I4.0 unzureichend ist und entsprechende Erkenntnisse bisher vor allem unsystematisch in der grauen Literatur aufbereitet wurden. In ihrem Review greifen sie daher auf Studien über die Treiber für die Implementierung von IKT in Unternehmen zurück. Dabei wurden keine ökologischen Nachhaltigkeitsbelange als Treiber identifiziert. Die Plattform Industrie 4.0 hat 2020 insgesamt 60 Unternehmensbeispiele der I4.0 auf ihre Nachhaltigkeitschwerpunkte hin ausgewertet. Der Großteil der eingegangenen Beispiele setzt I4.0 Technologien zur ressourcen- und energieeffizienten Produktion (28) ein

sowie im Rahmen der Nutzung smarter Produktionsverfahren und Datenauswertung (29, Mehrfachnennungen möglich). Ein deutlich geringerer Anteil nutzt I4.0 für die Umsetzung innovativer Geschäftsmodelle im Bereich Sharing Economy (4) oder zur Anpassung des Produktdesigns (10) nach ökologischen Kriterien (Plattform Industrie 4.0, 2020b). Diese (nicht repräsentative) Umfrage spiegelt auch den im Rahmen der hier ausgewerteten Literatur gewonnenen Eindruck wieder, dass I4.0-Technologien vor allem vor dem Hintergrund von Effizienzgewinnen und Produktivitätssteigerungen eingesetzt werden. Hierbei sind zwar potentiell auch positive Umweltauswirkungen möglich, dafür müsste sich der Effizienzgewinn jedoch in eine absolute Reduktion des Ressourcen- und Rohstoffbedarfs übersetzen, was nach aktuellem Forschungsstand für I4.0 unzureichend validiert ist. Weniger relevant scheint für die derzeitige I4.0-Umsetzung bislang die Erschließung neuer Geschäftsmodelle zu sein.

Im Folgenden sind exemplarisch drei derzeitige wie mögliche zukünftige Treiber für die Implementierung von I4.0 aufgelistet, die im Rahmen der durchgeführten Literaturanalyse und in der Auswertung von Positionspapieren und Untersuchungen von Industrieakteur:innen identifiziert wurden. Hierbei wurden im Bereich der Erschließung neuer Geschäftsmodelle auch Umsetzungsbeispiele aufgenommen, die potentielle künftige Geschäftsmodelle darstellen und aktuell von Industrie und Forschungsinstituten noch erprobt werden.

Effizienzgewinne und Produktivitätssteigerung als aktuelle Treiber für die Implementierung von I4.0 in Unternehmen:

- Effizienterer Ressourceneinsatz: Kostenreduktion und Effizienzsteigerung waren 2015 einer Umfrage des BDI unter den Manager:innen deutscher Unternehmen folgend der größte Treiber für die Digitalisierung eines Unternehmens (Bloching et al., 2015). Auch für serbische Industrieunternehmen identifizierten Herceg et al. 2020 Effizienzgewinne, die zu Kostenvorteilen für Unternehmen führen, als größten Treiber zur Implementierung von I4.0.
- Beschleunigte Innovationszyklen: Produktions- und Innovationszyklen können durch I4.0-Anwendungen beschleunigt werden, da sie eine schnellere und effizientere Kommunikation zwischen den an der Herstellung und Produktion beteiligten Akteur:innen (Ingenieur:innen, Planer:innen) und eine beschleunigte Anpassung von Produktionsverfahren

ermöglicht. Damit können die Produktionskosten durch verkürzte Entwicklungszeiten gesenkt werden und immer schneller „Innovationen“ auf den Markt gebracht werden (Milošević et al. 2020).

- Optimierung der Produktentwicklung über industrielle IoT-Plattformen: Die Vernetzung von Konsumgegenständen mit dem IoT ermöglicht es Herstellern, über industrie-eigene IoT-Plattformen entlang des gesamten Lebensweges Informationen über die Nutzung des Produkts zu erhalten, um so neue Hinweise für Produktverbesserungen zu erhalten (Plattform Industrie 4.0, 2019).
- Reduzierte Kosten für Maschinenwartung: Die Vernetzung von Maschinen über das IoT sowie die Datensammlung und -auswertung über Big Data ermöglicht eine genauere Einschätzung über Wartungsbedarfe von Industriemaschinen und Anlagen. Hieraus lässt sich der beste Zeitpunkt für eine gezielte Wartung ermitteln. Wartungs- und weitere Kosten (z.B. aufgrund von Produktionsausfällen) können hierdurch verhindert werden.

Versorgungs- und Planungssicherheit als Anreiz für künftige Implementierung:

Durch additive Fertigungsverfahren könnten wichtige Halbleiterkomponenten zukünftig lokal selber hergestellt werden. Hierdurch würde sich die Lieferkette verkürzen und die Versorgungssicherheit erhöhen.

Potentiale von I4.0 für die Erschließung neuer Geschäftsmodelle und dadurch mögliche zukünftige Treiber:

- Individualisierte Produkte aus serieller Massenfertigung: Technologien der I4.0 ermöglichen eine an den Bedürfnissen und Wünschen der Kund:innen individuell ausgerichteten Produktionsprozess, an dessen Ende ein individualisiertes Produkt steht. Durch die Datensammlung und Auswertung (Big Data) können auf die Interessen der Endkonsument:innen abgestimmte Produkte entwickelt, durch die Vernetzung und Rückkopplung in Social Media können Produkte zielgruppenspezifisch beworben und Optionen zur Individualisierung des Produktes angeboten werden (Li & Yang, 2021; Setia et al., 2013).). Additive Druckverfahren werden zudem künftig in der Lage sein, die Produktion individueller Konsumgüter im Massenfertigungsverfahren zu ermöglichen. Das Fraunhofer Institut forscht hierzu an entsprechenden Laser- und 3-D-

Druckverfahren zur Differenzierung und Effizienzsteigerung der Produktion individualisierter Produkte in der seriellen Massenfertigung des Fahrzeugbaus (Fraunhofer Institut, n.d.).

- Product as a Service: Mit dem Geschäftsmodell „Product as a Service“ werden Hersteller:innen zu Dienstleister:innen. Ein Produkt wird nicht mehr besessen, sondern die damit verbundene Dienstleistung verkauft (Beispiel Waschmaschine, Dienstleistung Waschen). Der/Die Hersteller:in bleibt Eigentümer:in und kommt für Reparatur und Wartung auf. Durch das IoT ermittelt der/die Hersteller:in den Wartungsbedarf und die Nutzungsintensität. Hierdurch verschwimmt die physische Grenze zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase.

Mit Blick auf die Treiber der I4.0 lässt sich festhalten, dass neben ihren Nachhaltigkeitspotentialen auch das Risiko besteht, dass I4.0 zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle beiträgt, die neue ressourcenintensive Bedürfnisfelder erschließen (individuelle Anpassung von Produkten, schnellere Innovationszyklen, Vermarktungsstrategien über Social Media, Digitalisierung von Alltagsgegenständen). Beschleunigte Produktions- und Innovationszyklen verschärfen den Trend, dass sich Abstände zwischen dem Markteintritt neuer Produkte weiterhin verkürzen (Milošević et al., 2020). Dies begünstigt insbesondere im IKT-Bereich kürzere Nutzungszeiten von Elektronikgeräten mit massiven negativen Umweltauswirkungen. Zugleich ermöglicht die Integration von Social-Media-Anwendungen in das Marketing sowie die Vernetzung mit den Kund:innen, über bspw. Einbindung in den Produktionsprozess via automatisierter Statusmeldungen zum Herstellungsprozess, eine gezielte Werbeansprache und bessere Absatzstrategien. Diese Aspekte können das Auftreten von Rebound-Effekten begünstigen, das heißt, dass die im Produktionsprozess potentiell erzielten Ressourceneffizienzgewinne durch einen angekurbelten Konsum konterkariert werden könnten.

Auf den Punkt:

- Die mit der Umsetzung der I4.0 assoziierten metallischen und mineralischen Rohstoffaufwendungen sind nicht bekannt. Nur wenige Studien beziehen die Umweltauswirkungen mit ein, die durch die Bereitstellung

der materiellen Infrastruktur a priori anfallen. Erste Verbrauchsschätzungen und Bedarfsszenarien für einzelne Rohstoffe im Kontext von I4.0-Technologien geben die Studien der DERA (2016, 2021).

- Allgemein mangelt es jedoch an quantitativen Daten für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen von I4.0-Technologien. Insbesondere Lebenszyklusanalysen, welche die Umweltauswirkungen der technologischen Infrastruktur erfassen, fehlen weitestgehend. Der Großteil der Studien stützt sich auf qualitative Methoden, darunter Expert:innen Befragungen.
- Die These, dass sich I4.0 „auf natürliche Weise“ (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2021) auf den Ressourcenschutz auswirkt ist mit Blick auf die derzeitige Studienlage daher eher abzulehnen. Vielmehr hängt das Nachhaltigkeitspotential von I4.0 davon ab, wie die Implementierung erfolgt und ob sie zur Befähigung von Geschäftsmodellen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft genutzt wird.
- Auf der einen Seite, wird den I4.0-Technologien in übergeordneten und/oder szenariobasierten Studien ein großes Potential für die Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele beigemessen. Auf der anderen Seite spielen Nachhaltigkeitskriterien und Kreislaufwirtschaftsprinzipien als Umsetzungstreiber eine nur untergeordnete Rolle. Damit Investitionen zur Umsetzung der I4.0 verstärkt in zirkuläre Geschäftsmodelle gelenkt werden, sollte die Politik geeignete Rahmenbedingungen für zirkuläre Geschäftsmodelle mit einer nachweislich positiven Wirkung auf reduzierten Ressourcenverbrauch und Treibhausgasneutralität setzen. Hierzu werden in Kapitel 4 erste politische Empfehlungen vorgestellt.

4. Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen

4.1. Das Gewicht der Machine Economy systematisch erfassen, Ressourcenverbräuche ermitteln, Wiederverwertbarkeit gewährleisten

Die Rohstoffbedarfe und konkreten Anforderungen im Kontext der I4.0 lassen sich, wie die vorliegende Auswertung gezeigt hat, kaum von anderen Entwicklungen der digitalen Transformation abgrenzen. So stellen Sensoren sowie Rechenzentren eine zentrale Infrastrukturkomponente der I4.0 dar, zugleich spielen diese Technologien auch im Bereich der Informationstechnologien eine immer bedeutsamere Rolle.

Die DERA (2021) verweist in ihrer aktuellen Studie über den Rohstoffbedarf von Zukunftstechnologien, insbesondere im Kontext der I4.0 darauf, dass die Datenlage zur Bewertung der zukünftigen Rohstoffinanspruchnahme – sowohl mit Blick auf Menge wie auch Art der genutzten Rohstoffe – z.B. für die Industrierobotik und das IoT derzeit unzureichend sind und sich keine belastbaren Szenarien ableiten lassen. Zum einen da kaum Daten über die stoffliche Zusammensetzung und das Materialverhältnis entsprechender Maschinen (im Falle von Industrierobotern) öffentlich verfügbar sind, zum anderen da die Datenlage für potentielle zukünftige Marktentwicklungen von digitalen Technologien und damit einhergehende Nachfrageszenarien für einzelne Rohstoffe unzureichend vorhanden sind. Es war daher in dieser Kurzstudie nicht möglich die Rohstoffbedarfe der I4.0 zu ausreichend zu ermitteln, da eine entsprechende Datengrundlage fehlt.

Die Digitalisierung und ihre technologische Infrastruktur wird insbesondere die Nachfrage nach Technologiemetallen um ein Vielfaches erhöhen und durch IoT-Anwendungen und -Entwicklungen den Trend der Miniaturisierung verschärfen.

Für deren Verarbeitung ist eine große und heterogene Palette von Technologiemetallen bzw. Materialkombinationen notwendig (Behrendt 2018). Die Zunahme immer komplexerer Konstruktionsweisen und Materialzusammensetzungen erschwert die Zirkularität digitaler Infrastrukturen und die Rezyklierbarkeit von Technologiemetallen im Besonderen.

Anders als für Massenmetalle wie Kupfer, Eisen und Aluminium, existieren Recyclingverfahren für Rohstoffe wie Seltene Erden und Gallium zwar teils in der Theorie, aber nicht in ausreichendem Maße in der Praxis. Neben Herausforderungen im Bereich Konstruktion und Zerlegbarkeit, trägt auch eine mangelnde Investitionsbereitschaft in die Entwicklung und Umsetzung entsprechender Recyclingsysteme zur derzeitigen katastrophalen Rückgewinnungsquote von unter 1% der Technologiemetalle auf EU-Ebene bei. Volatile Rohstoffpreise dämpfen den finanziellen Anreiz für entsprechende Investitionen.

Demgegenüber steht das Narrativ, dass die digitale Transformation der Industrie einen wesentlichen Beitrag sowohl zur Dematerialisierung als auch zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs leisten kann. Jedoch wird die Ressourcenintensität bzw. -effizienz der Industrie 4.0 in Studien fast ausschließlich für den Produktionsprozess selbst ermittelt, d.h. Vergleich der Input- und Output-Größen zwischen digitalen und nicht-digitalen Produktionssystemen und -prozessen. Die im Rahmen der bisherigen Arbeit ausgewerteten Studien setzen methodisch

meist auf die Selbstauskunft von Industrieakteur:innen oder anderen Expert:innen zur Bewertung des ökologischen Mehrwerts entsprechender Technologien, d.h. viele derzeitige Bewertungen beruhen auf qualitativen, weniger auf quantitativen Datengrundlagen.

Insbesondere werden in derzeitigen Studien und Analysen die Ressourcen außer Acht gelassen, die für die Bereitstellung der digitalen Infrastruktur selbst aufgewandt werden müssen. Ferner kann der bisherigen Studienlage nicht klar entnommen werden, inwieweit der eigene Ressourcenverbrauch (Energie, Rohstoffe) möglicherweise durch die Inanspruchnahme von Dienstleistungen von B2B-Plattformen im Bereich Datenverarbeitung und Maschinenvernetzung ausgelagert wird. Fertigungsprozesse werden hierdurch vernetzter und komplexer, dies erschwert die Zuweisung von Ressourcenaufwendungen, da Systemgrenzen durch die Vernetzung und vielfältigere Nutzungsweisen verschwimmen. Die Definition von Systemgrenzen ist jedoch Voraussetzung für die Zuweisung von Ressourcenaufwendungen, was zur Erfassung von Umweltwirkungen in klassischen Ansätzen, darunter die Lebenszyklusanalyse (LCA, von life cycle assessment), Voraussetzung ist.

Eine systematische und ganzheitliche Bewertung der Strategien zur Umsetzung von Industrie 4.0 ist Voraussetzung dafür, gezielte Maßnahmen zur Vermeidung negativer sowie zur Förderung positiver Auswirkungen zu entwickeln und politisch umzusetzen (Chen et al. 2020). Raihanian Mashhadi und Behdad (2018) haben Vorschläge entwickelt, wie die Lebenszyklusanalyse im Kontext der I4.0 weiterentwickelt werden könnte. Hierfür sollten die Vorteile digitaler Technologien selbst genutzt werden, um die Datenlage zu verbessern. Die Fähigkeit von Maschinen ihren eigenen Zustand erfassen und bewerten zu können (self assessment), um Reparatur- und Wartungsbedarfe frühzeitig zu erkennen bzw. Produktionsprozesse zu optimieren, sollte auch im Rahmen von LCA genutzt werden, indem das Konzept der maschinellen Selbsterkenntnis um Faktoren zur Bewertung und Optimierung der Umweltauswirkungen, Ressourcenverbräuche und Emissionen entlang des gesamten Systems erweitert wird. Anstatt physische Grenzen zu definieren und die Ergebnisse linear zu skalieren, ermöglicht die intensive Vernetzung durch das Internet der Dinge mit Cyberspace-Avataren von Maschinen, jegliche Inputs oder Outputs zu markieren, zu überwachen und im System nachzuverfolgen (siehe hierzu auch Ferrari et al. 2021). Bai et al. (2020) argumentieren darüber hinaus, dass eine Nachhaltigkeitsbewertung sowohl für die einzelnen Technologien der I4.0, als auch für ihr Zusammenspiel erfolgen sollte, um Synergien aber auch Risiken adäquat zu identifizieren und zu

adressieren. Hierdurch wäre es möglich eine differenzierte Bewertung der unterschiedlichen technischen Entwicklungen der Industrie 4.0 auch mit Blick auf ihre potentiellen Anwendungsfelder in den Geschäftsmodellen (siehe nächsten Punkt) durchzuführen und politische Steuerungsinstrumente dahingehend gezielter auszugestalten.

Hieraus ergeben sich folgende politische Handlungsempfehlungen:

Methoden zur Ermittlung der Ressourcenaufwendungen entwickeln, Datengrundlagen schaffen

- Die Umweltauswirkungen der digitalen Infrastruktur müssen in der politischen und gesellschaftlichen Debatte sowie in den mit der Digitalisierung in Zusammenhang stehenden Nachhaltigkeitsnarrativen endlich mehr Gewicht erlangen. Hierfür ist die Wissensgenerierung und Einspeisung in entsprechende politische und gesellschaftliche Foren von besonderer Bedeutung. Ein entsprechendes Forum stellt die Initiative Plattform I4.0 dar, welche besonders die umweltpolitisch positiven Aspekte des Transformationsprozesses hervorhebt.
- Die Politik sollte die Weiterentwicklung von dynamischen LCA zur systematischen Erfassung der Ressourcenverbräuche, Umwelt- und Klimaauswirkungen der digitalen Transformationen fördern, z.B. im Rahmen von Forschungsförderungen, Auftragsstudien oder Multi-Stakeholder-Initiativen, wie der Plattform Industrie 4.0. Wichtig ist bei letzterem jedoch, dass die Aufgabe nicht alleine den Industrieakteur:innen überlassen wird, sondern unabhängige Forschungsinstitute sowie Zivilgesellschaft in den Prozess einbezogen werden, um einen transparenten Prozess zu gewährleisten, als Grundlage für einen demokratischen Entwicklungsprozess umweltpolitischer Steuerungsinstrumente für die digitale Transformation.
- Die Politik sollte Anreize schaffen, um Unternehmen, die aktuell eine Transformation im Kontext der I4.0 durchlaufen, in die Erfassung entsprechender Datenströme in Rahmen von Open-Data-Pilotprojekten in unterschiedlichen Branchen einzubinden. Wichtig ist hierbei, dass bereits Daten miterfasst werden, die Aufschluss über die Umweltauswirkungen und Ressourcenaufwendungen der digitalen Infrastruktur selbst geben. Durch eine aggregierte Auswertung der Daten über einen längeren Zeitraum kann somit Transparenz über die Umweltauswirkungen und Potentiale die I4.0 besser getroffen werden.

- Bei diesen Vorhaben sollte, in Anlehnung an Bai et al. (2020), auch eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen I4.0-Technologien mit Blick auf ihre Potentiale und Risiken für den Ressourcenverbrauch und die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erfolgen.

Zivilgesellschaftliches Agenda-Setting befähigen und politische Dialogräume öffnen

- Aktuell ist die Zivilgesellschaft im Kontext der politischen Rahmensetzung zur Ausgestaltung der digitalen Transformation unterrepräsentiert. Es besteht ein gravierendes Ungleichgewicht zwischen der Teilhabe von Industrieakteur:innen an politischen Entscheidungsprozessen und der Einbeziehung zivilgesellschaftlicher Organisationen in diese (z.B. im Rahmen der Initiative Plattform I4.0 auf nationaler und GaiaX auf europäischer Ebene). Die Gründe hierfür sind vielfältig, neben der mangelnden Offenheit entsprechender Initiativen gegenüber der Zivilgesellschaft und dem dadurch resultierenden Ausschluss, mangelt es zivilgesellschaftlichen Akteur:innen an fachlicher Expertise und Kapazitäten, um sich aktiv in entsprechende Prozesse einzubringen. Wie in dieser Studie zu anfangs dargestellt, ist die Digitalisierung ein transformativer Prozess, der einen Umbruch gesellschaftlicher, politischer und ökonomischer Systeme zur Folge hat. Es ist daher von hoher demokratischer Relevanz ein breites Akteur:innenspektrum in die Rahmensetzung und Standardisierung digitaler Entwicklungen einzubinden und entsprechende Prozesse durch eine kritische Öffentlichkeit begleiten zu lassen. Neben der Förderung von Forschungsinitiativen und Vorhaben, sollte die Politik daher auch Maßnahmen ergreifen, um 1) die Zivilgesellschaft beim Aufbau von Kapazitäten zu digitalen Themen zu befähigen (z.B. im Rahmen von Förderungen), sodass sich Organisationen aktiv in politische Prozesse mit kritischer Expertise einbringen können; 2) die Zivilgesellschaft als zentrale Akteurin aktiv in Stakeholder-Foren zur Aushandlung politischer Rahmensetzungen einzubinden.

Politische Steuerungsinstrumente auf den Weg bringen

- Einführung einer an den Anforderungen der Digitalisierung ausgerichteten primären Ressourcensteuer: Um der Preisvolatilität von Rohstoffen

entgegenzuwirken, die Investitionen in Recycling-Infrastruktur erschweren, sollte in Erwägung gezogen werden, eine Ressourcensteuer auf primäre Rohstoffe einzuführen. Diese würde den Rohstoffpreis insofern stabilisieren, als dass sie die externen Kosten des primären Rohstoffabbaus einpreist. Hierdurch könnten recycelte Technologiemetalle als sekundäre Rohstoffe dauerhaft konkurrenzfähig auf den Markt gelangen. Eine Ressourcensteuer könnte auch dazu beitragen, dass die Umweltauswirkungen des Rohstoffabbaus durch die Einpreisung indirekter Ressourcenaufwendungen, die bei der Primärgewinnung anfallen, mit in die Investitionsentscheidungen für digitale Technologien einfließen – hierdurch werden potentielle Kosteneinsparungen durch Ressourcenreduktionen im Produktionsprozess zumindest in Ansätzen den Ressourcenaufwendungen, die für die Bereitstellung der Infrastruktur anfallen, entgegengestellt. Das Konzept einer primären Ressourcensteuer wurde bereits mehrfach und von unterschiedlichen Akteur:innen diskutiert und sollte im Kontext der Digitalisierung neuverhandelt und auf die Anforderungen der Digitalisierung neu ausgerichtet werden (z.B. DNR 2018). Hierbei empfiehlt es sich insbesondere, dass der Ansatz der Input-Steuer diskutiert wird. Die Bundesregierung hat sich in ihrem Koalitionsvertrag die absolute Reduktion des Ressourcenverbrauchs zum Ziel gesetzt, noch fehlen ihr hierzu entscheidende Politikhebel. Da Deutschland im europaweiten Vergleich einen sehr niedrigen Satz für Umweltsteuern erhebt (im europaweiten Vergleich lag Deutschland 2017 mit einem Anteil von 4,7% am Gesamtsteueraufkommen auf Platz 27 von 28, siehe Mahler et al. 2017) und damit unter der für 2020 geforderten EU-Quote für Umweltsteuern liegt, wäre die Ressourcensteuer ein geeignetes Instrument den Anteil zu erhöhen. Bei der Konzeption einer entsprechenden Steuer sollten jedoch mögliche negative Auswirkungen auf den Ausbau Erneuerbarer Energien antizipiert und vermieden werden.

- Ausdehnung der Ökodesign-Richtlinie und setzen von zirkulären Standards für digitale Infrastrukturen (u. a. im Maschinenbau): Ein möglicher Weg, den Aufbau der I4.0 im Sinne der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben und die Zirkularität von technologiemetallhaltigen Geräten zu gewährleisten, ist eine Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie auf digitale Infrastrukturen der Industrie 4.0. I4.0-Anlagen müssen von Anfang an systemisch gedacht und demontagegerecht gebaut werden. Dem sollte eine Standardisierung recyclinggerechter Konstruktionen spezifisch für den Maschinen- und Anlagenbau (z.B. im Bereich Robotik, 3D-Druck) zur

Konstruktion zirkulärer Anlagen und ihrer digitalen Schnittstellen vorangehen. Die Ökodesign-Richtlinie sollte neben dem Energieverbrauch um Umwelt- und Ressourcenaspekte bezüglich der Technologiemetalle erweitert werden.

- Verbesserung der Investitionssicherheit von Recyclingbetrieben: Langfristige Investitionen in die Entwicklung von Recyclingverfahren und den Aufbau von Verwertungsanlagen sowie die Unsicherheit der künftigen Preisentwicklung bei Technologiemetallen bedeuten ein hohes Risiko für Investoren (Bleher, Schüler 2011). Hinzu kommen die im Bereich der Abfallverbrennung niedrigen Entsorgungspreise, so dass der Kostendruck für die Recyclingbetriebe deutlich zunimmt. Die Investitionsbanken (KfW, Europäische Investitionsbank) könnten dazu beitragen, die Risiken für die Investoren zu reduzieren.

4.2. Potenziale von I4.0 für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft nutzen

Wie in Kapitel 3 dargelegt, bietet die Industrie 4.0 enorme Potentiale für eine konsequente Umsetzung der Kreislaufwirtschaft, da sie neue Möglichkeiten für das Remanufacturing, die Reparatur, das Recycling und die Nachverfolgbarkeit von Produkten und Stoffströmen schafft. Zwar werden diese Potentiale in wissenschaftlichen Studien und Industriepositionen stets betont, dennoch zeigt eine Umfrage der Plattform I4.0, dass zirkuläres Wirtschaften (hierunter Beispiele aus der Recyclingindustrie bereits eingeschlossen) nur in 27% der eingegangenen Unternehmensbeispiele bei der Umstellung auf digitale Anwendungen in der Industrie eine Rolle spielt (Plattform Industrie 4.0, 2020b). Noch seltener wird I4.0 für die gezielte Umsetzung innovativer zirkulärer Geschäftsmodelle genutzt (z.B. im Rahmen der Sharing Economy, 6% der Beispiele).

In den ausgewerteten Studien ließen sich unterschiedliche Treiber für die digitale Transformation der Industrie identifizieren, dabei wurde deutlich, dass Nachhaltigkeitsaspekte im Vergleich zu ökonomischen Anreizen eine stark untergeordnete Rolle spielen (Feroz et al., 2021). Zugleich weisen aktuelle Entwicklungen in der Umsetzung von I4.0 darauf hin, dass sich unter I4.0 ausbildende Geschäftsmodelle auch nachteilig auf die ökologische Nachhaltigkeit der Industrie auswirken könnten.

Verpasst es die Politik geeignete Leitplanken für die Kreislaufwirtschaft im Kontext der I4.0 zu definieren, besteht das Risiko, dass wichtige Chancen für ein zirkuläres Wirtschaftssystem verpasst werden. Die Politik sollte daher einen

steuerungspolitischen Rahmen schaffen, um Geschäftsmodelle der Industrie 4.0 mit einer positiven Umweltwirkung gezielt zu fördern und Regeln zur Setzung von Mindestanforderungen für eine nachhaltige Produktpolitik zu schaffen.

- Standards für modulares Design durch Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie setzen: Im Sinne einer nachhaltigen Produktpolitik sollten Regularien zur standardisierten und modularen Bauweise sowie Reparierbarkeit entlang unterschiedlicher Produktgruppen definiert werden – dies würde auch einen direkten Anreiz für die Maschinen- und Anlagenbauindustrie schaffen, die Entwicklung entsprechender Anlagen und Innovationen im Kontext der I4.0 an Kriterien der Zirkularität auszurichten. Die Kommission überarbeitet derzeit die Ökodesign-Richtlinie für besonders ressourcenintensive Produktgruppen, bei der Überarbeitung sollten bisher nicht identifizierte Potentiale, die die I4.0 für die Zirkularität und Langlebigkeit von Produkten bietet, erarbeitet und mitgedacht werden.
- Digitalen Produktpass für alle transparent gestalten: Im Rahmen des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft verweist die Kommission auf die Einführung eines digitalen Produktpasses, welcher angelehnt an das Konzept des digital twins Informationen über die technische und materielle Zusammensetzung von Produkten, über den Reparaturprozess und für den späteren Recyclingprozess enthält. Ziel einer entsprechenden Standardisierung sollte es sein, die Demontage, Zerlegung und Recyclingprozesse des Produktes zu präzisieren sowie Rohstoffe und ihre Herkunft besser nachverfolgen zu können. Außerdem können damit Daten bereitgestellt werden, die es ermöglichen in z.B. 3D-Druckverfahren einzelne Komponenten und Ersatzteile dezentral nach zu fertigen und damit Wertschöpfungsstrukturen in der Wiederverwendung und dem Remanufacturing aufzubauen. Dies hätte den Vorteil, dass Hersteller Ersatzteile nicht vorrätig auf Halde produzieren müssten, sondern dass diese bedarfsorientiert angefertigt werden könnten. Dieser Aspekt würde sich positiv auf die Ressourcenschonung auswirken und ein Argument gegen die Vorbehalte der Industrie liefern, da Kosten zur vorrätigen Produktion und Lagerung von Ersatzteilen entfallen. Hieraus könnten sich auch neue Geschäftsmodelle entwickeln, z.B. in der dezentralen und bedarfsgerechten Bereitstellung von Ersatzteilen. Zur Förderung dezentraler Wertschöpfungsstrukturen ist es daher zentral, dass im Rahmen politischer Standardisierungsprozesse der Zugang zu Informationen nicht nur systemkompatibel, sondern transparent entlang von Wertschöpfungs-

strukturen geregelt wird. Insbesondere der Zugang zu Reparaturinformationen und Konstruktionsanforderungen an Ersatzteile sollte im Sinne eines freien Rechts auf Reparatur für alle Nutzer:innen gewährleistet werden (z.B. im Sinne von Open-Source-Lösungen). In die Entwicklung des digitalen Produktpasses sollte daher auf EU-Ebene ein breites Konsortium aus unterschiedlichen Akteur:innen eingebunden werden, darunter neben wirtschaftlichen Akteur:innen aus den Sektoren Produktion und Recycling auch insbesondere wissenschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteur:innen. Das dies nicht selbstverständlich ist und die Debatte stark von mächtigen Industrieakteur:innen geprägt ist, zeigt sich am Beispiel des Gaia-X-Konsortiums, welches mit der Standardisierung von Anforderungen an ein europäisches Digitales Ökosystem beauftragt ist. Darüber hinaus existieren bereits unterschiedliche Brancheninitiativen für die Entwicklung von Produktpässen, z.B. im Automobil- und Batterie-Bereich (Battery Passport) und in der Verpackungsindustrie (R-Cycle). In Deutschland ist derzeit das Fraunhofer Institut mit der Entwicklung exemplarischer Ansätze beauftragt.

- Ressourcenaufwendungen digitaler Geschäftsmodelle im Kontext der Kreislaufwirtschaft ermitteln: Im Rahmen einer Studie sollte ein besseres Verständnis über die makroökonomischen Wechselwirkungen und die tatsächlichen Ressourcenaufwendungen zirkulärer Geschäftsmodelle ermittelt werden. An den Erkenntnissen sollten politische Steuerungsinstrumente neu ausgerichtet werden. Hierfür bietet die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten ein geeignetes Werkzeug, da so Investitionen gezielter in Geschäftsmodelle und I4.0 Anwendungen gelenkt werden könnten, die einen positiven Effekt auf die Reduktion des Ressourcenverbrauchs haben.

Literaturverzeichnis

- Acquier, A., Daudigeos, T., & Pinkse, J. (2017). Promises and paradoxes of the sharing economy: An organizing framework. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 125, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2017.07.006>
- Adrian, S., Drisse, M. B., Cheng, Y., Devia, L., Deubzer, O., Goldizen, F., Gorman, J., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Jingwei, W., Jinhui, L., Khatriwal, D. S., Linnell, J., Magalini, F., Nnororm, I. C., Onianwa, P., Ott, D., Ramola, A., Zeng, X. (2020). Quantities, flows, and the circular economy potential. *The Global E-waste Monitor 2020*.
- Annibaldi, V., & Rotilio, M. (2019). Energy consumption consideration of 3D printing. *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings*, 243–248. <https://doi.org/10.1109/METROI4.2019.8792856>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Behrendt, S. (2018). *Recycling von Technologiemetallen Fallstudie*.
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T., & Xue, B. (2017). Sustainability aspects of a digitalized industry – A comparative study from China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 4(2), 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0028-8>
- Benqassem, S., Bordage, F., de Montenay, L., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Lees Perasso, E., Prunel, D., & Vateau, C. (2021). *DIGITAL TECHNOLOGIES IN EUROPE: an environmental life cycle approach*.
- Bierdel, M., Köhler, A. R., & Ulrike Lange, D.-I. (2019). *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion Autorinnen und Autoren*. www.ressource-deutschland.de

- Bloching, B., Leutiger, P., Oltmanns, T., Rossbach, C., Schlick, T., Remane, G., Quick, P., & Shafranyuk, O. (2015). Die Digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. https://bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/Digitale_Transformation.pdf
- Bonilla, S., Silva, H., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J. (2018). Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740. <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Castorani, V., Rossi, M., Germani, M., Mandolini, M., & Vita, A. (2018). Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases. *Procedia CIRP*, 69, 499–504. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.11.113>
- Chen, X., Despeisse, M., & Johansson, B. (2020). Environmental Sustainability of Digitalization in Manufacturing: A Review. *Sustainability*, 12(24), 10298. <https://doi.org/10.3390/su122410298>
- Dehoust, G., Manhart, A., Dolega, P., Vogt, R., Auberger, A., Kämper, C., von Ackern, P., Rüttinger, L., Rechlin, A., & Priester, M. (2020). Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - Öko-Ress II. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- DERA. (2016). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. www.deutsche-rohstoffagentur.de
- DERA. (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. DERA Rohstoffinformationen. www.deutsche-rohstoffagentur.de
- DNR (Deutscher Naturschutzring) (2018): Ressourcenschonung: Steuern rauf, Verbrauch runter?! Steckbrief. Abrufbar unter: https://backend.dnr.de/sites/default/files/Publikationen/Steckbriefe_Factsheets/18_02_R2-0_Steckbrief_Ressourcensteuern.pdf (letzter Abruf: 23.03.2022).
- Esposito, M. (2018). World Economic Forum White Paper: Driving the Sustainability of Production Systems with Fourth Industrial Revolution Innovation Global Business Systems View project Artificial Intelligence View project Driving the Sustainability of Production Systems with Fourth Industrial

- Revolution Innovation In collaboration with Accenture.
<https://www.researchgate.net/publication/322071988>
- EU-Recycling. (2016). Edelmetallrecycling: Eine Zwischenbilanz – EU-Recycling.
<https://eu-recycling.com/Archive/13932>
- Feroz, A. K., Zo, H., & Chiravuri, A. (2021). Digital transformation and environmental sustainability: A review and research agenda. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13031530>
- Ferreboeuf, H., & et al. (2019). LEAN ICT-TOWARDS DIGITAL SOBRIETY. REPORT OF THE WORKING GROUP DIRECTED BY HUGUES FERREBOEUF FOR THE THINK TANK THE SHIFT PROJECT.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.150>
- Fraunhofer Institut. (n.d.). Digital Fertigung in der Massenproduktion. Retrieved March 4, 2022, from <https://www.go-beyond-four-point-zero.de/>
- Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and Climate Change—Exploring the Science–Policy Gap. *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 4511, 10(12), 4511. <https://doi.org/10.3390/SU10124511>
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., MacHado, E. L., Lopez-Robles, J. R., Dohan, M. S., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Link between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. *IEEE Access*, 8, 140079–140096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012812>
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- Gensch, C.-O., Prakash, S., & Hilbert, I. (2017). Is Digitalisation a Driver for Sustainability? 117–129. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54603-2_10
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119869>

- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., de Stercke, S., Cullen, J., Frank, S., Fricko, O., Guo, F., Gidden, M., Havlík, P., Huppmann, D., Kiesewetter, G., Rafaj, P., ... Valin, H. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy* 2018 3:6, 3(6), 515–527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Herceg, I. V., Kuč, V., Mijušković, V. M., & Herceg, T. (2020). Challenges and Driving Forces for Industry 4.0 Implementation. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4208, 12(10), 4208. <https://doi.org/10.3390/SU12104208>
- Hilbert, M., & López, P. (2011). The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *Science*, 332(6025), 60–65. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1200970>
- Junge, A. L., & Straube, F. (2020). Sustainable supply chains - Digital transformation technologies' impact on the social and environmental dimension. *Procedia Manufacturing*, 43, 736–742. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.110>
- Kayikci, Y. (2018). Sustainability impact of digitization in logistics. *Procedia Manufacturing*, 21, 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.184>
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117805. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117805>
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021a). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 297). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021b). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126655. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126655>

- Li, H., & Yang, C. (2021). Digital Transformation of Manufacturing Enterprises. *Procedia Computer Science*, 187, 24–29.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.029>
- Malmodin, J., & Coroama, V. (2017). Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation-The example of smart metering. 2016 *Electronics Goes Green 2016+*, EGG 2016.
<https://doi.org/10.1109/EGG.2016.7829814>
- Milošević, M., Lukić, D., Đurđev, M., & Vukman, J. (2020). Digital Transformation of Manufacturing Towards Industry 4.0 Concept. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 749(1), 012019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/749/1/012019>
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4674, 12(11), 4674.
<https://doi.org/10.3390/SU12114674>
- Pilgrim, H., Groneweg, M., & Reckordt, M. (2017). *Ressourcenfluch 4.0*.
<http://power-shift.de>
- Piscitelli, G., Ferazzoli, A., Petrillo, A., Cioffi, R., Parmentola, A., & Travaglioni, M. (2020). CIRCULAR ECONOMY MODELS IN THE INDUSTRY 4.0 ERA: A REVIEW OF THE LAST DECADE. *Procedia Manufacturing*, 42, 227–234.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.02.074>
- Plattform Industrie 4.0. (2019). *Digitale Geschäftsmodelle für die Industrie 4.0*.
www.bmwi.de
- Plattform Industrie 4.0. (2020a). *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. www.bmwi.de
- Plattform Industrie 4.0. (2020b). *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. Impulspapier der Task Force Nachhaltigkeit. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-nachhaltige-produktion.html>

- Plattform Industrie 4.0. (2021). Zehn Thesen, wie digitale Geschäftsmodelle Nachhaltigkeit in der Industrie 4.0 fördern. In 2021. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Thesen-Nachhaltigkeit-Geschaeftsmodelle.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Pohl, J., & Finkbeiner, M. (2017). Digitalisation for sustainability? Challenges in environmental assessment of digital services. *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings - Series of the Gesellschaft Fur Informatik (GI)*, 275, 1995–2000. https://doi.org/10.18420/IN2017_199
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität RESCUE-Studie. *CLIMATE CHANGE* 36/2019.
- Raihanian Mashhadi, A., & Behdad, S. (2018). Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0. *Manufacturing Letters*, 15, 93–96. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.012>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>
- Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2021). Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0465>
- Sander, K., Göbbling-Reisemann, S., Zimmermann, T., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., Schebeck, L., Wagner, J., Heegn, H., & Pehlken, A. (2017). Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra) Zusammenfassung Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-21_texte_68-2017_restra_zusamm_0.pdf

- Santarius, T., & Lange, S. (2021). Chancen und Grenzen einer ‚3-D-Ökonomie‘: Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum 2021 29:1, 29(1), 31–39. <https://doi.org/10.1007/S00550-021-00510-Y>
- Santarius, T., Pohl, J., & Lange, S. (2020). Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? Sustainability 2020, Vol. 12, Page 7496, 12(18), 7496. <https://doi.org/10.3390/SU12187496>
- Setia, P., Venkatesh, V., & Joglekar, S. (2013). Leveraging Digital Technologies: How Information Quality Leads to Localized Capabilities and Customer Service Performance. MIS Quarterly, 37(2), 565–590. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.11>
- Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. Nature Communications 2020 11:1, 11(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2020). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>, 32(10), 811–828. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. Process Safety and Environmental Protection, 118, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>
- Sühlmann-Faul, F., & Rammler, S. (2018). Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeitsdefizite der Digitalisierung auf ökologischer, ökonomischer, politischer und sozialer Ebene. Handlungsempfehlungen und Wege einer erhöhten Nachhaltigkeit durch Werkzeuge der Digitalisierung. https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/Studie_Suehlmann-Faul_Rammler_180406_final_pdf_protected.pdf

- Umweltbundesamt. (2020). Elektroschrott: Deutschland verfehlt EU-Sammelquote von 45 Prozent knapp | Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/elektroschrott-deutschland-verfehlt-eu-sammelquote>
- VDI. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. www.ressource-deutschland.de
- Verhoef, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C., García Nodar, B., & van Wijk, A. J. M. (2018). The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, 112, 349–360. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.10.034>
- Warmington-Lundström, J., & Laurenti, R. (2020). Reviewing circular economy rebound effects: The case of online peer-to-peer boat sharing. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 5, 100028. <https://doi.org/10.1016/J.RCRX.2019.100028>
- Wruk, D., Oberg, A., & Friedrich-Schieback, M. (2019). Quantifying the sharing economy. *GAIA*, 28(SUPPL.1), 184–189. <https://doi.org/10.14512/GAIA.28.S1.3>
- Yang, S., Raghavendra, M. R. A., Kaminski, J., & Pepin, H. (2018). Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. *Applied Sciences* 2018, Vol. 8, Page 1177, 8(7), 1177. <https://doi.org/10.3390/APP8071177>
- Youssef, A. ben. (2020). How can industry 4.0 contribute to combatting climate change? *Revue d'Economie Industrielle*, 169(1), 161–193. <https://doi.org/10.4000/REI.8911>
- Zhang, W., Gu, F., & Guo, J. (2019). Can Smart Factories Bring Environmental Benefits to Their Products? A Case Study of Household Refrigerators. *Journal of Industrial Ecology*, 23(6), 1381–1395. <https://doi.org/10.1111/JIEC.12928>

Umweltbelastungen in aufsteigenden Trends der KI

*Autor*innen: Oliver Zielinski, Neeske Lübben*

Kernthese

Wir müssen den Fokus auf die Qualität statt Quantität der Daten setzen und hybride KI-Modelle beim Ausbau befördern.

