

### 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

Wurm, Daniel; Zielinski, Oliver; Lübben, Neeske; Jansen, Maike; Ramesohl, Stephan

Veröffentlichungsversion / Published Version

Forschungsbericht / research report

#### Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

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.* (Wuppertal Report, 22). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. <https://doi.org/10.48506/opus-7828>

#### Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

#### Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

# 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

---

*Daniel Wurm*

*Oliver Zielinski*

*Neeske Lübben*

*Maike Jansen*

*Stephan Ramesohl*

**Herausgeber:**

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

**Autorinnen und Autoren:**

Daniel Wurm (daniel.wurm@wupperinst.org)  
Prof. Dr. Oliver Zielinski (oliver.zielinski@dfki.de)  
Neeske Lübben (neeske.luebben@dfki.de)  
Maike Jansen (maike.jansen@wupperinst.org)  
Dr.-Ing. Stephan Ramesohl (stephan.ramesohl@wupperinst.org)

„**Wuppertal Reports**“ sind Abschlussberichte aus Projekten, die von Auftraggebern zur Veröffentlichung freigegeben wurden. Sie sollen mit den Projektergebnissen aus der Arbeit des Instituts vertraut machen und zur kritischen Diskussion einladen. Das Wuppertal Institut achtet auf ihre wissenschaftliche Qualität. Für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Wuppertal, September 2021  
ISSN 1862-1953

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).  
Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Dieser Bericht ist ein Ergebnis des Forschungsvorhabens „CO:DINA – Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit“. Er wurde als solches bereits auf der Projektwebsite als Vorabpublikation zur Diskussion in der Forschungscommunity veröffentlicht. CO:DINA 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 umgesetzt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

***Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:***

Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., & Ramesohl, S. (2021). Wege in eine ökologische Machine Economy (Wuppertal Report Nr. 22). Wuppertal Institut.

***Projektlaufzeit:*** Mai 2020 – April 2023

***Projektpartner CO:DINA:***

IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH  
Schopenhauerstr. 26, 14129 Berlin  
Tel.: +49 30 803088-0  
Fax: +49 30 803088-88  
E-Mail [info@izt.de](mailto:info@izt.de)  
Internet: [www.izt.de](http://www.izt.de)

***Partner für die Erstellung dieser Studie:***

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz  
Kompetenzzentrum KI für Umwelt und Nachhaltigkeit  
Marie-Curie-Str. 1, 26129 Oldenburg  
Tel.: +49 631 20575-0  
Fax: +49 631 20575-5030  
E-Mail: [info@dfki.de](mailto:info@dfki.de)  
Internet: [www.dfki.de](http://www.dfki.de)

---

## Impressum

***Herausgeber:***

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19  
42103 Wuppertal  
[www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org)

***Stand:***

September 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>2 Wir betreten das Zeitalter der selbstständigen Maschinen</b>	<b>9</b>
<b>3 Der maschinelle Dialog und sein technologisches Fundament</b>	<b>11</b>
<b>4 Wertschöpfung und Akteurslandschaften werden neu konstruiert</b>	<b>12</b>
<b>5 Umweltbelastungen müssen im Gesamtsystem verstanden werden</b>	<b>13</b>
5.1 Wir haben kein genaues Bild der Umweltwirkung der Infrastruktur	13
5.2 Die Treiber der Umweltwirkung sind nicht ausreichend adressiert	14
<b>6 Wir brauchen eine „Grüne Governance der Machine Economy“</b>	<b>17</b>
6.1 Balancierung eines nachhaltigen Zielsystems	17
6.2 Herausforderungen an ein grünes Zusammenspiel der Technologien	18
6.2.1 <i>„Transparenz der Dinge“ für „Transparenz der Umweltwirkung“ einsetzen</i>	18
6.2.2 <i>„Internet of Everything“ -Mentalität nachhaltig ausrichten</i>	19
6.2.3 <i>Dynamische Anpassung und Komplexität ökologisch managen</i>	20
6.2.4 <i>Vernetzte Vielfalt grün gestalten</i>	21
6.3 Herausforderungen an ein Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen	22
6.3.1 <i>Digitalakteure in den Blick nehmen</i>	22
6.3.2 <i>Forschung stärker auf den ökologischen maschinellen Dialog ausrichten</i>	23
6.3.3 <i>Rahmen für eine nachhaltige Digitalpolitik bereitstellen</i>	23
<b>7 Fazit und Ausblick</b>	<b>24</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>25</b>

## Abkürzungsverzeichnis

BASCS	Business Alliance to Scale Climate Solutions
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
B2B	Business-to-Business
DAG	Directed Acyclic Graphs
DLT	Distributed Ledger Technology
KI	Künstliche Intelligenz
LTE	Long Term Evolution
IoT	Internet of Things
SDGs	Sustainable Development Goals
WLAN	Wireless Local Area Network

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1: Entstehung von Umweltwirkung im Gesamtsystem der Machine Economy</b>	<b>14</b>
<b>Abbildung 2: Herausforderungen an ein grünes Zusammenspiel der Technologien</b>	<b>18</b>
<b>Abbildung 3: Gestaltungsraum für eine "Grüne Governance der Machine Economy"</b>	<b>24</b>



## 1 Zusammenfassung

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. Internet of Things (IoT), Künstliche Intelligenz (KI) und Distributed Ledger Technology (DLT) sind das technologische Fundament der Machine Economy. Damit verbunden sind Infrastrukturen, Datenströme und Anwendungen, die hohe Energie- sowie Ressourcenaufwände erzeugen. 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. In diesem Papier sprechen wir uns für eine “Grüne Governance der Machine Economy” aus. Adressiert werden Annahmen zu systemübergreifenden Treibern von Umweltbelastungen und ihrer Wirkung. Ziel ist es, ein Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen und ein ökologisches Zusammenspiel aller beteiligten Technologien in der Wertschöpfung zu ermöglichen. Zukünftige Forschung soll die hier vorgestellten Hypothesen weiter ausarbeiten und konkrete Handlungsoptionen für eine Stakeholder übergreifende Roadmap erarbeiten.