Ausgangslage, Zielstellung und Vorgehensweise

Künstliche Intelligenz hat Geschichte. Die Anfänge der Künstlichen Intelligenz (KI) reichen in bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts, u.a. mit dem berühmten Workshop am Dartmouth College in 1956 (McCarthy et al., 1995). Es folgte eine rasante Entwicklung in Wellen, zuerst mit der symbolischen, wissensbasierten KI und in den letzten 10 Jahren auf Basis von Algorithmen des (tiefen) maschinellen Lernens (ML), großer Datenmengen und nicht zuletzt immer performanterer Rechenarchitekturen (Teich, 2020; DARPA, 2020). Heute ist KI aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken, generiert Wissen, steigert die Effizienz komplexer Prozesse und erlaubt deren Automation. Dies ist auch der Punkt, an dem der Energie- und Ressourcenbedarf der KI und anderer Elemente der Maschine Economy in den Fokus kommt (IEA, 2017; Wurm et al., 2021; Boll et al., 2021; Barrie et al., 2022). Prognosen über den wachsenden Bedarf an KI-Systemen (und deren unterstützender Infrastruktur) und Aufrufe nach einer Nachhaltigkeit innerhalb der KI finden sich zunehmend im aktuellen Diskurs (Schneider et al., 2018; Schwartz et al., 2020; Zielinski, 2021; van Wynsberghe,

2021; Wu et al., 2022) und Ihre Implikationen sind auch Teil des CODINA Vorhabens (Fritzsche & Ramesohl, 2021; Sühlmann, et al., 2022; Bauer et al., 2022; Altmeyer, Schubhan & Kerber, 2022).

Künstliche Intelligenz hat Zukunft. Es besteht kein Zweifel daran, dass KI auch in den kommenden Jahrzehnten eine wachsende Bedeutung hat (Europäische Kommission, 2021). Aber wie wird sich die KI verändern? Welche Trends sind für das nächste Jahrzehnt oder auch darüber hinaus erkennbar und welche Umweltbelastungen lassen sich daraus ableiten? Diesen Fragen widmet sich das vorliegende Positionspapier. Die Zukunft vorhersagen ist gerade in einer solch dynamischen Disziplin wie der KI-Forschung schwierig, insbesondere weil nicht-lineare Elemente eine einfache Extrapolation ad absurdum führen können. Wir nähern uns daher der Zukunft, indem wir die öffentlichen Aussagen von drei international anerkannten und medial prominenten KI-Forschern als Ausgangspunkt nehmen (IEEE Spectrum, 2022; The Next Web, 2022; Hoos & Kersting, 2020). Dies impliziert zwar diverse Probleme, beispielsweise die subjektive Verknüpfung von kommerziellen Interessen oder den Bias medialer Sichtbarkeit, ist aber für einen "Blick in Glaskugel" zumindest ein Experten-basierter Ausgangspunkt. Die Ableitung der Umweltbelastungen erfolgt auf Grundlage einer Übertragung aktuellen Wissens auf die prognostizierte Trendsituation. Beide Aspekte, die Trends wie auch die Umweltbelastungen, werden dabei qualitativ betrachtet, da die Basis für eine seriöse quantitative Darstellung nicht gegeben ist (Dhar 2020). Wir laden mit diesem Papier ausdrücklich zur Diskussion über die "KI der Zukunft" ein und fassen am Ende drei Trends und deren Umweltbelastungen als Kernaussagen zusammen.

Die Zukunft der KI – auf der Basis von Expertenaussagen

Andrew Ng's "data-centric AI"

Andrew Ng, ein weltweit anerkannter KI-Technologieführer, CEO und Gründer der Landing AI, Mitbegründer von Coursera und Gründungsleiter von Google Brain

(Landing AI, 2022), sieht in den nächsten Jahren eine Herausforderung in der effizienten Beschaffung von Daten für auf neuronaler Netzwerkarchitektur stattfindenden bewährten Deep Learning Anwendungen (z.B. Bildererkennung, Natural Language Processing, NLP) sowie in der Skalierbarkeit dieser Anwendungen in anderen Branchen (z.B. Medizin). Als nachhaltigeren Ansatz und Trend formuliert er das Prinzip der datenzentrierten KI (data-centric AI), deren Fokus auf der Qualität der Daten gegenüber der Quantität liegt. Er beschreibt sie als „Disziplin der systematischen Entwicklung der Daten, die für den erfolgreichen Aufbau eines KI-Systems erforderlich sind“ (IEEE Spectrum, 2022). Im Gegensatz zu Big-Data-Anwendungen, bei denen große Datenmengen genutzt werden, um bspw. Einflüsse durch Rauschen zu minimieren, zielt datenzentrierte KI darauf ab, Daten systematisch anhand analysierter Inkonsistenzen auszuwählen und in das Training von Modellen einzuspeisen, um ein leistungsstarkes System mit hoher Genauigkeit effizient aufzubauen (IEEE Spectrum, 2022).

Yann LeCun's "self-supervised learning"

Der Vizepräsident und leitende KI-Wissenschaftler des Meta Konzerns (vormals facebook), Yann LeCun, sieht in Deep Learning und künstlichen neuronalen Netzen die Zukunft, dabei rückt er speziell den Zweig des selbstüberwachten Lernens (self-supervised learning) als eine maßgebliche Innovation in den Vordergrund. Gegenüber dem überwachten Lernen, für welches es große Mengen vom Experten annotierter, qualitativ hochwertiger Daten bedarf, lernt ein selbstüberwachtes System anhand einer geringen Menge annotierter oder gänzlich keiner annotierten Beispieldaten. Das Modell optimiert sich kontinuierlich auf Basis weiterer eingespeister, nicht annotierter Daten durch Kontextualisierung und kann folglich eine große Menge nicht zugeordneter Daten analysieren. Das selbstüberwachte Lernen ähnelt dabei Prozessen, anhand derer Menschen u.a. durch Beobachtung in ihrer Entwicklung ein „Weltmodell“ erzeugen, welches als Basis für eine Abstraktion und Vorhersagefähigkeit unserer Umgebung dient und komplexes Wissen darüber ermöglicht (Kontextverständnis). Ein solches Modell soll in Zukunft ein Schlüsselement menschenkompatibler KI darstellen, dessen Architektur ebenfalls an die modulare Anordnung menschlicher Hirnareale und -strukturen, die miteinander vernetzt sind, angelehnt ist (The Next Web, 2022).

Kristian Kersting und die "dritte Welle der KI"

Kristian Kersting, Professor für Machine Learning an der TU Darmstadt und Leiter des Labors für künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen (AIML), erkennt die Grenzen aktuell überwiegend eingesetzter datengetriebener Machine Learning Verfahren, die Produkte der ersten und zweiten Welle der KI – handgefertigtes Wissen und statistisches Lernen – sind. Gerade die hochspezialisierten Systeme des Deep Learning, die verlässlich bezüglich einer speziellen Fragestellung funktionierten, können übergeordnete Zusammenhänge nicht erkennen und benötigen bei Änderung der Bedingungen oftmals ein Neutraining (Kersting, 2020). Die dritte Welle der KI, die kontextbezogene Anpassung (vergleiche DARPA, 2020), wird beschrieben durch den vermehrten Einsatz hybrider Systeme die Zusammenhänge erkennen und nutzen (Hoos & Kersting, 2020). Basierend auf klassischen KI-Methoden, werden diese in einer engen Symbiose von künstlicher und menschlicher Intelligenz erweitert, um die Abstraktionsfähigkeit der Modelle zu erhöhen – wissensbasierte und datengetriebene KI werden vereint (Schmid et al., 2021).

Diese drei Trendaussichten beschreiben in erster Linie die Art des Umgangs mit verfügbaren Daten und/oder der grundlegenden Architektur der KI-Modelle. Dass die Zahl der KI-Anwendungen in den nächsten Jahren steigen wird, prophezeit auch Kai Fu Lee, Vorsitzender und CEO von Sinovation Ventures, eines der führenden chinesischen Technologie-Risikokapitalunternehmen. In seinem Buch "AI 2041: Ten Visions for Our Future", erschienen im Jahr 2021, wagt er einen Blick darauf, wie KI die Welt in zwanzig Jahren verändern wird. In diversen Bereichen (bspw. Arbeit, Gesundheit, Transport, Bildung, Unterkunft) werden durch KI-Anwendungen Routineaufgaben übernommen und Dienste angeboten (Lee, 2021). Für den Menschen soll das Erleichterung schaffen, doch wie steht es um die Umweltwirkungen dieser KI-Transformationen?

Potenzielle Umweltauswirkungen der KI-Trends

Für die Abschätzung von Umweltwirkungen setzen wir auf den aktuellen Erfahrungen aus den ökologischen Nachhaltigkeitsbetrachtungen von KI auf, wie sie z.B. in Jones (2018), Strubell et al. (2019), Henderson et al. (2020), Vinuesa et al. (2020), Wurm et al. (2021) und Wu et al., (2022) zu finden sind. Diese qualitative Herangehensweise überträgt also Erfahrungen in einfacher Kausallogik aus dem 'Jetzt' in die Zukunft. Weitere ressourcensparende Entwicklungen, die beispielsweise der vermehrte Einsatz regenerativer Energien zum Betrieb von IT-Infrastrukturen oder Fortschritte in der Halbleitertechnik bleiben hierbei unberücksichtigt, da ihre Wirkung nicht in direktem Zusammenhang mit dem betrachteten Zukunftstrend steht.

In der Prognose von Yann LeCun, werden gelabelte Daten als Trainingsgrundlage weitgehend gar nicht mehr vorausgesetzt. Wohl aber setzt dieser Ansatz auf große Datenmengen und große bzw. tiefe KI-Systeme, die einen signifikanten Energie- und Ressourcenbedarf haben (COWLS et al., 2021). Sich selbst überwachende, lernenden KI-Systeme werden sich demnach vermutlich weiter spezialisieren, basierend auf den individuellen Daten- bzw. Erfahrungsgrundlagen, was die Austauschbarkeit von Modellen behindert. Viele, potentiell performante Lösungen entstehen, deren kumulierte Umweltwirkungen überproportional steigen.

Hybride KI, wie sie beispielsweise von Kristian Kersting, als dritte Welle der KI vorhergesagt wird, bindet vorhandenes Wissen ein und verringert so den Bedarf an ressourcenintensiven Deep Learning Ansätzen. Während die Performanz des Gesamtsystems im Idealfall steigt, sind ein kleinerer Datensatz, kleinere Modelle und lernende Systeme mit Transfer menschlichen Wissens möglich, die sowohl im Energie- als auch im IT-Infrastrukturbedarf genügsamer sind.

Kernaussagen zu Trends und Handlungsempfehlungen

Alle drei Experten beschreiben den zukünftigen Bedarf großer Datenmengen aktuell vorherrschender, datenintensiver Anwendungen des maschinellen Lernens, insbesondere des Deep Learning. Neben der Benennung der Quantität der Daten für die Großzahl der derzeitig eingesetzten ML Anwendungen, wird auch die erforderliche Qualität der Daten beleuchtet. Die Erzeugung hochwertiger, annotierter Trainingsdaten, welche insbesondere bezüglich der immer höher angestrebten Genauigkeit des generierten Outputs erforderlich sind, ist zeit- und kostenintensiv und führt so zu einem Defizit. Um dieser Herausforderung zu begegnen, benennen die drei Experten Alternativansätze.

Ng und LeCun beschreiben zwar unterschiedliche Ansätze (datenzentrierte KI und selbstüberwachtes Lernen) postulieren dennoch beide den Trend bzw. Bedarf einer reduzierten Menge eingespeister Daten. Um eine angestrebte Genauigkeit zu erreichen, liegt es nahe, dass es bei dieser Auswahl der Daten auf die Qualität ankommt. Ein verschärfter Qualitätsfokus für datenzentrierte KI-Modelle aber potenziell auch für selbstüberwachte Systeme, erlaubt einen ressourcenschonenderen Input mit gleichzeitig verbessertem Output. Bei gleichzeitiger Modularisierung und verstärkter Nachnutzung (offene Daten und Modelle im Sinne der Green AI) werden die Umweltwirkungen geringer.

Unsere erste Handlungsempfehlung ist daher, den Schwerpunkt bei zu entwickelnden ML-Modellen auf den Ansatz der reduzierten Menge der Input Daten zu legen, welche eine hohe Qualität aufweisen und gezielt gegenüber möglichen Inkonsistenzen wirken.

Die hybride KI verspricht das Beste aus zwei Welten: das Nutzen statistischer Verfahren wie Deep Learning, wo komplexe Datenmengen relevante Informationen enthalten, gepaart mit dem Einfluss menschlichen Wissens und seiner Expertise, wo kontextuelle Adaption nötig ist. Diese Kombination erlaubt es statistischen Verfahren bessere Ergebnisse, trotz des Zurückgreifens auf eine geringere Datenmenge, zu erzielen. Wenn Wissen nicht über große Datensätze mühsam gelernt, sondern nachvollziehbar und effizient inkorporiert werden kann, dann wird diese Symbiose auch den Energiebedarf positiv beeinflussen.

Ein Ausbau hybrider KI-Modelle ist eine weitere Handlungsempfehlung. Der Trend ermöglicht die Chance eines neuen Ansatzes, der Transparenz, Nachhaltigkeit und Performanz vereinen kann.

Die Analyse der drei hier vorgestellten Trends in der KI zeigt Potentiale auf, die direkten Umweltwirkungen von KI-Anwendungen und deren Entwicklung geringer zu gestalten. Diese Potentiale zu nutzen, wird weiterer wissenschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen bedürfen, da die existierenden ressourcenintensiven Ansätze weit verbreitet und in ihrer Spezialisierung auch performant sind. Das Bewusstsein für ressourceneffiziente KI-Lösungen zu stärken und deren Ausbau zu fördern ist eine drängende Aufgabe dieser Dekade.

Literaturverzeichnis

- Altmeyer, M., Schubhan, M., Kerber, F. (2022). Automatisieren, Personalisieren, Optimieren: Chancen & Herausforderungen von KI-Anwendungen auf Basis des Digitalen Produktpasses im Handel. Online: https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CO-DINA-Kurzstudie_1-KI-im-Handel-1.pdf
- Barrie, J., Buckley, K., Caminade, C., Chen, J., Cortez, F., Emejulu, D. A., ... & Wäspi, F. (2022). Recommendations on Using Digitalisation for Our Common Future: A Report by the Policy Network on Environment and Digitalisation. Internet Governance Forum.
- Bauer, S., Kollosche, I., Uhl, A., de Melo, G., & Fritzsche, K. (2022). Die digitale Vermessung der Zukunft. Welche Rolle spielt Künstliche Intelligenz in Foresight zur Gestaltung von Nachhaltigkeitstransformationen?. Online: https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier-9_Die-digitale-Vermessung-der-Zukunft.pdf
- Boll, S., Schnell, M., Dowling, M., Faisst, W., Mordvinova, O., Pflaum, A., ... & Riss, U. (2021). Mit KI zu nachhaltigen Geschäftsmodellen – Nachhaltigkeit von und Nachhaltigkeit durch Künstliche Intelligenz. Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme. Online: https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/AG4_WP_KI_und_Nachhaltigkeit.pdf
- Cowls, J., Tsamados, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2021). The AI gambit: leveraging artificial intelligence to combat climate change—opportunities, challenges, and recommendations. *Ai & Society*, 1-25.
- Dhar, P. (2020). The carbon impact of artificial intelligence. *Nature Machine Intelligence*, 2(8), 423–425.
- Europäische Kommission (2021). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Fostering a European approach to Artificial Intelligence, COM (2021) 205 final, Brüssel.

- Fritzsche, K., & Ramesohl, S. (2021). Gemeinsam für eine sozial-ökologische Digitalisierung. Welche Themen jetzt auf die Agenda müssen. Online: https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier-1_Februar-2021-1.pdf
- Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. arXiv:2002.05651 [cs].
- Hoos, H. & Kersting, K. (2020). Die dritte Welle der Künstlichen Intelligenz. Frankfurter Allgemeine Zeitung. 14.12.2020. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/die-dritte-welle-der-kuenstlichen-intelligenz-17100377.html> [Zugriff: 03.05.2022]
- International Energy Agency; IEA (2017). Digitalization & Energy. IEA, 1-188.
- IEEE Spectrum (2022). Andrew Ng: Unbiggen AI. Online: <https://spectrum.ieee.org/andrew-ng-data-centric-ai> [Zugriff: 03.05.2022]
- Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. Nature, 561(7722), 163-166.
- Kersting, K. (2020). Rethinking Computer Science Through AI. KI-Künstliche Intelligenz, 34, 435-437.
- Landing AI (2022). <https://landing.ai/about/> [Zugriff: 16.05.2022]
- Lee, K. F. (2021). How AI Will Completely Change the Way We Live in the Next 20 Years. TIME2030, <https://time.com/6097625/kai-fu-lee-book-ai-2041/> [Zugriff: 03.05.2022]
- McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (1955). A proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence. <https://ojs.aaai.org/index.php/aimagazine/article/download/1904/1802>. [Zugriff: 12.05.2022]
- Schmid, U., Tresp, V., Bethge, M., Kersting, K., & Stiefelhagen, R. (2021). Künstliche Intelligenz - Die dritte Welle. INFORMATIK 2020.
- Schneider, J., Basalla, M., & Seidel, S. (2018). Principles of Green Data Mining. Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Hawaii.
- Sühlmann-Faul, F., Fritzsche, K., Haenel, F., Strobel, H., & Mayer, S. (2022). Wachstum und Digitalisierung: ein ambivalentes Verhältnis. Ermöglicht

- die Digitalisierung neue Spielräume hin zu einer Wachstumsunabhängigkeit?. Online: https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier-6_Wachstum-und-Digitalisierung-Ein-Ambivalentes-Verha%CC%88ltnis-1.pdf
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54-63.
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. arXiv:1906.02243 [cs].
- The Next Web (2022). Meta's Yann LeCun is betting on self-supervised learning to unlock human-compatible AI. <https://thenextweb.com/news/metas-yann-lecun-is-betting-on-self-supervised-learning-to-unlock-human-compatible-ai> [Zugriff: 03.05.2022]
- van Wynsberghe, A. (2021). Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI. *AI and Ethics*, 1(3), 213-218.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., ... & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature communications*, 11(1), 1-10.
- Wu, C. J., Raghavendra, R., Gupta, U., Acun, B., Ardalani, N., Maeng, K., ... & Hazelwood, K. (2022). Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities. *Proceedings of Machine Learning and Systems*, 4.
- Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., Ramesohl, S. (2021): Wege in eine ökologische Machine Economy: Wir brauchen eine Grüne Governance der Machine Economy', um das Zusammenspiel von Internet of Things, Künstlicher Intelligenz und Distributed Ledger Technology ökologisch zu gestalten. In: Wuppertal Report No 2. Online: https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/Positionspapier_WEGE-IN-EINE-ÖKOLOGISCHE-MACHINE-ECONOMY-1.pdf
- Zielinski, O. (2021): Grüne Künstliche Intelligenz, The Pioneer. <https://www.thepioneer.de/originals/thepioneer-expert/articles/gruene-kuenstliche-intelligenz> [Zugriff: 10.05.2022]

KI-Methodenkoffer zur Messung von Umweltbelastungen im Einsatz von KI, sowie IoT und DLT

Autor*innen

Andreas Moring

Vanessa Just

Lucas Spreiter

Philipp Damm

Kurz gesagt

Künstliche Intelligenz (KI), Distributed Ledger Technologien (DLT) wie Blockchain und das Internet of Things (IoT) sind nur einige digitale Zukunftstechnologien. Doch Zukunftstechnologie muss auch zukunftsfähig sein – und das bedeutet letztlich, dass das technologische Umfeld sowie die Technologie selbst nachhaltig sein müssen. In dieser Studie werden mögliche Ansätze und ein Methodenkoffer vorgestellt, mit welchem sich die genannten Technologien nachhaltiger gestalten lassen.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Die Auswirkungen von Künstlicher Intelligenz (KI), Internet of Things (IoT) und Distributed Ledger Technologie (DLT) auf die Umwelt sind kaum erforscht und bekannt. Bisher werden die sogenannten „embodied emissions“ fokussiert, nicht aber die Nachhaltigkeitsbilanz des laufenden Betriebs. Und auch Lifecycle Ansätze beschränken ihren „Scope“ auf Ausschnitte des Problems. Eine holistische oder systemische Erfassung der Umweltwirkungen von digitalen Technologien ist bisher nicht gegeben.

Zielsetzung:

Die Studie beantwortet die Frage: Mit welchen KI-Methoden („Methodenkoffer“) lassen sich Umweltbelastungen in KI, DLT, IoT messen, quantifizieren und zielgerichtet steuern?

Ergebnisse:

Das von Hardware und Geräten bekannte Modell der Lebenszyklusphasen sollte in der Form eines virtuellen „Digital Twin“ für die Nachhaltigkeitsbilanz für KI-Services angewendet werden.

Die besten Methoden zur Analyse der komplexen Daten und Informationen des „Digital Twin“ sind unüberwachtes Lernen und Reinforcement Learning.

Bisher gibt es nur wenige Beispiele und Vergleichsdaten für KI/DLT/IoT-Anwendungen und Systeme in Bezug auf ihre Klimawirksamkeit. Um trotzdem die Nachhaltigkeitsbilanz zu optimieren, sollte auf Few Shot Learning gesetzt werden.

Handlungsempfehlung:

Die Daten von (großen) Cloud Plattformen, Rechenzentren, Energieversorgern, Middleware-Anbietern u.a. müssen zugänglich werden. Grund: Hier liegen die relevanten Daten zu den einzelnen Lebensphasen, die für Minimierung der Umwelteffekte notwendig sind. Wir schlagen eine partnerschaftliche Entwicklung eines Prototyps des beschriebenen Digital Twin für die Lebenszyklusbewertung von KI, DLT und IoT Technologien zwischen relevanten Unternehmen und Akteuren aus Wissenschaft und Forschung vor.

Inhaltsverzeichnis

1. Beschreibung der Problemstellung und Zielsetzung in Bezug auf die „Vision einer Machine Economy“	115
2. Einschätzung der Wahrnehmung des Stellenwerts von Nachhaltigkeit und Digitalen Technologien mittels Expertenbefragung.....	116
3. Umweltbelastungen durch KI Technologien.....	117
4. KI und ML Methoden für die nachhaltige Verringerung von Umweltbelastungen.....	119
5. Konkrete Anwendungsszenarien zur Darstellung und Vertiefung von Methoden und Ansätzen.....	131
6. Zusammenfassende Analyse & Bewertung.....	135
7. Hinweise zur Integration in die bestehende Akteurslandschaft und Handlungsoptionen der Akteure (2030+)	136
Literaturverzeichnis	138

Abkürzungsverzeichnis

DLT	Distributed Ledger Technologie
FSL	Few-shot Learning
GPU	Graphics Processing Unit
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
ML	Machine Learning
RCA	Root Cause Analyse
SDG	Sustainable Development Goals
THG	Treibhausgas

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Expertenbefragung	117
Abbildung 2: Life Cycle Phases of Device	124
Abbildung 3: Life Cycle Phases of Device mit KI Methoden zur Messung der Nachhaltigkeit.....	126
Abbildung 4: Life Cycle AI Services mit KI Methoden zur Messung der Nachhaltigkeit.....	127
Abbildung 5: Modell eines Digital Twin für die Nachhaltigkeitsmessung von KI, IoT und DLT mit den zugehörigen Methoden.....	129

1. Beschreibung der Problemstellung und Zielsetzung in Bezug auf die „Vision einer Machine Economy“

Im Zeitalter der selbständigen Maschinen und der „Machine Economy“ auf Basis von Künstlicher Intelligenz (KI), Distributed Ledger Technologien (DLT) wie Blockchain und dem Internet of Things (IoT) werden Fragen der Nachhaltigkeit neu gestellt und definiert. Die Mehrzahl der Prognosen geht davon aus, dass der Markt für Künstliche Intelligenz und ihre Applikationen in den nächsten fünf Jahren um das Zehnfache auf mehrere hundert Milliarden Dollar ansteigen wird. Das gleiche gilt auch für DLT und IoT. All diese Investitionen in Forschung, Entwicklung und Einsatz haben bereits bisher zu einem exponentiellen Wachstum von KI-Daten, KI-Modellen und KI-Infrastrukturkapazitäten geführt. Angesichts dieses dramatischen Wachstums von KI und anderen digitalen Technologien ist es notwendig, die Auswirkungen auf die Umwelt, die Herausforderungen und die Chancen dieser neu entstehenden Technologie zu verstehen. Denn Technologien neigen dazu, einen sich selbst beschleunigenden Wachstumszyklus zu schaffen, der neue Anforderungen an die Umwelt stellt (Wu et al., 2022). KI kann zudem auch als ein soziales Experiment an der Gesellschaft betrachtet werden. Es handelt sich um eine Technologie, über die wir noch viel lernen müssen. Wenn dieser experimentelle Charakter von KI klar ist, dann müssen unbedingt ethische und ökologische Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, um Mensch und Natur zu schützen (van Wynsberghe, 2021). CO:DINA hat im Einklang damit bereits das Ziel einer „Grünen Governance der Machine Economy“ postuliert, die Akteure und Technologien über alle Ebenen der Wertschöpfung hinweg erfasst, um die Umweltbelastungen durch die technologischen Infrastrukturen der Machine Economy zu minimieren (Wurm et al., 2021). Diese Kurzstudie soll hierzu einen Beitrag leisten und einen Bestandteil der Transformationsroadmap für Digitale Nachhaltigkeit bilden. Die erkenntnisleitende Fragestellung lautet deshalb:

„Mit welchen KI Methoden oder einer Kombination aus diesen („Methodenkoffer“) lassen sich Umweltbelastungen in KI, DLT, IoT messen, quantifizieren und zielgerichtet steuern?“

2. Einschätzung der Wahrnehmung des Stellenwerts von Nachhaltigkeit und Digitalen Technologien mittels Expertenbefragung

In einer eigenen Expertenbefragung sind für diese Studie zentrale Fragestellungen vertieft worden. Dazu wurden verschiedene Expert/innen aus Wissenschaft, Forschung und Unternehmenspraxis befragt. Die Expert/innen arbeiten in verantwortlichen Positionen in der Unternehmensleitung und/oder der Leitung des Bereichs Data Science/KI und Prozessmanagement. Die Unternehmen sind dabei in verschiedenen Branchen aktiv, so dass eine ausgeglichene und relativ umfassende Perspektive auf die Fragestellungen als gegeben angesehen werden kann. Zusätzlich wurden Expert/innen aus der Wissenschaft und Forschung befragt. Die Mehrzahl der Befragten kann in der täglichen Praxis keinen besonderen Stellenwert der Nachhaltigkeit von Digitalen Technologien feststellen, lediglich die Teilnehmer, die sich in ihrer Arbeit stark mit dem Thema auseinandersetzen messen diesem eine Rolle bei. Gleichzeitig rechnen alle Experten damit, dass das Thema in naher Zukunft an Relevanz und strategischer Bedeutung gewinnen wird. Alle Befragten geben an, dass zur effektiven Bearbeitung und Steuerung der Nachhaltigkeits- und Klimaeffekte von Digitalen Technologien zunächst einmal klare und allgemein anerkannte Kennzahlen und Indikatoren zu definieren sind. Für fast alle Expert/innen liegen im Energieverbrauch und der Ressourceneffizienz entscheidende Aspekte für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von KI, DLT und IoT Anwendungen und Systemen. Dabei betonen viele Expert/innen, dass Künstliche Intelligenz als „stand alone Technologie“ hier nicht sinnvoll eingesetzt werden kann und sollte, sondern eine Kombination aus KI Methoden und deren Einbettung in eine Systematik oder ein Modell notwendig sei. Auch die Skalierbarkeit einer Lösung wurde mehrfach betont. Damit unterstützt die Expertenbefragung den Ansatz und den Anspruch dieser Studie und der CO:DINA Roadmap. Beispiele für vergleichbare Ansätze sind den meisten Experten dabei aus der Energiewirtschaft bekannt, sowie aus der Verwertungs- und Recyclingindustrie. Einig sind sich die Expert/innen in der zentralen Bedeutung und Notwendigkeit von umfangreichen Datenbeständen für die Nachhaltigkeitsmessung von Digitalen Technologien. Hier sehen die Befragten vor allem Unternehmen in der Pflicht, kontinuierliche Messdaten über den Energiebedarf und die Nutzungsszenarien der bereit gestellten eigenen Produkte und Services zugänglich zu machen. Als Hürden für die Umsetzung einer Nachhaltigkeitsmessung und –

steuerung identifizieren die Expert/innen aktuell fehlende Daten und eine geringe Datentransparenz, sowie die wegen der Komplexität der Thematik zu erwartenden hohen Kosten und Aufwände in der Etablierung und Umsetzung. In Bezug auf die Nachhaltigkeitsbilanz wurde vor allem KI eine mittlere bis hohe Relevanz zugeschrieben, während bei DLT eine höhere Unsicherheit bezüglich des Einflusses besteht (siehe Abbildung).

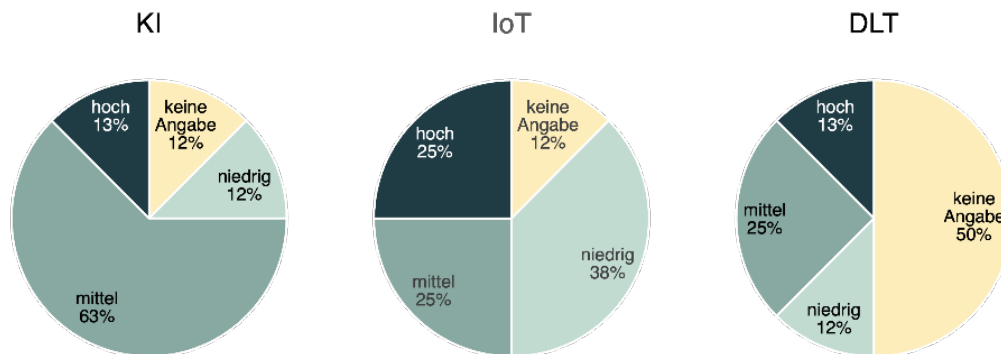


Abbildung 7: Expertenbefragung: Wie ausgereift schätzen Sie die Nachhaltigkeitsbilanzen von KI, IoT und DLT Anwendungen aktuell ein?

3. Umweltbelastungen durch KI Technologien

Für die Folgenabschätzung und Beurteilung von KI Technologien ist eine Orientierung an der Abfolge beziehungsweise am Aufbau von KI Prozessen empfehlenswert. Die Häufigkeit des Trainings und der Umfang jeder Stufe der Machine Learning (ML)-Pipeline müssen berücksichtigt werden, um die wichtigsten Engpässe für nachhaltige KI zu verstehen (vgl. Wu et al., 2022, Lozo & Onishchenko, 2021, Ligozat et al., 2022). Im Zentrum dieser Life Cycle Betrachtung steht dabei das Problem des Material- und Energieverbrauchs. Maschinelles Lernen erfordert eine große Menge an Daten und Energie, die für Verarbeitung und Speicherung benötigt wird. Computerhardware und -infrastruktur sind auch für inhärente Emissionen bei der Rohstoffgewinnung und Herstellung sowie für Emissionen beim Transport und am Ende der Lebensdauer verantwortlich. Bei dezentraler Datenverarbeitung (z. B. Desktops, Laptops, Smartphones) machen diese "embodied emissions" 40 bis 80 Prozent der Lebenszyklus-Treibhausgas(THG)-Emissionen der Geräte aus, während sie bei Rechenzentren in der Regel weniger als 10 Prozent ausmachen (Kaack et al., 2021). Ausgehend von der Annahme, dass erneuerbare Energien am Standort verfügbar sind, beträgt die Aufteilung

zwischen dem inhärenten und dem (standortbezogenen) betrieblichen Kohlenstoff-Fußabdruck etwa 30/70 Prozent für die groß angelegten ML-Aufgaben. Berücksichtigt man kohlenstofffreie Energie, wie z. B. Solarenergie, kann der betriebliche Kohlenstoff-Fußabdruck erheblich reduziert werden, so dass die Kohlenstoffkosten für die Herstellung die dominierende Quelle des Kohlenstoff-Fußabdrucks der KI sind (Wu et al., 2022).

Ein eigener, neuer und zentraler Aspekt bei der Beurteilung von KI Systemen und Anwendungen ist der Aspekt der komplizierten Methoden und Algorithmen. Einfachere und induktive Ansätze für KI Modelle erweisen sich nicht nur als resilienter, sondern zugleich auch als klimafreundlicher. Denn die KI an sich hat einen CO₂-Fußabdruck, da sie für ihre Berechnungen viel Energie verbraucht. Neue Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der CO₂-Fußabdruck des Trainings eines einzigen KI-Modells 284 Tonnen CO₂ entspricht, was dem Fünffachen der Lebenszeitemissionen eines durchschnittlichen Autos entspricht. Das Training eines einzigen Modells ist das Minimum an Arbeit, das ein Experte leistet. In der Praxis erfordert der Prozess der Erstellung und Prüfung eines endgültigen Modells das Training von Tausenden von Modellen – und je nach den Umständen, unter denen es wahrscheinlich eingesetzt wird, ist dieses „endgültige“ Modell möglicherweise nur für eine bestimmte Zeit nützlich. Ein KI-Programm muss auf eine große Menge von Eingabedaten wie Bilder trainiert werden und kontinuierlich parallele Berechnungen durchführen (meist über mehrere GPUs) (Nabavi et al., 2019). Die Bewertung der Auswirkungen eines KI-Dienstes unterscheidet sich zunächst nicht grundlegend von der eines anderen IT-Dienstes, aber KI weist Besonderheiten auf, die berücksichtigt werden müssen, weil sie die Umweltauswirkungen verstärken. Erstens erfordern KI und insbesondere Deep-Learning-Methoden in der Regel große Mengen an Daten. Auch für das Training tiefer neuronaler Modelle werden viel Rechenzeit und Ressourcen benötigt, zum Teil weil das Modell selbst eine umfassende Darstellung lernt, die es ihm ermöglicht, die Daten besser zu verarbeiten (Ligozat et al., 2022).

Wenn die Genauigkeit von KI Anwendungen (der Prozentsatz der richtigen Vorhersagen) mit steigendem Energieverbrauch zunehmen würde, dann könnte das den Energieverbrauch komplexerer Modelle in gewisser Weise rechtfertigen. Doch das Gegenteil ist der Fall: Komplexe Algorithmen fressen mehr Energie, sind aber in den meisten Fällen nicht besser in ihrer Performance (Lottick et al., 2019). Die Erhöhung der Anzahl der Knoten in den verborgenen Schichten erhöht den Energieverbrauch, ohne notwendigerweise die Genauigkeit zu erhöhen. Bei Modellen, die wiederholt neu trainiert werden können (z. B. wenn Daten aktualisiert

werden), sollte der Energieverbrauch als eine der Standardmaßnahmen zur Optimierung untersucht werden. Dies stellt jedoch auch einen potenziellen Widerspruch und eine Herausforderung dar, da für die Untersuchung dieses Kompromisses weitere Energie aufgewendet werden muss. Strubell et al., 2019 zeigen weiter, dass das "Tuning" (d.h. die Wiederverwendung oder Verfeinerung) eines KI-Modells teurer ist als die Ausbildung eines Modells zu Beginn. Diese Erkenntnisse sind für (politische) Entscheidungsträger von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, Entscheidungen über die Verhältnismäßigkeit bestimmter KI-Methoden im Vergleich zu ihrer beabsichtigten Anwendung zu treffen. Da sich die Gesellschaft in ihren Kommunikations-, Transport- und sozialen Gewohnheiten weiterentwickelt, müssen alte KI-Modelle ständig angepasst werden, um weiterhin effektiv zu sein. Diese Kosten müssen zu jeder Verhältnismäßigkeitsberechnung hinzugezählt werden (van Wynsberghe, 2021). Darum ist die energieintensivste Phase des Lebenszyklus von ML-Modellen die Modellentwicklung, die das Training vieler verschiedener Modelle erfordert (Kaack et al., 2021).

4. KI und ML Methoden für die nachhaltige Verringerung von Umweltbelastungen

Bislang gibt es einige mögliche Tools und zwei Standards zur Beurteilung von Emissionen bei KI bzw. ML Anwendungen. MLPerf ist der Industriestandard für den Leistungsvergleich von ML-Systemen. Infolgedessen erfordert das Training eines hochmodernen Modells heute beträchtliche Rechenressourcen, die zusammen mit den damit verbundenen finanziellen und ökologischen Kosten viel Energie erfordern. Die Forschung und Entwicklung neuer Modelle vervielfacht diese Kosten um das Tausendfache, da ein erneutes Training erforderlich ist, um mit Modellarchitekturen und Hyperparametern zu experimentieren (Strubell et al., 2019). Der KI Prozessstandard IEEE 7000 adressiert die Lebenszyklusperspektive mit Blick auf verantwortungsvolles Engineering. Zu den Tools gehört der „Machine Learning Emissions Calculator“ zur Schätzung des CO₂-Fußabdrucks von GPU-Berechnungen durch Angabe des Hardwaretyps, der genutzten Stunden, des Cloud-Anbieters und der Region. Des Weiteren das Framework „experiment-impacttracker“ zur Verfolgung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen in Echtzeit sowie zur Erstellung standardisierter Online-Anhänge. Jeder dieser Ansätze zielt auf die Minderung von Kohlenstoffemissionen und die

Reduzierung des Energieverbrauchs ab, um die nachhaltige Entwicklung von ML zu unterstützen. Tools, um die Auswirkungen von Trainingsmodellen besser sichtbar zu machen lassen sich schematisch unterteilen in

a) Integrierte Tools wie Experiment Impact Tracker, Carbon Tracker und Code-Carbon, bei denen es sich um Python-Pakete handelt, die den gemessenen Energieverbrauch und den damit verbundenen CO₂-Fußabdruck melden.

b) Online-Tools wie Green Algorithms 4 ML und CO₂ Impact, die nur wenige Parameter wie die Trainingsdauer, das Material und den Standort benötigen, aber weniger genau sind (Ligozat et al., 2022). Weitere Werkzeuge, wie das Carbon Aware SDK der Green Software Foundation, befinden sich in der Entwicklung. Diese Instrumente nutzen jedoch selbst keine KI oder ML Anwendungen.

4.1. Methoden für Wirkungsanalysen

Bei KI Methoden ist zwischen sogenanntem überwachtem und unüberwachten Lernen zu unterscheiden. Beim überwachten maschinellen Lernen erlernt das Modell die Gesetzmäßigkeiten eines zugrundeliegenden Datensatzes nachzubilden. Typische Anwendungsfälle sind das Klassifikations- oder Regressionsproblem. Nötig für das Trainieren eines solchen Modells ist ein Datensatz bei dem sowohl die Eingabe-, als auch Ergebnisgrößen bekannt sind. Großes Potential zur Emissionseinsparung ergibt sich insbesondere aus der Kombination von den Fähigkeiten des überwachten Lernens zur Vorhersage und zur Optimierung. So kann beispielsweise der Ertrag einer Windkraftanlage vorhergesagt werden und diese Prognose dazu benutzt werden die Einspeisung ins Energienetz zu optimieren (Elkin & Witherspoon, 2019). Grundlage einer solchen Lösung ist immer ein ausreichender Datensatz mit Hilfe dessen ein Machine Learning Modell trainiert werden kann. Jedoch sind momentan zu wenig Daten über die Umweltauswirkungen von KI, IoT und DLT vorhanden, um aussagekräftige Modelle zu entwickeln. In einem ersten Schritt sollte von Seiten der Forschung (und Industrie) ein entsprechender Datensatz aufgebaut werden, welcher mindestens die direkten Umweltauswirkungen der entsprechenden Technologien beschreibt und auf Basis dessen für Neuentwicklungen im Voraus Aussagen über die Klimawirkungen getroffen werden können.

Für die Quellen- und Wirkungsanalyse in Lebenszyklen und Prozessen bieten sich verschiedene KI bzw. ML Methoden an. Eine Methode ist das Unüberwachte Lernen. Unüberwachte Algorithmen des maschinellen Lernens leiten Muster aus einem Datensatz ohne Bezug auf bekannte oder gekennzeichnete Ergebnisse

ab. Unbeaufsichtigtes Lernen kann verwendet werden, um die zugrundeliegende Struktur der Daten zu entdecken (vgl. Russell & Norvig, 2012). In der Erkenntnis der Struktur von Daten und Mustern liegt der erste Schritt zur Transparenz darüber, was den ökologischen Fußabdruck von Systemen und Anwendungen beeinflusst und wie diese Faktoren wiederum beeinflusst und gesteuert werden können, um einem gewünschten Ergebnis (z.B. Minimierung der Umweltbelastung) näher zu kommen. Beispiele für die Anwendungen von unüberwachtem Lernen liegen hier in Prozessen in der Industrie, der Mobilität oder der Nutzung von digitalen Services, bei denen die entscheidenden Stellhebel für eine bessere Klimabilanz erst noch gefunden werden müssen. Hier können mit dieser Methode Zusammenhänge und Korrelationen in Datenmengen gefunden werden, die mit menschlicher Analyse nur extrem aufwändig oder auch gar nicht erreichbar wären.

Einige Anwendungen von unüberwachten Techniken des maschinellen Lernens sind:

Clustering kann einen Datensatz automatisch nach Ähnlichkeit in Gruppen aufteilen. Häufig überschätzt die Clusteranalyse jedoch die Ähnlichkeit zwischen Gruppen und behandelt Datenpunkte nicht als Individuen (Kaplan, 2018, Wartala, 2018, Yao et al., 2019) .

Die Anomalieerkennung kann automatisch ungewöhnliche Datenpunkte in einem Datensatz entdecken.

Association Mining identifiziert Gruppen von Elementen, die häufig zusammen in einem Datensatz vorkommen.

Auch das Reinforcement Learning gehört zum unbewachten oder autonomen Lernen. In Abgrenzung zu den Methoden supervised und unsupervised Learning werden beim Reinforcement Learning jedoch vorab keine Daten benötigt. Stattdessen werden diese in einer Simulationsumgebung in vielen Durchläufen in einem Trial-and-Error-Verfahren während des Trainings generiert und gelabelt. Reinforcement Learning steht für eine ganze Reihe von Einzelmethoden, bei denen ein Software-Agent selbständig eine Strategie erlernt. Das Ziel bei dem Lernvorgang ist es, die Zahl an Belohnungen innerhalb einer Simulationsumgebung zu maximieren. Beim Training führt der Agent zu jedem Zeitschritt Aktionen innerhalb dieser Umgebung aus und erhält jeweils ein Feedback. Dabei wird dem Software-Agenten vorab nicht gezeigt, welche Aktion in welcher Situation die beste ist. Vielmehr erhält er zu bestimmten Zeitpunkten eine Belohnung. Während des Trainings lernt der Agent auf diese Weise die Folgen von Aktionen auf

Situationen in der Simulationsumgebung einzuschätzen. Auf dieser Basis kann er eine langfristige Strategie entwickeln, um die Belohnung zu maximieren. Die Strategie könnte also beispielsweise dahingehend bestimmt werden, den CO₂-Fußabdruck in KI Anwendungen und in ganzen Lebenszyklen zu minimieren. Eine sogenannte „Policy“ ist dann das gelernte Verhalten eines Software-Agents. Eine Policy gibt an, welche „Action“ bei einer beliebigen Verhaltensvariante (Observation) aus der Lernumgebung (Environment) ausgeführt werden soll, um die Belohnung (Reward) zu maximieren (vgl. Ertel, 2016, Lapan, 2020).

Beim Few-shot Learning (FSL) geht es darum, Vorhersagen auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Beispielen zu treffen. Im Bereich der Bilderkennung zum Beispiel benötigen klassische ML-Systeme mehrere Millionen Bilder als Beispiele, um zu lernen. Few-Shot-Learning hingegen kann mit wenigen hundert oder tausend Beispielen auskommen und eine hohe Leistung und Zuverlässigkeit erreichen. Dies ist in Fällen notwendig, in denen es einfach unmöglich ist, genügend Daten zu sammeln. Da gerade in Bezug auf KI Technologien und deren Anwendungen sowie Lebenszyklen eher wenige Daten und miteinander vergleichbare historische Beispiele vorhanden sind, liegt im Few Shot Learning ein theoretisch großes Potenzial zur Folgenabschätzung von KI Anwendungen wie auch bei DLT und IoT Anwendungen.

4.2. Federated Learning als neuer Ansatz

Während in traditionellen Modellen und Konzepten also der Grundsatz gilt, die Daten zur Verarbeitung zu bringen oder sie auf einer Plattform zu sammeln, gilt im Federated Learning der Ansatz, die Verarbeitung und Analyse zu den Daten zu bringen. Federated Learning kann als ein Zusammenspiel zwischen globalen und lokalen Berechnungen beschrieben werden. Globale Berechnungen werden auf der Serverseite ausgeführt und sind für die Orchestrierung des Lernprozesses über eine Reihe von verfügbaren Clients verantwortlich. Lokale Berechnungen werden auf einzelnen Clients ausgeführt und haben Zugang zu den tatsächlichen Daten, die für das Training oder die Bewertung der Modellparameter verwendet werden. Clients können Geräte oder ganze Gebäude sein oder Datenbanken. Es ist also mit dem Federated Learning Ansatz nicht mehr notwendig, die Daten der einzelnen Teilnehmer auf einer Plattform zu versammeln, bevor sie verwertbar und nutzbar sind.

Darüber hinaus können auch die weiter oben beschriebenen systemischen Ansätze und Lebenszyklus-Modelle verwendet werden, um daraus KI basierte Simulationen oder virtuelle Zwillinge („digital twins“) für Einsatzszenarien von KI, wie auch DLT oder IoT Technologien zu modellieren. So empfiehlt beispielsweise die Royal Society „digital twins“, die durch KI-Analysen ergänzt werden, als Schlüsselkomponenten potenzieller (planetarischer) digitaler „Regelkreise“ für wirksame Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels und robustere wirtschaftliche Praktiken (Galaz et al., 2021).

4.3. Lebenszyklus und Scope

Die oben beschriebenen Methoden eignen sich prinzipiell zur Messung und Beurteilung von Umweltbelastungen und damit zur Folgenabschätzung und zielgerichteten Steuerung von Abläufen und Prozessen. Damit ist die erkenntnisleitende Fragestellung jedoch noch nicht beantwortet. Der Anspruch lautet, die Akteure und Technologien über alle Ebenen der Wertschöpfung hinweg zu erfassen, um die Umweltbelastungen durch die technologischen Infrastrukturen der Machine Economy zu minimieren. Das stimmt auch mit den Erkenntnissen und Postulaten aus den ebenfalls bereits zitierten Untersuchungen und Experimenten überein, wonach eine Betrachtung der Lebenszyklen (Life Cycle Assessment) notwendig ist. Gleichzeitig ist klar, dass wir es bei KI, DLT und IoT Anwendungen und Systemen mit zwei Lebenszyklen zu tun haben, die miteinander verbunden sind, in weiten Teilen aber trotzdem unabhängig voneinander funktionieren und ablaufen. Letztlich spiegelt das die klassische Trennung von Hard- und Software beziehungsweise von „Service“ und „Device“ wider. Hierzu haben Wu et al. und Ligozat et al. Vorschläge und Schemata erarbeitet. Für die weitere Analyse und Ausarbeitung nutzen wir den Vorschlag von Ligozat et al.. Hierbei handelt es sich um zwei Lebenszyklus Darstellungen für den „AI Service“ und die „Life Cycle Phases of Device“. Dabei ist der Device Lifecycle jedoch in die „AI Services“ integriert, da jeder Phase oder Aufgabe (task) im Service Zyklus ein oder mehrere „Devices“ zugeordnet werden können. Damit lassen sich verschiedene KI, DLT und IoT Anwendungen und Szenarien abbilden, die grundsätzlich alle relevanten Aspekte erfassen und widerspiegeln. Ebenfalls sind hiermit die bereits zuvor beschriebenen signifikanten „Stellhebel“ für die Beurteilung und Beeinflussung von Nachhaltigkeit bei KI Systemen integriert: Hardware wie z.B. GPU's; Algorithmen und ihre Komplexität; Modelle für das Training.

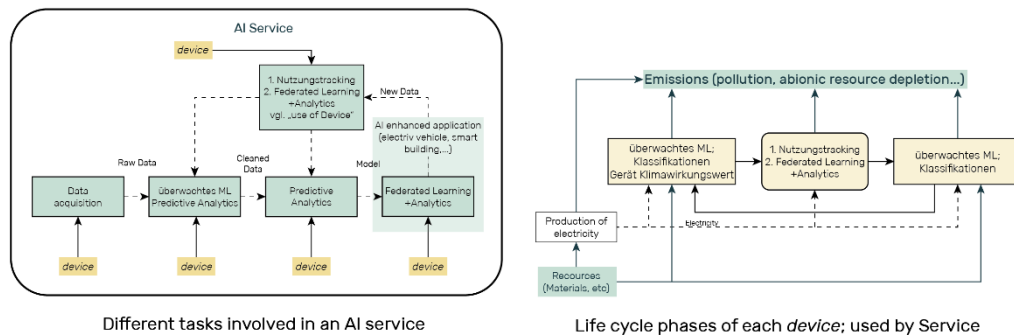


Abbildung 2: Life Cycle Phases of Device (nach Ligozat et al., 2022) Die rechte Darstellung beschreibt den Hardware Lifecycle von Geräten und die empfohlenen KI Methoden zur Messung der Nachhaltigkeitsbilanz in den jeweiligen Lifecycle Phasen. Die linke Darstellung beschreibt den Software Lifecycle der auf bzw. mit den Geräten genutzten Services und die KI Methoden zur Messung von deren Nachhaltigkeitsbilanz in den jeweiligen Lifecycle Phasen.

Wir greifen die Empfehlung auf, „digital twins“ auf Basis dieser Lebenszyklus-Modelle zu entwerfen und zu etablieren. Diese Methode ist bereits in verschiedenen Zusammenhängen bekannt und erprobt, von der Immobilienwirtschaft über die industrielle Produktion, die Landwirtschaft über die Gesundheits- und Medizinwirtschaft bis hin zu den Klimawissenschaften. In allen Fällen werden Systeme und Regelkreise definiert, um sie zu beobachten, zu messen, zu analysieren, sie zu simulieren und zu optimieren. Diese „digital twins“ sollen nun durch KI Methoden und KI Analysen ergänzt beziehungsweise aus diesen aufgebaut und zusammengesetzt werden. Es gilt also, die passenden KI Methoden für die einzelnen Phasen und Bestandteile des Lebenszyklus-Modells zu finden und ihren Einsatz zu definieren und ebenso zu definieren, welche Voraussetzungen und Anforderungen erfüllt sein müssen, damit die KI Methoden auch ihren (Erkenntnis-)Zweck erfüllen können.

4.4. Methodenkoffer für Lebenszyklen von „Devices“

Für die Lebenszyklusphasen des jeweiligen Gerätes oder der jeweiligen Maschine schlagen wir überwachtes Lernen und Federated Analytics als wesentliche Methoden vor. Die Daten der Produktion des jeweiligen „device“ sollten aus den industriellen Prozessen der Herstellung vorhanden sein beziehungsweise genutzt werden können. Grundsätzlich kann so zu jedem Stück Hardware ein CO₂-Fußabdruck und eine Klimawirkung zugeordnet werden. Notwendig ist hier, dass die herstellenden Unternehmen die Produktionsdaten sowie die Beschaffungsdaten der verwendeten Einzel- und Bestandteile zugänglich und nutzbar machen. Da die jeweiligen Geräte und Hardware standardisiert sind, können hier

Klassifikationen per KI vorgenommen werden, um bestimmte Hardwarekomponenten und Geräte einem CO₂- oder Klimawirkungswert zuordnen zu können.

Für die Phase der Nutzung („use of device“) sind Federated Learning Methoden zu empfehlen. Auch wenn die Geräte an sich standardisiert sind, so ist deren Nutzung wiederum sehr individuell vom jeweiligen Nutzer und dem Zweck der Nutzung abhängig. Im ersten Schritt kommt es darauf an, Nutzungsdaten zu sammeln und auszuwerten. Sofern historische Daten vorhanden und nutzbar sind, sollten diese ebenfalls genutzt werden. Der Vorteil beim Federated Learning, dass die Daten nicht an einem zentralen Platz versammelt sein müssen, lässt sich hier voll ausspielen. Ziel hierbei ist es Nutzungsmuster und Klimaeffekte zu erkennen und zu lernen, die dann für spätere Modellierungen und Prognosen genutzt werden können. In der konkreten Nutzungssituation des Gerätes geht es also zunächst „nur“ um ein Tracking und ein Messen der Nutzung und des damit verbundenen Energieverbrauchs. Hier muss jeweils bekannt sein, auf welche Art und aus welchen Quellen die verbrauchte Energie produziert worden ist. Es muss also gewährleistet sein, dass die Nutzungsdaten der Geräte zugänglich sind (von privaten Nutzern freigegeben und von Unternehmen freigegeben) und dass die Daten zur jeweiligen Energieproduktion von den Energieversorgern zugänglich sind. Die aggregierten Einzeldaten lassen sich dann analysieren und für Modellierungen und „predictive analytics“ nutzen. Damit ließe sich der Klimaeffekt einer Nutzung recht genau beziffern und es wären Voraussagen möglich, welches Gerät in welcher Situation zu welchem Zweck am besten genutzt werden sollte, um den Klimaeffekt zu minimieren.

Zur Beurteilung der letzten Phase („end of life of device“) ist es notwendig, verlässliche und repräsentative Daten zur Verwertung, Vernichtung oder (teilweisen) Wiederverwertung von Geräten und Hardwarekomponenten nutzbar zu haben. Es ist illusorisch, den „letzten Weg“ eines Gerätes und der jeweiligen Bestandteile so wie die Nutzung zu „tracken“ und nachzuverfolgen. Hier geht es – wie bei der Produktion – um die Zuordnung und Klassifizierung von Geräten, Gerätetypen und Komponenten zu standardisierten CO₂- und Klimaeffekt-Werten. Auf dieser Basis ließen sich – auch wieder wie bei der Produktion – Voraussagen ableiten und Prognosen für künftige mögliche Szenarien erstellen. Die nötigen Daten dafür müssen von Hersteller-Unternehmen, von Entsorgern und Verwertern und öffentlichen Akteuren wie Ämtern und Prüfstellen zugänglich gemacht werden, welche normalerweise aufgrund von Vorgaben oder Vorschriften die Verwertung dieser Art von „Sondermüll“ monitoren und kontrollieren.

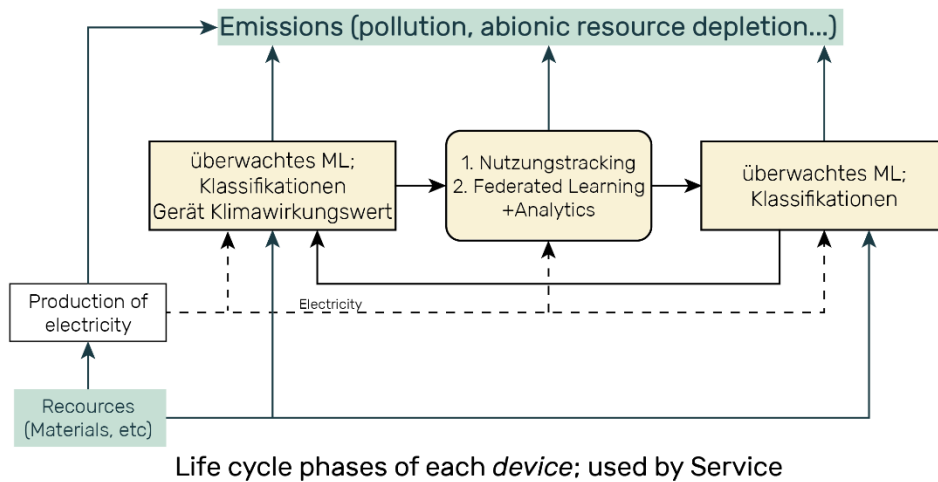


Abbildung 8: Life Cycle Phases of Device mit KI Methoden zur Messung der Nachhaltigkeit

4.5. Methodenkoffer für „AI Services“

Bei den verschiedenen KI Services („AI tasks“) kann der Bereich „Data Storage“ weitgehend mit dem zuvor beschriebenen „use of device“ im Hardwarelebenszyklus verglichen werden. Hier geht es darum, zu wissen welche Daten, in welchem Umfang in was für einer Art von Datenbank und Serverstruktur gelagert und vorgehalten werden. Daraus lässt sich mit dem Energiebedarf auch ein CO₂-Fußabdruck und ein Klimaeffekt berechnen und zuordnen. Dazu müssen die Daten von den jeweiligen Betreibern von Datenbanken und Servern nutzbar und zugänglich sein, ebenso wie die Daten zur Energieversorgung dieser an den jeweiligen Orten der Datenspeicherung und Prozessierung.

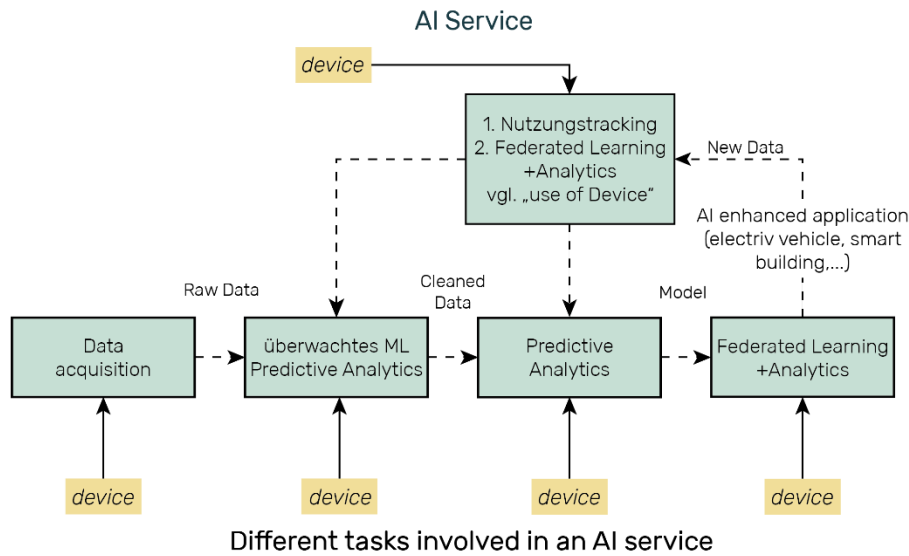


Abbildung 9: Life Cycle AI Services mit KI Methoden zur Messung der Nachhaltigkeit

Schwieriger stellt sich die Beurteilung der Datenproduktion und des „Data Cleaning“, also der Vorbereitung der Daten für das maschinelle Lernen oder für DLT- und IoT-Anwendungen dar. Hier liegt die Schwierigkeit darin, dass ein Teil dieser Aufgabe und ihrer Arbeitsschritte von Menschen geleistet wird und geleistet werden muss, andere Arbeitsschritte bereits automatisiert unter Anwendung von KI abgearbeitet werden (können). Im Falle eines maschinellen Data Cleaning kann hier auf den Energiebedarf für die Cleaning Prozesse Rückgriff für die Beurteilung genommen werden. Bei menschlicher Arbeit sind historische Erfahrungswerte und Beispielwerte nötig. Auch hier geht es in einem ersten Schritt zunächst um das Messen und den Aufbau einer Datenbasis. Darauf aufbauend lassen sich mit Hilfe von überwachtem Lernen und Predictive Analytics auch Voraussagen zu Klimaeffekten bei verschiedenen Data Cleaning Möglichkeiten und Szenarien machen.

Für die Learning und Inference Phase ist ein Datensatz mit Meta-Daten über den Anwendungsfall, die Technologie, sowie über den Energieverbrauch und die verbundenen CO2 Emissionen notwendig. Für den Fall der Entwicklung eines Machine Learning Modells könnte man unter anderem folgende Größen in einem Datensatz erfassen:

1. Daten über den Anwendungsfall: Branche, Einsatzzweck und Ziel, Textuelle Beschreibung der Anwendung

2. Technologische Daten (spezifisch für maschinelles Lernen): Verwendeter Algorithmus, Anzahl Trainingsparameter (Anzahl Neuronen und Schichten), Trainingsart des Algorithmus (z.B. vortrainierte Modelle, Few-Shot Learning, etc.), Evaluationsmetrik (z.B. f1 Score), Verwendeter Optimierungsalgorithmus, Anzahl Trainingsläufe, Größe des Trainings-, Evaluations-, Testsets, Verwendetes Hyperparameter-Tuning
3. Energiebedingte Daten (einzeln für verschiedene Life-Cycle Phasen), Typ der verwendeten Hardware, Ort der verwendeten Hardware, Anzahl der verwendeten Geräte, Zeiten der Benutzung der Hardware, Daraus abgeleitet: Energieverbrauch, Daraus abgeleitet: Emissionen

Für die Technologien IoT und DLT sollten ähnliche Datensätze aufgebaut werden, bei denen die technologischen Daten durch entsprechende technologie-spezifische Parameter ersetzt werden.

Mit Hilfe eines derartigen Datensatzes wäre es wiederum möglich Machine-Learning Modelle und Optimierungsalgorithmen zu entwickeln, welche den Energieverbrauch von Neuentwicklungen vorhersagen und optimieren können. Beispielhaft könnte mit Hilfe eines darauf trainierten Neuronalen Netzwerks eine Aussage über die Trainingszeit, die Performanz, den Energieverbrauch und die abgeleiteten Emissionen für die Entwicklung eines neuen Machine Learning Modells abgegeben werden. Eingangsp Parameter, wie die Größe des Trainingsdatensets oder die Anzahl der Trainingsparameter, könnten variiert werden und so eine optimale Konfiguration gefunden werden. Für die Phase der „Inference“ im Modell der KI Services empfehlen wir wiederum den Einsatz von

Federated Learning und Federated Analytics, denn hier laufen KI (oder DLT- oder IoT-Applikationen) wiederum auf irgendeiner Art von individuellen und räumlich getrennten Geräten oder Hardware.

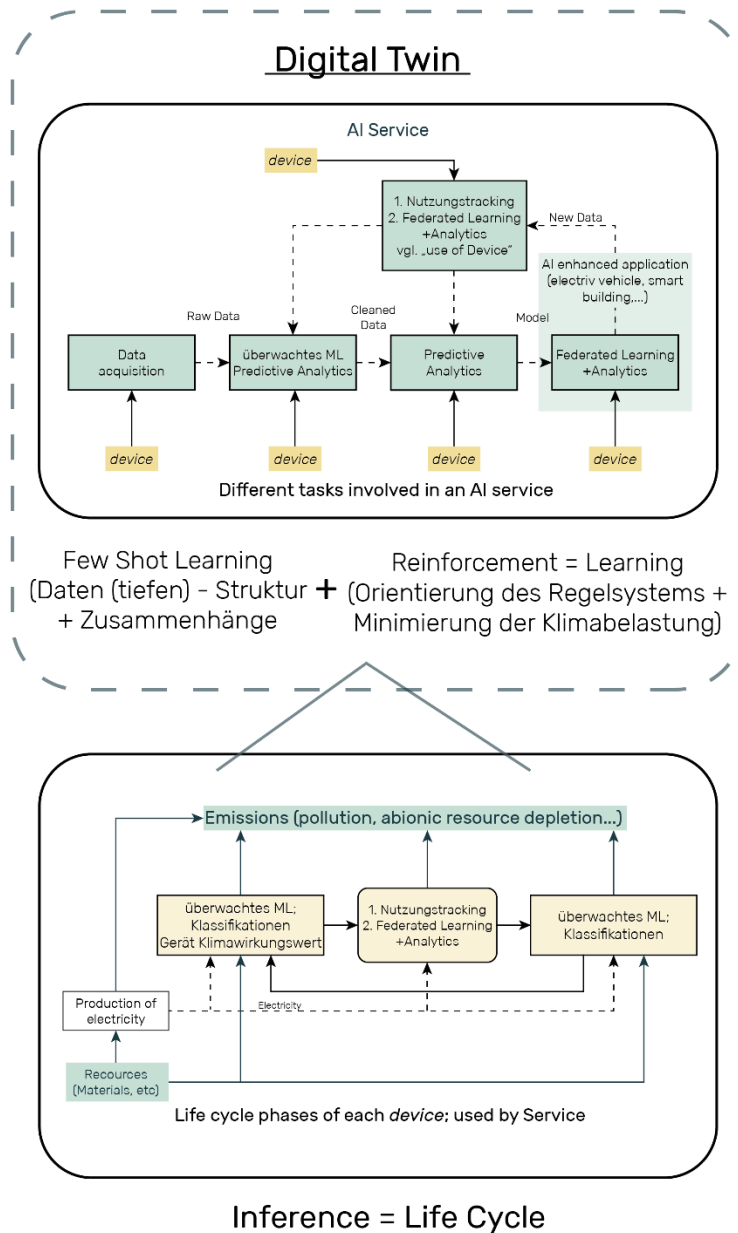


Abbildung 10: Modell eines Digital Twin für die Nachhaltigkeitsmessung von KI, IoT und DLT mit den zugehörigen Methoden

4.6. Integration der Methodenkoffer im „Digital Twin“

Das Modell der Lebenszyklusphasen der Geräte und der Hardware kann für ein umfassenderes Modell oder einen „Digital Twin“ in das Schema der KI Services integriert werden. Der Bereich der „Inference“ ist als eine Mischung aus dem

Energiebedarf der laufenden KI-, DLT- oder IoT-Applikation zu verstehen, verbunden mit der „use of device“-Phase des Gerätelebenszyklus. Sowohl die Nutzung der Applikation als auch des Gerätes sind, wie zuvor beschrieben, dynamisch und hängen dazu noch voneinander ab: Nur wenn ein Gerät genutzt wird, kann auch eine Applikation auf diesem Gerät oder über dieses Gerät auf einem Server genutzt werden. Die Kennwerte zu den Phasen „Production“ und „End of Life“ sind statisch und standardisiert und können so als Information oder Datensatz in das Gesamtmodell beziehungsweise den „Digital Twin“ integriert werden.

Zur Analyse der Daten und Informationen des „Digital Twin“ sollte auf unüberwachtes Lernen und Reinforcement Learning gesetzt werden. Durch die Methoden des unüberwachten Lernens lassen sich, wie bereits weiter vorne beschrieben, die zugrundeliegenden Strukturen von komplexen Daten transparent machen und verstehen. Dies liefert verlässliche Ansatzpunkte für die Optimierung von Systemen beziehungsweise des „Digital Twin“ von, KI-, DLT- und IoT-Systemen im Sinne der Verringerung der Klimabelastungen des Systems. Aufgrund der zunächst wenigen Beispiele und Vergleichsdaten für die genannten Anwendungen und Systeme in Bezug auf ihre Klimawirksamkeit sollte für die Prognosen zur Optimierung auf Few Shot Learning gesetzt werden. Diese Methode hat sich bereits bei der Analyse und Modellierung anderer seltener Ereignisse bewährt und insbesondere bei der Modellierung von verschiedenen Arten von Zyklen oder Kreisläufen. Mit zunehmender Fülle von Daten und Beispielen werden die „Regeln“ des Systems und des „Digitale Zwillinge“ klarer und belastbarer werden. Es geht hier also im übertragenen Sinne darum, die Strategie in einem Spiel zu optimieren, um es zu gewinnen. Gewinnen bedeutet hier, den besten – also niedrigsten – Wert der Klimabelastung zu erreichen. Für das Erkennen, Lernen und Perfektionieren solcher (Spiel-)Strategien hat sich Reinforcement Learning als eine Art des unüberwachten Lernens bisher als sehr erfolgreich und performant erwiesen. Hier besteht die schwierige Aufgabe für Menschen darin, die richtigen Parameter für die Anreize zu definieren, anhand derer die KI selbst das System- oder Spiel ausrichtet und perfektioniert.

5. Konkrete Anwendungsszenarien zur Darstellung und Vertiefung von Methoden und Ansätzen

Im Folgenden werden Anwendungsszenarien aufgezeigt, welche die unterschiedliche Herangehensweise von Unternehmen an das Thema nachhaltige KI darstellen. Im Wesentlichen lassen sich mittels KI-Nachhaltigkeitsziele erreichen, indem entweder die Software energiesparend programmiert ist, die Hardware möglichst emissionsfrei betrieben wird oder die erzielte Auswirkung der KI im Use-Case einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeitsbilanz hat. Im besten Fall werden alle drei Ansatzpunkte gemeinsam realisiert.

Die erfolgreichsten Einsatzgebiete für nachhaltige KI mit Fokus auf Ökologie sind (Zielinski, 2020):

- Detektion von Umweltverschmutzung
- Entwicklung nachhaltiger Methoden in der Agrarwirtschaft
- Intelligenten Mülltrennung und -beseitigung
- Nachhaltigeren Nutzung aquatischer Umgebungen
- Zukunftsorientierten Entwicklung grüner Mobilität
- Reduzierung des Energieverbrauchs
- Optimierung der Kreislaufwirtschaft
- Umweltbewussten Produktion
- Energieoptimierung
- CO2 Reduktion
- Steigerung der Ressourcen Effizienz
Ressourcenschonung

Energiesparender Einsatz von KI-Methoden mittels eines Baukastens, Use-Case: Selbstlernende Betriebsstörungserkennung

Kunde: Emschergenossenschaft & Lippeverband (EGLV): EGLV sind der größte Abwasserentsorger Deutschlands. Entsprechend des Selbstverständnisses verstehen sich EGLV als Treiber der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft.

Regenwasserbehandlungsanlagen sind zentrale Einrichtungen des Gewässer- und Umweltschutzes, deren Funktionserfüllung durch stete Überwachung zu gewährleisten ist. Betriebsstörungen müssen frühzeitig erkannt und behoben werden. Die weit mehr als 450 Anlagen der Regenwasserbewirtschaftung im Verbandsgebiet (zahlreiche weitere Baumaßnahmen sind in der Umsetzung)

werden mit einem hochkompetenten, aber durch den Fachkräftemangel begrenzten Mitarbeiterstab betreut. Das bedeutet, dass nicht alle Anlagen ständig besetzt sein können, und viele daher durch Fernüberwachung zu kontrollieren sind.

Während Störungen, die durch einfache Grenzwertüberwachungen diagnostiziert werden können, keinerlei Probleme bereiten, werden unvorhergesehene kleinere Änderungen zeitnah oft nicht erkannt. Zu einer hier relevanten Betriebsdatenkontrolle werden Know-How-Träger mit einer sehr genauen Anlagenkenntnis benötigt, die naturgemäß nicht überall zeitgleich tätig sein können.

Als Lösung wurde ein KI – basiertes, selbstlernendes Assistenzsystem für die operativ Betriebsbeschäftigten und die Betriebsteams in der Arbeitsvorbereitung entwickelt, das frühzeitig Störungen, Sensordrifts und Defekte identifiziert.

Das System setzt auf der bereits vorhandenen Sensorik an den einzelnen Anlagen auf, ist in der Lage messwertbasiert Ursachendiagnosen zu erstellen und lernt mit weiteren Ereignissen über ein Feedbacksystem ständig dazu.

Verwendet wurden die folgenden Methoden: Multikanal – Messwertüberwachung / algorithmische Zeitreihenanalyse / gleitende Zeitfenster / Störungsklassifikation via Nutzerfeedback.

Ergebnisse mit besonderem Bezug auf Nachhaltigkeit durch Technologie:

- Frühzeitige Erkennung von auftretenden Störungen, eröffnet die Möglichkeit Wartungstouren zu optimieren, signifikant Arbeitszeit und Treibstoff zu sparen.
- Störungsminimierte Regenwasserbewirtschaftung ist eine relevante Säule für energie- und ressourcensparende Schadstoffentsorgung in nachgelagerten Klärwerken.
- Heute bereits diskutierte, und zukünftig wünschenswert schärfere Grenzwerte für umweltrelevante Stoffe in Gewässern und in gereinigten Abwässern sind dann gut realisierbar, wenn quasistationäre Betriebsoptima die notwendige Klärleistung garantieren können. Störungsminimierte Regenwasserbewirtschaftung sorgt in diesem Kontext für einen gleichmäßigen Zufluss, sodass das jeweilige Betriebsoptimum in der Kläranlage nicht gestört wird.

Erfolgsfaktoren:

- Frühe Integration der Anwender in den Entwicklungsprozess und dadurch hohe Akzeptanz

- Verschlankung der Arbeitsvorbereitung für Wartungsteams
- Verbesserung der Datenqualität durch frühzeitige Erkennung von fehlerhaften Messwerten
- Senkung von Plausibilisierungsaufwänden
- Methodik kann auf andere Betriebsprozesse jenseits von Regenwasserbehandlung übertragen werden

Energiesparender Betrieb der Hardware, Use-Case: Ermittlung der CO2 Äquivalente bei der Nutzung von Soft- und Hardware:

Kunde: Open Source Tool in github für jeden Entwickler und jede Entwicklerin. Das Tool dient zur Ermittlung des CO2 Äquivalents des eigenen Hardware und Software Set Ups.

Der Machine Learning Emission Calculator (Schmidt et al., 2021) ist ein Tool, mit Hilfe dessen bereits heute in vier Schritten eine vereinfachte, schnelle aber dennoch relativ genaue Berechnung der CO2 Äquivalente möglich ist. Im ersten Schritt geht es darum, die CO2 Emissionen des GPU zu berechnen. Dazu steht eine breite Auswahl an gängiger Hardware zur Verfügung. Für das CO2 Äquivalent muss im zweiten Schritt die Betriebsdauer angegeben werden, mit der man die Berechnung durchführen möchte.

Im dritten Schritt ist ein Provider auszuwählen. Hier stehen die vier größten zur Verfügung.

Im letzten Schritt muss nun ausgewählt werden, in welcher Region der Server betrieben wird.

Das Ergebnis ist ein CO2 Äquivalent, sowie die gesamte Summe. Dieses kann nun durch die Eingabe eigener Reduktionsmaßnahmen verringert werden. Abschließend ist das Ergebnis als Code verfügbar, um es im eigenen Use-Case zu integrieren.

Die genaue Berechnung ist transparent und kann direkt in der Quelle nachvollzogen werden.

Verbesserter Umwelteinfluss durch den Usecase selbst, Use-Case: Optimierung Abfallrecycling

Kunde: Die Nehlsen AG ist ein internationales Unternehmen für Abfallentsorgung und -recycling mit mehr als 2.800 Mitarbeitern an rund 70 Standorten in

Deutschland und sechs weiteren Ländern. Die ausgewählten Unternehmensprozesse berühren die automatische KI-basierte Sortierung von Abfällen in verschiedene Wertstoffgruppen und die damit verbundene Qualitätssicherung.

Um im Bau- und Gewerbemischabfall befindliche Wertstoffe recyceln zu können, ist es notwendig, die verschiedenen Wertstoffe (z.B. Holz, Beton, Eisen, Kunststoffe) voneinander zu trennen. Nehlsen unterhält mehrere moderne Sortieranlagen, um diese Aufgabe zu bewältigen. Im Augenblick kann die Effizienz der Anlage nur reaktiv und nachträglich betrachtet werden, was es erschwert regulierend und optimierend in den Trennungsvorgang einzugreifen.

Unter Rückgriff auf in der Anlage verbaute Sensoren (z.B. Gewichtssensor) und neu hinzugefügte optische Sensoren (Kameras) kann der Anlagenzustand kontinuierlich erfasst und den Anlagenleitern unmittelbar zur Ansicht zur Verfügung gestellt werden. Diese kontinuierliche Bereitstellung zentraler Anlagenparameter bietet die Grundlage für KI-basierte Vorhersagen des Anlagenverhaltens (z.B. drohende Störungen / Ausfälle) und der erzielten Wertstoffqualität und damit die Grundlage für eine proaktive effiziente Steuerung des Sortierungs- und Recyclingprozesses.

Methoden: Multikanal – Messwertüberwachung / algorithmische Zeitreihenanalyse / gleitende Zeitfenster / prädiktive Anlagensteuerung

Ergebnisse mit besonderem Bezug auf Nachhaltigkeit durch Technologie:

- Effizientere Nutzung der Sortieranlage als Ressource: Durch verringerter Ausfallzeiten und bessere Auslastung der Anlage, wird Energie gespart und die in die Produktion der Anlage geflossenen Ressourcen besser genutzt.
- Effizienteres Recycling: Eine bessere Trennung der Wertstoffe führt sowohl dazu, dass mehr Wertstoffe wiederverwertet werden können, als auch dazu, dass die gewonnenen Wertstoffe von höherer Qualität sind. Dies reduziert den Ressourcenbedarf, der ansonsten bei der Neugewinnung vergleichbarer Stoffe notwendig gewesen wäre.

Erfolgsfaktoren:

- Stärkere Automatisierung der Betriebsabläufe.
- Detaillierteren, schnelleren und umfassenderen Überblick über wichtige Anlagenparameter.
- Prädiktive und dadurch bessere Grundlage für die Anlagensteuerung.

- Reduzierung von Fehlerquellen in der Anlagenerfassung.

6. Zusammenfassende Analyse & Bewertung

Im Einklang mit der bisherigen Forschung und Praxis wird auch in dieser Kurzstudie deutlich, dass ein umfassender Scope und eine Orientierung an Lebenszyklen die sinnvollste Herangehensweise zur Beurteilung von Klima- und Nachhaltigkeitseffekten von KI, DLT und IoT Technologien darstellt. Die wichtigen Stellhebel zur Beeinflussung der Nachhaltigkeitwirkung von digitalen Technologien - Hardware, Algorithmen und Modelle - finden auch in dem hier vorgestellten Methodenkoffer ihren Niederschlag. Im Unterschied zu den bisherigen Forschungen wird mit dem hier erarbeiteten Ansatz die Bedeutung von Daten und Datenzugang deutlicher als bisher. Das hat zwei Gründe: Zum einen sind die von uns vorgeschlagenen KI Methoden auf mengenmäßig wie qualitativ ausreichende Daten angewiesen. Dabei spielt die Datenqualität eine größere Rolle, als die Quantität, da vor allem Few Shot und Reinforcement Learning auch mit relativ kleinen Datenmengen gute Ergebnisse zeitigen, wenn deren Qualität nur gut genug ist. Zum Zweiten spielen Daten in den Phasen des Data Cleaning, Data Processing und der Inference Phase eine wichtige Rolle und haben damit einen Einfluss auf die Klimaeffekte von digitalen Systemen. Je schneller und einfacher Daten für Machine Learning nutzbar sind, desto geringer sind die Klima- und Umwelteffekte. Die beste Kombination sind in dieser Hinsicht ausreichende Daten mit hoher Qualität und möglichst einfache Modelle zu ihrer Ver- und Bearbeitung. Hinweise auf diese Erkenntnisse haben sich bereits in der Expertenbefragung dieser Studie gezeigt und sind im Verlauf der Untersuchung bestätigt worden. Dieser Anspruch ist auch auf den Methodenkoffer anzuwenden. Wenn auch das vorgeschlagene Modell des „Digital Twin“ komplex sein muss, so sind die einzelnen Bausteine mit den dazugehörigen Methoden doch recht eindeutig und klar. Im ersten Schritt ist zunächst einmal eine ausreichende Datensammlung notwendig, bevor die beschriebenen Methoden des überwachten und unüberwachten Lernens zum Einsatz kommen. Die Kombination der beschriebenen Methoden soll dann die Beurteilung der Nachhaltigkeitseffekte von digitalen Technologien mit dem anfangs dieses Kapitels angesprochenen umfassenden Scope ermöglichen. Die notwendigen Daten sind in praktisch allen Fällen vorhanden, liegen aber bei unterschiedlichen Akteuren und müssten zugänglich gemacht werden. Hier liegt die größte Hürde für die Umsetzung des

Methodenkoffers in der Realität. Die zweite bedeutende Hürde besteht in der erstmaligen Entwicklung der vorgeschlagenen Modellierung, die jedoch grundsätzlich von Forschung und Wissenschaft in Partnerschaft mit Unternehmen umsetzbar sein sollte, denn alle vorgeschlagenen einzelnen Methoden existieren bereits und sind in der Realität bereits erprobt.

7. Hinweise zur Integration in die bestehende Akteurslandschaft und Handlungsoptionen der Akteure (2030+)

Für die Integration der vorgeschlagenen Methoden in die bestehende Akteurslandschaft kann zum großen Teil auf bereits vorhandene Instrumente und vor allem Datenbestände zurückgegriffen werden. Meistens geht es darum, diese letztgenannten zugänglich und für die oben dargestellten Modellierungen nutzbar zu machen. Der erste und einfachste Schritt zur Integration besteht darin, die in Kapitel 5 vorgestellten bereits vorhandenen Tools und Standards grundsätzlich für eine erste Beurteilung der Klimafolgen von KI Anwendungen anzuwenden, um zumindest grobe Indikationen zu haben. Zudem ist es nötig, die Daten von (großen) Cloud Plattformen und Rechenzentren zugänglich machen, auf denen die relevanten Daten zu den einzelnen Lebensphasen erzeugt und vorgehalten werden. Des Weiteren ist es nötig, auf Datenbestände zugreifen zu können, die aus der Nutzung verschiedener KI Lösungen im Rahmen von beispielsweise Microsoft Azure resultieren. Hiermit ließen sich grundlegende Erkenntnisse und Erfahrungen vor allem für die Phasen des AI Services Lifecycle und dessen Modellierung und Beurteilung ziehen. Für das gleiche Ziel im Device Lifecycle sind neben Daten zur Kategorisierung der Geräte vor allem Daten der Energieversorger notwendig, um Klima- und Nachhaltigkeitseffekte messen und voraussagen zu können. Auch hier gilt wiederum, dass die Daten vorhanden, aber (noch) nicht zugänglich und nutzbar für die beschriebenen Zwecke und Ziele sind. Ein Vorschlag zur Lösung dieser Probleme, ist eine partnerschaftliche Entwicklung eines Prototyps des beschriebenen Digital Twin für den Lebenszyklus von KI, DLT und IoT Technologien zwischen relevanten Unternehmen und Akteuren aus Wissenschaft und Forschung. Der strategische Vorteil für die teilnehmenden Unternehmen wäre eine erstmalige Transparenz der Nachhaltigkeits- und Klimaeffekte ihrer Digitalen Produkte und Anwendungen und in der Folge deren Verbesserung und Nachhaltigkeitsoptimierung und eine verbesserte Akzeptanz und Vermarktbarkeit.

Die folgende Übersicht fasst die wichtigsten Herausforderungen und Anforderungen an die verschiedenen Akteure zusammen, damit die vorgestellten Methoden und Systematiken zur Nachhaltigkeitsmessung und -optimierung von KI, IoT und DLT-Anwendungen realisiert werden können.

AKTEUR	Herausforderung	Handlungsoption
Device Produzenten	Klassifikation von Geräten nach Nachhaltigkeitsaspekten	Erweiterung von vorhandenen Geräte- und Produktionsdaten um Kennzahlen zur Klassifizierung
Service Provider	Datenzugang zu Energieverbrauch und Klimaeffekten von Modellen und Algorithmen	Schnittstellen zur Kooperation
Nutzer Privat	Zugang zu Nutzungsdaten von Services und Devices	Erlaubnis zur Datenerhebung und Datennutzung
Nutzer Unternehmen	Zugang zu Nutzungsdaten von Services und Devices	Erlaubnis zur Datenerhebung und Datennutzung
Energieversorger	Transparenz zur Energiequellen und Distribution	Schnittstellen zur Kooperation
Politik	Rechtliche Rahmenbedingungen für Datenteilung und Datennutzung	Gesetzgebung und Richtlinien
Staat & Verwaltung	Zugang zu relevanten Daten des Device Lifecycles und Sekundärdaten zur Modellierung von einzelnen Phasen und des Digital Twin	Schnittstellen zur Kooperation
Wissenschaft & Forschung	Entwicklungen von Modellen zur Beurteilung von Klimaeffekten auf Basis des vorgeschlagenen Methodenkoffers	Public Private Partnership Projektierung

Weitere Anknüpfungspunkte werden sich durch zukünftige und bisher unbekannte Innovationen ergeben.

Literaturverzeichnis

- Elkin, C., & Witherspoon, S. (2019). Machine learning can boost the value of wind energy. DeepMind. <https://www.deepmind.com/blog/machine-learning-can-boost-the-value-of-wind-energy>
- Ertel, W. (2016). Grundkurs Künstliche Intelligenz. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13549-2>
- Galaz, V., Centeno, M. A., Callahan, P. W., Causevic, A., Patterson, T., Brass, I., Baum, S., Farber, D., Fischer, J., Garcia, D., McPhearson, T., Jimenez, D., King, B., Larcey, P., & Levy, K. (2021). Artificial intelligence, systemic risks, and sustainability. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160791X21002165>
- Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F., & Rolnick, D. (2021). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03368037>
- Kaplan, J. (2018). Artificial Intelligence: What Everyone Needs to Know. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0170840618792173>
- Lapan, M. (2020). Deep Reinforcement Learning: Das umfassende Praxis-Handbuch (K. Lorenzen, Übers.; 1. Auflage). mitp. <https://www.oreilly.com/library/view/deep-reinforcement-learning/9783747500385/>
- Ligozat, A.-L., Lefevre, J., Bugeau, A., & Combaz, J. (2022). Unraveling the Hidden Environmental Impacts of AI Solutions for Environment Life Cycle Assessment of AI Solutions (S. 5172). <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5172>
- Lottick, K., Susai, S., Friedler, S. A., & Wilson, J. P. (2019). Energy Usage Reports: Environmental awareness as part of algorithmic accountability (arXiv:1911.08354). <http://arxiv.org/abs/1911.08354>
- Lozo, O., & Onishchenko, O. (2021). The Potential Role of the Artificial Intelligence in Combating Climate Change and Natural Resources Management: Political, Legal and Ethical Challenges. <https://grassrootsjournals.org/gjnr/0403m00247.html>

- Nabavi, E., Daniell, K., Williams, E., & Bentley, C. (2019). AI for sustainability: A changing landscape. https://www.researchgate.net/publication/338844371_AI_for_sustainability_A_changing_landscape
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2012). Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz (F. Langenau, Übers.; 3., aktualisierte Auflage). Pearson, Higher Education. <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9783863265045>
- Schmidt, V., Luccioni, A., Lacoste, A., & Dandres, T. (2021). Machine Learning CO2 Impact Calculator. <https://mlco2.github.io/impact>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019, Juli). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. ACL 2019, Florence, Italy. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1355>
- van Wynsberghe, A. (2021). Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI. <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00043-6>
- Wartala, R. (2018). Praxiseinstieg Deep Learning: Mit Python, Caffe, TensorFlow und Spark eigene Deep-Learning-Anwendungen erstellen (1. Auflage). O'Reilly. <https://www.oreilly.com/library/view/praxiseinstieg-deep-learning/9781492065593/>
- Wu, C.-J., Raghavendra, R., Gupta, U., Acun, B., Ardalani, N., Maeng, K., Chang, G., Behram, F. A., Huang, J., Bai, C., Gschwind, M., Gupta, A., Ott, M., Melnikov, A., Candido, S., Brooks, D., Chauhan, G., Lee, B., Lee, H.-H. S., ... Hazelwood, K. (2022). Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities (arXiv:2111.00364). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2111.00364>
- Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., & Ramesohl, S. (2021). Wege in eine ökologische Machine Economy. Warum wir eine „Grüne Governance der Machine Economy“ brauchen (CO:DINA) [Positionspapier]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier-4_Wege-in-eine-machine-economy.pdf
- Yao, H., Jiang, C., & Qian, Y. (2019). Developing Networks using Artificial Intelligence. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15028-0>

Zielinski, O. (2020). Rettet Künstliche Intelligenz den Planeten?
https://uol.de/f/5/inst/icbm/ag/msys/download/Zielinski_2020_Rettet_ku__nstliche_Intelligenz_den_Planeten.pdf

Diffusionsbarrieren in der Umsetzung einer ökologischen Machine Economy

Thesen für eine digital-ökologische Gestaltung von aufstrebenden Technologien in der Unternehmenspraxis

Autor*innen

Daniel Wurm
Maike Jansen

Mit Unterstützung von
Rahel Weier

Kurz gesagt

Die Gestaltung einer ökologischen Machine Economy scheint in der Umsetzung ins Stocken zu kommen. Diese Studie soll beispielhaft Thesen zu Barrieren und Handlungsoptionen für die Diffusion eines nachhaltigen digitalen Technologie-Mix in der Unternehmenspraxis aufstellen. Dabei werden Prozesse und Strukturen digitaler Wertschöpfung beleuchtet.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Die digital-ökologische Transformation von Unternehmen scheint in der Umsetzung – jenseits von übergreifenden Strategien – ins Stocken zu kommen. Gleichzeitig bringt der Umgang mit dem sich entwickelnden technologischen Fundament der Machine Economy (Künstliche Intelligenz, Internet of Things sowie Distributed Ledger Technologie) zusätzliche Herausforderungen mit sich. Wir sehen jetzt ein Gelegenheitsfenster für eine nachhaltige Gestaltung dieses Technologie-Mix durch Aktivierung der richtigen Stellhebel auf der Unternehmensebene.

Zielsetzung:

Diese Studie soll explorativ und beispielhaft Thesen für Barrieren und Handlungsoptionen in der Diffusion eines nachhaltigen Technologie-Mix der Machine Economy in der Unternehmenspraxis aufstellen.

Ergebnisse:

Digitale Wertschöpfung bedient sich sogenannter Service-Oriented Architectures sowie DevOps-Strukturen bzw. Prozessen. Hier werden modulare Produkt-Service-Komponenten dynamisch kombiniert und stetig weiterentwickelt.

Barrieren für nachhaltige Technologiegestaltung können vor allem die fehlende Partner- und Partnerinnenlandschaft, ein Mangel an Umsetzungsstrategien, das starre Middle Management, ein unangepasstes Nachhaltigkeitsmanagement, geringe Nachhaltigkeitskompetenzen sowie Zielkonflikte in Nachhaltigkeitsinitiativen darstellen.

Handlungsempfehlung:

Wir schlagen einen Mix an Maßnahmen vor, die eine nachhaltige Ausrichtung des direkten Unternehmensökosystems, der Strategie- und Planungsebene, des Middle Managements, Strukturen und Prozesse sowie Wissenszugänge forcieren. Wir präsentieren einige Instrumente für verschiedene Stakeholder und Stakeholderinnen.

Inhaltsverzeichnis

1. Relevanz & Zielsetzung	145
2. Vorgehen	150
3. Stand der Forschung	151
4. Ergebnisse	154
5. Fazit	166
Literaturverzeichnis	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungslogik für eine ökologische Maschine Economy.....	149
Abbildung 2: Vorgehen.....	151
Abbildung 3: System digitaler Wertschöpfung	155
Abbildung 4: Diffusionsbarrieren für eine ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis	161
Abbildung 5: Handlungsoptionen für die Gestaltung einer ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis.....	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Diffusionsbarrieren von IoT, KI, DLT und Nachhaltigkeit.....	154
--	-----

1. Relevanz & Zielsetzung

Der Weg in eine Machine Economy, in der Maschinen wesentliche Aufgaben des Wirtschaftens übernehmen (Wurm et al., 2021), wird in signifikanter Weise durch Unternehmen geprägt. Unter Einwirken politischer, zivilgesellschaftlicher und forschender Akteure und Akteurinnen entwickeln sie Technologien und Regeln, über die Maschinen zukünftig Transaktionen nahezu selbstständig abwickeln könnten. Daher lohnt sich an dieser Stelle der Blick auf die Unternehmensebene, um schon jetzt ökologische Impulse für eine nachhaltiger Vision einer Machine Economy in die Umsetzung zu bringen. In dieser Studie fokussieren wir daher Unternehmen, ihre Strategien, Prozesse, Strukturen sowie Rollen und verknüpfen diese Sicht mit einer integrierten Betrachtung der digital-ökologischen Transformation in der Unternehmenspraxis. Während wir zwar die Industrieunternehmen als groben Rahmen fokussieren, sind die Ergebnisse auch auf andere Sektoren anwendbar. Wir begleiten unsere Ergebnisse mit ausgewählten Informationen zum Stand nachhaltiger Digitalisierung in deutschen Unternehmen.

Eine Digital- sowie Nachhaltigkeitsstrategie wird sich in naher Zukunft in einem Großteil der deutschen Unternehmen wiederfinden

Viele deutsche Unternehmen erkennen mittlerweile die Relevanz beider Transformationen. Sie entwickeln Strategien und setzen so den Grundstein für einen digitalen sowie nachhaltigen Wandel. Allerdings sind übergreifende Strategien noch nicht so verbreitet, wie man durch die mediale Präsenz beider Bereiche meinen möchte.

Verbreitung von Digitalisierungsstrategien: Laut Bitkom (2022) hat nur etwa jedes dritte Unternehmen eine zentrale Digitalisierungsstrategie. Häufig ist Digitalisierung lediglich in einzelnen Unternehmensbereichen angesiedelt (Bitkom e.V., 2022). Gleichzeitig gewinnt das Thema in der Corona-Pandemie stark an Bedeutung (Berg, 2021). Wie eine Studie der Staufen AG (2020) aufzeigt, ist zwar der Anteil der Unternehmen mit einer bestehenden Digitalstrategie eher gering, aber mehr als jedes zweite Unternehmen plant oder setzt derzeit eine solche auf (Staufen AG, 2020).

Verbreitung von Nachhaltigkeitsstrategien: Im Kontext des Nachhaltigkeitsmanagements sieht es ähnlich aus. In einer Studie von Odgers Berndtson (2021) gaben 75% der befragten Top Level Manager bzw. Managerinnen an, Nachhaltigkeit in Unternehmenszweck und Leitbild verankert zu haben (Odgers Berndtson,

2021). In ähnlicher Weise deuten verschiedene Studien darauf hin, dass etwa 30-45% der Unternehmen eine Nachhaltigkeitsstrategie haben, über 30% daran arbeiten und lediglich zwischen 25-32% der Unternehmen keine Nachhaltigkeitsstrategie haben oder planen (Staufen AG, 2022)(Commerzbank, 2020).

Wichtig ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass Faktoren wie z. B. Branche sowie Unternehmensgröße entscheidenden Einfluss auf die strategische Planung beider Transformationsfelder haben. Beispielsweise sinkt mit der Unternehmensgröße im Bereich der Digitalisierung die Anzahl an Chief Digital Officers (Kawohl & Schneider, 2017) und Chief Sustainability Officers finden sich in größeren Unternehmen häufiger auf der Vorstands- als auf anderen Unternehmensebenen wieder (Odgers Berndtson, 2021).

Kommt die digitale Transformation sowie die Nachhaltigkeitstransformation von Unternehmen in der Umsetzung der Strategien ins Stocken?

Während auf der übergreifenden strategischen Ebene zukünftig möglicherweise viele Unternehmen Leitplanken in der Transformation setzen werden, zeigt sich beidseitig eine gleichartige Herausforderung: Es gibt Anzeichen dafür, dass die Übersetzung der Strategien in konkrete Maßnahmen und ihre Umsetzung in Unternehmen nicht so schnell voranschreiten. Auf der operativen Ebene kommen gewünschte Veränderungen nicht an d.h. Unternehmen haben digitale und nachhaltige Visionen, die derzeit noch zu wenig Impact erzeugen. Komplexität, Abweichung von bisherigen Geschäftspraktiken und mehr scheinen sich blockierend auszuwirken, was sich an den folgenden Beispielen verdeutlichen lässt:

Ganzheitliches Transformationsverständnis: Da transformative Strategien nicht weiter heruntergebrochen werden, stockt die Umsetzung. Unternehmen schöpfen die Möglichkeiten der Digitalisierung z. B. nicht in Gänze aus. Häufig werden die Potenziale aufstrebender Technologien erkannt, ohne dass sie in die Umsetzung gebracht werden. In einer Studie von PricewaterhouseCoopers (PwC) (2020) gaben 75% der Befragten an, Potenzial durch Blockchain zu sehen, aber 97% von ihnen bestätigten, kein signifikantes Budget dafür zur Verfügung zu stellen (PricewaterhouseCoopers, 2020). Zudem wird die Digitalstrategie häufig nicht stark genug ausdifferenziert. In einer Befragung von Hewlett Packard Enterprise (2021) gab ein großer Teil der teilnehmenden Führungskräfte an, keine Datenstrategie zu haben (Hewlett Packard Enterprise, 2021). Ebenso mangelt es im Nachhaltigkeitsmanagement oftmals an einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitsverständnis. Zum Beispiel fokussieren meist kleine und mittelständische

Unternehmen lediglich ausgewählte Bereiche, wie Umweltschutz oder Arbeitssicherheit, während wesentliche Aspekte, wie nachhaltige Lieferketten oder Diversität, ausgeblendet (Akzente & HypoVereinsbank, 2021).

Transformative Geschäftsmodelle: Fehlende Geschäftsmodelle verhindern, dass Transformation in allen Unternehmensbereichen gelebt wird. Bei der Digitalisierung streben Unternehmen insbesondere nach Effizienzgewinnen. So sollen z. B. Kostensenkungen in der Produktion erreicht werden. Umsatzsteigerung durch neue Geschäftsmodelle sind dabei weniger von Relevanz (Staufen AG, 2020). Vor allem im Bereich aufstrebender Technologien tun sich Unternehmen noch damit schwer Potenziale in neue Wertschöpfungslogiken zu übersetzen (Crisp Research, 2019). Und im Nachhaltigkeitsmanagement sehen Unternehmensvertreter und -vertreterinnen als größte Herausforderung die Entwicklung von nachhaltigen Geschäftsmodellen – weit vor z. B. der Umsetzung klimaneutraler Produktion (Akzente & HypoVereinsbank, 2021).

Transformation von Prozessen & Organisationsstrukturen: Häufig stehen Prozesse und Organisationsstrukturen der Transformation im Wege. Im Kontext der Digitalisierung treffen über Jahre gewachsene Unternehmen auf ein schnelllebiges Umfeld. Jenseits der StartUp Szene stellen starre Organisationsstrukturen und Prozesse Hindernisse in der Digitalen Transformation in Unternehmen dar (Back & Klingenburg, 2016). Diese Wandlungsunfähigkeit behindert auch die Nachhaltigkeitsbewertung. Prozesse müssten gänzlich transparent gestaltet werden, um Umweltwirkungen sichtbar zu machen. Hier sehen Unternehmen derzeit allerdings eine der größten Herausforderungen (IDC, 2022).

Digitalisierung und Nachhaltigkeit werden in der Unternehmenspraxis nicht ausreichend zusammengedacht

Zwar scheinen Unternehmen einige Kontaktpunkte von Digitalisierung und Nachhaltigkeit zu erkennen, beide Bereiche werden allerdings weitestgehend getrennt voneinander geplant und implementiert. Beispielsweise werden KPI-Systeme für Nachhaltigkeitsinitiativen angestrebt, die nur über umfassende Datenerfassung in vernetzten Systemen gespeist werden können (IDC, 2022). Gleichzeitig bleiben beide Transformationsfelder auf der Ebene der strategischen Planung sowie in Prozessen und Rollen oftmals getrennt, wie sich an der Trennung von CDO und CSO bzw. getrennten Fachabteilungen zeigt.

Aufstrebende Technologiefelder kommen in der Debatte um nachhaltige Digitalisierung zu kurz

Und auch aus der Forschung heraus scheinen wenige Implikationen für eine integrative Sicht in die Praxis zu gelangen. Zwar beschäftigt sich hier insbesondere die „Green IT“ Debatte mit einem ökologischen Einsatz von Informations- bzw. Kommunikationstechnologien. Jedoch steht hier vor allem die IT-Abteilung und entsprechende Infrastruktur im Fokus. Green IT ist damit nur ein Teil der Veränderungsprozesse, die wir im Kontext eines ganzheitlichen sozio-technischen Wandels von Unternehmen untersuchen möchten. Viel wesentlicher aber ist der Mangel an Beiträgen zur nachhaltigen Gestaltung von aufstrebenden Technologiefeldern wie KI, IoT und DLT. Um sie hervorzubringen müssen Unternehmen zukünftig ihre Strukturen bzw. Prozesse drastisch anpassen und verändern damit Wirkungslogiken rund um nachhaltige Digitalisierung funktionieren.

Jetzt muss das Gelegenheitsfenster für eine ökologische Gestaltung der Machine Economy genutzt werden

Ein Blick auf die relevanten – jedoch international ausgerichteten – Gartner Hype Cycles (Supply Chain Strategy 2020 (Garnter, 2020), Manufacturing Operations Strategy 2020 (Gartner, 2020), Internet of Things 2020 (Bremild, 2021), Artificial Intelligence 2021 (Goasduff, 2021) offenbart Details zur möglichen Diffusion von aufstrebenden Technologien:

Ebene einzelner Technologiefelder: Hier wird deutlich, dass erstens vor allem Einzeltechnologien wie IoT und Edge und Cloud Computing die Produktionsverfahren und Lieferketten jetzt und in naher Zukunft verändern könnten und zweitens in diesem Kontext aber z. B. Machine Learning, Predictive Analytics, Prescriptive Analytics und Blockchain noch einige Zeit der Entwicklung benötigen, bevor sie größere Veränderungen bewirken können.

Verschmelzung von Technologiefeldern: Hier wird es noch einige Zeit dauern bis KI, IoT und DLT integrativ zusammenwirken – und damit letztlich die Machine Economy hervorbringen können. Beispielsweise wird für „Autonomous Things – Manufacturing Operations“ oder die Integration von „Blockchain and IoT“ ein Zeitraum von 5-10 Jahren bis zum sogenannten „Plateau of Productivity“ angegeben (d.h. weit verbreitete Adoption und hoher Grad an Marktdurchdringung). Für „Things as Customers“ (auch „Machine Customers“) wird dagegen ein Zeitraum von über 10 Jahren angegeben.

Damit öffnet sich jetzt ein Gelegenheitsfenster, um die (zusammenfindenden) Technologiefelder nachhaltig zu gestalten. Wir sind davon überzeugt, dass vor allem dem Lösen von Diffusionsbarrieren in der integrierten Betrachtung der Digitalen Transformation sowie der Nachhaltigkeitstransformation in der Unternehmenspraxis eine Schlüsselrolle zukommt. Diffusionsbarrieren sind für uns solche Bedingungen, die die Berücksichtigung von einerseits bestehenden und andererseits neuen grünen Ansätzen, Zusammenarbeitslogiken, Prozessen, Technologiekomponenten usw. in Projekten und Betrieb digitaler Lösungen erschweren. Es muss jetzt begonnen werden, diese Barrieren einzureißen, um nachhaltige Gestaltung zu fördern.

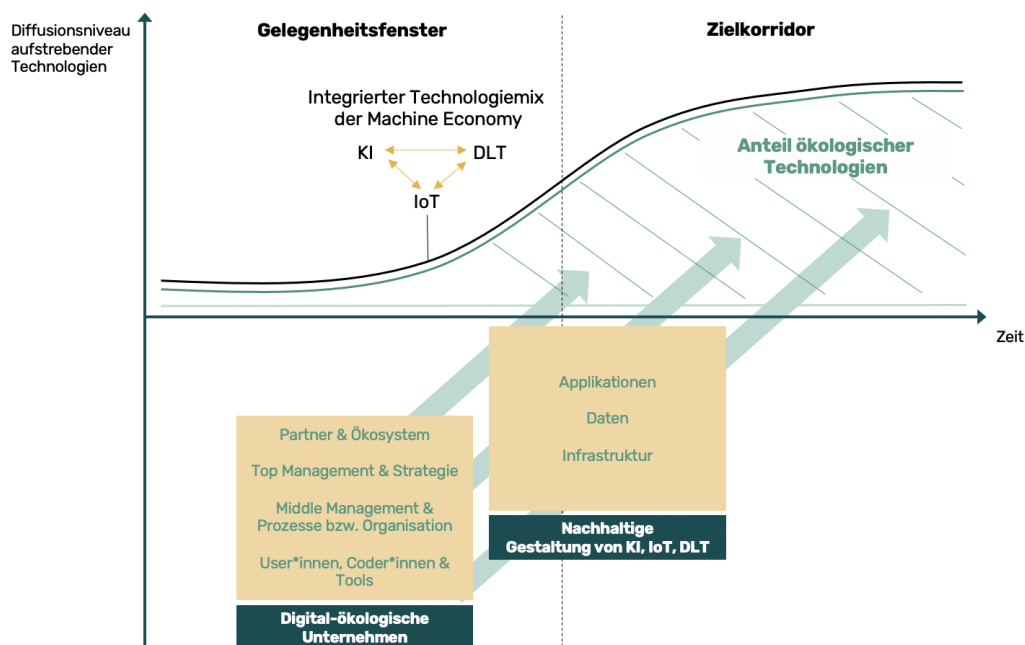


Abbildung 11: Wirkungslogik für eine ökologische Maschine Economy

Dadurch soll der Weg für einen ökologischen Diffusionspfad digitaler Innovation freigemacht werden, wie in Abbildung 1 aufgezeigt. Basierend auf der Grundannahme, dass diese Technologien in gänzlich neuen organisatorischen Strukturen und Prozessen hervorgebracht werden, fokussieren wir dabei insbesondere auf unternehmensinterne Gegebenheiten sowie angrenzende Ökosysteme und stellen die folgenden Forschungsfragen auf:

- a. Wie sieht das Umsetzungssystem der Machine Economy innerhalb Unternehmen und auf den verschiedenen Unternehmensebenen aus?
- b. Welche Diffusionsbarrieren nachhaltiger KI, IoT, DLT/Blockchain können identifiziert werden?
- c. Durch welche Maßnahmen lassen sich diese Barrieren auflösen?

2. Vorgehen

Um unsere Forschungsfragen zu beantworten, folgten wir einem mehrstufigen Prozess, der in Abbildung 2 dargestellt ist. In einem ersten Schritt soll über Scoping-Interviews der Themenbereich abgesteckt werden. Wir haben dabei insbesondere über die Vorstellung der Zielsetzung in Verbindung mit offenen Fragen (z. B. „Welche Barrieren nachhaltiger aufstrebender Digitaltechnologien sind für Sie in der Unternehmenspraxis besonders relevant?“) den inhaltlichen Rahmen inkl. Keywords für ein ausführliches Literatur-Review abgesteckt.

Hierauf basierend wurden in einem Literatur-Review bekannte Barrieren in der Diffusion von erstens KI, IoT, DLT/Blockchain sowie zweitens nachhaltiger Managementansätze in produzierenden Unternehmen identifiziert und priorisiert. In Ermangelung ausführlicher Literatur zu Diffusionsbarrieren nachhaltiger KI, IoT, DLT/Blockchain stellen die zwei genannten Kategorien eine erste Näherung dar. Die Ergebnisse wurden zunächst jeweils in Form einer „Long-List“ auf Artikel-ebene gesammelt und dann auf eine priorisierte „Short-List“ reduziert.

Die Ergebnisse aus der Literatur-Recherche wurden als Input für einen Fokus-Workshop an die Teilnehmer und Teilnehmerinnen gesendet. Im Workshop selbst wurde die Organisationsstruktur stark digital-getriebener Unternehmen im Kontext von KI, IoT, DLT als „Unternehmen von morgen“ skizziert. Anhand dessen und mithilfe der Ergebnisse der Literaturrecherche wurden dann ausgewählte Diffusionsbarrieren diskutiert. Letztlich wurden Handlungsoptionen zur Bewältigung dieser Barrieren gesammelt und ausdifferenziert.

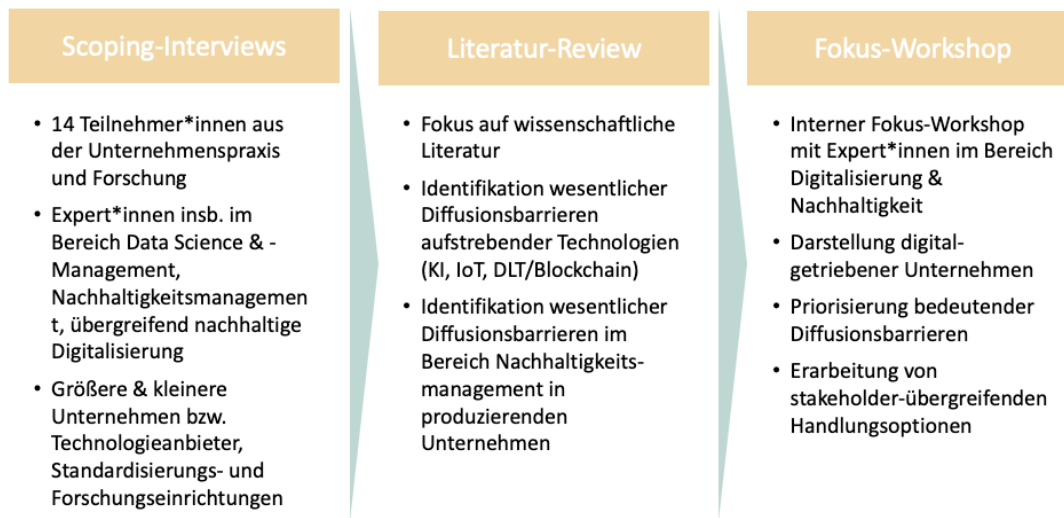


Abbildung 12: Vorgehen

3. Stand der Forschung

In dem Literatur-Review wurden ausgewählte wissenschaftliche Artikel – meist selbst Reviews – ausgewertet. Aus insgesamt 29 Artikeln wurden zunächst die identifizierten Diffusionsbarrieren in einer Long List zusammengetragen und dann in einer Short List konsolidiert. In letzterer wurden alle Diffusionsbarrieren einheitlich kategorisiert und gegenübergestellt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse anhand der Kategorien. Dabei kommt es zwischen beiden Seiten zu Überschneidungen, während andere Barrieren spezifische Herausforderungen darstellen.

Deep Dive	Titel	Beschreibung
Wissen und Kompetenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Unwissen über Einsatzoptionen von KI, IoT, DLT • Fehlende Methodenkompetenz zur Bewertung, Entwicklung und Implementierung der Technologien • Fehlender Zugang zu Wissensquellen (z. B. Expertenwissen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mangelndes Wissen im Kontext grüner Innovationen (z.B. Wertschöpfungsketten übergreifende Innovationen) • Unsicherheit durch wechselnde Gesetzgebung • Fehlender Zugang zu technischem Wissen (z.B. externe Beratung) • Mangel an Sensibilisierung für Nachhaltigkeits-Trends • Geringe Vertrauenswürdigkeit der Informationsquellen • Zweifel durch intransparente zukünftige Entwicklung • fehlende technologische Erfahrung und Kompetenz

		<ul style="list-style-type: none"> • Schwierigkeiten bei der Anwendung und Bindung von Experten und Expertinnen
<p>Technische Bedarfe</p>	<p><i>Datenbezogen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Komplexität bei der Interpretation und Integration unstrukturierter Daten • Fehlende Standards für die Datenerfassung (Format, mangelnde Qualität und Quantität) • Unsicherheiten bzgl. komplexer Umwelteffekte (z. B. Rebound-Effekte) • Fehlender Zugang zu Daten von hochwertiger Qualität, Genauigkeit, Aktualität, Integrität und Konsistenz <p><i>Infrastruktur, Architektur und Anwendungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Veraltete oder unpassende Infrastrukturen (z. B. Kapazitäten zur Übertragung, Speicherung, Verarbeitung und Austausch von Daten) • Heterogene Infrastrukturen der Geräte und Konfigurationen des IoT als starke Einschränkung für die Datenintegration und Interoperabilität • Mangel an Referenzarchitekturen und Standards für das Logistikmanagement • Allgemeine technologische Unausgereiftheit durch frühes Entwicklungsstadium • Komplexität z. B. von dezentralen Lösungen (z. B. basierend auf Blockchain) und Funktionalitäten (z.B. Smart Contracts) • Energie- und Ressourcenverbrauch der Rechenleistung <p><i>Data Security und Data Privacy:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bedenken zu Cybersicherheit, Datenschutz sowie rechtlichen und ethischen Fragen in diesem Kontext • Technische Barrieren für Cybersicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Sachzwänge der grünen Technologien und Komplexität grünen Systemdesigns (z.B. Bedarf an Änderungen der Infrastruktur) • Innovationen nicht verfügbar oder nicht kompatibel mit (aktuell eingesetzten) veralteten Technologien • Fehlen von standardisierten oder praktikablen Richtlinien und Parametern
<p>Unternehmenskultur und Einstellungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Skepsis gegenüber Veränderungen • Individuelle Ängste und Befürchtungen vor Jobverlust • Mangelndes Verständnis für das Zusammenspiel von Technik und Mensch 	<ul style="list-style-type: none"> • Widerstand gegen Veränderungen und allgemeine Trägheit bzw. restriktives Denken • Fehlende Risikobereitschaft in der Umsetzung grüner Innovationen • Pessimistische Vorannahmen • Unvereinbarkeit persönlicher Einstellungen, Werte und Ethik mit Nachhaltigkeit • Geringe Beteiligung der Arbeitnehmer in der Unternehmenskultur

<p>Finanzierung und Investitionen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unzureichende Finanzierung • Hohe Investitionskosten & variable Kosten (z. B. für Big Data Management) • Unklarheit über wirtschaftlichen Nutzen von Investitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende finanzielle Mittel zur Förderung grüner Innovationen • Fehlen von Kreditmöglichkeiten • Hohe Investitionskosten und Implementationskosten von Nachhaltigkeitsmaßnahmen • Unklarheit über Erfolg von Umweltinvestitionen • Ausschluss von Umweltkosten in traditionellen Buchführungssystemen
<p>Strategische Planung und Zielsetzungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unklare Geschäftsmodelle und Umsatzsteigerungspotentialen • Fehlende Unterstützung durch das Top-Management • Mangelnde strategische Planung • Schwierigkeiten im Management, Nutzen und Ziele der neuen Technologien zu verstehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Unterstützung und Vertrauen durch das Management für nachhaltige Fertigungsverfahren • Konflikte mit anderen Geschäftszielen • Zögerliches Vorgehen in Planungsprozessen (z.B. einer Kreislaufwirtschaftsagenda) • Ausbleibende ganzheitliche Abstimmung von Zielen, Routinen und Entscheidungsfindung für eine Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen • Zu enger Fokus der bestehenden Nachhaltigkeitsstrategien • Strukturen und Denkweisen linearer Geschäftsmodelle
<p>Prozesse und Organisationsstruktur</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Starre Organisationsstrukturen und -prozesse, die nicht zu Schnellebigkeit aufstrebender Technologien passen • Mangelnde Policies und Prozesse für gemeinsame Nutzung, Weitergabe und Integration von Daten und Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> • Häufig keine interne Kommunikation und Bewerbung • Schwierigkeiten beim Aufbau einer organisationsübergreifenden Zusammenarbeit für Nachhaltigkeitsinitiativen • Spezielles Produktdesign für maximale Rentabilität erforderlich • Mangel an Kontinuität bei der Einführung von nachhaltigen Herstellungsverfahren • Komplexität der Wertschöpfungsprozesse
<p>Externe Abhängigkeiten und Akteure bzw. Akteurinnen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mangelndes Verbrauchervertrauen • Regulatorische Barrieren und geringe Reichweite von Regulation • Fehlen von Benchmarks und Referenzarchitekturen • Marktwettbewerb und Unsicherheiten (Volatilität der Kryptowährungen und -märkte) • Wenig Vertrauen gegenüber Partnern und Akzeptanz entlang der Supply Chain • Probleme bei der Offenlegung von Informationen • Abhängigkeit von Adoptionsgrad anderer Akteure bzw. Akteurinnen 	<ul style="list-style-type: none"> • Unklare Nachfrage und Akzeptanz der Kunden auf dem Markt nach grünen Produkten • Popularität der nicht-nachhaltigen Alternativen • Niedriger Preis von und einfacher Zugang zu nicht-nachhaltigen Materialien • Geringe politische Beteiligung von KMUs • Hoher bürokratischer Aufwand durch Gesetzgebung (z. B. durch häufige Änderungen der Umweltvorschriften) • Geringe Zusammenarbeit in Partnersystemen

	<ul style="list-style-type: none"> • Negatives Image einzelner Technologien (z.B. Blockchain) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlen staatlicher Rechtsvorschriften, Anreize und Unterstützung für nachhaltige Produktion • Verzerrung durch die Politik durch Steuern oder Subventionen für nicht-nachhaltige Technologien
--	--	--

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Diffusionsbarrieren von IoT, KI, DLT und Nachhaltigkeit

4. Ergebnisse

Im Fokus-Workshop wurden anhand der ermittelten Diffusionsbarrieren aus dem Literatur-Review das System der Wertschöpfung hoch digitalisierter Unternehmen skizziert und daraufhin beispielhaft Thesen zu Diffusionsbarrieren einer integrierten digital-ökologischen Transformation thematisiert.

4.1. System digitaler Wertschöpfung im Unternehmenskontext

Abbildung 3 zeigt auf verschiedenen Unternehmensebenen wie digital-getriebene Wertschöpfung abläuft und welche Rollen dabei besetzt sind. Im Wesentlichen verändern sich Unternehmen hierbei auf der Implementationsebene unterhalb der Managementebene. Zwei Kernkonzepte sind hier besonders prägend, weshalb wir in sie anhand bestehender Literatur in Kürze einführen bevor wir auf die Wertschöpfungslogik weiter erläutern.

Service-Oriented Architecture (SOA): Die SOA umfasst Policies, Routinen und Frameworks die es ermöglichen Funktionen in Form von digitalen Services bereitzustellen. Sie sind dabei in ihrer Gestalt auf Nutzer und Nutzerinnen zugeschnitten wobei technische verkomplizierende Details ausgeblendet werden. Services sind wiederverwendbar ohne, dass Code und damit Services kopiert werden müssen. Kombiniert mit dem „Web Services“ Ansatz können Services in SOA unabhängig von der verwendeten Technologie („Technology Neutrality“) und standardisiert verfügbar gemacht werden (Spratt & Wilkes, 2004).

In aktuellen SOA werden sogenannte „Microservices“ bereitgestellt. Sie sind auf bestimmte Funktionen reduzierte Anwendungen, die unabhängig voneinander entwickelt, getestet und skaliert werden können (Dragoni et al., 2017; Thönes, 2015). SOA erhöhen Flexibilität und Agilität der digitalen Architektur und werden in jüngeren Veröffentlichungen selbst als Ansatz für nachhaltige Digitalisierung – insbesondere aufgrund ihrer „Reuse“ Fähigkeit – beschrieben (Hustad & Olsen,

2021). SOA können darüber hinaus eine wesentliche Rolle im Aufkommen der Machine Economy spielen, z. B. im Kontext von diversen Industry 4.0 Anwendungen (Schnicke et al., 2020), Robotics (Siefke et al., 2020) und „Machine-to-Machine“ Kommunikation (Katsikogiannis et al., 2018)

DevOps: Zusammengesetzt aus „Development“ und „Operations“ werden im Rahmen von „DevOps“ digitale Entwicklungs- und Betriebsprozesse integriert. Anders als in der klassischen IT-Entwicklung, in der Entwicklungs-Teams und Operations-Teams funktional getrennt agieren, arbeiten im Rahmen von DevOps cross-funktionale Teams zusammen (Ebert et al., 2016). DevOps wird daher häufig definiert als kollaborative und multidisziplinäre Anstrengung innerhalb von Organisationen verstanden, die das Ziel hat kontinuierlich neue Software-Versionen zu entwickeln und auszurollen, während gleichzeitig ihre Richtigkeit und Verlässlichkeit garantiert wird. DevOps wird dabei als Evolution des Ansatzes der agilen Entwicklung bezeichnet. Hier wird die ständige Einbindung von Kundenfeedback und die Fähigkeit der Anpassung an wechselnde Bedürfnisse mit dem sicheren Ausrollen und zuverlässigen Betrieb einer Lösung kombiniert (Leite et al., 2020). Neben neuen Teamstrukturen geht damit ein kultureller Wandel einher: Während Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des operativen Betriebs Entwicklung als umständlich und teuer empfinden, beschreiben Entwickler bzw. Entwicklerinnen den Betrieb von Software als wenig gründlich und ausgearbeitet – beide Seiten finden nun zusammen und neue Einstellungsmuster entstehen. Letztlich kann DevOps als Framework für SOA und Microservices (siehe oben) verstanden werden. Hierüber können derartige Services entwickelt, getestet und ausgerollt werden (Ebert et al., 2016).

Im Workshop wurden diese Konzepte aufgegriffen, um die Logik der Wertschöpfung in hoch digitalisierten Unternehmen zu beschreiben. Hier werden virtuelle und physische Komponenten zu verschiedenen Produkten zusammengefügt. Hierfür sind verschiedene Organisationsstrukturen denkbar. In unserer Darstellung unterscheiden wir insb. nach den folgenden Bereichen:

Der Bereich aufstrebender Technologien bringt spezialisierte Services zu KI/Big Data Analytics, (I)IoT, DLT/Blockchain hervor. Grundlegende digitale Services beinhalten z. B. Shared Infrastructure Services aber auch Betriebssysteme. Aus den unterstützenden Funktionen gehen digitale und nicht digitale Services hervor, wie z. B. Suchmaschinenoptimierung (Marketing) oder Akquise-Services (Vertrieb). Aus der smarten Produktion gehen insbesondere physische Produktkomponenten hervor. Und der Bereich der Systemarchitektur sorgt für eine effektive

technische Integration der zuvor benannten digitalen Services. Letztlich bedienen sich die Kundenprodukte an all diesen Services, um Angebote zu vermarkten.

Insbesondere die digitalen Services bzw. Software-Elemente werden in Form von Microservices bereitgestellt, die jeweils in einer Vielzahl an weiteren Services betrieben werden können (z. B. wenn ein Kundenprodukt Aspekte der IoT-bezogenen Daten integrieren möchte). Services werden in Produkt-Teams nach dem DevOps Ansatz entwickelt, getestet, ausgerollt und betrieben. Diese Teams sind cross-funktional aufgestellt, d.h. Service/Product-Owner, Entwickler bzw. Entwicklerinnen, Moderator*innen, Sicherheitsmanager und -managerinnen, usw. – und damit technisch sowie geschäftsorientierte Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen – sind gemeinsam für Services verantwortlich. Diese Teams können gleichzeitig Services anderer Teams nutzen, bspw. wenn aus Technologie-Teams auf grundlegende Infrastrukturen zugegriffen wird. Außerdem können nicht nur interne sondern auch externe Services in die Service-Landschaft integriert werden.

Insgesamt ergibt sich hieraus ein modulares und sehr dynamisches System digital-getriebener Wertschöpfung. Es kann sich flexibel an neue Umweltbedingungen anpassen und stellt gleichzeitig sichere und qualitativ hochwertige Lösungen bereit.

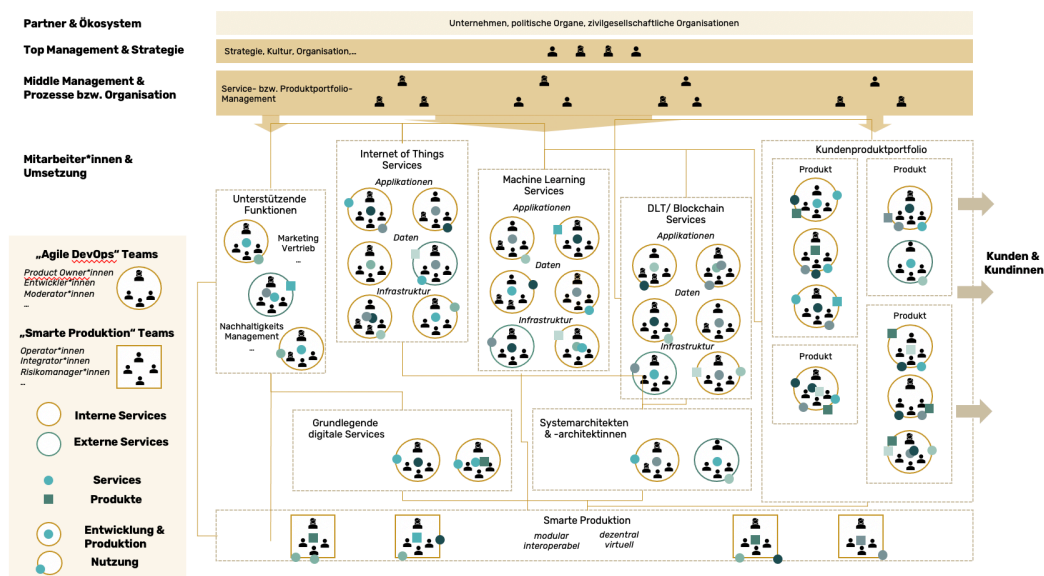


Abbildung 13: System digitaler Wertschöpfung

4.2. Diffusionsbarrieren für eine ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis

In Anlehnung an das dargestellte System digitaler Wertschöpfung wurden im weiteren Verlauf des Workshops beispielhaft Thesen zu herausstechenden Herausforderungen diskutiert. Im Folgenden werden diese Barrieren in Kürze beschrieben und durch Studien kontextualisiert. Abbildung 4 zeigt die Diffusionsbarrieren in der Übersicht.

Unternehmen mangelt es an Partnerorganisationen für die grüne Entwicklung von IoT, KI, DLT

Während sich Unternehmen vielfach um den Aufbau geeigneter interner Digitalkompetenzen bemühen, mangelt es im Kontext der Digitalisierung im Allgemeinen aber insbesondere von IoT, KI und DLT an einem umsetzungsorientierten Partnerorganisationen-Ökosystem für die nachhaltige Entwicklung digitaler Lösungen. Infrastruktur- und Softwareprovider sowie umsetzungsnahe Beratungshäuser konzentrieren sich weitestgehend auf technische Entwicklung und ökonomische Performance-Größen, während dediziert nachhaltigkeitsorientierte externe Beratungsleistungen schwer zugänglich sind. Und auch Akteure und Akteurinnen angewandter Forschung, die z. B. umsetzungsnahe Nachhaltigkeitsbewertungen gemeinsam mit der Industrie vornehmen könnten, bleiben rar.

Untermauern lassen sich diese Ergebnisse mit einem Blick auf deutsche Technologieunternehmen, die als Partnerorganisationen für die digital-ökologische Transformation unterstützen könnten. Vornehmlich werden sie als Anbieter aufstrebender Technologien für deren Umsetzung von Unternehmen konsultiert. In einer Studie von Tata Consultancy Services (TCS) und Bitkom Research (2021) setzte mehr als jedes zweite Unternehmen auf externe Organisationen in der Umsetzung von KI (Tata Consultancy Services & Bitkom, 2021). Gleichzeitig sind aber diese Partnerorganisationen noch nicht versiert in der ökologischen Gestaltung von digitalen Lösungen, wie am folgenden Zitat aus einer Studie von KPMG (2021) zu deutschen Digitalunternehmen klar wird: „Die Technologiebranche ist Vorreiter bei der Entwicklung innovativer und smarterer Lösungen. Sie ist Treiber der Digitalisierung. Sie ist Experte für Datenmanagement. All das gilt aber nicht im Hinblick auf Nachhaltigkeit. Die ökologische Transformation in der Technologiebranche verläuft bis dato eher schleppend“ (KPMG, 2021).

Mangel an digital-ökologischen Leitplanken: Umsetzungsnahe Strategien fehlen

Unternehmen setzen schon jetzt auf IoT-Lösungen und versuchen diese in Kombination mit KI, Big Data Analytics und Co. in ganzheitliche Geschäftsmodelle zu überführen. Gleichzeitig fußen diese Bemühungen oftmals nicht auf umsetzungsnahen Digitalstrategien. Insbesondere Daten- und Applikationsstrategien sind – jenseits einer übergreifenden Digitalstrategie – häufig nicht gegeben. Aber auch Strategien für eine erfolgreiche Integration verschiedener Anwendungsgebiete und Technologiefelder bieten derzeit meist keine Orientierungshilfe in Umsetzungsprojekten. Diese Leitplanken wären aber eine entscheidende Basis für die Ableitung von Leitplanken für die Umsetzung nachhaltiger Technologieentwicklung. Auch anders herum besteht die Problematik. Meist sind lediglich übergreifende Nachhaltigkeitsstrategien gegeben, die nicht in umsetzungsorientierte Strategien heruntergebrochen geschweisedenn mit Digitalstrategien zusammengedacht sind. Letztlich finden sich in der Praxis daher kaum integrative digital-ökologische Strategien, die konkrete Bedarfe auf der Umsetzungsebene fokussieren.

Ein gutes Beispiel für die oben dargelegte Problematik findet sich in der Ausrichtung von Unternehmen auf die stetig wachsenden Datenvolumina. In einer Studie von Hewlett Packard Enterprise (2021) wurden über 800 Führungskräfte in der D-A-C-H Region bezüglich ihrer Datenstrategie befragt. Lediglich 22% von ihnen gaben an eine bereichsübergreifende Datenstrategie zu haben.

Das Middle-Management als den digital-ökologischen Transformationsmotor in den Blick nehmen

Das Middle- und Linienmanagement könnte als Bindeglied zwischen Top-Management und ausführenden Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen als wesentlicher Transformationsmotor in Unternehmen wirken. Allerdings sind es genau diese Manager bzw. Managerinnen, die einen wesentlichen Widerstand darstellen können. Aus einer Change Management Perspektive heraus ist es genau dieses „Frozen Middle“, das unter dem Druck des digitalen sowie ökologischen Wandels in bestehenden Routinen und Abhängigkeiten verharrt. Vor allem im Kontext nachhaltiger Technologieentwicklung rund um IoT, KI und DLT wird die Rolle von Middle- und Linienmanagern bzw. -managerinnen sowie weiteren Führungskräften (z. B. Teamleads) allerdings zu wenig beachtet. Häufig finden sich hier Personen, die viele Jahre im Unternehmen sind bzw. in ihren Positionen verhar-

ren, wodurch sie derzeit kaum als Change-Agents auftreten können. Ihnen fehlen häufig nicht nur die entsprechenden Wissenszugänge, sondern auch das passende Mindset. Zudem sind Nachhaltigkeits- sowie Technologiefragen oftmals in dedizierten Abteilungen untergebracht, wodurch diese Personen wenig Anreize haben Eigeninitiative und Verantwortung für den Wandel zu übernehmen.

Verdeutlichen lässt sich die Problematik anhand der Ergebnisse verschiedener Studien bezüglich des Wandels in deutschen Unternehmen. So wurde in einer Studie von Boyden (2017) das mittlere Management als „größte Bremse für digitale Konzepte wahrgenommen“ (Boyden, 2017). Und im „Management Barometer“ von Odgers Berndtson (2022), in dem Manager bzw. Managerinnen aus der Unternehmensleitung aber vor allem mittleren Managementpositionen in der D-A-C-H Region befragt werden, gaben diese an, dass eine Verpflichtung des Unternehmens zu Nachhaltigkeit weniger Bedeutung bei der Auswahl des Arbeitgebers für sie hat (Odgers Berndtson, 2022).

Kaum dedizierte Ansätze für Nachhaltigkeitsmanagement in dezentralisierten Produkt- und Service-Teams

Systemische Lösungen aus der Integration aufstrebender Technologien entstehen in der Machine Economy nicht linear und über wasserfallartig aufgebaute Entwicklungsprojekte. Sie wachsen evolutionär und befruchten sich unstopig gegenseitig. Dadurch verschiebt sich die Steuerungswirkung von initialen Entwicklungsprojekten hin zu DevOps-Mechanismen. Eigenständig organisierte Produkte und Services und die dahinterstehenden, dezentral organisierten internen sowie externen Teams bilden eine komplexe dezentralisierte Servicelandschaft. Zwar können diese Strukturen wesentliche Kompetenzen zusammenbringen, z. B. wenn in einem Produktteam Fragen der Geschäfts- und Applikationsentwicklung zusammengedacht werden. Jedoch werden an anderen Stellen Weisungs- und Kommunikationslinien durch die Verfolgung von Eigenständigkeit durchbrochen. Für ein Nachhaltigkeitsmanagement, das klassisch als Abteilung in Unternehmen angelegt ist, ann diese Ausgangslage herausfordernd sein. Noch sind dedizierte Ansätze für Nachhaltigkeitsmanagement in den beschriebenen Strukturen rar, was eine nachhaltige Ausrichtung der ökologischen, Ebenen-übergreifenden Entwicklung von IoT, KI und DLT im Wege steht.

In Deutschland gibt es mehr und mehr Unternehmen, die auf agile Entwicklung umsteigen. Laut Tata Consultancy Services (TCS) und Bitkom Research (2021)

wächst seit einiger Zeit der Anteil von deutschen Unternehmen, die größtenteils oder immer agile Methoden einsetzen jährlich (Tata Consultancy Services & Bitkom, 2021). Zwar gibt es erste Beiträge, die sich mit Nachhaltigkeit durch agile Entwicklung beschäftigen (Eckstein & Linders, 2021), dedizierte Ansätze für Nachhaltigkeitsmanagement in DevOps Organisationen konnten im Rahmen dieser Studie allerdings nicht identifiziert werden.

Das Low Code-Sustainability Gap: Digitalisierung wird gestaltbar, aber nicht nachhaltiger

Hartnäckig umwerben Unternehmen weltweit Programmierer und Programmierinnen. Doch in Anbetracht wachsender Entwicklungsbedarfe besteht weiterhin eine signifikante Lücke an Entwicklungskapazitäten. Gleichzeitig erleben wir, wie Millennials und folgende Generationen einen immer größeren Anteil der Arbeitnehmer und -nehmerinnen ausmachen und grundlegende digitale Skills und Digitalaffinität in Unternehmen tragen. Größere Softwareunternehmen reagieren auf diese Trends, in dem sie sogenannte No bzw. Low Code Services auf den Markt bringen. Hier ist es möglich ohne Programmierfähigkeiten Funktionen in Software anzupassen oder Software unterschiedlicher Hersteller konnektiv miteinander zu vernetzen. Durch die Ausprägung der sogenannten Low Code-Analytics können z. B. im Kontext der Machine Economy digitalaffine Businessanwender und -anwenderinnen selbstständig (u. a. durch Drag & Drop-Mechanismen) Analytics-Lösungen entwickeln, die heute meist nur dedizierten Programmierern und Programmierinnen vorbehalten sind. Während allerdings dadurch Datenanalysen und Automatisierung einen deutlichen Schub erfahren dürften, ist derzeit ein in gleicher Weise starker Aufbau der Nachhaltigkeitskompetenzen unter Anwender und Anwenderinnen nicht erkennbar. Wenn aber eben jene Anwender und Anwenderinnen nicht gleichzeitig über Nachhaltigkeitskompetenzen verfügen, wird grüne Technologieentwicklung behindert. Zum Beispiel werden ökologische Lösungen nicht eingefordert oder eine nachhaltige Nutzung nicht forciert.

Die Dringlichkeit dieser Herausforderung wird anhand der Studie „State of Low-Code 2021“ deutlich. Hiernach durchdringen Low-Code-Anwendungen schon jetzt eine Vielzahl deutscher Unternehmen. Zum Beispiel gaben hier 69% der befragten IT-Expert*innen an, Low-Code-Anwendungen einzusetzen während 54% der geschäftskritischen Apps bereits mit Low-Code entwickelt wurden. Außerdem wird davon ausgegangen, dass das Thema auch zukünftig weiter an

Fahrt gewinnt. Dabei wird insbesondere das Potenzial in der Digitalen Transformation der industriellen Fertigung hervorgehoben (Mendix, 2021). Diese Beispiele veranschaulichen die Relevanz von Low-Code in Unternehmen und geben gleichzeitig der Frage nach ökologisch versierten „Low-Coder bzw. -Coderinnen“ mehr Gewicht.

Erbauung nachhaltiger Technologieintegration: Die Suche nach ökologisch-versierten Systemarchitekt*innen

Im Kontext nachhaltiger Digitalisierung sprechen wir häufig über Entwickler bzw. Entwicklerinnen sowie Coder und Coderinnen und ihre Fähigkeit ökologisch Anwendungen zu programmieren. Noch nicht im Fokus stehen ökologisch-versierte Systemarchitekt*innen digitaler Service-Landschaften. Diese Personen stellen sicher, dass einzelne Technologien auf den verschiedenen Ebenen des Digital-systems (von der Businesssebene über Applikationen, Daten und Infrastrukturen) passgenau ineinandergreifen. Aus Sicht der Unternehmenspraxis sind diese Personen essentiell auf dem Weg in eine nachhaltige Machine Economy, da sie die Schnittstellen in der Integration von IoT, KI/Big Data Analytics und DLT ökologisch gestalten können. Der Mangel an ökologisch-versierten Systemarchitekt*innen muss für eine nachhaltige Diffusion benannter Schlüsseltechnologien dringend angegangen werden.

Digitalisierungsexpert*innen bescheinigen deutschen Unternehmen einen großen Erfahrungsschatz im Umgang mit komplexen digitalen Architekturen. Erste Hinweise deuten darauf hin, dass Unternehmen hierzulande sich relativ gesehen länger mit dem sogenannte „Enterprise Architecture Management“ beschäftigen und dieses effektiv – vor allem in komplexen Umgebungen – umzusetzen wissen (Lixenfeld, 2017). Dieser Umstand bietet eine gute Absprungbasis, um Systemarchitekten und -architektinnen nachhaltig auszurichten. Es bleibt offen, warum diesem Aspekt in der laufenden Debatte nicht mehr Aufmerksamkeit zuteil wird.

Fokussierung auf Transparenz der Umweltbelastungen und Vorgaben blockiert die „letzte Meile“ von Nachhaltigkeitsinitiativen

Mit wachsenden Digitalisierungsansprüchen und aufstrebenden bzw. anspruchsvollen Technologiefeldern wie IoT, KI und DLT steigt die Komplexität des Digital-systems in der Unternehmenspraxis. Laufende Nachhaltigkeitsbestrebungen zielen vor allem auf Transparenz und Wirkungsmessung ab. Getrieben von Standards und rechtlichen Berichtspflichten (z. B. über EMAS, ISO) ist der Ansatz,

basierend auf messbaren KPIs Umweltwirkung zu optimieren. Besonders im Falle von komplexen Digitalsystemen, die stetig im Wandel sind, ist eine vollständige Sichtbarkeit aller ökologischer Wirkungsmechanismen derzeit nicht möglich. Es ist schwer vorstellbar, mittelfristig Umweltwirkung so detailliert abzubilden zu können, dass alle potenziellen Stellhebel tangiert werden. Gleichzeitig können rechtliche Vorgaben (wie „Ökodesign“) ebenfalls nicht jede Aufgabe in der Entwicklung abbilden und damit vorgeben. Wenn also der Link zwischen Umweltwirkung sowie Regulierung und den Gegenständen der täglichen Entwicklungsarbeit digitaler Lösungen nicht vollständig gegeben ist, kann dies bedeuten, dass Teams oder Entwickler bzw. Entwicklerinnen jenseits dieser Vorgaben nicht den Bedarf erkennen, ökologisch zu gestalten. Genau diese eigenständige Proaktivität braucht es aber, um Unternehmen ganzheitlich digital-ökologisch auszurichten. Wenn auch Transparenz und die Beachtung von Standards wesentlich für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung sind – die „letzte Meile“ d.h. der Bereich, der nicht transparent gemacht bzw. reguliert werden kann, sollte ebenfalls Beachtung finden.

Die Fokussierung auf Transparenz und Indikatoren wird auch anhand von Studien zur deutschen Unternehmenspraxis sichtbar. Wird zum Beispiel danach gefragt, wie Nachhaltigkeit Unternehmen verändert, wird am häufigsten der Umbau der Prozess- und Indikatorlandschaft zur Wirkungsmessung angegeben. Damit einher geht die Messung der Zielerreichung von Nachhaltigkeitsinitiativen. Gleichzeitig wird der Umsetzung in allen operativen Bereichen deutlich weniger Relevanz eingeräumt (Odgers Berndtson, 2021). Transparenz wird also als Voraussetzung für Veränderung gesehen, was z. B. einem frühzeitigen und iterativen nachhaltigen Umbau im Wege steht.



Abbildung 14: Diffusionsbarrieren für eine ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis

4.3. Handlungsoptionen für die Gestaltung einer ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis

Basierend auf den beschriebenen Diffusionsbarrieren sollen in den folgenden Abschnitten ausgewählte Handlungsoptionen für verschiedene Stakeholder und Stakeholderinnen skizziert werden. Aufgrund des Formats dieses Papiers und der verwendeten Methodik stellen wir dabei keine eindeutige Beziehung zu diesen her und streben ebenfalls nicht danach, alle Barrieren in Gänze zu lösen. Die möglichen Maßnahmen werden hier ebenfalls nicht im Detail ausgearbeitet. Sie sollen als kreative Vorschläge verstanden werden, die im Weiteren operationalisiert werden müssen. Abbildung 5 zeigt die Handlungsoptionen in der Übersicht.

Förderrichtlinien für ein selbstorganisiertes Supportsystem nachhaltiger digitaler Entwicklung

Organisationen, die neue Projekte in der Schnittstelle Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Unternehmenskontext angehen, sollten ihre Förderrichtlinien dahingehend anpassen, dass Forschungsergebnisse proaktiv in ausgewählten Social Media-Kanälen (z. B. Fachforen) geteilt werden. Die damit angestoßenen Diskussionen sollen ein dezentrales System von Anlaufstellen für Fragen rund um nachhaltige digitale Entwicklung befeuern. Anstatt zentralisierte Plattformen aufzubauen, werden damit die Selbstorganisationskräfte der Entwicklungsszene genutzt.

Austauschformate für "Green Systems Consultancy Geschäftsmodelle"

Über Austauschformate (wie Konferenzen o.ä.) könnten sich Beratungshäuser, Software- und Infrastrukturprovider, Organisationen angewandter Forschung und weitere externe Unterstützer und Unterstützerinnen näherkommen. Dabei sollten neue Beratungskonzepte für digital-ökologische Umsetzungsstrategien, Prozesse und Organisationsstrukturen, Architekturen usw. diskutiert werden. Voraussetzungen oder Bedürfnisse von digital-getriebenen Unternehmen könnten zudem in den Blick genommen werden und neue Partnerschaften entstehen.

Umsetzungsnahe Digitalstrategien nachhaltig denken

Anstatt digitale und nachhaltige Umsetzungsstrategien getrennt voneinander zu behandeln, sollten Unternehmen direkt beide Seiten integrativ aufsetzen. Auf

diesem Wege können übergreifende Nachhaltigkeits- und Digitalstrategien schneller in die Umsetzung gebracht werden und Middle Manager bzw. Managerinnen sowie Entwickler bzw. Entwicklerinnen erhalten zeitnah Orientierung in der Auseinandersetzung mit den voranschreitenden Transformationsfeldern der Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Umsetzung eines design-orientierten Ansatzes für nachhaltige Digitalisierung auf Middle Management Ebene

Unternehmen sollten agile DevOps Strukturen über design-orientiertes Management aussteuern. Um das "Frozen Middle (Management)" in Richtung nachhaltige digitale Innovation zu bewegen, braucht es einerseits die starke Einbeziehung von Kundenfeedback in der Aussteuerung des Service-Portfolios. Andererseits sollten Menschen mit Design-Hintergrund stärker in Management-Rollen aufgenommen werden. Die Design-Orientierung ersetzt das Streben nach konstanten Outputs mit "Lernen durch Scheitern".

Forschungsprojekt „Nachhaltigkeitsmanagement in agilen DevOps-Organisationen“

Die Politik sollte gezielt ein Forschungsprojekt anstoßen, in dem ein Framework für Nachhaltigkeitsmanagement in agilen DevOps-Organisationen erarbeitet wird. Dabei sollte insbesondere die Verortung der Nachhaltigkeitsverantwortlichen (z. B. dedizierte Abteilung, Mitglieder in Service-Teams,...) sowie die prozessuale Einbindung (z. B. im Scrum Ansatz oder der strategischen Planung) angestrebt werden. Wesentlich ist auch, individuelle Unternehmenskontexte, Prozesslandschaften sowie Organisationsstrukturen zu berücksichtigen und z. B. durch eine Typologisierung mit entsprechenden Empfehlungen abzubilden.

Verankerung eines "Digital Sustainability Scores" in den Rahmenwerken digitaler Entwicklung

Umwelteffekte können in der Praxis häufig nicht transparent gemacht werden. Als "Best Guess" Ansatz sollten sich Entwicklungs-Teams die Frage stellen "Ist diese digitale Lösung nachhaltig?". Um dies zu erreichen sollten Zertifizierungseinrichtungen agile Frameworks u. a. um eine entsprechende "Definition of Done" erweitern und Schulungshäuser dazu bringen die neuen Ansätze zu vermitteln. So wird nachhaltige digitale Entwicklung auch ohne dedizierte Datenbasis zu spezifischen Umweltwirkungen angeregt.

Schulungsprogramme für digital-ökologisch ausgerichtete Systemarchitekten fördern

Die Politik sollte mit einem Förderprogramm gezielt Digitalunternehmen sowie Schulungsanbieter, die Programme für Systemarchitekten an der Schnittstelle zur Nachhaltigkeit aufbauen möchten, unterstützen. Dabei soll die ökologische Gestaltung über Architekturebenen (Infrastruktur, Daten, Applikationen) hinweg vermittelt werden. Zu empfehlen wäre eine Unterscheidung nach Anwendungsgebieten. Die geschulten Personen füllen die Wissenslücke in der Unternehmenspraxis rund um Treiber von Umweltbelastungen komplexer Digitalssysteme.

Forschungsprojekt "Konzeption von Sustainable & Digital Open Innovation Labs"

Über ein Forschungsprojekt sollte die Politik die Konzeption eines "Digital Open Innovation Lab" fördern. Ähnlich Reallaboren sollen Möglichkeiten im digitalen Raum geschaffen werden, um digitale Bausteine aus der unternehmensinternen Entwicklung kollaborativ und mit verschiedenen Stakeholdern und Stakeholderinnen im Sinne von "plug-and-play" zu testen und die ökologische Wirkung zu optimieren. Ziel ist, die Fähigkeiten der Community für nachhaltige digitale Entwicklung zu bündeln.



Abbildung 15: Handlungsoptionen für die Gestaltung einer ökologischen Machine Economy in der Unternehmenspraxis

5. Fazit

In diesem Papier wollten wir erkunden, welche Diffusionsbarrieren dem Weg in Richtung einer ökologischen Machine Economy im Wege stehen. Dabei haben wir uns auf die Unternehmensebene und diejenigen Prozesse und Organisationsstrukturen konzentriert, welche KI, IoT und DLT im Detail hervorbringen und sie integrieren. Zunächst konnten wir das System der Wertschöpfung in hoch-digitalisierten Unternehmen mit den Ebenen der Umsetzung und Nutzung der Technologien, des Managements und direkt angrenzenden Ökosystemen skizzieren. Es verbindet eine SOA (Microservices) mit DevOps Strukturen bzw. Prozessen, um flexibel und dennoch zuverlässig bzw. sicher digitale Produkt-Service-Kombinationen hervorzubringen.

Zudem konnten wir beispielhaft wesentliche Diffusionsbarrieren identifizieren, die sich insbesondere auf die fehlende Partnerlandschaft, einen Mangel an Umsetzungsstrategien, das starre Middle Management, ein unangepasstes Nachhaltigkeitsmanagement, geringe Nachhaltigkeitskompetenzen, zu wenige ökologisch-versierte Systemarchitekten und -architektinnen sowie Zielkonflikte in Nachhaltigkeitsinitiativen beziehen. Hierfür wurden ausgewählte Lösungen vorgeschlagen, um den identifizierten Barrieren entgegen zu treten und verschiedene Stakeholder und Stakeholderinnen zu mobilisieren.

Zusammenfassend finden sich auf der Unternehmensebene viele Ansatzpunkte für eine nachhaltige Digitalisierung und insbesondere ökologische Ausrichtung aufstrebender Technologien. Wenn jetzt die richtigen Akteure und Akteurinnen die richtigen Entscheidungen treffen, rückt eine ökologische Ausrichtung von KI, IoT und DLT – und damit einer nachhaltigen Machine Economy – in greifbare Nähe.

Literaturverzeichnis

- Akzente & HypoVereinsbank. (2021). Nachhaltigkeit im Mittelstand: Status – Chancen – Ausblick. https://www.akzente.de/wp-content/uploads/2021/07/Final-Studie-Nachhaltigkeit-im-Mittelstand_2021041535.pdf
- Back, A., & Klingenburg, P. (2016). Rollen, Prozesse und Führung in der Digitalen Transformation – Ratgeber und Fallstudien zur Strategiearbeit für das digitale Zeitalter.
- Berg, A. (2021). Digitalisierung der Wirtschaft – Wo steht Deutschland nach zwei Jahren Pandemie? https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-11/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-24-11-2021_final.pdf
- Bitkom e.V. (2022). Unternehmen gehen Digitalisierung strategisch an | Bitkom e.V. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierungsstrategie-von-Unternehmen>
- Boyden. (2017). Leadership in der digitalen Welt – wo stehen die deutschen Unternehmen? <https://www.boyden.com/media/leadership-in-der-digitalen-welt-boyden-studie-2017-1787791/leadership-in-der-digitalen-welt-boyden-studie-2017.pdf>
- Bremild, M. (2021). What Happened to the IoT Hype? <https://www.linkedin.com/pulse/what-happened-iot-hype-morten-bremild/>
- Commerzbank. (2020). Wirtschaft im Umbruch: Die Chancen des „Green Deal“. https://media.events.commerzbank.de/media/projekt-medien/e_mail/2021_1/downloads_2/Commerzbank_Unternehmerperspektiven_Whitepaper_zur_Studie.pdf
- Crisp Research. (2019). IoT – Make or Buy. <https://www.lufthansa-industry-solutions.com/de-de/studien/crisp-research-studie-iot-2019?consent=disable&cHash=68510448080f29081a1fce5091ca332f>
- Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lafuente, A. L., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R., & Safina, L. (2017). Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. In

- M. Mazzara & B. Meyer (Hrsg.), Present and Ulterior Software Engineering (S. 195–216). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12
- Ebert, C., Gallardo, G., Hernantes, J., & Serrano, N. (2016). DevOps. IEEE Software, 33(3), 94–100. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.68>
- Eckstein, J., & Linders, B. (2021). Leveraging the Agile Manifesto for More Sustainability. InfoQ. <https://www.infoq.com/articles/agile-manifesto-sustainability/>
- Garnter. (2020). Gartner 2020 Hype Cycle for Supply Chain Strategy Shows Internet of Things is Two to Five Years Away from Transformational Impact. Gartner. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-09-gartner-2020-hype-cycle-for-supply-chain-strategy-shows-internet-of-things-is-two-to-five-years-away-from-transformational-impact>
- Gartner. (2020). Hype Cycle for Manufacturing Operations Strategy, 2020. <https://www.optessa.com/wp-content/uploads/2021/04/Gartner-Hype-Cycle-August-2020-with-Optessa.pdf>
- Goasduff, L. (2021). The 4 Trends That Prevail on the Gartner Hype Cycle for AI, 2021. Gartner. <https://www.gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021>
- Hewlett Packard Enterprise. (2021). Umfrage: Zwei Drittel der Vorstände haben keine Datenstrategie. <https://www.hpe.com/de/de/newsroom/press-release/2021/10/umfrage.html>
- Hustad, E., & Olsen, D. H. (2021). Creating a sustainable digital infrastructure: The role of service-oriented architecture. Procedia Computer Science, 181, 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.210>
- IDC. (2022). Neue IDC Studie: Fehlende Transparenz über Prozesse und Daten bremst Nachhaltigkeitsinitiativen in deutschen Unternehmen aus. IDC: The premier global market intelligence company. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prEUR148886822>

- Katsikogiannis, G., Kallergis, D., Garofalaki, Z., Mitropoulos, S., & Douligeris, C. (2018). A policy-aware Service Oriented Architecture for secure machine-to-machine communications. *Ad Hoc Networks*, 80, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.06.003>
- Kawohl, J., & Schneider, P. (2017). Wer braucht schon einen Chief Digital Officer? Eine Analyse der DAX- und MDAX-Konzerne. https://docs.wixstatic.com/ugd/63eb59_16a6bd6b6e4848d69e5f14fb9728343f.pdf
- KPMG. (2021). Sustainability 1.0 – Warum die Technologiebranche kein Vorreiter der Nachhaltigkeitstransformation ist. <https://hub.kpmg.de/sustainability-1.0>
- Leite, L., Rocha, C., Kon, F., Milojicic, D., & Meirelles, P. (2020). A Survey of DevOps Concepts and Challenges. *ACM Computing Surveys*, 52(6), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3359981>
- Lixenfeld, C. (2017). Komplexität senken: Business unterschätzt Enterprise Architecture massiv. <https://www.cio.de/a/business-unterschaetzt-enterprise-architecture-massiv,3560074>
- Mendix. (2021). Low-Code-Entwicklung wird als Chance bei hoher Digitalisierungs-Nachfrage erkannt und genutzt. Mendix. <https://www.mendix.com/de/presse/low-code-entwicklung-wird-als-chance-bei-hoher-digitalisierungs-nachfrage-erkannt-und-genutzt/>
- Odgers Berndtson. (2021). Sustainability & Leadership 2020–2021: Exklusive Studie und Befragung von Top-Managern zum Thema Nachhaltigkeit und Führung in deutschen Unternehmen. <https://www.odgersberndtson.com/media/10709/sustainability-leadership-studie.pdf>
- Odgers Berndtson. (2022). Barometer Elfte jährliche Befragung des Odgers Berndtson Executive Panels in Deutschland, Österreich und der Schweiz Manager 2021–2022. <https://www.odgersberndtson.com/media/11152/ob-managerbarometer-2122.pdf>
- PricewaterhouseCoopers. (2020). PwC Blockchain Survey 2020. PwC. <https://www.pwc.de/de/finanzdienstleistungen/banken/pwc-blockchain-survey-2020.html>
- Schnicke, F., Kuhn, T., & Antonino, P. O. (2020). Enabling Industry 4.0 Service-Oriented Architecture Through Digital Twins. In H. Muccini, P. Avgeriou,

- B. Buhnova, J. Camara, M. Caporuscio, M. Franzago, A. Koziolok, P. Scandurra, C. Trubiani, D. Weyns, & U. Zdun (Hrsg.), Software Architecture (S. 490–503). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59155-7_35
- Siefke, L., Sommer, V., Wudka, B., & Thomas, C. (2020). Robotic Systems of Systems Based on a Decentralized Service-Oriented Architecture. *Robotics*, 9(4), 78. <https://doi.org/10.3390/robotics9040078>
- Sprott, D., & Wilkes, L. (2004). Understanding Service-Oriented Architecture. *The Architecture Journal*. <https://forum.uavcan.org/uploads/short-url/IBmsRnkX7EkHAq8HZ5hYKQEIIIRI.pdf>
- Staufen AG. (2020). Digitalisierung 2020. https://www.staufen.ag/wp-content/uploads/STAUFGEN.AG_Studie_Digitalisierung_2020_web.pdf
- Staufen AG. (2022). Unternehmen im Wandel—Deutscher Change Readiness Index 2022. https://www.staufen.ag/wp-content/uploads/staufen_Unternehmen-im-wandel-2022_de_web-1.pdf
- Tata Consultancy Services & Bitkom. (2021). Nachhaltig geht nur digital Wie Deutschland mit KI und Co. Die Zukunft gestaltet. https://www.tcs.com/content/dam/tcs-germany/pdf/TrendstudieDigitalisierung/2021_TCS-Studie_Nachhaltigkeit_digital.pdf
- Thönes, J. (2015). Microservices. *IEEE Software*, 32(1), 116–116. <https://doi.org/10.1109/MS.2015.11>
- Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., & Ramesohl, S. (2021). Wege in eine ökologische Machine Economy.

Nachhaltiges Edge Computing im Kontext der Machine Economy

Ökologische Implikationen

Autor*innen

Ralph Hintemann

Simon Hinterholzer

Tim Grothey

Kurz gesagt

Edge Computing ist ein wesentliches Element der Machine Economy. Die verteilte Bereitstellung von Computing-Leistung am Rande des Internets bietet sowohl Chancen für mehr Nachhaltigkeit, ist aber auch mit der Gefahr verbunden, den Energie- und Ressourcenbedarf der Digitalisierung noch einmal deutlich zu erhöhen. Da aktuell wichtige Entscheidungen zum Ausbau der Edge-Infrastrukturen getroffen werden, sollten Maßnahmen zur Gestaltung von nachhaltigen Edge Computing zeitnah greifen.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Neben zentralen Cloud Infrastrukturen gewinnt der Ausbau dezentraler Edge-Infrastrukturen im Rahmen der Machine Economy eine zunehmende Bedeutung. Schon heute werden in großem Umfang Investitionen in diese neuen Infrastrukturen getätigt. Es entwickelt sich ein Edge-Cloud-Kontinuum, dessen konkrete Ausgestaltung noch mit vielen offenen Fragen verbunden ist.

Zielsetzung:

Die digitalen Infrastrukturen der Zukunft müssen so energie- und ressourceneffizient wie möglich gestaltet werden, um die Nachhaltigkeitspotenziale der Digitalisierung ausschöpfen zu können.

Ergebnisse:

Mit dem Ausbau von Edge Computing bilden sich neue Akteurs-Konstellationen, welche sich von Netzbetreibern bis hin zu den Endverbrauchern auswirken. Aktuell bieten sich noch vielfältige Einflussmöglichkeiten auf die Entwicklung nachhaltiger Betreiber- und Geschäftsmodelle, Standorte und Nutzungsarten von Edge Computing.

Für einen energie- und ressourcenschonenden Aufbau von Edge-Infrastrukturen fehlt es noch an vielen Grundlagen. So mangelt es noch an einem gemeinsamen Begriffsverständnis und grundsätzlichem Know-how zur nachhaltigen Ausgestaltung des Edge-Cloud-Kontinuums. Es bedarf klarer Rahmenbedingungen und Anreize.

Handlungsempfehlung:

Gezielte Forschung, klare rechtliche Vorgaben, neue technische Standards und mehr Transparenz können dazu beitragen, die nachhaltigen digitalen Infrastrukturen der Zukunft zu entwickeln und aufzubauen.

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen Edge Computing – vom Edge Device zum Edge-Cloud-Rechenzentrum.....	175
2. Identifikation und Kartierung der bei neuen Edge-Computing-Lösungen relevanten Akteurslandschaft.....	178
3. Das System Edge Computing – Abhängigkeiten zu Daten- und Applikationsbedarfen.....	180
4. Edge Computing und Nachhaltigkeit.....	181
5. Darstellung wesentlicher Herausforderungen	183
6. Handlungsempfehlungen	186
Literaturverzeichnis	190

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Edge Computing Kontinuum (Quelle: Borderstep Institut 2022)
..... 176

1. Grundlagen Edge Computing – vom Edge Device zum Edge-Cloud-Rechenzentrum

1.1. Begriffsklärung

Auch wenn der Begriff Edge Computing in der Theorie geklärt ist, gibt es der Praxis und in der wissenschaftlichen Literatur bislang noch keine einheitliche Abgrenzung, welche technischen Infrastrukturen und Anwendungsfälle genau darunterfallen (Beck et al., 2016; W. Z. Khan et al., 2019; Marshall, 2021; Ostler, 2019). Der Begriff „*Edge*“ bezieht sich auf eine sogenannte Netzwerkkante (=englisch: *network edge*), also beispielsweise bei öffentlichen Telekommunikationsnetzen auf den Übergang von Anschlussnetzwerk („letzte Meile“) zu einem übergreifenden Netz (Aggregations- oder Metronetz). „*Compute*“ steht für die Verarbeitung von Daten. Entsprechend kann unter „*Edge Computing*“ die Datenverarbeitung an einer solchen Netzwerkkante verstanden werden. Aus der Sicht eines Anbieters von digitalen Diensten findet Edge Computing also netztopologisch (und meistens auch geographisch) in relativer Nähe zu Endanwender bzw. deren Endgeräten statt. In der Praxis und auch in der wissenschaftlichen Literatur wird Edge Computing meist etwas breiter verstanden und schließt neben der Datenverarbeitung auch Datenspeicherung ein. Auch wird räumlich nicht nur die konkrete Netzwerkkante (z.B. direkt am Router/Switch), sondern auch die weitere dezentrale Dateninfrastruktur einbezogen, als Gegenstück zur hoch zentralisierten Verarbeitung/Speicherung in der (Hyperscale-) Cloud. Häufig wird in Abgrenzung von Hyperscale-Cloud-Rechenzentren auch von der Edge-Cloud gesprochen. Edge-Infrastrukturen sind also Rechen- oder Netzwerkressourcen, die sich zwischen den Datenquellen und Cloud-basierten Rechenzentren befinden. Sie ermöglichen sowohl die dezentrale Bereitstellung von Diensten aus der Cloud („downstream“) als auch das Angebot von IoT-basierten Diensten („upstream“) (Shi & Dustdar, 2016). Diesem Verständnis folgt auch der vorliegende Bericht.

Auch die Linux-Foundation (LF) nutzt ebenfalls dieses Begriffsverständnis und bezeichnet in ihrem State-Of-The-Edge Report 2021 Edge Computing als ein Kontinuum zwischen zentralen Rechenzentren der Cloud und den Datenquellen. Dieses Kontinuum wird auch als Fog Computing bezeichnet (S. Chen et al., 2017; Luber & Karlstetter, 2018). Hierbei werden entlang des Kontinuums verschiedene Services platziert, um (ggf. zukünftige) Anforderungen an Latenz besser zu be-

friedigen (Marshall, 2021). Diese Edge-Infrastrukturen können sowohl in den Zugangs-, Aggregations- und Metronetzen liegen als auch „On-Premises“, also auf dem Grundstück bzw. in den Räumlichkeiten der Endnutzenden. Bei den Endgeräten existieren auch spezielle Edge Devices, die für die (Vor-)Verarbeitung und Übertragung dezentral generierter Daten eine spezifische Rolle erfüllen. Eine trennscharfe Grenze zu vernetzten Endgeräten im Sinne eines Internet-of-Things im Allgemeinen ist hier kaum möglich.

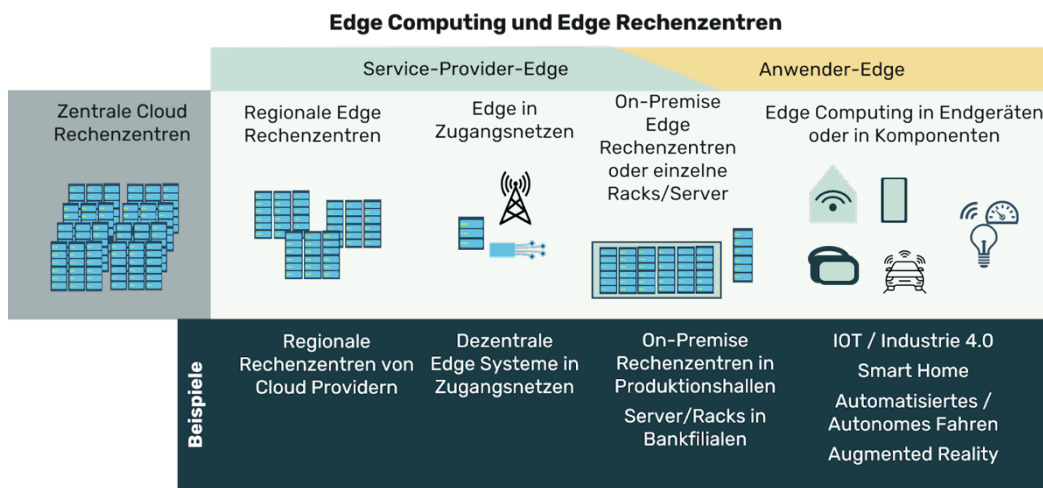


Abbildung 16: Das Edge Computing Kontinuum (Quelle: Borderstep Institut 2022)

In Abbildung 1 sind schematisch typische Komponenten mit Speicher- und Rechenkapazität vom Endgerät bis zur zentralen Cloud dargestellt. Edge Computing findet hier auf verschiedenen Ebenen statt, beim Endanwender, in lokalen Rechenzentren von Unternehmen oder an strategischen Stellen in Zugangsnetzen, insbesondere im Zusammenhang der Einführung von 5G Mobilfunk. Hierbei spricht man gerne vom Multi-Access-Edge-Computing (MEC) (Porambage et al., 2018; Taleb et al., 2017; Vodafone, 2021). Auch regional verteilte Rechenzentren von Cloud-Anbietern werden häufig als Edge-Infrastrukturen bezeichnet (Tong et al., 2016). Damit erstreckt sich der Begriff Edge sowohl netztopologisch als auch geographisch teilweise auf einen relativ großen Bereich, charakterisiert dabei jedoch immer eine Form der verteilten oder lokalen Speicherung und Verarbeitung von Daten.

1.2. Aktuelle Marktentwicklung bei Edge Computing

Das grundlegende Konzept des Edge Computings ist nicht neu. Schon in den 1990er Jahren wurden sogenannten Content Delivery Networks (CDN) eingerichtet, in denen Daten von häufig aufgerufenen Webseiten auf dezentralen

Speichern bereitgestellt werden, um so zentrale Leitungen des Internets (Backbone) zu entlasten. In der jüngeren Vergangenheit wird dem Edge Computing ein starkes Wachstum vorhergesagt, vor allem aufgrund der Prognosen namhafter Analysten und Marktforschungs-Institute wie Gardner, IDC oder McKinsey (Bittman, 2017; JM Chabas et al., 2018; van der Meulen, 2019; Shirer, 2021). Dabei hat insbesondere Gartner (van der Meulen, 2019) seine Prognosen zum Anteil von Edge bei der Verarbeitung von Unternehmensdaten anfangs mehrfach in der Form korrigiert, dass das Wachstum eher später eintritt. Dies lässt sich in der Wayback-Machine des Internet-Archive nachlesen.

Wie schnell und in welchem Ausmaß Edge-Infrastrukturen ausgebaut werden, ist aus aktueller Sicht noch unklar. Zum einen ist die Entwicklung wesentlicher Technologien, die als Treiber von Edge Computing gelten, wie Autonomes Fahren, IoT, KI, Augmented und Virtual Reality, noch nicht genau absehbar. Außerdem ist oft auch fraglich, wie die Edge-Strukturen konkret aufgebaut werden. Wie viele verteilte Edge-Infrastrukturen an den Straßen werden für autonomes Fahren benötigt und wie viel Rechenleistung kann direkt im Fahrzeug erfolgen (Bonomi et al., 2017)? Auch verschiedene Prognosen zum Markt von Edge Computing liegen teilweise weit auseinander (Global Market Insights, 2020, 2020; Marshall, 2021; Shirer, 2021).

Dennoch ist bereits an vielen Stellen erkennbar, dass Edge Computing deutlich an Bedeutung gewinnt. Komplexe Endgeräte-/Anlagen erhalten immer höhere Kapazitäten an Rechenleistung, um lokal erzeugte Daten zu verarbeiten. Beispiele hierzu finden sich in Bereichen wie Fahrzeugen mit Assistenzfunktionen, bei der intelligenten Gebäude- und Wohnungssteuerung aber auch in professionellen Bereichen wie Produktionsanlagen (Smart Factory), Medizinrobotik und Echtzeitoptimierung in der Logistik (Abbas et al., 2017; Cao et al., 2020; *Edge Computing*, 2020; L. U. Khan et al., 2020; Shi & Dustdar, 2016).

Auch Kooperationen von Netzbetreibern und Cloud-Service-Anbietern, die derzeit Edge-Infrastrukturen an verteilten Netzpunkten installieren sind vermehrt zu beobachten (*Edge Computing*, 2020; van der Meulen, 2019; u.a. Vodafone, 2021).

2. Identifikation und Kartierung der bei neuen Edge-Computing-Lösungen relevanten Akteurslandschaft

2.1. Akteure im Bereich Edge Computing

Aufgrund der großen Vielfalt von Anwendungen und technischen Varianten von Edge Computing ergibt sich eine ebenso breite und komplexe Akteurslandschaft.

Bei der physischen Infrastruktur ergibt sich ein Bedarf für den Betrieb von Edge Equipment, was grundsätzlich der Funktionalität und dem Betrieb von klassischen Cloud-Rechenzentren ähnelt, jedoch in wesentlich kleinerem Maßstab. Deshalb sind Betreiber von Cloud- oder Onlinediensten (insbesondere IaaS) oder auch Betreiber von Content-Delivery-Netzwerken (CDN) prädestiniert, um auch Edge-Rechenzentren oder -Server zu betreiben.

Wie bereits beschrieben werden Edge-Infrastrukturen typischerweise an Standorten in einem Zugangsnetz oder Aggregations-/Metronetz errichtet, weshalb bei den Edge-Infrastrukturen Netzbetreibern von öffentlichen Telekommunikationsnetzen eine strategische Position zukommt. Deren Motivation, sich am Ausbau der Edge Infrastruktur zu beteiligen, liegt darin, digitale Dienste und Services mit niedriger oder gar ultraniedriger Latenz eigenen Kunden zur Verfügung zu stellen. Dies ist ganz besonders vor dem Hintergrund des Ausbaus von 5G Mobilfunks relevant, aber auch leistungsfähige Festnetzanschlüsse können davon profitieren.

Als Nutzende der Edge-Infrastrukturen sind Anbieter von Onlinediensten oder Edge-Cloud-Anwendungen (SaaS) denkbar, die in unterschiedlicher Form von der Edge-Bereitstellung profitieren. Dies können Anbieter von Video/Musikstreaming, Cloud-Gaming, Navigation- und Verkehrsdienste, aber auch diverse Cloud-Applikationen (z.B. Application Streaming) sein.

Daneben haben natürlich auch die Hersteller von Edge-IT-Equipment bzw. deren Zulieferer sowie Hersteller der Gebäude/Schaltschränke einen starken Einfluss darauf, wie solche Infrastrukturen technisch implementiert werden. Da der Übergang von Edge-Endgeräten zu allgemein vernetzten Geräten (IoT) fließend verläuft, spielen auch allgemeine Hersteller von vernetzten Geräten hier eine bedeutende Rolle.

Die Endanwender bzw. Endkunden wiederum spielen mit ihrem Nutzungs- und Konsumverhalten eine große Rolle für das Wachstum und die entsprechende

Höhe der bereitgestellten Kapazitäten sowohl bei den Edge-Endgeräten als auch bei Edge-Infrastrukturen. Hierzu zählen auch Geschäftskunden wie große Industrieunternehmen, die für diverse vernetzte Anwendungen (z.B. Industrie 4.0, IoT) entsprechende Kapazitäten am Edge benötigen.

Neben den dargestellten Einzelakteuren sind auch Initiativen zum Auf- und Ausbau der europäischen Cloud- und Dateninfrastruktur wie GAIA-X (GAIA-X, 2021) oder IPCEI-CIS (BMW, 2021) von Bedeutung.

Unter all diesen Akteuren kann es zu diversen Kooperationsmodellen kommen. Im Folgenden werden beispielhaft zwei charakteristische Kooperationen vorgestellt.

2.2. Kooperationen im Bereich öffentlicher Edge-Infrastrukturen

Als Betreiber für physische Edge-Infrastrukturen in öffentlichen Datennetzen sind, wie zuvor beschrieben, die Cloud- oder CDN-Anbieter prädestiniert. Diese Betreiber sind jedoch darauf angewiesen, dass sie von Netzbetreibern auch die Möglichkeit erhalten, in den Zugangsnetzen ihre physischen Edge-Infrastrukturen zu verbinden und ggf. auch Räumlichkeiten zur Unterbringung zu erhalten. Solche Räumlichkeiten befinden sich z.B. häufig in früheren Gebäuden von Vermittlungsstellen, die noch aus Zeiten der Analogtelefonie stammen und deren Equipment heute nur noch einen Bruchteil des Platzes einnimmt, zu finden. Gleichzeitig profitiert der Netzbetreiber dadurch, dass die Mobilfunkkunden seines Netzes dadurch neuartige Anwendungen nutzen können, die auf Edge-Infrastrukturen angewiesen. Eine besondere Bedeutung kommt dieser Kooperation im Ausbau von 5G Netzen zu, für die bereits erste Kooperationen zwischen Cloudanbieter und Netzbetreiber bekannt wurden (Vodafone, 2021).

2.3. Kooperationen im Rahmen von Industrie 4.0

Neben den Kooperationen zum Aufbau öffentlicher Edge-Infrastrukturen ergeben sich im Kontext von Industrie 4.0 auch verschiedene Konstellationen zwischen Industriebetrieben, Netzbetreibern und ggf. auch Cloud-Anbietern. Sogenannte Campusnetze grenzen sich durch „Network Slicing“ als eigenes (virtuelles) Netzwerk vom öffentlichen 4G oder 5G Netz ab. Dabei können dem Netz ganz spezielle Ressourcen (z.B. Bandbreite/Paketpriorisierung) zugewiesen werden. Innerhalb dieser Netze können gezielt durch Edge-Infrastrukturen auch spezielle Kapazitäten zur Datenverarbeitung und -speicherung bereitgestellt werden (Industrie.de, 2021). Hierzu ist neben den Industrieunternehmen und

Netzbetreibern ebenfalls wieder ein Betreiber der Edge-Infrastrukturen notwendig, wenn nicht der Netzbetreiber oder das Industrieunternehmen diese selbst betreibt.

3. Das System Edge Computing – Abhängigkeiten zu Daten- und Applikationsbedarfen

3.1. Edge Computing als Chance, Datenmengen zu reduzieren

Der grundlegende Ansatz von Edge Computing liegt darin, Kapazitäten zur Speicherung und Verarbeitung von Daten dezentral bereit zu stellen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, große Datenmengen lokal zu verarbeiten und so die Menge an über Datennetze zu übertragenden Daten erheblich zu reduzieren. Je nach Bedarf können alle Daten vollständig dezentral gespeichert und verarbeitet werden oder es wird nur ein Extrakt in zentrale Clouds geladen (Stead et al., 2020; Valk, 2021).

3.2. Edge Computing – Treiber für neue Applikationen und Daten

Edge Computing ermöglicht aber auch eine Vielzahl neuer (insbesondere latenzkritischer) Anwendungen, in denen Daten erfasst und verarbeitet werden. Aus aktueller Sicht werden Applikationen wie Cloud-Gaming, Autonomes Fahren oder Augmented/Virtual Reality sehr stark vom Ausbau von Edge-Infrastrukturen profitieren (Marshall, 2021) und zu mehr Daten und mehr Datenverarbeitung führen.

Ebenso werden durch die sehr niedrigen Latenzen neue All-Cloud Desktops mit Application-Streaming möglich, bei denen z.B. Office-Anwendungen über den Browser genutzt werden. Bei diesen Rechnern wird auf die Installation von Software verzichtet, u.a. um dadurch die Angreifbarkeit stark zu reduzieren (David Mytton, 2021).

3.3. Machine Economy und Edge Computing

Für die Machine Economy stellt Edge Computing ein zentrales Element dar, welches neben dem zentralen Cloud Computing Kapazitäten für Datenspeicherung und -verarbeitung bereitstellt. Dabei können die Kapazitäten am Edge je nach

Bedarf vollautomatisch skaliert werden. Insbesondere bei Public-Edge-Infrastrukturen kann die Abrechnung vollautomatisiert organisiert werden. So ließen sich mit heutigen Cloud-Ressourcen vergleichbare virtuelle Edge-Ressourcen zur Speicherung und Verarbeitung automatisiert einsetzen. Aufgrund der heterogenen Akteurs-Struktur sind für die Bereitstellung solcher Edge-Dienste allerdings einheitliche Schnittstellen/APIs zu Cloud-Diensten bzw. zu den Services auf den Endgeräten erforderlich.

Die Nutzung von Edge-Infrastrukturen kann insbesondere auch für Anwendungen im Bereich der Künstlichen Intelligenz und für Big-Data-Analysen Vorteile bieten, z.B. im Technologiefeld „Distributed Artificial Intelligence“. Auch hier ergeben sich vielfältige Fragestellungen hinsichtlich der effizienten Gestaltung solcher Lösungen oder der Datensicherheit (J. Chen & Ran, 2019; E. Li et al., 2019).

4. Edge Computing und Nachhaltigkeit

4.1. Überblick

Bisher ist die Anzahl der Untersuchungen, die sich mit dem Zusammenhang von Edge Computing und Nachhaltigkeit befassen, noch überschaubar. Solche Untersuchungen lassen sich grundsätzlich in zwei Arten unterteilen: Einerseits werden die Möglichkeiten untersucht, mit Edge-Computing-Lösungen mehr Nachhaltigkeit zu erreichen, während andererseits die Nachhaltigkeit von Edge-Infrastrukturen untersucht wird.

4.2. Ökologische Potenziale durch Edge Computing

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen, die sich mit den ökologischen Potenzialen durch die Nutzung von Edge Computing befassen. Übergreifende Darstellungen finden sich z.B. in Helmrich (2021), Valk (2021) Hamm et al. (2019) oder Skoff & Rutrecht (2021). Ökologischen Potentiale von Anwendungen, die durch Edge Computing ermöglicht werden, finden sich beispielsweise in der Mobilität, bei der in Edge-Ressourcen der Verkehr optimiert wird (Ahuja & Khosla, 2019). Dies kann einerseits dazu beitragen, dass verschiedene Verkehrssysteme möglichst gut ineinandergreifen; z.B. verschiedene öffentliche und auch individuelle

Verkehrsmittel. Andererseits kann auch der Verkehrsfluss dadurch weiter optimiert werden, indem Verkehrssteuerung (Ampelschaltungen, Taktzeiten bei ÖPNV) in Echtzeit an die jeweiligen Bedarfe angepasst wird. Unter der Zielsetzung einer Minimierung der CO₂-Emissionen könnte hierdurch die Nutzung von CO₂-armen Verkehrsmitteln wie Fahrrad oder ÖPNV gestärkt werden.

Des Weiteren gibt es im Bereich der intelligenten Energienetze, insbesondere in der Stromversorgung diverse Anwendungsfälle für Edge Computing, um beispielsweise Netzengpässe zu beseitigen oder Lasten dynamisch anzupassen (Demand-Side-Management) (Liu et al., 2019). Auch hier sind hohe Potenziale zur Reduktion der CO₂-Emissionen zu erwarten.

Gleichzeitig weisen Hamm et al. (2019) jedoch auch auf den Energieverbrauch der Datenverarbeitung hin, die die ökologischen Potentiale verringern oder umkehren könnte. Fraga-Lamas et al. (2021) weisen auf die großen Potentiale von Edge Computing im Zusammenspiel mit IoT und KI-Technologien als Treiber von nachhaltigen Digitalisierungsansätzen in einer zukünftigen Kreislaufwirtschaft hin.

Neben der direkten Optimierung stellt auch die Datenerfassung und das reine Monitoring zusammen mit der Datenanalyse eine wichtige Möglichkeit von Edge Computing dar, so (indirekt) zu ökologischer Nachhaltigkeit beizutragen.

4.3. Ökologische Auswirkungen in den Edge-Infrastrukturen und -Endgeräten

Die Nutzung und Herstellung der Endgeräte (inklusive Unterhaltungselektronik) verursachen mit weltweit ca. 1.000 Mt. CO₂ im Jahr 2020 einen hohen CO₂-Fußabdruck, der deutlich über dem der Netze und Rechenzentren liegt (Bieser et al., 2020). Bei den Endgeräten ist, wie oben dargestellt, eine Abgrenzung zwischen einfachen IT-Endgeräten und Edge Devices oft nur schwer möglich. Im gegenwärtigen Trend zu immer mehr vernetzten Endgeräten (Internet-of-Things) wird jedoch auch der Bedarf an solchen Edge Devices und deren Kapazitäten zur Speicherung und lokalen Verarbeitung stark ansteigen; entsprechend kann dies auch zu steigenden Umweltwirkungen führen.

Daneben wird erwartet, dass Edge-Infrastrukturen in den kommenden Jahren stark zunehmen werden. Schon heute nutzen ca. 17% der Unternehmen in Deutschland Dienste aus Edge-Rechenzentren. Bezüglich der IT-Fläche könnten Edge-Rechenzentren im Jahr 2025 etwa 12% der IT-Flächen aller Rechenzentren in Deutschland ausmachen (Hintemann et al., 2022). Mit ca. 2 TWh/Jahr wird ein

ähnlich hoher Anteil von Edge-Rechenzentren am Energiebedarf der Rechenzentren im Jahr 2025 erwartet (Hintemann, 2020).

Aufgrund der komplizierten Wechselwirkungen zwischen Edge-Geräten, Edge-Servern und Cloud-Rechenzentren ist die energieeffiziente Gestaltung von Edge-Infrastrukturen bislang noch wenig erforscht (Jiang et al., 2020). Möglichkeiten, den Energiebedarf und die ökologischen Auswirkungen von Edge Computing zu reduzieren, werden insbesondere in der Optimierung des Managements der Datenspeicherung und -verarbeitung in Edge-Infrastrukturen gesehen (Mansouri et al., 2021; Stead et al., 2020; Xu et al., 2018). Auch die Möglichkeiten, Edge Infrastrukturen räumlich und zeitlich an das Angebot regenerativer Stromversorgungskapazitäten anzupassen, werden untersucht (W. Li et al., 2018).

5. Darstellung wesentlicher Herausforderungen

5.1. Uneinheitliches Verständnis von Edge Computing, Edge-Geräten und Edge-Infrastrukturen

Wie oben ausgeführt, kann derzeit noch nicht davon gesprochen werden, dass bei den Diskussionen um die Einsatzgebiete und Auswirkungen von Edge Computing ein einheitliches Begriffsverständnis vorliegt, was Edge bzw. Edge Computing bedeutet. Viele Publikationen basieren auf einem Gerätebezogenen Verständnis, andere dagegen von einem eher Infrastrukturbezogenen Verständnis. Die beiden State-of-the-Edge Reports 2020 und 2021 (Marshall, 2021; Marshall et al., 2019) definieren das Edge dagegen vor allem als eine geographische Lokation, die sowohl Teile der Infrastruktur als auch der Endgeräte einschließt. Hierbei fehlt im allgemeinen Gebrauch des Begriffs noch eine sinnvolle Definition des Begriffs sowie Ausdifferenzierung der einzelnen Ebenen von Edge Computing. Ohne diese Ausdifferenzierung ist eine sinnvolle Beurteilung und Diskussion der Funktionalitäten sowie der ökologischen Wirkungen extrem schwierig.

5.2. Steigender Energie- und Ressourcenbedarf durch Wachstum auf mehreren Ebenen

Der Bedarf an Rechenkapazitäten am Edge steigt deutlich an. Speziell die Verbreitung neuartiger Anwendungen werden zukünftig zu starkem weiterem Wachstum führen. Im Bereich der Edge-Computing-Endgeräte bedeutet dies vor

allem, dass in den kommenden Jahren eine hohe Anzahl zusätzlicher Geräte erwartet werden. Obwohl das einzelne Gerät verhältnismäßig geringe Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenbedarf haben wird, kann durch die hohe Multiplikation der Geräteanzahlen eine signifikante Höhe erreicht werden. Häufig erfahren solche Geräte während der Einführung auch sehr kurze Innovationszyklen, weshalb neue Geräte bereits nach wenigen Jahren als veraltet gelten und ausgetauscht werden. Somit ist hier mit einem starken Ressourcen- und Energiebedarf für die Herstellung zu rechnen. Im Betrieb werden voraussichtlich vor allem die Geräte mit Always-On-Charakteristik durch die Standby- oder Bereitschaftsenergiebedarfe verursachen. Bei der Edge-Infrastruktur ist zu erwarten, dass ähnliche Geräte (Server, Storage) wie in herkömmlichen Rechenzentren (insbesondere Cloud) eingesetzt werden, jedoch in wesentlich kleineren Einheiten, wie beispielsweise in Einzelracks, Räumen oder Container-Rechenzentren. Eine detaillierte Untersuchung zu den entstehenden Energie- und Ressourcenbedarfen für Edge Computing liegt derzeit nicht vor.

5.3. Unklarheit über die Entwicklung und den Nutzen von verteilten Speicher- und Rechenkapazitäten in regionalen Rechenzentren, in den Zugangsnetzen sowie in lokalen Rechenzentren

Es ist derzeit noch nicht absehbar, in welchem Umfang und in welcher Ausprägung Edge-Ressourcen in Zukunft erforderlich und auch sinnvoll sein werden. Während z. B. im 5G-Mobilfunknetz erste Piloten bereits in Betrieb sind (Sawall, 2021), steht heute noch nicht fest, welche neuen Anwendungen mit welchen Latenzanforderungen tatsächlich realisiert werden. Entsprechend ist auch unklar, inwiefern weiterer Aufwand getrieben werden muss, um durch eine immer nähere Platzierung von Servern am Endgerät (netztopologisch) noch weitere Latenzreduktionen anzustreben. Da auch aus Sicht des Anbieters eine verteilte Infrastruktur immer einen höheren Aufwand bedeutet, als eine zentrale Infrastruktur, ist abzuwarten, welche Konzepte sich hier etablieren. Ob tatsächlich durch Latenzen von einer Millisekunde noch Mehrwerte erreicht werden, die den dafür erforderlichen Kostenaufwand sowie ökologische Auswirkungen rechtfertigen, ist noch offen.

5.4. Fehlende Transparenz hinsichtlich der Energieverbräuche in der Infrastruktur

Informationen zu den Energiebedarfen von digitalen Infrastrukturen, wie Rechenzentren oder Datennetzen, sind bislang kaum verfügbar. Das liegt daran,

dass die Betreiber der Netze diese Informationen nicht zur Verfügung stellen, da sie Rückschlüsse auf geschäftliche Entwicklungen eines Unternehmens ermöglichen könnten. Für eine verteilte Edge-Infrastruktur, die in großen Teilen wie Datennetze für diverse Anbieter oder gar öffentlich nutzbar sein sollen, wäre eine Transparenz der Energiebedarfe sehr sinnvoll. Nicht nur, um ein besseres Gesamtbild der Energiebedarfe dieser Infrastrukturen zu erhalten, sondern auch um ggf. im Betrieb die optimalen Bereitstellungsformen (Cloud vs. Edge) abzuwägen; ggf. auch unter Einbeziehung von Emissionsfaktoren des lokalen Strommix.

5.5. Das komplexe Zusammenspiel von verschiedenen Edge-Ebenen, Akteuren und Anwendungen erschwert eine nachhaltige Gestaltung des Cloud-Edge Kontinuums

Gegenwärtig stellen Cloud-Betreiber typischerweise eigene „Cloud-Ökosysteme“ zur Verfügung, bei denen diverse Dienste problemlos ineinandergreifen. Dies funktioniert oft problemlos, da die einzelnen Dienste stark zentralisiert bereitgestellt werden und jeder Anbieter eine große Palette an Funktionalitäten mit einheitlichen Schnittstellen/APIs bietet, womit sich diverse Cloud Services realisieren lassen. Bei in der Fläche verteilten Edge-Infrastrukturen ergeben sich jedoch zusätzliche Herausforderungen. Um ähnlich wie bei Cloud-Ökosystemen handeln zu können, müsste jeder Cloud-Anbieter flächendeckend eigene Edge-Infrastrukturen aufbauen. Dies würde aber voraussichtlich zu Überkapazitäten führen, um z. B. bei jedem Event ausreichend Kapazität lokal bereitstellen zu können. Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch, dass die Infrastruktur meistens dadurch schlecht ausgelastet ist, da die Edge-Dienste nicht gleichmäßig über einen Tag/Woche und an jedem Ort benötigt werden. Somit lassen sich relativ geschlossene Cloud-Ökosysteme nicht auf eine Edge-Computing-Infrastruktur übertragen.

5.6. Vergleichbarkeit von verschiedenen Edge-Infrastrukturen

Wie auch im Bereich von Cloud-Rechenzentren ist es bisher für Nutzende von Edge-Infrastrukturen (z.B. Softwareunternehmen, Streaming-Anbieter) kaum möglich, fundierte und vergleichbare Zahlen über verschiedene Infrastrukturen zu erhalten. Hierzu existieren kaum einheitliche Real-time KPIs oder Labels, die eine solche Vergleichbarkeit für die Nutzenden der Infrastruktur einfach erkennbar zu machen.

5.7. Ressourceneffiziente Software

Durch den kontinuierlichen und deutlichen Anstieg der Rechenleistung sowohl in Endgeräten wie auch in Servern war es bislang bei der Softwareentwicklung kaum erforderlich, eine möglichst effiziente Ressourcennutzung zu erreichen. Insbesondere in Cloud-Umgebung ist ein beliebiges Skalieren der Ressourcen möglich, weshalb der Bedarf an physischer Hardware für einen Softwareentwickler immer mehr an Bedeutung verliert. Die Kosten für die Nutzung von IaaS-Kapazitäten sind in vielen Fällen gegenüber den Gesamtkosten bei der Softwareentwicklung ein kleiner, meist unrelevanter Anteil. Dementsprechend liegt bisher auf einer effizienten Softwareentwicklung nur eine geringe Priorität (Hilty et al., 2015). Mit der zunehmenden Entstehung von Edge-Diensten wird neue Software entwickelt werden müssen. Diese sollte von vornherein möglichst effizient designet sein, um den Bedarf an Edge-Infrastrukturen gering zu halten.

5.8. Begrenztes Zeitfenster für „Ecology by Design“ während des Aufbaus neuer Infrastrukturen

Infrastrukturen wie Rechenzentren oder Kommunikationsnetze werden unter der Maßgabe höchster Zuverlässigkeit erbaut. Ein nachträglicher Eingriff in den Betrieb ihrer Versorgungsinfrastrukturen (Strom, Klimatisierung) oder in Gebäude stellt eine große Herausforderung dar. Deshalb lassen sich viele Designparameter unter sinnvollen ökonomischen Gesichtspunkten nur in der Planungsphase vor Inbetriebnahme festlegen bzw. verändern. Auf die gesamte entstehende Infrastruktur ergibt sich damit aktuell ein „Window of Opportunity“, das sich jedoch langsam schließt. Sollen solche Infrastrukturen beispielsweise zukünftig ihre Abwärme sinnvoll nutzen oder mit eigenem regenerativem Strom versorgt werden, sollte dies von Anfang an auch so von politischer Seite unterstützt werden. Werden solche Ziele erst nach dem Aufbau der Infrastruktur definiert, könnte es für eine ökonomisch sinnvolle Umsetzung bereits zu spät sein.

6. Handlungsempfehlungen

6.1. Entwicklung eines europäischen Standards zur Definition und Abgrenzung der verschiedenen Ebenen von Edge Computing

Die Diskussionen um Edge Computing leiden derzeit noch sehr stark unter verschiedenem Verständnis, beispielsweise was grundsätzliche Bestandteile von

Edge Computing sind und entsprechende Entwicklung in diesem Bereich prognostiziert werden kann. Mit einem Standard sollen sprachliche und technische Eigenschaften des Edge Computings definiert werden, vergleichbar mit dem Standard NIST-SP 500-291 (Cloud Computing). Dafür wäre mindestens ein Industriestandard durch Branchenverbände wie der Linux Foundation sinnvoll, ggf. auch ein internationaler Standard einer Normungsorganisation. Dies würde weitergehende Diskussionen stark vereinfachen.

6.2. Forschungsprogramm zum generellen Nutzen vs. ökologischen Aufwand für Edge Computing auf europäischer Ebene

Edge Computing kann aufgrund der lokalen Datenspeicherung und der geringen Latenzen Vorteile für viele Anwendungen bieten. Im Rahmen von einem oder mehreren Forschungsprojekten soll untersucht werden, inwiefern diese Vorteile durch die Technik tatsächlich ermöglicht werden können und welche ökologischen und sonstigen Mehrwerte diese für die Anwender bedeuten. Gleichzeitig soll untersucht werden, welche negativen Auswirkungen die Umsetzung eines Cloud-Edge-Kontinuums bedeutet, z. B. welche Material- und Energiebedarfe daraus resultieren. Das Projekt sollte darauf angelegt sein, diverse Ebenen des Edge Computing und verschiedene Anwendungen abzubilden. Entsprechend sollten auch verschiedene Industriepartner, Verbände sowie Forschungseinrichtungen in das Projekt einbezogen werden. Das Ziel eines solchen Projekts wäre ein besseres Verständnis der ökologischen Auswirkungen von Edge Computing sowie ggf. weitere (v.a. technische) Handlungsmöglichkeiten, um entstehende Edge-Infrastrukturen und Edge-Geräte möglichst ökologisch sinnvoll zu gestalten.

6.3. Europäische Transparenzvorschriften zum Energie- und Ressourcenbedarf von Edge Computing

Bisherige Ermittlungen von Energie- und Ressourcenbedarfen von digitalen Infrastrukturen beruhen in der Regel auf Modellrechnungen (z.B. mittels Marktzahlen und Geräteinventar) und nur selten auf tatsächlichen Messungen. Digitale Technik ist häufig bereits in der Lage den eigenen Energiebedarf zu erfassen, zum Teil sogar bezogen auf einzelne Anwendungen (vgl. Smartphone, Notebook). Für das zum Großteil neu entstehende Edge-Computing-Ökosystem sollten daher von vorn herein recht klare Transparenzanforderungen gelten, um eine Erfassung der Auswirkungen auf Umwelt und Klima besser zu quantifizieren. Die detaillierte Ausgestaltung solcher Transparenzanforderungen können vor allem

durch einen politischen Prozess bestimmt sein; vermutlich wäre dafür eine Vorstudie sinnvoll. Das Ziel wäre ein möglichst realistisches und akkurates Bild der ökologischen Wirkungen im Edge-Bereich zu schaffen, um mögliche Auswirkungen auf Umwelt und Klima abschätzen zu können sowie die zukünftige Entwicklung besser zu lenken.

6.4. Standardisierte Bereitstellungsmodelle für Edge Lösungen im Rahmen von GAIA-X entwickeln

Mittels der sogenannten Virtualisierung/Containerisierung haben sich, eng verknüpft mit dem Cloud Computing im letzten Jahrzehnt, die Möglichkeiten stark erhöht, die physische Hardware in virtuellen Einheiten für diverse Dienste zur Verfügung zu stellen. Dies ermöglicht für die Hardware eine wesentlich flexiblere Nutzung, sowohl für die Auslastung über die Zeit als auch für diverse Anwendungstypen. Damit ließe es sich vermeiden, dass verschiedene Dienstanbieter jeweils eigene Edge-Infrastrukturen aufbauen und dagegen ihre Dienste auf standardisierten Modellen von ggf. unterschiedlichen Edge-Infrastruktur-Anbietern betreiben.

Das erfordert allerdings auch, dass die Bereitstellung herstellerübergreifend voll automatisiert (ggf. einheitliche APIs) stattfindet und die unteren Software Layer einheitlich gestaltet sind (z.B. GAIA-X). Teil davon ist eine einheitliche Klassifikation von Instanz-Typen, die spezielle Eigenschaften für die jeweiligen Anforderungen der Anwendungen erfüllen (z.B. GPU-beschleunigt, RAM-optimiert, Speicheroptimiert...). Da die Anforderungen an die Edge-Infrastruktur sich dynamisch entwickeln werden, wäre hierfür ein internationaler Standard sinnvoll, der kontinuierlich an die technischen Bedarfe angepasst wird, vergleichbar z. B. mit IEEE 802.11 (WLAN)".

6.5. Entwicklung eines oder mehrerer Labels für die energie- und ressourcenorientierte Bereitstellung von Edge-Diensten

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Forschung sowie zur Transparenz sollte ein oder mehrere Labels etabliert werden, das eine Auskunft über die Energie und Ressourceneffizienz von Edge-Infrastrukturen bzw. der dort bereitgestellten Dienste gibt. Ein solches Label kann entweder einen von Grund auf neuen Ansatz darstellen, oder es kann an bestehende Labels, wie den Blauen Engel für Rechenzentren, anknüpfen.

6.6. Capacity Building für die nachhaltige Softwareentwicklung von Edge-Diensten und -Anwendungen

Die Gestaltung von Software hat einen sehr starken Einfluss darauf, welche und ggf. wie viel Hardware (zentral vs. dezentral) zur Bereitstellung eines Dienstes erforderlich ist. Da Hardware-Ressourcen insbesondere im Bereich von Cloud-Anwendungen nahezu unbegrenzt und verhältnismäßig günstig verfügbar sind, ist eine solche Software-Effizienz bisher kein primäres Ziel bei der Entwicklung von Anwendungen. Um die Potenziale einer effizient gestalteten Software zu heben, ist es notwendig, dass Softwareentwickler und Softwareunternehmen das Ziel der Softwareeffizienz stärker berücksichtigen. Hierzu werden vor allem Informationsmaßnahmen sowie Capacity-Building im Rahmen geförderter Programme zur Aus- und Weiterbildung von Softwareentwicklern vorgeschlagen. Die Politik initiiert diese Maßnahme, allerdings muss sie auch von Unternehmen mitgetragen werden.

6.7. Finanzielle Förderung öffentlich zugänglicher Multi-Tenant-Infrastrukturen (national und EU)

Ausgehend von der Multi-tenant-fähigen Public-Cloud-Infrastruktur sollte auch im Bereich der dezentralen Edge-Rechenzentren/Edge-Nodes eine für alle Dienste zugängliche Infrastruktur (Soft-&Hardware) geschaffen werden. Dies würde den Vorteil bieten, dass Edge-Infrastrukturen nicht redundant aufgebaut werden und dadurch eine bessere Auslastung und horizontale Skalierbarkeit ermöglichen. Dazu müsste neben der Verfügbarkeit von einheitlichen Bereitstellungsmodellen auch die tatsächliche Verbreitung und Nutzung solcher Bereitstellungsmodelle gefördert werden. Dies kann durch ökonomische Förderung solcher Modelle, durch gezielte Beschaffung im öffentlichen Bereich und in Teilen durch regulatorische Maßnahmen (z.B. Mindestanforderungen) geschaffen werden. Dadurch wird der Roll-Out/Skalierung solcher einheitlichen Edge-Infrastrukturen gefördert, was gegenüber einer heterogenen Edge-Infrastruktur einzelner Akteure langfristig sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile bieten kann.

Literaturverzeichnis

- Abbas, N., Zhang, Y., Taherkordi, A., & Skeie, T. (2017). Mobile edge computing: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 450–465.
- Ahuja, K., & Khosla, A. (2019). Driving the Development, Management, and Sustainability of Cognitive Cities. In <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-5225-8085-0>. IGI Global. <https://www.igi-global.com/book/driving-development-management-sustainability-cognitive/www.igi-global.com/book/driving-development-management-sustainability-cognitive/214076>
- Beck, M. T., Feld, S., Linnhoff-Popien, C., & Pützschler, U. (2016). Mobile Edge Computing. *Informatik-Spektrum*, 39(2), 108–114. <https://doi.org/10.1007/s00287-016-0957-6>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., & Hilty, L. (2020). Klimaschutz durch digitale Technologien. Borderstep Institut, Universität Zürich.
- Bittman, T. (2017, März 6). The Edge Will Eat The Cloud. Gartner Blog Network. https://blogs.gartner.com/thomas_bittman/2017/03/06/the-edge-will-eat-the-cloud/
- BMWK. (2021). IPCEI on Next Generation Cloud Infrastructure and Services. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Industry/ipcei-cis.html>
- Bonomi, F., Poledna, S., & Steiner, W. (2017). The role of fog computing in the future of the automobile. *Fog for 5G and IoT*, 191.
- Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An overview on edge computing research. *IEEE access*, 8, 85714–85728.
- Chen, J., & Ran, X. (2019). Deep learning with edge computing: A review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1655–1674.
- Chen, S., Zhang, T., & Shi, W. (2017). Fog computing. *IEEE Internet Computing*, 21(2), 4–6.
- David Mytton. (2021, April 30). How energy efficient is application streaming? David Mytton. <https://davidmytton.blog/how-energy-efficient-is-application-streaming/>

- Edge Computing. (2020). <https://www.t-systems.com/de/de/cloud-und-infrastructure/neue-geschaeftsmodelle/edge-computing>
- Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*, 21(17), 5745.
- GAIA-X. (2021). Factsheet. <https://www.gaia-x.eu/what-gaia-x/factsheet>
- Global Market Insights. (2020). Edge Data Center Market Share 2020-2026 | Global Report. Global Market Insights, Inc. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/edge-data-center-market>
- Hamm, A., Willner, A., & Schieferdecker, I. (2019). Edge computing: A comprehensive survey of current initiatives and a roadmap for a sustainable edge computing development. arXiv preprint arXiv:1912.08530.
- Helmrich, K. (2021). Wie die Cloud, Edge Computing und Künstliche Intelligenz zur Nachhaltigkeit in der Industrie beitragen. In *CSR und Digitalisierung* (S. 175–192). Springer.
- Hilty, L., Lohmann, W., Behrendt, Siegfried, S., Evers-Wölk, M., Fichter, K., & Hintemann, R. (2015). Green Software. Analysis of potentials for optimizing software development and deployment for resource conservation. Umweltbundesamt.
- Hintemann, R. (2020). Rechenzentren 2018. Effizienzgewinne reichen nicht aus: Energiebedarf der Rechenzentren steigt weiter deutlich an. Borderstep Institut. <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/03/Borderstep-Rechenzentren-2018-20200324rev.pdf>
- Hintemann, R., Graß, M., Hinterholzer, S., & Grothey, T. (2022). Rechenzentren in Deutschland—Aktuelle Marktentwicklungen. Bitkom.
- Industrie.de. (2021, Oktober 15). 5G für die Industrie: Campusnetze, Einsatz und Vorteile. Industrie.de. <https://industrie.de/5g-mobilfunkstandard/5g-fuer-die-industrie-campusnetze-einsatz-und-vorteile/>
- Jiang, C., Fan, T., Gao, H., Shi, W., Liu, L., Cerin, C., & Wan, J. (2020). Energy aware edge computing: A survey. *Computer Communications*, 151, 556–580.

- JM Chabas, Chandra Gnanasambandam, Sanchi Gupte, & Mitra Mahdavian. (2018). What edge computing means for hardware companies | McKinsey. <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/new-demand-new-markets-what-edge-computing-means-for-hardware-companies>
- Khan, L. U., Yaqoob, I., Tran, N. H., Kazmi, S. A., Dang, T. N., & Hong, C. S. (2020). Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 10200–10232.
- Khan, W. Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I., & Ahmed, A. (2019). Edge computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 97, 219–235.
- Li, E., Zeng, L., Zhou, Z., & Chen, X. (2019). Edge AI: On-demand accelerating deep neural network inference via edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(1), 447–457.
- Li, W., Yang, T., Delicato, F. C., Pires, P. F., Tari, Z., Khan, S. U., & Zomaya, A. Y. (2018). On enabling sustainable edge computing with renewable energy resources. *IEEE Communications Magazine*, 56(5), 94–101.
- Liu, Y., Yang, C., Jiang, L., Xie, S., & Zhang, Y. (2019). Intelligent Edge Computing for IoT-Based Energy Management in Smart Cities. *IEEE Network*, 33(2), 111–117. <https://doi.org/10.1109/MNET.2019.1800254>
- Luber, S., & Karlstetter, F. (2018, Juli 27). Was ist Fog Computing? <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-fog-computing-a-736757/>
- Mansouri, Y., Prokhorenko, V., Ullah, F., & Babar, M. A. (2021). Evaluation of Distributed Databases in Hybrid Clouds and Edge Computing: Energy, Bandwidth, and Storage Consumption. arXiv preprint arXiv:2109.07260.
- Marshall, P. (2021). STATE OF THE EDGE 2021—A Market and Ecosystem Report for Edge Computing. State of the edge. <https://stateoftheedge.com/reports/state-of-the-edge-report-2021/>
- Marshall, P., Smith, J., & Trifiro, M. (2019). STATE OF THE EDGE 2020—A Market and Ecosystem Report for Edge Computing. State of the edge. <https://stateoftheedge.com/reports/state-of-the-edge-2020/>

- Ostler, U. (2019, Oktober 4). Definieren Sie Edge Datacenter! <https://www.datacenter-insider.de/definieren-sie-edge-datacenter-a-870803/>
- Porambage, P., Okwuibe, J., Liyanage, M., Ylianttila, M., & Taleb, T. (2018). Survey on multi-access edge computing for internet of things realization. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2961–2991.
- Sawall, A. (2021). AWS: Vodafone setzt beim 5G-Edge Computing auf Amazon–Golem.de. <https://www.golem.de/news/aws-vodafone-setzt-beim-5g-edge-computing-auf-amazon-2112-161697.html>
- Shi, W., & Dustdar, S. (2016). The promise of edge computing. *Computer*, 49(5), 78–81.
- Shirer, M. (2021). IDC Forecasts Strong Growth for the Managed Edge Services Market with Worldwide Revenues Approaching \$2.8 Billion in 2025. IDC: The premier global market intelligence company. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48179321>
- Skoff, K., & Rutrecht, B. (2021). Edge Computing. Intelligente Datenverdichtung, Effizienz im Netzwerk. In *Digitalisierung im Kontext von Nachhaltigkeit und Klimawandel* (S. 121–134). Rainer Hampp Verlag. <https://doi.org/10.5771/9783957102966-121>
- Stead, M., Gradinar, A., Coulton, P., & Lindley, J. (2020). *Edge of Tomorrow: Designing Sustainable Edge Computing*.
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. (2017). On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1657–1681.
- Tong, L., Li, Y., & Gao, W. (2016). A hierarchical edge cloud architecture for mobile computing. *IEEE INFOCOM 2016–The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, 1–9.
- Valk, M. (2021). Refusing the Burden of Computation: Edge Computing and Sustainable ICT. *A Peer-Reviewed Journal About*, 10, 14–29. <https://doi.org/10.7146/aprja.v10i1.128184>

- van der Meulen, R. (2019). What Edge Computing Means for Infrastructure and Operations Leaders. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/what-edge-computing-means-for-infrastructure-and-operations-leaders/>
- Vodafone. (2021). Distributed Multi-Access Edge Computing mit AWS | Vodafone. <https://www.vodafone.de/business/loesungen/aws-mec.html>
- Xu, J., Ota, K., & Dong, M. (2018). Saving energy on the edge: In-memory caching for multi-tier heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(5), 102–107.

Wie Tech-Unternehmen die Umweltwirkung digitaler Services in der Praxis sichtbar machen können

Eckpfeiler für die Bewertung komplexer digitaler Services in der Unternehmenspraxis – Einblicke aus der Siemens AG.

Autor*innen

Daniel Wurm

Bastian Bach

Ulrike Dowie

Kurz gesagt

Für die Bewertung digitaler Services – insbesondere im Kontext aufstrebender Technologien – gibt es derzeit wenige Haltepunkte für Tech-Unternehmen. Diese Studie zeigt explorativ und beispielhaft Herausforderungen und methodische Eckpfeiler für die Bewertung digitaler Services auf. Handlungsmaßnahmen für eine breite Anwendung in der Praxis werden für verschiedene Stakeholder und Stakeholderinnen abgeleitet.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Tech-Unternehmen stehen vor der Herausforderung die Umweltwirkung komplexer digitaler Services im Kontext aufstrebender Technologien bewerten zu müssen. Diese Services unterscheiden sich jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften deutlich von physischen digitalen Infrastrukturen und Erfahrungswerte für entsprechende Analysen sind kaum gegeben.

Zielsetzung:

In dieser Studie werden erstens Herausforderungen in der Bewertung digitaler Services in Tech-Unternehmen identifiziert werden. Daraufhin sollen zweitens methodische Eckpfeiler für eine zielführende Bewertung erarbeitet werden. Und drittens werden Handlungsoptionen abgeleitet, über die diese Bewertungen erleichtert werden können bzw. mehr Anwendung in der Praxis finden.

Ergebnisse:

Fehlende Daten, dynamische Entwicklung und mangelnde Vergleichbarkeit, komplexe Architekturen sowie interne Abhängigkeiten erschweren für viele Tech-Unternehmen den Einstieg in die Bewertung und das Erfüllen zukünftiger Berichtspflichten. Je detaillierter, schneller und passgenauer für Optimierungsprozesse die Ergebnisse produziert werden sollen, desto ausgeprägter sind die beschriebenen Herausforderungen.

Über einen iterativen Prozess mit einem Fokus auf Lernen und Erfahrungen sammeln sollten sich Tech-Unternehmen an die Bewertung digitaler Services herantasten. Hierbei sollten zunächst einfach darzustellende und wesentliche Effekte im Vordergrund stehen, während komplexe Fragestellungen qualitativ bzw. kollaborativ gelöst werden sollten. Daten sollten, wenn möglich selbst oder im Verbund mit anderen Unternehmen erhoben werden. Und um aus Transparenz tatsächlich Optimierungsprozesse zu speisen, sollten Erkenntnisse dediziert auf Unternehmenseinheiten ausgerichtet sein.

Handlungsempfehlung:

Für die verbreitete Anwendung von Bewertungen in der Praxis empfiehlt dieses Papier die Ausarbeitung bzw. Anpassung von Standards sowie von Bewertungsmethoden, Regulierung und neue Prozesse für die Sammlung von Inventory-Daten und den Aufbau von Unternehmensnetzwerken für gemeinsame Bewertungsinitiativen.

Inhaltsverzeichnis

1. Relevanz & Zielsetzung	200
2. Vorgehen & Methodik.....	201
3. Grundlagen	203
4. Hypothesen zur Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis..	209
5. Fazit	221
Literaturverzeichnis	222

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umweltwirkung digitaler Services.....204

Abbildung 2: Hardware- und Softwarekomponenten von AIVI (AI-powered Visual Inspection) zur Pseudofehlerreduktion in der Elektronikfertigung209

Abbildung 3: Hypothesen zur Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis210

Abbildung 4: Typen von Nachhaltigkeitseffekten (Pohl et al., 2019)213

Danksagung

Für die Mitarbeit in Interviews und/oder unserem Workshop bedanken wir uns herzlich bei:

Forschende:

Roland Hischier (Empa, ecoinvent)

Jens Gröger (Öko-Institut e.V.)

Rene Itten (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften)

Stefan Naumann (Hochschule Trier)

Johanna Pohl (Technische Universität Berlin)

Jan Bieser (Universität Zürich)

Etienne Lees-Perasso (ehem. LCIE Bureau Veritas)

Jan Bitter-Krahe (Wuppertal Institut)

Stephan Ramesohl (Wuppertal Institut)

Paul Suski (Wuppertal Institut)

Severin Hackspiel (Wuppertal Institut)

Justus von Geibler (Wuppertal Institut)

Aus der Unternehmenspraxis (Siemens AG):

Florian Ansgar Jaeger (Digital Industries)

Katrin Müller (Technology)

Rainer Karcher (Information Technology)

Oliver Seufert (Mobility)

Bernhard Mager (Smart Infrastructure)

Marcel Kuhn (Digital Industries)

Alexis Guibourge (Digital Industries)

1. Relevanz & Zielsetzung

Digitale Services schaffen heute Mehrwert in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten. Getrieben durch wachsende Volumina von Unternehmensdaten erfahren IT Services- und Software-Märkte auch in den kommenden Jahren ein deutliches Wachstum (Technavio, 2021b, 2021a). Gartner (2022) prognostiziert, dass diese beiden Kategorien überdurchschnittlich – im Vergleich zu Infrastruktur-Investitionen – IT-Ausgaben vorantreiben werden.

Gleichzeitig scheinen sich die Nachhaltigkeitsaktivitäten von Tech-Providern noch nicht an diesen Trend anzupassen. Studien weisen darauf hin, dass selbst bedeutende Software-Unternehmen in ihren CSR-Policies vor allem auf CO₂-Emissionen ihrer Hardware fokussieren statt Initiativen für grüne Software voranzutreiben (Calero et al., 2019). Zudem mangelt es auf strategischer Ebene von Tech-Providern an Rahmenbedingungen, um derartige Perspektivwechsel zu vollziehen. Zwar geht eine deutliche Mehrheit von Tech-CEOs davon aus, dass ihr zukünftiges Wachstum von ihrer Fähigkeit zur nachhaltigen Transformation abhängt. Gleichzeitig sind Fragen des Nachhaltigkeitsmanagements nur in etwa einem Viertel aller Tech-Provider fest im Strategieprozess integriert (KPMG, 2020).

Besonders die Fähigkeit die eigenen Umweltwirkungen transparent zu machen, kann als Ausgangsbasis für die nachhaltige Gestaltung von digitalen Services verstanden werden. Im Rahmen dieses Papiers konnten allerdings keine Studien identifiziert werden, die sich dediziert mit der Messung von Umweltwirkungen digitaler Services im Kontext von Tech-Unternehmen beschäftigen. Einzelne Schnittmengen ergeben sich in verschiedenen laufenden Debatten, werden allerdings nicht im Detail ausformuliert:

In der „*Green IT*“-Debatte wird Monitoring und Evaluierung meist aus Sicht von IT-Abteilungen angeführt. Beispielsweise bilden Green-IT-Governance-Frameworks im Bereich der Management-Prozesse Assessments und Reportings zur Einhaltung interner und externer Anforderungen an ökologische Digitalisierung ab (Patón-Romero et al., 2017). Zudem finden sich Studien, die sich aus der Vogelperspektive mit Umweltstandards bzw. -normen, wie der ISO Reihe 14000, auseinandersetzen (Patón-Romero et al., 2019).

In der „*Corporate Social Responsibility (CSR)*“-Debatte wird die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit als Strategie-Komponente von Tech-Unternehmen diskutiert. Darunter fällt bspw. der Bereich der umweltbezogener Audits (Bernal-

Conesa et al., 2017) sowie die Umsetzung von Lebenszyklusanalysen als Basis für nachhaltige Initiativen (Pistoni et al., 2016).

Eine fundierte wissenschaftliche Debatte zu den konkreten Herausforderungen in der Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis und insbesondere im Kontext von Tech-Unternehmen bleibt aus. Daher bleiben grundlegende Einordnungen zu individuellen Anforderungen auf der Unternehmensebene – aufgrund von bestehenden Prozesslandschaften, Organisationsstrukturen, Skills usw. – unberücksichtigt. Eben diese Informationen sind aber wesentlich für eine enge Verzahnung von Transparenz- und Optimierungsinitiativen.

Insgesamt scheint es, als würden Unternehmen für die Bewertung digitaler Services insbesondere auf bestehende Standards bzw. Normen zurückgreifen. Hier wird allerdings häufig auf ältere Standards gesetzt, die aufstrebende Technologiefelder (Internet of Things (IoT), Künstliche Intelligenz (KI)/Machine Learning und Distributed Ledger Technologien (DLT)/Blockchain), die Herausforderungen in der Bewertung damit verbundener Services sowie die oben beschriebenen Anforderungen auf Unternehmensebene nicht im Detail berücksichtigen.

In diesem Papier möchten wir in einem ersten explorativen Beitrag Herausforderungen und Eckpfeiler für die Bewertung von Umweltwirkungen komplexer digitaler Services beschreiben. Zudem werden Handlungsoptionen abgeleitet, um Tech-Providern eine möglichst effektive Umsetzung ihrer Bewertungen zu ermöglichen. Dabei werden wir insbesondere die Umsetzung dieser Analysen in der Unternehmenspraxis mit Fokus auf Provider digitaler Technologien und ihrer Abhängigkeiten (Reportingpflichten, Industriestandards usw.) in den Blick nehmen. Beispielhaft konzentrieren wir uns auf Business-to-Business Services, die auf aufstrebenden Technologien basieren (Fokus: IoT und KI).

2. Vorgehen & Methodik

Aufgrund der unzureichenden Studienlage im betrachteten Themenbereich, haben wir uns zu einem stark explorativ getriebenen Vorgehen entschieden. In einem ersten Schritt wurden grundlegende Inhalte zu digitalen Services und Rahmenwerken der Messung ihrer Umweltwirkung recherchiert. Daraufhin wurden in einem internen Design Sprint Herausforderungen und Eckpfeiler unter Beteiligung des Projektteams und Mitarbeitenden der Siemens AG

zusammengetragen. Diese wurden in einem weiteren Schritt in Experteninterviews ergänzt und angepasst. Letztlich wurden die Erkenntnisse anhand eines Fallbeispiels aus der Unternehmenspraxis (einer KI-Lösung der Siemens AG) in einem Workshop validiert und Handlungsoptionen zusammengetragen.

Für die Expert*innen-Interviews wurden acht Forschende aus Deutschland, der Schweiz und Frankreich ausgewählt. Ihre Expertise war entscheidend für die Auswahl: Bis auf einen von ihnen haben alle langjährige Erfahrung im Bereich Life-Cycle-Assessments der Informations- und Telekommunikations (IKT) Branche zumeist mit dedizierter Erfahrung im Bereich digitale Services. Ein Teilnehmer ist zudem im Verein ecoinvent aktiv und konnte daher über den aktuellen Stand der Datenbasis Auskunft geben. Außerdem brachte ein Teilnehmer detailliertes Wissen rund um den Vergleich verschiedener Umweltbilanzierungsverfahren mit. Schließlich wurde sichergestellt, dass genügend Teilnehmende Expertise in der Bewertung einer Vielzahl von Umwelteffekten (Energie- sowie Ressourcenbedarfe) sowie Ebenen (direkte sowie indirekte Effekte) einbringen konnten. Allen Teilnehmenden wurde vor dem Interview ein Arbeitspapier mit den wesentlichen Erkenntnissen aus dem internen Design Sprint zugesendet. Im Gespräch sollte das Papier ausführlich kommentiert werden. Zudem wurden ausgehend vom individuellen Hintergrund Detailfragen diskutiert.

Für den Workshop wurden sechs Teilnehmende der Expert*innen-Interviews mit acht Mitarbeitenden der Siemens AG zusammengebracht, um die Erkenntnisse aus Forschungs- sowie Praxisperspektive zu spiegeln und anhand des Fallbeispiels zu prüfen. Von der Siemens AG waren Personen aus den Bereichen Nachhaltigkeitsmanagement, Lebenszyklusanalysen, Technologieentwicklung (insb. Analytics/KI) und digitale Infrastrukturen (insb. Smart Buildings) anwesend. Nach einer kurzen Einführung in die identifizierten Herausforderungen und Eckpfeiler in der Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis wurden die Teilnehmenden in zwei Gruppen eingeteilt. Hier wurden jeweils drei Kernfragen diskutiert: Erstens: „Wie können direkte Umweltwirkungen digitaler Services in der Unternehmenspraxis bewertet werden?“ Zweitens: „Wie können indirekte Umweltwirkungen digitaler Services in der Unternehmenspraxis bewertet werden?“ Drittens: „Welche Maßnahmen braucht es, damit eine Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis Verbreitung findet?“ Als Fallbeispiel wurde auf den Service „AIVI – AI-Empowered Visual Inspection“ der Siemens AG zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um einen digitalen Service, der automatisiert Qualitätsprüfungen in der Produktion anhand von Bilderkennung umsetzen kann. Der Service wurde ausgewählt, weil er durch seine Vielschichtigkeit aufgrund

verschiedener Infrastruktur- sowie Softwarekomponenten und Technologien (KI sowie IoT bzw. Edge-Computing) komplexe Services repräsentiert. Der Workshop wurde virtuell im Januar 2022 durchgeführt und lief über einen Zeitraum von ca. drei Stunden. Alle Kommentare wurden konsolidiert in Form von „Klebezetteln“ gesammelt.

3. Grundlagen

3.1. Digitale Services

Digitale Services werden in der Literatur, in Standards und Regulierungen als Teilbereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) beschrieben bzw. sie setzen sich aus verschiedenen Bausteinen dieses übergreifenden Feldes zusammen. Infrastrukturen (Netzwerke, Endgeräte, Rechner, Speicher), Software bzw. Applikationen, Datenstrukturen und Services selbst können als Bausteine digitaler Services verstanden werden und erfüllen gemeinsam eine Funktion, wie z. B. die Optimierung der Materialeffizienz in der Fertigung.

Gemäß der Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 (EU 2020) über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen zur Festlegung technischer Bewertungskriterien sind Gegenstand der Bewertungen digitaler Services: Die Entwicklung oder Nutzung von Lösungen der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT), die auf die Erhebung, Übertragung und Speicherung von Daten sowie auf deren Modellierung und Nutzung abzielen, wenn diese Tätigkeiten überwiegend auf die Bereitstellung von Daten und Analysen ausgerichtet sind, sowie unter anderem dezentrale Technologien (d. h. Distributed-Ledger-Technologien), das Internets der Dinge (IoT), 5G und künstliche Intelligenz nutzen.

Digitale Services sind komplexe Systeme (siehe Abbildung 1): Die Vielzahl an verschiedenartigen Bausteinen, wird geformt von Akteuren und Akteurinnen, die Services anhand diverser Anforderungen und Ziele ausrichten bzw. gestalten. Dadurch können selbst einzelne digitale Services eine Fülle von Funktionen bereitstellen und auf vielfältige Anwendungsszenarien ausgerichtet werden. Dazu kommt, dass digitale Services nicht statisch sind. Sie sind ständig in Bewegung, da sie in sogenannten service-orientierten Architekturen hervorgebracht werden, in denen insb. Software-Bausteine über Service-Schnittstellen interoperabel und wiederverwendbar eingesetzt und nach Bedarf ausgetauscht werden

können. Schließlich haben alle beschriebenen Bausteine jeweils eigene Lebenszyklen, die sich aufgrund ihrer Austauschbarkeit in unterschiedlichen Phasen befinden. Alle diese Aspekte erhöhen die Komplexität digitaler Services und erschweren dadurch potentiell ihre Bewertung.

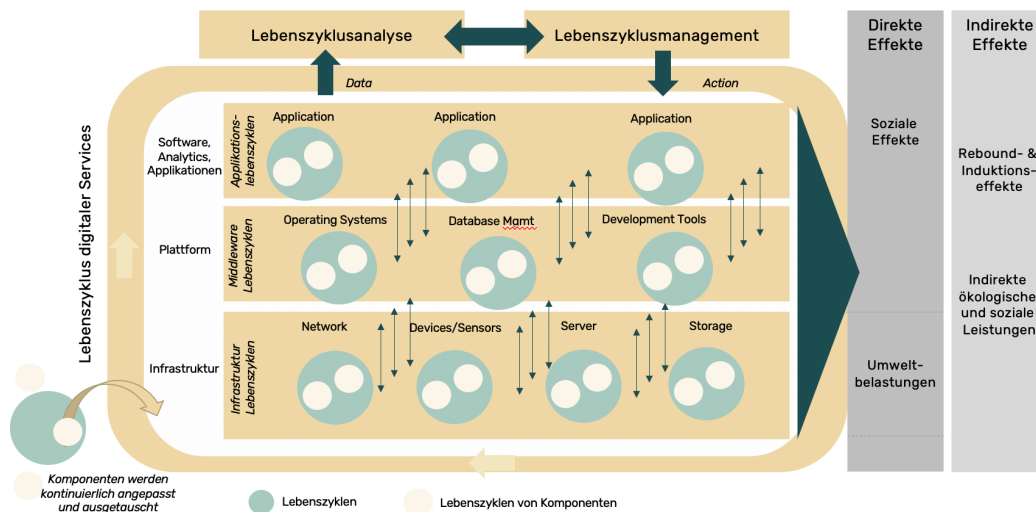


Abbildung 17: Umweltwirkung digitaler Services

3.2. Messung von Umweltwirkungen digitaler Services

Seit einigen Jahren wird insbesondere die digitale Infrastruktur mit Blick auf Umweltwirkungen bewertet. Darunter wurden z. B. Rechenzentren, Netzwerke oder Smartphones bezüglich ihrer Energie- und Ressourcenverbräuche bewertet. Eine ganzheitliche Perspektive zum Zusammenspiel von Software, Daten und Infrastruktur, durch die Services hervorgebracht werden, rückt in der jüngeren Vergangenheit immer stärker in den Mittelpunkt. Allerdings unterscheiden sich hierbei Bewertungen in der Forschung von solchen in der Unternehmenspraxis.

3.2.1. Messung der Umweltwirkung in der Forschung

In forschungsnahen Kontexten sind Bewertungen digitaler Services meist in größeren Projekten angelegt. Unter Beteiligung diverser Akteure und Akteurinnen, z. B. aus dem universitären Umfeld, aus der angewandten Forschung, der Wirtschaft oder unter Mitwirken zivilgesellschaftlicher Organisationen werden ausgewählte Services analysiert. Diese werden dabei intensiv beleuchtet und Energie- oder Ressourcenverbräuche im Detail dokumentiert.

Vor allem werden verbrauchernahe Dienste in der Forschung untersucht. Zum Beispiel analysieren Gröger et al. (2021) in der Studie „Green Cloud Computing“

die Umweltwirkungen verschiedener Cloud-basierter Services, darunter Speicherdienste oder Videotelefonie (Gröger et al., 2021). In der Studie „Carbon impact of video streaming“ von Carbon Trust (2021) werden die CO₂-Emissionen von Video Streaming Diensten wie Netflix im Detail auf die beteiligten Komponenten (z. B. Netzwerke und Endgeräte) heruntergebrochen.

Andere Studien konzentrieren sich eher auf die Bewertung aufstrebender Technologien, die als Grundlage für digitale Services verstanden werden können. Beispielsweise ermitteln Strubell et al. (2019) den Ausstoß von CO₂-Emissionen im Training von ausgewählten Deep Learning Modellen (Strubell et al., 2019). Oder Montevecchi et al. (2020) stellen die Energieverbräuche von Cloud und Edge Computing gegenüber (Montevecchi et al., 2020). Darüber hinaus sind Studien, die kombinierte Umweltwirkungen verschiedener Technologien analysieren rar.

Forschungsnahе Untersuchungen bewerten die betreffenden Services dabei meist aus einer Vogelperspektive, wobei stark vereinfacht wird. Es lassen sich gesellschaftliche Implikationen ableiten, indem wesentliche Herausforderungen (z. B. nach Lebenszyklusphase oder Komponente) quantifiziert werden. Die meisten Entscheidungen in der Produktion, Nutzung, oder anderen Phasen des Lebenszyklus digitaler Services werden meist auf wenige Kernindikatoren beschränkt (z. B. Nutzungszeit in Stunden). Daher können konkrete Implikationen meist nur mit einer niedrigen Auflösung identifiziert werden.

Methodisch ist „Life Cycle Assessment“ (Umweltbilanzierung bzw. Lebenszyklusanalyse) die meist eingesetzte Methode zur Bewertung von Umweltwirkung durch digitale Technologien (insb. in der Forschung) (Court & Sorrell, 2020). Zur Bewertung von besonders komplexen Umständen (indirekte Effekte oder dynamische Faktoren) kommen auch alternative Verfahren zum Einsatz, wie ICT enablement method (ICTem) oder vereinzelt System Dynamics Ansätze (Bieser & Hilty, 2018).

3.2.2. Messung der Umweltwirkungen in der Unternehmenspraxis

Seit Veröffentlichung des Entwurfs zur Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) (European Commission, 2021b) der EU ist klar, dass künftig große, aber auch kleinere Unternehmen – in Summe etwa 50.000 in der EU, davon 15.000 in Deutschland (Mazar, 2022) – umweltrelevante Informationen preisgeben müssen. Erste Arbeitspapiere der EFRAG (2022) deuten darauf hin, dass detaillierte Informationen in verschiedenen Themenbereichen bereitgestellt

werden müssen (EFRAG, 2022). Entsprechend wird auch eine Vielzahl an Tech-Unternehmen die Transparenz bezüglich der Umweltwirkung ihres Service-Portfolios erhöhen müssen.

Tech-Unternehmen orientieren sich für die Bewertung ihrer Umweltwirkungen an bestehenden Empfehlungen und Standards. Für die Ökobilanzierung von IKT-Lösungen werden gemäß 2021/2800 der EU (European Commission, 2021a) die folgenden Standards empfohlen:

- Methodology for environmental LCA of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services ETSI ES 203 199 – entspricht der ITU-Norm ITU-T L.1410 und ergänzt die ISO 14040/44
- Produkt-Umwelt-Fußabdruck 2013/179/EU
- ISO 14067:2018 oder ISO 14064-2:2019 zur ausschließlichen Bewertung von Treibhausgasemissionen

Diese Standards werden entsprechend auch zur Bewertung digitaler Services eingesetzt, was sich am ETSI ES 203 199 (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen, 2014) verdeutlichen lässt. Er sieht zur Strukturierung von LCA eine Dreiteilung in Produkte (Goods), die auch Software darstellen kann, jegliche Art von (Datenübertragungs-)Netzen (Networks) und Dienste (Services), dem eigentlich zu untersuchenden digitalen Service, vor. In diesem Zusammenhang können Netze und Dienste als logische Strukturen betrachtet werden, die aus Produkten, Hard- und Software, bestehen, aber sich auch z. B. auf Gebäude, Bauarbeiten für Kabeltrassen, Klimaanlage, Stromgeneratoren und Stromspeicher wie USV ausweiten können. Folglich spiegelt die Bilanzierung von Netzen die Umweltwirkungen der in den Netzen eingesetzten Produkte und Diensten wider. Über die bereits genannten Standards hinaus, weist die "European Framework Initiative for Energy & Environmental Efficiency in the ICT Sector" zudem neben weiteren Standards für ICT-Güter dedizierte GHG-Protokolle für digitale Services aus (insbesondere Telecommunication Network Services, Desktop Management Services und Cloud Computing & Data Center Services) (ICTFOOTPRINT.eu, 2016).

An den beschriebenen Standards orientieren sich Tech-Unternehmen bzw. ihre Dienstleister also zur Bewertung der digitalen Services. Allerdings ist an dieser Stelle wesentlich zu erwähnen, dass mittlerweile auch Provider von Cloud- und IoT-Lösungen z. T. die Bewertung übernehmen. Zum Beispiel bieten größere Or-

ganisationen ihren Kunden mittlerweile Einsicht in die Umweltwirkung ihrer Produkte bzw. Services, wie das "Emissions Impact Dashboard" von Microsoft (Microsoft, 2021) oder der CO₂-Bilanz in der Google Cloud (Google, 2021). Noch ist allerdings davon auszugehen, dass insbesondere direkte Effekte (z. B. Emissionen durch den Betrieb von Rechenzentren) hierbei im Vordergrund stehen. Und auch zukünftig ist offen, inwieweit derartige Dienstleistungen Berichtspflichten oder sogar darüber hinaus gehenden Anforderungen ökologisch ambitionierter Tech-Provider genügen werden.

Schließlich stehen Unternehmen derzeit vor zwei übergreifenden Herausforderungen in der Bewertung ihrer digitalen Services: Erstens können die aufgezeigten Standards den individuellen Unternehmenskontext (Prozesse, Strukturen, usw. wie einleitend beschrieben) nur bedingt einbeziehen aufgrund ihrer „One Size Fits All“ Eigenschaft. Zweitens sind die Standards in die Jahre gekommen und eignen sich möglicherweise nicht ausreichend zur Bewertung komplexer digitaler Services, die auf aufstrebenden Technologien, wie KI, IoT oder DLT basieren. Auf den folgenden Seiten werden wir diese Herausforderungen weiter differenzieren und Lösungsansätze skizzieren.

3.2.3. „Environmental Impact Assessment“ bei der Siemens AG

Nachhaltigkeit ist ein integraler Bestandteil des Siemens-Geschäfts. Siemens befähigt seine Kunden zu ihrer eigenen nachhaltigen Entwicklung und ermöglicht die digitale Transformation der Industrie. Mit dem Rahmenwerk DEGREE (Decarbonisation, Ethics, Governance, Resource Efficiency, Equity, Employability) werden ambitionierte Ziele zugunsten aller Stakeholder in den Bereichen Umwelt, Soziales und Governance verfolgt.

Als Teil dieses 360-Grad-Ansatzes setzt Siemens im Bereich der Ressourceneffizienz ein Robust Eco Design für 100 % der relevanten Siemens-Produktfamilien bis 2030 um. Mit diesem sollen die Standardanforderungen an ein umweltbewusstes Design, wie dieses etwa in der IEC 62430 „Environmentally Conscious Design for Electrical and Electronic Products“ festgelegt ist, zur absoluten Entkopplung der Aktivitäten von der einhergehenden Ressourcen-nutzung erfüllt bzw. übertroffen werden. Ein wichtiges Element zur Erhöhung der Ressourceneffizienz der Produkte, die bei Siemens sowohl Hard- als auch Software sind, Services und Lösungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg stellt die Umweltbilanzierung als Datengrundlage für Entscheidungen samt Überführung in transparente Umweltproduktdeklarationen dar.

Die Bilanzierungen werden von den Geschäftseinheiten für ihre – auf Umsatz und Umweltwirkungen bezogen – als relevant eingestuftes Produktfamilien durchgeführt. Einzelne Produkte werden dazu in homogene Produktfamilien zusammengefasst. Eine homogene Produktfamilie ist nach EN 50693 die Teilgruppe einer Produktfamilie basierend auf der zugrunde liegenden Technologie oder Bauart, wobei davon auszugehen ist, dass die Umweltauswirkungen ähnlich und daher über die Gruppe skalierbar sind.

Der AG-weite, interne Standard zur quantitativen Bewertung der Umweltwirkungen sieht die Ökobilanzierung gemäß der ISO-Normen 14040/44 über alle Phasen des Lebenszyklus vor. Die ermittelten Umweltwirkungen werden nach Kategorien des europäischen Product Environmental Footprints mit marktüblicher Software und Datenbanken wie GaBi bestimmt und stellen für die Grundlage für die umweltgerechte Produktgestaltung dar.

Während ein Großteil der Hardware-Produkte aktuell bereits nach den etablierten Methoden bewertet wird, ist dies für das gesamte Software- und digitale Services-Geschäft im Aufbau. Siemens orientiert sich dabei sowohl an etablierten, oben beschriebenen Methoden der Bilanzierung, als auch an verfügbaren Methoden, die auf den IKT-Sektor abzielen.

Fallbeispiel: Künstliche Intelligenz in der Elektronikfertigung

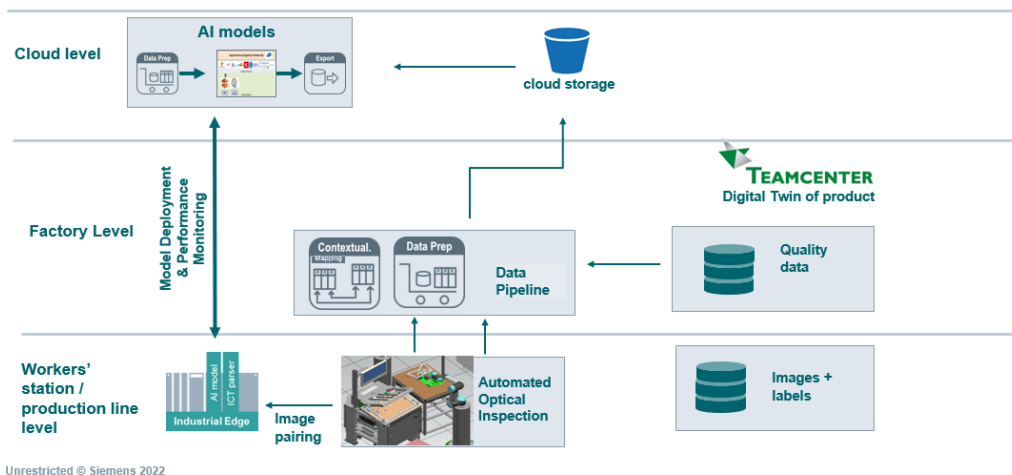
Anhand des folgenden Beispiels lässt sich die Komplexität digitaler Services verdeutlichen. In einem Elektronikwerk werden in der Leiterplattenfertigung verschiedene Veredelungsschritte mit jeweils zugehörigen Prüfschritten durchlaufen. Hierbei kommen auch optische Prüfungen zum Einsatz. Die dabei erzeugten Bilder werden regelbasiert maschinell ausgewertet und darauf basierend wird jede Leiterplatte als fehlerhaft oder fehlerfrei beurteilt.

Die maschinelle optische Prüfung liefert eine hohe Anzahl an Pseudofehlern, d.h. fälschlicherweise als fehlerhaft ausgewiesene Produkte, die aussortiert und mit beträchtlichem manuellem Aufwand überprüft werden müssen. Um diese Pseudofehler und damit den manuellen Aufwand zu reduzieren, wurde ein KI-basierter digitaler Service namens AIVI (AI-powered Visual Inspection) entwickelt. Welche Komponenten dazu zusammenspielen, zeigt Abbildung 3.

Dazu werden an der Produktionslinie Bilddateien der optischen Prüfung mit je einem Label, d.h. der Beurteilung durch Produktionsmitarbeiter und-mitarbeiter-

rinnen als fehlerhaft oder fehlerfrei, weitergeleitet in die sog. Data Pipeline. Aufgabe der Data Pipeline ist es, die Bilder in Ausschnitte aufzuteilen, sie um Qualitätsdaten anzureichern und zu normalisieren. Anschließend werden die vorverarbeiteten Daten von der Fabrik in die Cloud transferiert, und dort als Trainings-Input eines KI-Modells verwendet. Dieses Modell, ein komplexer Algorithmus, wird anhand des Trainingsinputs angepasst („trainiert“) und anschließend weitergegeben an die Produktionslinie, wo es auf einem Edge Device zum Einsatz kommt: Hier wird jeder neue Bildausschnitt bewertet und das Ergebnis ausgegeben, ob ein Fehler vorliegt oder nicht.

AI in electronics manufacturing: Hardware and Software components of AIVI (AI-powered Visual Inspection)



Unrestricted © Siemens 2022

Abbildung 18: Hardware- und Softwarekomponenten von AIVI (AI-powered Visual Inspection) zur Pseudofehlerreduktion in der Elektronikfertigung

4. Hypothesen zur Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis

In diesem Abschnitt werden zunächst Herausforderungen in der Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis aufgezeigt. Darauf aufbauend sollen Lösungsansätze aufgezeigt werden und Handlungsoptionen abgeleitet werden.

Hypothesen zur Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis

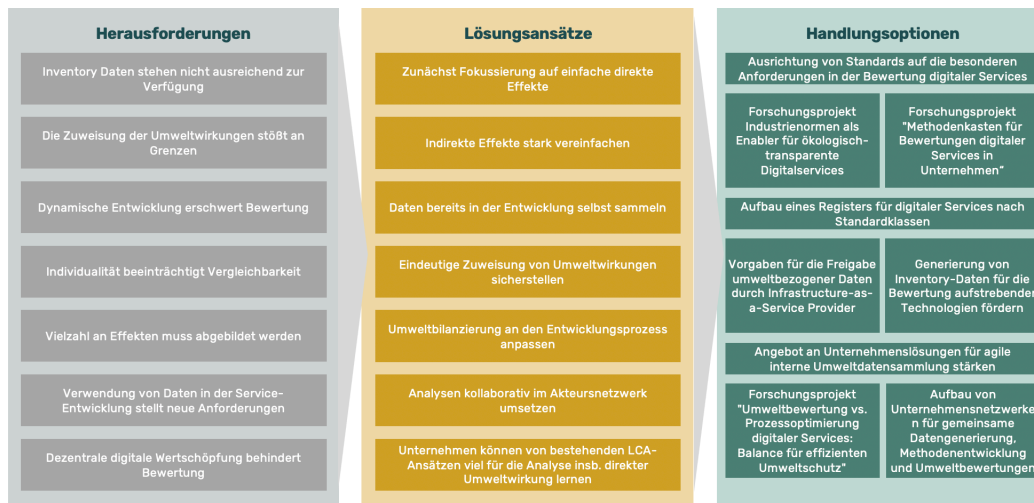


Abbildung 19: Hypothesen zur Bewertung digitaler Services in der Unternehmenspraxis

4.1. Herausforderungen

Hier werden die Herausforderungen beschrieben, vor denen Tech-Provider, wie die Siemens AG derzeit im Übergang von Infrastruktur- zu Service-Bewertungen stehen:

Inventory Daten stehen nicht ausreichend zur Verfügung

In der Life Cycle Inventory Analysis werden die In- und Outputs entlang aller Phasen des Lebenszyklus eines Produkts oder Services gesammelt und quantifiziert. Die dafür verwendeten Datensätze sind entsprechend essentiell für die Bewertung. Diese Daten scheinen für die Verwendung in digitalen Services nicht ausreichend bereitzustehen. Sie beziehen sich insbesondere auf Energieverbräuche, fokussieren die Nutzungsphase digitaler Lösungen und decken nicht alle relevanten Komponenten (Networks, Datacenter, usw.) ausreichend ab (Lees-Perasso, 2019).

Zudem sind die Daten zu aufstrebenden Technologiefeldern lückenhaft. Beispielsweise ist im Kontext von Machine Learning Anwendungen noch nicht genug über Energiebedarfe entlang der einzelnen Phasen des Lebenszyklus bekannt (Rolnick et al., 2019). Welche Datensätze benötigt werden, hängt zudem von den Bedarfen und Optimierungsanforderungen bewertender Unternehmen ab.

Oftmals wird für Analysen auf bestehende Datenbanken, wie ecoinvent oder die GaBi Software zugegriffen. Allerdings sind die Informationen in diesen Datenbanken meist veraltet oder ihre Ursprünge bzw. Qualität lässt sich nicht nachvollziehen.

Dynamische Entwicklung erschwert Bewertung

Im Gegensatz zu Infrastrukturkomponenten (z. B. Endgeräte oder Server) werden digitale Services kontinuierlich in Sinne sog. "DevOps"-Prozesse hervorgebracht, d.h. Entwicklung und Betrieb werden zusammengebracht, wodurch stetig Service-Komponenten bzw. Funktionen ergänzt, abgewandelt, ausgetauscht oder entfernt werden.

Im Diskurs bzgl. Umweltbilanzierung bzw. Life Cycle Assessments (LCA) haben sich als Antwort auf sich stetig verändernde Umstände dynamische Ansätze der LCA ("Dynamic Lifecycle Assessment") etabliert und gewinnen an Bedeutung. Dynamik wird in Analysen einbezogen, z. B. über "Dynamic Process Inventory" (z. B. Effizienzgewinne von Komponenten), "Dynamic System Inventory" (z. B. Systemwandel von Technologien, wie Kohle- zu Wind-Energie) oder "Dynamic Characterization" (z. B. Veränderung der Berechnung von CO₂-Äquivalenten) (Hertwich et al., 2015). Zudem wird unterschieden nach dem Grad der Verwendung von dynamischen Größen (in allen Phasen der LCA ("full") oder nur in ausgewählten Phasen ("partial")) (Sohn et al., 2020). Letztlich bleibt offen, inwiefern in Forschung und Praxis in der Bewertung digitaler Services dynamische Aspekte berücksichtigt werden. Es ist allerdings zu bezweifeln, dass die Dynamik von digitalen Services in Entwicklung und Betrieb umfassend abgebildet werden können.

Die Zuweisung der Umweltwirkungen stößt an Grenzen

Digitale Services sind selbst zusammengesetzt aus Einzel-Services, die auf diversen Ebenen (Infrastruktur, Plattform oder Software bzw. Applikationen) existieren, stetig weiterentwickelt und zu übergreifenden Services integriert werden (bez. "Service-oriented Architecture" und IoT siehe z. B. (Alfonso Garcia-de-Prado et al., 2017; Reis et al., 2021) Dadurch entstehen nebeneinander komplexe Service-Konglomerate, die sich zum Teil aus den gleichen Komponenten zusammensetzen.

Anhand der oben beschriebenen Dreiteilung in Produkte, Netze und Dienste für eine Bewertung zeigt sich im Falle dieser Konglomerate die Schwierigkeit die Attribution von Umweltwirkungen im Detail durchzuführen. Netze und Dienste stellen keine physischen Einheiten dar, sondern sind logische Konzepte, die auf Produkten aufbauen. Im Kontext komplexer Services, die in sich verschachtelt sind, ist Attribution so vorzunehmen, dass es nicht zu einem Double-Accounting kommt d. h. Dienste zusammen mit Netzen und Produkten bilanziert werden bzw. das Unternehmen in Summe falsche Umweltbilanzen für seine Services ausweist.

Individualität beeinträchtigt Vergleichbarkeit

Ein wesentlicher Anspruch an eine LCA (insb. „Comparative LCA“) ist es, bewertete Objekte untereinander vergleichen zu können. Viele Einzelbausteine und dynamische Entwicklung schließen eine Vergleichbarkeit nahezu aus. So gleichen sich digitale Services so gut wie nie. Es weist z. B. Lees-Perasso (2019) darauf hin, dass zwei Smartphones zwar auf der Ebene der Infrastruktur vergleichbar sind, jedoch unter Hinzunahme der individuell gestalteten (cloudbasierten) App-Landschaft und Nutzungsintensität Vergleiche nahezu ausgeschlossen sind (Lees-Perasso, 2019). Besonders im Kontext komplexer digitaler Services wird damit die Vergleichbarkeit stark beeinträchtigt.

Vielzahl an Effekten muss abgebildet werden

Durch ihre Entwicklung und Betrieb auf verschiedenen Architekturebenen des Digitalsystems wirken digitale Services multidimensional. Bewertungsansätze müssen in der Lage sein ökologische sowie soziale Wirkmechanismen aufzuzeigen. Ökologische Wirkung wird zumeist über Energie- sowie Ressourcenaufwände bemessen. Darüber hinaus müssen direkte sowie indirekte Wirkungen erfasst werden. Und schließlich können digitale Services positive sowie negative Implikationen mit sich bringen. LCA-Ansätze müssen in der Lage sein, für diverse Bausteine digitaler Services bzw. Services in Gänze, die beschriebenen Dimensionen in allen Phasen des Lebenszyklus abzubilden, um ein ganzheitliches Wirkungsmodell ableiten zu können. Allerdings werden, wie Bieser & Hilty (2018) zeigen, aufgrund von beschränkten Ressourcen LCA im Kontext digitaler Lösungen meist auf bestimmte Lebenszyklusphasen fokussiert (Bieser & Hilty, 2018).

Abbildung 3 zeigt die Vielzahl an zu berücksichtigenden Effekten, die Pohl et al (2019) strukturiert haben (Pohl et al., 2019). Diese Darstellung verdeutlicht, dass negative Effekte (hier Umweltbelastungen) und positive Effekte (hier Umweltleistungen) digitaler Services in Summe optimiert werden müssen. Besonders die Effekte auf technologischer sowie Nutzerebene können mittels LCA analysiert werden. Ob allerdings eine ganzheitliche Analyse dieser Effekte für eine Bewertung „unterm Strich“ wiederholend umgesetzt bzw. unter gegebenen Kapazitäten machbar ist, ist derzeit im Kontext komplexer digitaler Services offen.

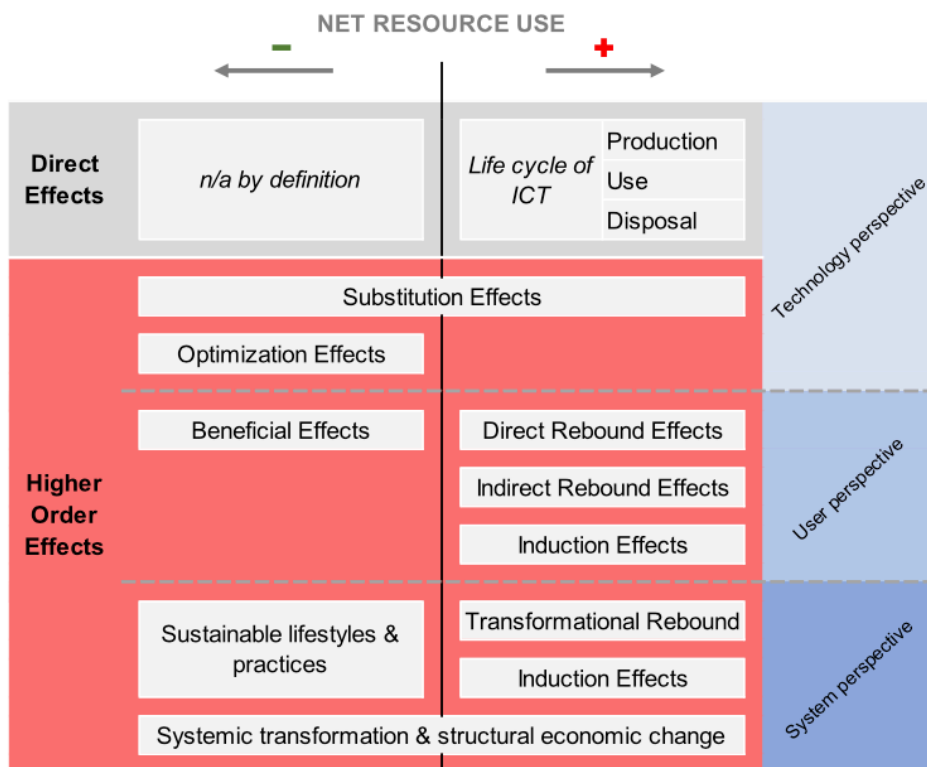


Abbildung 20: Typen von Nachhaltigkeitseffekten (Pohl et al., 2019)

Verwendung von Daten in der Service-Entwicklung stellt neue Anforderungen

Die meisten der in der in der Forschung durchgeführten Analysen sind als Ad hoc-Studien zu verstehen, die einmalig durchgeführt werden. Kontinuierliche Service-Entwicklung, wie oben beschrieben, bedarf einem kontinuierlichen Zufluss an Umweltdaten, damit diese jederzeit in die Ausgestaltung neuer Komponenten einfließen können. Es ist fraglich, ob klassische LCA-Verfahren diese Anforderungen erfüllen können.

Neben der zeitlichen Dimension ist auch der Gegenstand der bereitgestellten Informationen wesentlich. Forschende bspw. stehen nicht in der Pflicht Daten dahingehend auszuwerten, dass sie sich innerhalb eines digitalen Service auf „bearbeitbare Pakete“ beziehen. Sind umweltrelevante Informationen etwa verschiedenen Verantwortungsbereichen zuzuordnen bzw. beziehen sich die Daten nicht auf Komponenten, die als solche „Bearbeitungsgegenstände“ im Unternehmen darstellen, könnte sich dies negativ auf eine Optimierung auswirken.

Dezentrale digitale Wertschöpfung behindert Bewertung

Services entstehen durch das Zusammenwirken von diversen Organisationen, z. B. wenn Software-Unternehmen ihre Infrastruktur extern beziehen bzw. buchen. Daher liegen auch die umweltrelevanten Daten an unterschiedlichen Stellen. Im Falle direkter Effekte sind insb. die Daten der Dienstleister relevant (z. B. Stromverbräuche von Rechenleistung). Außerdem betrifft dieser Punkt z. B. Beratungshäuser, die Umweltanalysen (z. B. Software und methodische Beratung) sowie Zugang zu externen Datenbanken anbieten.

In der Bewertung indirekter Effekte ist es vor allem entscheidend, die Nutzung bzw. den Nutzungskontext der Services und damit die Kundenseite zu verstehen. Häufig sind hierfür quantitative Befragungen einzusetzen.

4.2. Methodische Eckpfeiler

Es wird deutlich, dass je höher auflösend Umweltwirkungen dargestellt und je schneller sowie passgenauer Analyseergebnisse an Optimierungsprozesse gekoppelt werden sollen, desto eher treten die oben beschriebenen Herausforderungen zu Tage. Eine grob auflösende Analyse in längeren Abständen vereinfacht dagegen den Bewertungsprozess. Letztlich müssen für diese Entscheidungen interne Abhängigkeiten (u. a. Kapazitäten, Skills, Systeme) und externe Anforderungen (insb. Berichtspflichten und Vermarktungspotentiale) berücksichtigt werden. Anhand der Diskussionen um das Fallbeispiel der Siemens AG wurde deutlich, dass es einen schrittweisen Prozess braucht, über den diese Herausforderungen gelöst werden können. Dieser sollte von iterativem Experimentieren und Lernen geprägt sein, um sich auf diesem Weg einer optimalen Methodik zu nähern. Eckpunkte dafür werden im Folgenden aufgezeigt.

Zunächst Fokussierung auf einfache direkte Effekte

Unter den gegebenen Voraussetzungen (mangelnde Datenverfügbarkeit, fehlende Erfahrung in der Bewertung von Services, Barrieren zwischen Akteuren und Akteurinnen usw.) erscheint es empfehlenswert zunächst einfache Analysemethoden mit klarem Fokus zu implementieren. Das bedeutet zunächst, nicht alle möglichen Effekte in der Breite zu analysieren, sondern sich auf solche Effekte zu fokussieren, die vor dem Hintergrund globaler Herausforderungen relevant, aber gleichzeitig schnell zu analysieren sind. Im Kontext von Umweltbelastungen wäre es für Unternehmen ratsam direkte Effekte und insb. den Energieaufwand (und darüber CO₂-Emissionen) in den Mittelpunkt der Analyse zu stellen. Dieser lässt sich anhand „einfacher“ Allokationsregeln und anhand in der Unternehmenspraxis häufig bestehender Kennzahlen (z. B. CPU-Auslastung, Speicherplatz usw.) abschätzen. Diese Daten sollten bereits während der Entwicklung digitaler Services sowie rückwirkend im Hinblick auf die Nutzung der Services strukturiert gesammelt werden. Auch sollte der Detailgrad der Bewertungsgegenstände nicht zu hoch sein. Zunächst ist eine Bewertung eines Service in Gänze und nicht der einzelnen Funktionen ausreichend.

Indirekte Effekte stark vereinfachen

Wesentlich für Tech-Provider ist es, nicht nur die von ihren Services ausgehenden Umweltbelastungen transparent zu machen, sondern auch ihre Umweltleistungen. Diese indirekten Effekte sowie indirekte Umweltbelastungen lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt schwer auf einzelne Services oder Service-Komponenten herunterbrechen.

Möglicherweise ist es an dieser Stelle ein guter Einstieg, qualitative Bewertungen vorzunehmen, um nicht nur eine erste Annäherung für indirekte Umweltwirkungen zu erhalten, sondern gleichzeitig auch Impulse für eine Nachhaltigkeitsoptimierung in Entwicklungsprozesse einspeisen zu können. Für diese Analyse wären unter Umständen auch Fokusgruppen oder Interviews mit Kunden umzusetzen. Auch könnten Entwickler bzw. Entwicklerinnen einbezogen werden, die allein durch eine grobe Bewertung indirekter Effekte sensibilisiert sind und entsprechend in der Entwicklung nachhaltige Impulse setzen können.

Für Unternehmen scheint aufgrund begrenzter Kapazitäten und einer Vielzahl an abzudeckenden Produkten bzw. Services eine Durchführung quantitativer Analysen indirekter Effekte nicht machbar. Eine Möglichkeit wäre allerdings Kapazitäten zu bündeln und gemeinsam mit anderen Service-Anbietern Services mit

ähnlichem Nutzenversprechen durch breit angelegte Kundenbefragungen quantitativ zu bewerten.

Daten bereits in der Entwicklung selbst sammeln

In Ermangelung ausreichender Datensätze steht auch die Frage im Raum, ob Datensätze "eingekauft" oder in der Entwicklung der digitalen Servicekomponenten (zumindest teilweise) selbst erschlossen werden können (z. B. durch Messung von Serverkapazitäten in der Entwicklung). Die Möglichkeiten hierfür sind stark von der jeweiligen digitalen Architektur abhängig. Darunter wäre z.B. relevant, ob Server überhaupt zugänglich oder wie im Falle von Infrastructure-, Plattform- und Software-as-a-Service Angeboten oftmals Cloud-Anbieter Zugang gewähren müssten. Zudem ist bspw. ist ein Unternehmen im Einsatz von integrierter Standard-Software möglicherweise darauf angewiesen, dass entsprechende Schnittstellen und Funktionen bereitgestellt werden. Letztlich braucht es dedizierte Software-Anwendungen, die auf Datensammlung innerhalb von Entwicklungsprozessen ausgerichtet ist.

Eindeutige Zuweisung von Umweltwirkungen sicherstellen

Entscheidend bei der Ausgestaltung der Analyse von Umweltwirkungen digitaler Services sollten die Handlungsbedarfe zur Optimierung der Umweltwirkung aller beteiligten Bausteine auf allen Ebenen der Service-Architektur unter Einhaltung von Kosten-Nutzen Beschränkungen sein. Wie weiter oben beschrieben, kann Optimierung im Kontext digitaler Services nur dann funktionieren, wenn letztlich Verantwortlichkeiten hinter Umwelteffekten klar zugewiesen werden.

Wünschenswert wäre es an dieser Stelle Effekte mindestens jeweils für Produkt- bzw. Service-Teams anzugeben. Damit sind schlagkräftige Teams von meist 2-10 Personen gemeint, die für die Entwicklung sowie den Betrieb (DevOps) eines Produkts bzw. eines Service oder einer Service-Komponente verantwortlich sind. Auf diese Weise sind Verantwortung für Effekte sowie Optimierung eindeutig verortet. Zudem könnten dadurch zwischen Teams Dynamiken entstehen, die sich vorteilhaft für die Optimierung auswirken könnten (Zielsetzungen, interner Wettbewerb usw.).

Umweltbilanzierung an den Entwicklungsprozess anpassen

Unter der Annahme, dass die digitale Servicelandschaft ständig dynamischen Veränderungen agiler Entwicklung unterworfen ist, wären Echtzeitinformationen zu Umweltwirkungen empfehlenswert. Häufige Tests und Experimente bringen eine hohe Frequenz von Entscheidungen mit sich, in welche Umweltdaten einfließen sollten.

Auf der anderen Seite schränken limitierende Ressourcen die Möglichkeiten für Echtzeit-Daten stark ein. Vor diesem Hintergrund wäre die Mindestanforderung, Daten entsprechend der Service Portfolio Management Cycles bereitzustellen, wonach die Service-Landschaft häufig jährlich geprüft und neu ausgerichtet wird (zu Service-Portfolio Management siehe Lichtenberger, 2013).

Ein gangbarer Mittelweg wäre möglicherweise ausgewählte Informationen entsprechend der in der agilen Entwicklung eingehaltenen Phasen, wie z. B. in Scrum (bspw. monatlich) bereitzustellen. Denkbar wäre den Analyseprozess entsprechend agil zu gestalten und Fokusbereiche/-effekte nacheinander zu analysieren und diese Informationen als sog. „Increments“, d.h. fertige Analyse-Teilergebnisse in den Entwicklungsprozess einzuspeisen.

Analysen kollaborativ im Akteursnetzwerk umsetzen

Entscheidend für die Bewertung von Umweltwirkungen digitaler Services sind die der Analyse zugrunde liegenden Daten. Diese liegen nicht alle bei den betreffenden Unternehmen bereit oder können in der Entwicklung gesammelt werden, sondern müssen aus verschiedenen Quellen bezogen werden. Möglicherweise sollten die verschiedenen Akteure und Akteurinnen entlang der Wertschöpfungskette an der Analyse arbeiten und nach einem „Geben und Nehmen“-Prinzip Daten austauschen. Auch könnte es nötig sein, dass Unternehmen mit ähnlichen Service-Portfolios ihre Erfahrungen diskutieren bzw. Vergleichsdaten austauschen. Welche Rolle bestehende Datenbanken, wie ecoinvent oder GaBi, hierbei spielen, bleibt dabei zu diskutieren.

Unternehmen können von bestehenden LCA-Ansätzen viel für die Analyse insb. direkter Umweltwirkung lernen

Im Kontext von Bewertungen digitaler Services werden heute durchaus Lebenszyklusphasen analysiert (z. B. Gröger et al., 2021). Allerdings gibt es Stimmen, die diese Sicht je nach Untersuchungskontext für fraglich halten. Das in der Literatur

angeführte französische Projekt "GreenConcept" setzte auf LCA zur Bewertung von digitalen Services (Sidos, 2020). Im Nachgang äußerten sich die Beteiligten kritisch und hoben die Limitationen hervor. Insbesondere die Anwendung auf komplexe Servicesysteme (multiple integrierte Service-Bausteine, multiple (logische) Lebenszyklen aller Bestandteile, multiple Anwendungsfelder) wird für fraglich gehalten (Lees-Perasso, 2019).

Andere Stimmen betonen allerdings, dass besonders in der Bewertung direkter Umweltwirkung viel aus den Erfahrungen durch LCA-Ansätze gelernt werden kann. Zum Beispiel können Allokationsregeln auf den neuen Kontext digitaler Services angewendet werden. Im Umgang mit indirekten Effekten und möglicherweise qualitativen Analyseansätzen in der Unternehmenspraxis können diese Ansätze weniger unterstützen. Möglicherweise eignen sich hier eher Ansätze, die sich z. B. an Systems Dynamics Modelle anlehnen, in denen Wirkungsabhängigkeiten beschrieben bzw. einfach visualisiert werden können. Eine genauere Untersuchung letzterer steht aus.

4.3. Handlungsoptionen für Stakeholder und Stakeholderinnen

Um Bewertungen digitaler Services in der Unternehmenspraxis zu fördern und damit Transparenz in Tech-Unternehmen als Ausgangspunkt für Optimierungsvorhaben zu schaffen, braucht es Engagement verschiedener Stakeholder und Stakeholderinnen. Im Folgenden werden Handlungsoptionen aufgeführt, die im Rahmen des Workshops unter Beteiligung von Bilanzierungs-Expert*innen und Mitarbeitenden der Siemens AG entstanden sind:

Ausrichtung von Standards auf die besonderen Anforderungen in der Bewertung digitaler Services

Normungsgesellschaften sollten Standards (z. B. ETSI ES 203 199) für die Anforderungen in der Bewertung digitaler Services passgenauer auf den Unternehmenskontext zuschneiden. Dazu zählen u. a. Ansätze für die Bemessung indirekter Effekte, von Dynamik oder die Orientierung unterschiedlicher zeitlicher (Echtzeit. vs jährlich) oder organisatorischer (Team- vs. Unternehmensebene) Ausprägungen sowie die Sicherstellung der Vergleichbarkeit funktionaler Einheiten. Dadurch steigt die Akzeptanz und Anwendbarkeit von Umweltbewertungen digitaler Services für Praktiker und Praktikerinnen insb. bei Tech-Providern.

Forschungsprojekt „Industrienormen als Enabler für ökologisch-transparente Digitalservices“

Die Politik sollte ein umfassendes Forschungsprojekt fördern, das erarbeitet, wie Anforderungen von Bewertungsmethoden in Standards und Normen digitaler Services eingebracht werden können. Diese Anforderungen sollten "by-design" in der Entwicklung digitaler Services berücksichtigt werden indem sie durch Normungsgesellschaften einerseits in bestehende (z. B. ISO/IEC 30141 für IoT), aber auch in neue Normen (z. B. im Bereich KI) und Richtlinien (z. B. Ökodesign) direkt mit eingebunden werden.

Forschungsprojekt "Methodenkasten für Bewertungen digitaler Services in Unternehmen"

Die Politik sollte die Entwicklung dedizierter Methoden für die Analyse der Umweltwirkung digitaler Services fördern – als Hilfestellung für Praktiker und Praktikerinnen und Input bei der Entwicklung von Standards. Die Methoden sollten die jeweiligen Anforderungen in der Praxis berücksichtigen und Orientierung für verschiedene Kontexte liefern (z. B. KMU vs. Enterprise, versch. Branchen, usw.).

Aufbau eines Registers digitaler Services nach Standardklassen

Die Politik sollte die Umsetzung eines Registers finanzieren, durch das die Umweltwirkung digitaler Services dargestellt wird. Innerhalb von Standardklassen können hier Kunden Services vergleichen und Anbieter Wettbewerbsvorteile generieren. Das Register muss einen Weg finden, neben den Gemeinsamkeiten der Services innerhalb von Klassen, individuelle Unterschiedlichkeit und Leistungen einzubeziehen.

Vorgaben für die Freigabe umweltbezogener Daten durch Infrastructure-as-a-Service Provider

Die Politik sollte über Regulierung große Infrastructure-as-a-Service (IaaS) Provider in die Pflicht nehmen, wesentliche Daten bez. der Energie- und Ressourcenbeanspruchung der darauf zugreifenden Services ihrer Kunden für diese bereitzustellen. In einem ersten Schritt könnten dies stark vereinfachte Datensätze als Grundlage für Umweltbilanzierungen sein. Über die freiwillige Bereitstellung von Echtzeitdaten können sich darüber hinaus Differenzierungs- bzw. Wettbewerbsvorteile für IaaS Provider ergeben.

Generierung von Inventory-Daten für die Bewertung aufstrebender Technologien fördern

Die Politik sollte über ein Forschungsprojekt die Generierung dedizierter Datensätze für die Bewertung digitaler Services und insb. aufstrebender Technologien (KI, IoT, DLT) initiieren. Die Daten sollten in bestehende Datenbanken (z. B. ecoinvent) integriert werden. Damit sind sie - neben der unternehmens-internen Produktion von Umweltdaten - ein wesentliche Grundlage für eine Verbreitung von Bilanzierungen digitaler Services.

Angebot an Unternehmenslösungen für agile interne Umweltdatensammlung stärken

Über Startup-Förderung sollte die Politik Mittel für die Entwicklung dedizierter Lösungen für das interne Sammeln von umweltbezogenen Daten bei Tech-Providern bereitstellen. Solche Lösungen müssen den Anforderungen digitaler Services, u. a. der selbstständigen Produktion von Umweltdaten in dynamischen Kontexten gerecht werden (z. B. in der agilen Entwicklung von Big Data Anwendungen). Damit wird eine Grundlage für kontinuierliche Bewertungsprozesse geschaffen.

Aufbau von Unternehmensnetzwerken für gemeinsame Datengenerierung, Methodenentwicklung und Umweltbewertungen

Tech-Provider sollten sich für den Aufbau unternehmensübergreifender Netzwerke unter Einbeziehung von kommerziellen und freien Anbietern von Umweltdatenbanken und Bewertungssoftware einsetzen, um gemeinsam Umweltdaten auszutauschen, Methodenentwicklung voranzutreiben und aufwendige Bewertungen (z. B. indirekter Effekte) gemeinschaftlich durchzuführen. Insb. braucht es den Zusammenschluss von Tech-Providern mit ähnlichen Service-Portfolios, um Vergleichbarkeit und Synergien wahrzunehmen.

Forschungsprojekt "Umweltbewertung vs. Prozessoptimierung digitaler Services: Balance für effizienten Umweltschutz"

Die Politik sollte Forschung fördern, die untersucht, wie Unternehmenskapazitäten am effektivsten zur Reduzierung von Umweltbelastungen digitaler Services eingesetzt werden können. Vor dem Hintergrund hoher Dynamik und Individualität komplexer Services, mag eine Fokussierung auf Prozessoptimierung (z. B. anhand von Green Coding Standards) in Verbindung mit wenigen vereinfachten

Performance-Indikatoren gegenüber ausführlichen Umweltbilanzierungen in der Unternehmenspraxis zu bevorzugen sein.

5. Fazit

Vor dem Hintergrund wachsender IT Services- und Software-Märkte und entsprechend erhobenen und prozessierten Datenmengen braucht es jetzt eine Debatte um die Nachhaltigkeit digitaler Services. Während die Bewertung von digitalen Infrastrukturen teilweise erprobt ist, stellt die Bilanzierung digitaler Services – vor allem im Kontext aufstrebender Technologien – vor besondere Herausforderungen. Fehlende Daten, dynamische Entwicklung und mangelnde Vergleichbarkeit, komplexe Architekturen sowie interne Abhängigkeiten erschweren für viele Tech-Unternehmen den Einstieg in die Bewertung und das Erfüllen zukünftiger Berichtspflichten. Je detaillierter, schneller und passgenauer für Optimierungsprozesse die Ergebnisse produziert werden sollen, desto ausgeprägter sind die beschriebenen Herausforderungen.

Dieses Papier hat herausgestellt, dass sich über einen iterativen Prozess mit Fokus auf Lernen und Erfahrungen sammeln an die Thematik herangetastet werden kann. Hierbei sollten zunächst einfach darzustellende und wesentliche Effekte im Vordergrund stehen, während komplexe Fragestellungen qualitativ bzw. kollaborativ gelöst werden sollten. Daten sollten, wenn möglich selbst oder im Verbund mit anderen Unternehmen erhoben werden. Und um aus Transparenz tatsächlich Optimierungsprozesse zu speisen, sollten Erkenntnisse dediziert auf Unternehmenseinheiten ausgerichtet sein. Letztlich hat dieses Papier Handlungsoptionen aufgezeigt, um Unternehmen bei der Umsetzung dieser Ideen zu helfen. Die hier explorativ erarbeiteten Aspekte sollen als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen verstanden werden – damit die Umweltwirkung digitaler Services transparent und steuerbar wird.

Literaturverzeichnis

- AlfonsoGarcia-de-Prado, A., Ortiz, G., & Boubeta-Puig, J. (2017). COLLECT: COL-LaborativE ConText-aware service oriented architecture for intelligent decision-making in the Internet of Things—ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417417303573>
- Bernal-Conesa, J. A., de Nieves Nieto, C., & Briones-Peñalver, A. J. (2017). CSR Strategy in Technology Companies: Its Influence on Performance, Competitiveness and Sustainability. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 24(2), 96–107. <https://doi.org/10.1002/csr.1393>
- Bieser, J. C. T., & Hilty, L. M. (2018). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Calero, C., García-Rodríguez De Guzmán, I., Moraga, M. A., & García, F. (2019). Is software sustainability considered in the CSR of software industry? *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5), 439–459. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1590746>
- Court, V., & Sorrell, S. (2020). Digitalisation of goods: A systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption. *Environmental Research Letters*, 15(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6788>
- EFRAG. (2022). Sustainability reporting standards interim draft—EFRAG. <https://www.efrag.org/Activities/2105191406363055/Sustainability-reporting-standards-interim-draft>
- Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen. (2014). ETSI ES 203 199, Environmental Engineering (Ausschuss für Umwelttechnik, EE), Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services (Methodik zur Bewertung der Lebenszyklus-Umweltbilanz von Waren,

Netzwerken und Diensten der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)),. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203100_203199/203199/01.03.00_50/es_203199v010300m.pdf

European Commission. (2021a). DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) .../... DER KOMMISSION zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien, anhand deren bestimmt wird, unter welchen Bedingungen davon auszugehen ist, dass eine Wirtschaftstätigkeit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Anpassung an den Klimawandel leistet, und anhand deren bestimmt wird, ob diese Wirtschaftstätigkeit erhebliche Beeinträchtigungen eines der übrigen Umweltziele vermeidet. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=PI_COM:C\(2021\)2800](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=PI_COM:C(2021)2800)

European Commission. (2021b). Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2013/34/EU, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Regulation (EU) No 537/2014, as regards corporate sustainability reporting. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0189>

Google. (2021). CO2-Bilanz | Carbon Footprint. Google Cloud. <https://cloud.google.com/carbon-footprint?hl=de>

Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Duschke, J., & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-cloud-computing>

Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. arXiv:2002.05651 [cs]. <http://arxiv.org/abs/2002.05651>

Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J. D., Ramirez, A., Vega, M. I., & Shi, L. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global envi-

- ronmental benefit of low-carbon technologies. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(20), 6277–6282. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>
- ICTFOOTPRINT.eu. (2016, September 22). Map of ICT Methodologies. ICTFOOTPRINT.eu. <https://ictfootprint.eu/en/ict-methodologies/map-ict-methodologies>
- KPMG. (2020). The ESG imperative for technology companies. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/us/pdf/2020/04/esg-imperative-for-tech-companies.pdf>
- Lees-Perasso, E. (2019). Learnings from GreenConcept – how to deal with multi-functionality and data availability.
- Lichtenberger, A. (2013, Januar 23). From Project Portfolio to Service Portfolio Management. Disruptive agile Service Management. <https://blog.itil.org/2013/01/from-project-portfolio-to-service-portfolio-management/>
- Mazar, G. (2022). Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)—KPMG Deutschland. KPMG. <https://home.kpmg/de/de/home/themen/uebersicht/esg/corporate-sustainability-reporting-directive.html>
- Microsoft. (2021). Microsoft Emissions Impact Dashboard. <https://microsoft.com/sustainability/emissions-impact-dashboard>
- Montevecchi, F., Therese Stickler, Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market>
- Patón-Romero, J. D., Baldassarre, M. T., Piattini, M., & García Rodríguez de Guzmán, I. (2017). A Governance and Management Framework for Green IT. Sustainability, 9(10), 1761. <https://doi.org/10.3390/su9101761>
- Patón-Romero, J. D., Baldassarre, M. T., Rodríguez, M., & Piattini, M. (2019). Application of ISO 14000 to Information Technology Governance and Management. Computer Standards & Interfaces, 65, 180–202. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2019.03.007>

- Pistoni, A., Songini, L., & Perrone, O. (2016). The how and why of a firm's approach to CSR and sustainability: A case study of a large European company. *Journal of Management & Governance*, 20(3), 655–685. <https://doi.org/10.1007/s10997-015-9316-2>
- Pohl, J., Hilty, L. M., & Finkbeiner, M. (2019). How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches. *Journal of Cleaner Production*, 219, 698–712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.018>
- Reis, J. S. da M., Espuny, M., Nunhes, T. V., Sampaio, N. A. de S., Isaksson, R., Campos, F. C. de, & Oliveira, O. J. de. (2021). Striding towards Sustainability: A Framework to Overcome Challenges and Explore Opportunities through Industry 4.0. *Sustainability*, 13(9), 5232. <https://doi.org/10.3390/su13095232>
- Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Kording, K. P., Gomes, C., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., ... Bengio, Y. (2019). Tackling Climate Change with Machine Learning. arXiv:1906.05433 [cs, stat]. <http://arxiv.org/abs/1906.05433>
- Sohn, J., Kalbar, P., Goldstein, B., & Birkved, M. (2020). Defining Temporally Dynamic Life Cycle Assessment: A Review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(3), 314–323. <https://doi.org/10.1002/ieam.4235>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. arXiv:1906.02243 [cs]. <http://arxiv.org/abs/1906.02243>
- Technavio. (2021a). IT Services Market Size to Grow by USD 478.39 Billion from 2020 to 2025 | Technavio. <https://www.prnewswire.com/news-releases/it-services-market-size-to-grow-by-usd-478-39-billion-from-2020-to-2025--technavio-301445412.html>
- Technavio. (2021b). Software Market to grow by USD 250.35 bn | Increase in the Volume of Enterprise Data to Drive Growth | Technavio. <https://www.prnewswire.com/news-releases/software-market-to->

grow-by-usd-250-35-bn--increase-in-the-volume-of-enterprise-
data-to-drive-growth--technavio-301430810.html

The European Parliament and the Council of the European Union. (2020). Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088 (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/eng>

Nachhaltige Systemtransformation durch eine unabhängige Allianz

Autor: Max Schulze

Kernthese

Wir brauchen eine unabhängige Allianz, die Akteure und Akteurinnen einer transparenten und nachhaltigen Digitalwirtschaft orchestriert.

Jede digitale Applikation benötigt digitale Ressourcen, egal ob Künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen, Internet-Webseite oder Smartphon-App. Die digitale Welt ist abstrakt und die zugrundeliegende Infrastruktur zum Großteil unsichtbar, daher ist es aus Sicht der Nutzer schwer, den Ressourcenverbrauch einer Applikation wahrzunehmen und zu verstehen.

Man sieht das Glasfasernetz, die Mobilfunk-Antenne, das Rechenzentrum oder das IT-Equipment hinter einer Applikation meistens nicht, sondern lediglich das Endgerät wie beispielsweise das Laptop oder Smartphone. Ein Großteil der Anwendungen, die wir täglich nutzen laufen aber schon lange nicht mehr nur auf dem Endgerät, sondern brauchen enorme Mengen an Rechenleistung und Speicherplatz auf die diese über das Internet zugreifen.

Nimmt man das Beispiel des aktuell führenden Sprach-KI-Modells GPT-3 wird deutlich, wie hoch der potenzielle Ressourcenverbrauch von zukünftigen Modellen sein kann. Nach einer Schätzung belaufen sich die Trainingskosten auf \$11.5 - \$27.6 Millionen für das Modell (Dickson, 2020, Li, 2020). Die Organisation, die das Modell gebaut hat, macht die Ressourcenkosten für das Modell nicht transparent verfügbar.

Betrachtet man die gesamte Wertschöpfung von digitalen Applikationen wie z. B. KI-Anwendungen stellt man fest, dass die nachhaltige Nutzung von digitalen Ressourcen eine branchenübergreifende Zusammenarbeit erfordert:

- fehlende Transparenz zum Ressourcenverbrauch und Umweltwirkung über die gesamte Wertschöpfungskette, von allen Akteur*innen

- unklare Verteilung der Verantwortung an die verschiedenen Akteure und Akteurinnen der Wertschöpfung
- ausgereizte individuelle Optimierungspotentiale (z.B. in der Hardware oder im Rechenzentrum) fordern branchenübergreifende Kollaboration

Die aktuellen Akteure und Akteurinnen profitieren von der Intransparenz und dem Mangel an klarer Verantwortung. So wird deutlich, dass eine unabhängige, systemübergreifende Organisation gebraucht wird, mit der Kompetenz diese komplexe Wertschöpfung nachhaltig zu gestalten, um gemeinsam mit Regierungen und den Industrieakteur*innen eine Roadmap und Maßnahmen zu definieren.

Eine vereinfachte Darstellung der digitalen Wertschöpfung am Beispiel der KI - Anwendung und den Verantwortungen der Akteure und Akteurinnen:





	Rolle	Verantwortung
	Anwender	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltige Nutzung • Bedarfsgerechte Nutzung • Funktionalitäten auf Anforderungen anpassen
	Hersteller & Entwickler von KI Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverbrauch messen und ggü. Kunden sichtbar machen • Ressourcennutzung minimieren • Nachhaltig erzeugte Ressourcen einkaufen
	Infrastruktur-Software Hersteller & Entwickler	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcen effizient zuweisen und verwalten • Zugang zu zertifiziert nachhaltig erzeugten Ressourcen ermöglichen
	Anbieter digitaler Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcen nachhaltig erzeugen • Ausreichend Ressourcen zur Verfügung stellen • Ressourcen kennzeichnen um Einkauf nachhaltiger Ressourcen zu ermöglichen

Abbildung 21: Eigene Darstellung nach Workshop Ergebnissen (eigene Darstellung)

Welche Aufgaben hat eine unabhängige Allianz für nachhaltige Digitalisierung, die systemübergreifend Akteure und Akteurinnen einer Nachhaltigkeitsroadmap orchestriert?

Eine solche systemübergreifende Organisation, wie z.B. die Sustainable Digital Infrastructure Alliance (SDIA), verfolgt ein klares Ziel: Die Umwelt- und Gesellschaftswirkung vor dem Jahr 2030 auf null zu reduzieren und eine nachhaltige Digitalwirtschaft zu ermöglichen. Dadurch werden Innovationen und Wachstum gefördert, welche keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben, Ressourcen in einer Kreislaufwirtschaft verwenden und Gesellschaftswirkungen transparent machen. Je weiter diese Transformation vorangeschritten ist, desto mehr kann die Organisation in eine Monitoring-Funktion übergeleitet werden.

Digital-nachhaltige Missionen gestalten und managen

Mögliche Umweltbelastungen und soziale Externalitäten der Digitalisierung sollten als gesellschaftliche Herausforderung verstanden werden. Wir brauchen ganzheitliche Missionen, die systemübergreifend Akteure und Akteurinnen aus verschiedenen Sektoren mobilisieren und über Missionsprojekte Kapazitäten auf eine gemeinsame und konkrete Zielsetzung ausrichten.

Der hier beschriebenen unabhängigen Allianz sollten zwei Hauptaufgaben in diesem Kontext zukommen. Erstens kann sie durch ihr Wissen rund um Akteure, und Akteurinnen sowie Bedürfnissen zwischen diesen und der Politik in der Gestaltung digital-nachhaltiger Missionen und entsprechender gemeinsamer Zielsetzungen unterstützen. Zweitens würde sie in der Umsetzung der Missionsprojekte eine Vermittlungsrolle innerhalb sowie zwischen Projekten und Akteur*innen einnehmen.

Handlungsmaßnahmen und Strategien entwickeln

Insbesondere durch transparente Informationen zu Umwelt-, Wirtschafts- und Gesellschaftswirkung der Digitalwirtschaft, sowohl von digitalen Produkten und Dienstleistungen als auch in der Infrastruktur, lassen sich neue Handlungsempfehlungen und Strategien für digitale Unternehmen und nationale Regierungen entwickeln. Dabei ist es wichtig, dass die Beobachtungen, Fakten und Daten global erhoben werden. Die Digitalwirtschaft wird durch das Internet ermöglicht und

stellt somit einen global-integrierten Wirtschaftsbereich da. Nationale oder regionale Beobachtungen betrachten meist lediglich Symptome.

Aus diesen Beobachtungen und erhobenen Daten lassen sich regionale und nationale Handlungsempfehlungen ableiten und gemeinsam mit Regierungen in die Umsetzung bringen. Für digitale Unternehmen lassen sich globale Strategien und neue Geschäftsmodelle entwickeln, mit dem gemeinsamen Ziel eine nachhaltige Digitalwirtschaft zu realisieren.

Transparenz schaffen

Nach heutigem Stand gibt es sehr wenige zuverlässige Informationen zur Umwelt- und Gesellschaftswirkung als auch zum Ressourcenverbrauch der Digitalwirtschaft. Gleichzeitig bauen alle Akteure und Akteurinnen in der Wertschöpfungskette aufeinander auf. Jedoch haben sie kaum eine Chance sich über die Wirkung ihrer Produkte in die gesamte Wertschöpfungskette zu informieren.

Ein Beispiel: So entsteht z.B. die Illusion, dass ein Betreiber eines Rechenzentrums, das zu 100% mit Server-Hardware belegt ist (es ist "voll"), insgesamt effizient IT-Infrastruktur betreibt. Dabei ist es häufig bereits der Fall, dass dieselbe Server-Hardware selbst nur eine Auslastung von durchschnittlich 5% hat oder sich gar im Leerlauf befindet. Mit Blick auf die räumliche Kapazität ist das Rechenzentrum voll - tatsächlich aber wird Strom für "nichts tuende IT" verbrannt. Ein Informationsaustausch zwischen Betreiber von IT und Rechenzentrum findet nicht statt - ist aber erforderlich für die Betrachtung der Effizienz des Gesamtsystems. Jeder Akteur und Akteurin geht heute davon aus, "maximal effizient" zu agieren, dabei ist das Gesamtsystem aus der Querschnittsperspektive außerordentlich ineffizient.

Nur durch Transparenz in der kompletten Wertschöpfungskette lassen sich diese systemischen Herausforderungen verbessern, wie beispielsweise, die dadurch entstehende Verschwendung von Ressourcen und die damit verbundene Umweltwirkung.

Bildung ermöglichen

Die Förderung von verantwortungsbewusstem Handeln erfordert Wissen und Know-How zur Umweltwirkung, Ressourcenverbräuchen und Nachhaltigkeit von digitalen Anwendungen.

Software-Entwickler bzw. -Entwicklerinnen und Architekt*innen brauchen neues Wissen, Strategien und Umsetzungshilfen um den Ressourcenverbrauch von Software-Anwendungen zu verstehen und zu minimieren. Aber auch für die Nutzer von digitalen Anwendungen ist es wichtig zu verstehen, welches Verhalten zu negativen Auswirkungen für die Umwelt führt. Die Produzenten der digitalen Ressourcen und die Betreiber von digitaler Infrastruktur, brauchen eine Möglichkeit sich über die Anforderungen von digitalen Anwendungen, z.B. KI-Anwendungen zu informieren, um die Infrastruktur entsprechend darauf abzustimmen und dadurch effizienter zu machen.

Zusammenarbeit und Austausch fördern

Der transparente Austausch von Informationen hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Umweltwirkung legt den Grundstein für eine erfolgreiche Zusammenarbeit. Es schafft die Faktenbasis für eine kollaborative Priorisierung und Erarbeitung von Lösungen über die Grenzen der jeweiligen Branchen hinweg.

Die Förderung dieser Zusammenarbeit ist notwendig, um zwischen den Akteur*innen der Wertschöpfungskette, als auch internationalen Organisationen und nationalen Regierungen gemeinsam einen Fahrplan zu erarbeiten. Die Umsetzung des Fahrplans ist eine zentrale Aufgabe der Organisation. Des Weiteren stellt die Organisation den Fortschritt für diesen Fahrplan transparent dar und ermöglicht Akteur*innen sich in den Fahrplan einzubringen, in dem sie Zusammenarbeit durch Arbeitsgruppen, Veranstaltungen und gezielte Vernetzung fördert.

Die Zivilgesellschaft einbinden

Eine weitere und sehr wichtige Aufgabe der Organisation ist es, die Zivilgesellschaft auf die Umwelt- und Gesellschaftswirkungen von digitalen Produkten und Dienstleistungen aufmerksam zu machen und somit eine nachhaltige Nutzung bzw. nachhaltigen Einsatz zu fördern.

Ein Beispiel hierfür, ist das viele Nutzer bzw. Nutzerinnen und Anwender bzw. Anwenderinnen heute bereits davon ausgehen, dass z.B. "Cloud Anwendungen oder Cloud-KI" ("Wolken-Anwendungen") einen geringen Ressourcenverbrauch haben als z.B. eine traditionelle Desktop Anwendung. Jedoch ist das Gegenteil meistens der Fall.

Mit welchen Maßnahmen lässt sich eine systemübergreifende Allianz für eine nachhaltige Digitalisierung fördern?

Damit eine solche Organisation erfolgreich sein kann, können verschiedene Maßnahmen dabei helfen, sowohl die Organisation selbst zu befähigen als auch Instrumente zu schaffen, um eine Veränderung zu ermöglichen:

1. Förderung für den Aufbau einer unabhängigen "Allianz für nachhaltige Digitalisierung"

Die Politik sollte den Aufbau einer gemeinnützigen, unabhängigen Organisation fördern mit dem Ziel eine Plattform zu schaffen, die es Akteuren aus der Wertschöpfungskette, Forschung und Politik ermöglicht eine Nachhaltigkeitsroadmap zu entwickeln, Missionen abzuleiten und die Umsetzung zu begleiten. Die Politik sollte dabei die Schirmherrschaft übernehmen um die Unabhängigkeit von den Interessen einzelner Branchen oder Akteure zu gewährleisten und die Gemeinwohlorientierung der Organisation zu sichern.

2. Forschungsprojekt "Anreizsysteme für eine Allianz für nachhaltige Digitalisierung"

Das Projekt sollte die Frage nach formellen und informellen Anreizen für das Mitmachen in der Allianz durch Akteure und Akteurinnen aus verschiedenen Teilen der Wertschöpfungskette beantworten (insb. Hersteller von digitalen Services und Anbietern von digitaler Infrastruktur). Hier könnte es insbesondere um die Unterscheidung zwischen freiwilliger Mitarbeit und Zwang je nach Bereich und Aufgabe gehen.

3. Forschungsprojekt "Rechtliche Rahmenbedingungen für eine unabhängige Allianz für nachhaltige Digitalisierung"

Die Politik sollte ein Projekt fördern, das rechtliche Rahmenbedingungen für eine gestaltungsfähige Allianz für nachhaltige Digitalisierung schafft. Hier sollen insb. ihre Befugnisse und Schnittstellen im Kontext verschiedener Akteure und Akteurinnen definiert werden.

4. Einbindung einer Allianz für nachhaltige Digitalisierung in die Politik-Mix-Gestaltung

Die Allianz sollte durch die Politik in wesentliche Prozesse des Policy-Designs eingebunden werden. Hier kann sie die Bedürfnisse einer nachhaltigen Digitalisierung sowie die Bedürfnisse der Stakeholder und Stakeholderinnen einbringen und Feedback aus dem Politikprozess in Richtung privater Akteure kommunizieren.

Fazit

Es ist im Sinne der Gemeinschaft, die digitale Transformation der Wirtschaft, als auch unsere Gesellschaft, nachhaltig zu gestalten. Diese Gestaltung erfordert eine Organisation die globale Digitalkompetenz bündelt, Transparenz und Fakten schafft, unparteiisch agiert, sowie einen Nachhaltigkeitsfahrplan (Roadmap) bzw. Missionen begleitet. Sie übersetzt diesen Fahrplan in Handlungsempfehlungen und Strategien und fördert dadurch übergreifende Zusammenarbeit entlang der digitalen Wertschöpfungskette. Die hier dargestellten Handlungsoptionen für den Aufbau einer solchen unabhängigen Allianz sollen als erste Ideen verstanden werden, die es im Weiteren zu detaillieren gilt - damit die Allianz als Multiplikator die wesentlichen Akteure und Akteurinnen für eine nachhaltige Digitalisierung zusammenbringen kann.

Literaturverzeichnis

Dickson, B. (2020, September 21). The GPT-3 economy. TechTalks.
<https://bdtechtalks.com/2020/09/21/gpt-3-economy-business-model/>

Li, C. (2020, Juni 3). OpenAI's GPT-3 Language Model: A Technical Overview.
Lambda Blog. <https://lambdalabs.com/blog/demystifying-gpt-3/>

Über die Autor*innen

Daniel Wurm

Daniel Wurm ist Researcher des Forschungsbereichs „Digitale Transformation“ am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Seine Arbeitsschwerpunkte umfassen die Umweltwirkung der Digitalisierung sowie Governance-Fragestellungen an der Schnittstelle Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Oliver Zielinski

Prof. Dr. Oliver Zielinski ist Physiker, Meeresforscher und Entwickler intelligenter Sensoren für die Umweltbeobachtung. Er leitet im Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) den Forschungsbereich „Marine Perception“ und ist Sprecher des DFKI-Kompetenzzentrums „Künstliche Intelligenz (KI) für Umwelt und Nachhaltigkeit“ (DFKI4planet). Prof. Zielinski hat die Professur für Marine Sensorsysteme an der Universität Oldenburg inne.

Neeske Lübben

Neeske Lübben ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsbereich „Marine Perception“ am Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI). Sie ist Ansprechpartnerin für das DFKI-Kompetenzzentrum „Künstliche Intelligenz (KI) für Umwelt und Nachhaltigkeit“ (DFKI4planet).

Stephan Ramesohl

Dr.-Ing. Stephan Ramesohl ist Co-Leiter des Forschungsbereichs „Digitale Transformation“ am Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Perspektiven einer nachhaltigen Digitalisierung und der digital-ökologischen Industrietransformation.

Maike Jansen

Maike Jansen ist Researcherin des Forschungsbereichs „Digitale Transformation“ am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Schwerpunktmäßig befasst sie sich mit Digitalisierung als Treiber der sozial-ökologischen Transformation, der Schnittstelle Circular Economy und Industrie 4.0 sowie mit nachhaltigen digitalen Datenräumen.

Rebecca Heinz

Rebecca Heinz ist Referentin für Ressourcenpolitik und zirkuläres Wirtschaften. Sie arbeitet bei Germanwatch e.V. zu ressourcenpolitischen Fragestellungen an der Schnittstelle der digitalen Transformation und der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft. Ein besonderer Fokus ihrer Arbeit liegt derzeit auf den Chancen und Risiken digitaler Geschäftsmodelle für den Ressourcen- und Rohstoffverbrauch sowie auf der Umsetzung des Rechts auf Reparatur.

Andreas Moring

Andreas Moring ist Professor für Digitalwirtschaft und KI an der International School of Management (ISM) und Leiter des Hamburger Campus. Andreas Moring ist zusammen mit Vanessa Just Gründer und Leiter des juS.TECH Instituts für Data Science, KI und Nachhaltigkeit. Er veröffentlichte zuletzt Studien und Bücher zur Mensch-KI-Kooperation, den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen von KI Systemen und zu Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Immobilienwirtschaft. Moring studierte VWL, BWL und Geschichte, arbeitete bei einem europäischen Medienkonzern und einer Unternehmensberatung und gründete 2010 und 2011 eigene Unternehmen. Seit 2020 ist er Co-Founder und Aufsichtsrat der juS.TECH AG.

Vanessa Just

Dr. Vanessa Just ist Founderin und CEO der juS.TECH AG und bei team neu-sta für die KI Strategie zuständig. Sie promovierte in nachhaltiger Automatisierung und Digitalisierung von Geschäftsprozessen. Neben der beruflichen Tätigkeit hält sie Vorlesungen an verschiedenen deutschen Hochschulen und Universitäten und ist im KI Bundesverband e.V. Mitglied des Vorstands.

Lucas Spreiter

Lucas Spreiter ist Gründer und Geschäftsführer der Unetiq GmbH – einer Agentur für die Entwicklung Künstlicher Intelligenz in nachhaltigen Projekten. Daneben hat er im Jahr 2020 die Arbeitsgruppe „Klima und Nachhaltigkeit“ im Bundesverband Künstliche Intelligenz e.V. gegründet, welche sich sowohl mit den Möglichkeiten Künstlicher Intelligenz im Kontext der Nachhaltigkeit beschäftigt, als auch mit dem Einfluss von KI auf das Klima selbst.

Philipp Damm

Philipp Damm ist Founder und CFO der juS.TECH AG und arbeitet zudem als Projektleiter Produktentwicklung bei der Festo SE & Co. KG im Bereich Lifetech. Neben den beruflichen Tätigkeiten ist er ehrenamtlich in mehreren Vereinen und Hilfsorganisationen aktiv und engagiert sich neben sozialen Themen auch in der Arbeitsgruppe KI&Klima des KI Bundesverbands e.V. für nachhaltige Künstliche Intelligenz.

Ralph Hintemann

Dr. rer. pol. Ralph Hintemann ist Gesellschafter und Senior Researcher am Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Sein besonderes wissenschaftliches Interesse gilt den Nachhaltigkeitspotenzialen der Digitalisierung. Im Mittelpunkt seiner Forschungstätigkeit stehen Innovationsstrategien, neue Geschäftsmodelle für Nachhaltigkeitsinnovationen und die Erfolgsfaktoren für die Diffusion neuer Produkte und Technologien.

Ralph Hintemann studierte Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften an der RWTH Aachen und war dort von 1991 bis 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit den Schwerpunkten Innovations- und Umweltforschung beschäftigt. Im Jahr 2000 promovierte er am Institut für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen. Anschließend arbeitete er auf verschiedenen technologischen Gebieten beim Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. – BITKOM in Berlin, zuletzt als Bereichsleiter IT-Infrastruktur & Digital Office und als Leiter Business Excellence.

Simon Hinterholzer

Simon Hinterholzer ist Ingenieur für Erneuerbare Energien und arbeitet seit Mai 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Borderstep Institut. Er untersucht im Rahmen von Forschungsprojekten und Auftragsstudien sowohl die positiven als auch negativen Nachhaltigkeitswirkungen der Digitalisierung.

Ein Schwerpunkt seiner Arbeit liegt dabei auf der Nachhaltigkeitsbewertung von Rechenzentren und Cloud Computing. Ebenso forscht er an den Möglichkeiten zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich durch digitale Technologien, unter anderem mittels zeitdynamischer energetischer Bilanzierung. In diesen Bereichen hat er am Borderstep Institut unter verschiedene Forschungsprojekte für Bundesministerien sowie das Bundesland Hessen durchgeführt und daneben diverse Studien für nationale Digitalverbände sowie für die Europäische Kommission erstellt.

Tim Grothey

Tim Grothey ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Borderstep im Forschungsfeld Digitalisierung und Green IT. Nach dem Bachelorstudium International Business and Technology in Nürnberg und Valparaiso (Chile) zog es Tim Grothey für Praktika nach Berlin. Er sammelte dabei Erfahrungen in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit sowie in einem Beratungsunternehmen. Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Energie und Umweltressourcen an den Hochschulen für Wirtschaft und Recht Berlin sowie der Beuth-Hochschule für Technik Berlin. In seiner Arbeit interessiert er sich vor allem für die Möglichkeit, mit nachhaltigen Innovationen aus dem Ingenieurwesen Herausforderungen des Klimawandels anzugehen.

Bastian Bach

Dr. Bastian Bach leitet die Konzernfunktion des produktbezogenen Umweltschutzes bei der Siemens AG. Er begleitet u. a. die unternehmensweiten Umweltprogramme im Produktbereich, die das Ökodesign von Software und digitalen Services einschließen.

Ulrike Dowie

Dr. Ulrike Dowie ist Head of Transformation bei der Siemens AG Digital Industries. Mit ihrem Team entwickelt sie KI-basierte Softwarelösungen, um auf der Grundlage von Daten bessere Entscheidungen zu ermöglichen und Ressourcenverbrauch zu reduzieren.

Max Schulze

Max Schulze ist Gründer der Sustainable Digital Infrastructure Alliance (SDIA). Er bringt seine Erfahrungen als Software Engineer & Cloud Experte in Start-ups und größeren Unternehmen in die Transformation der digitalen Wirtschaft ein, um sie zukunftssicher und nachhaltig zu gestalten. Während seiner gesamten Karriere hat er sich dem Wohlergehen des Planeten und der Menschen verschrieben und engagiert sich für die Gestaltung einer positiven Zukunft für die nächste Generation.

Unterstützerinnen**Alyssa Gunnemann**

Alyssa Gunnemann studiert Economic Research im Master an der Universität zu Köln und ist wissenschaftliche Hilfskraft am Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie.

Rahel Weier

Rahel Weier ist wissenschaftliche Hilfskraft am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Mit einem Bachelorabschluss in Politikwissenschaft und Studium der Sozioökonomie setzt sie Schwerpunkte im Bereich Governance für eine digital-ökologische Circular Economy.

Über CO:DINA

Das Verbundvorhaben CO:DINA – Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit vernetzt Wissenschaft, Politik, Zivilgesellschaft und Wirtschaft, um neue strategische Stoßrichtungen für eine sozial-ökologische Digitalisierung zu identifizieren. Vielfalt in Denkweisen, Perspektiven und Erfahrungen ist die Voraussetzung, um die Komplexität der Digitalisierung besser zu verstehen und grundlegenden Fragen insbesondere zur Künstlichen Intelligenz mit tragfähigen Lösungsansätzen zu begegnen. Dabei entstehen Netzwerke zwischen Akteursgruppen, die bislang unzureichend verbunden waren. So wird die politische und gesellschaftliche Handlungsfähigkeit für einen sozial-ökologisch-digitalen Wandel gestärkt.

Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen der KI-Leuchtturminitiative gefördert und gemeinsam vom IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie umgesetzt.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum



IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH
Schopenhauerstr. 2614129 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 803088-0
Fax: +49 (0) 30 803088-88
Email: info@izt.de
Internet: www.izt.de



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
Tel.: +49 (0) 202-2492-101
Fax: +49 (0) 202-2492-108
E-Mail: info@wupperinst.org
Internet: www.wupperinst.org



Weitere Veröffentlichungen unter www.codina-transformation.de