## 2 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 Bezahlsystemen 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 Gestalter/-innen. 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, ausgesteuert 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.

### 3 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).

## 4 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 (Bleichschmidt & Stöcker 2016).

Den direkten Wertschöpfungsprozessen stehen neue Akteure in der Machine Economy gegenüber. Sie kommen aus der Wirtschaft, Politik, Zivilgesellschaft sowie der Forschung und koordinieren die Ausrichtung der Wertschöpfung. Neben den klassischen Akteuren rund um die physische Produktion und Logistik, konnten sich insbesondere neue Akteure 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, 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 Entwickler/-innen- bzw. Open Source Communities. Das Verständnis neuer Wertschöpfungsprozesse sowie einer sich wandelnden Akteurslandschaft ist die Basis der folgenden ökologischen Bewertung der Machine Economy.

## 5 Umweltbelastungen müssen im Gesamtsystem verstanden werden

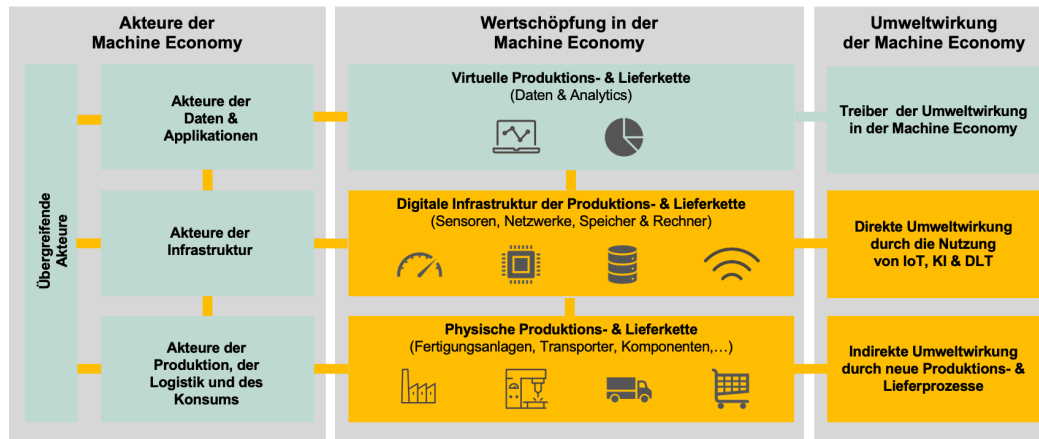
Die neue Architektur der Machine Economy bietet große Chancen und Lösungsmöglichkeiten – ist wie andere digitale Systeme aber gleichzeitig immer auch Teil des Problems, denn sie belastet die Umwelt. Um die Mechanismen hinter diesen Umweltbelastungen zu verstehen, müssen die dafür verantwortlichen Systembausteine 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 Akteuren 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.

### 5.1 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 1: 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 Montecvecchi 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.

## 5.2 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, 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 & Nicolaï 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) zusammengetan, 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.

## 6 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 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 mit ihren Abhängigkeiten, Machtfragen und Interessen, Strategien und Geschäftsmodellen in ein *Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen* eingebunden werden.

### 6.1 Balancierung eines nachhaltigen Zielsystems

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“, dass die Chancen der KI ihre Risiken übersteigen – vorausgesetzt die Technologie wird im Sinne der Nachhaltigkeit angesteuert (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.

## 6.2 Herausforderungen an ein grünes Zusammenspiel der Technologien

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



Abbildung 2: Herausforderungen an ein grünes Zusammenspiel der Technologien (eigene Darstellung)

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

Durch den Zugriff von Big Data Analytics und KI auf ubiquitäre Datenströme und die digitalen Zwillinge von Maschinen und Prozessen ist die Transparenz ein elementares Merkmal der Machine Economy. Diese Fähigkeit wird jedoch noch nicht in den Dienst der Nachhaltigkeit gestellt. Wir müssen uns darüber Gedanken machen, wie die Energie- und Ressourcenaufwände digitaler Technologien aus Datenströmen abgeleitet und in ein umfassendes Evaluierungs- und Monitoring-System der

Umweltwirkung in der Machine Economy integriert werden können. Zum Beispiel müssen wir zukünftig 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. Daneben müssen natürlich auch Energieaufwände bemessen werden.

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 anbieterübergreifend die ökologische Übersicht und Wege, diese für ihre Kunden in nachhaltige Geschäftsmodelle zu übertragen.

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.

### 6.2.2 „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 Entscheider/-innen und Entwickler/-innen 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/-innen 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.

### 6.2.3 Dynamische Anpassung und Komplexität ökologisch managen

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/-innen 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 Umgebungssituationen 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.

#### **6.2.4 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 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 (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.

Neben den in diesem Papier behandelten technologischen Herausforderungen, sollten abschließend auch jene Themengebiete weiter beobachtet werden, die sich zum jetzigen Zeitpunkt noch schwer bewerten lassen. Erstens zählen wir hierzu 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 müssen mögliche Umwelteffekte durch Cyberkriminalität im Kontext der Machine Economy untersucht werden. Ob z. B. Angriffe auf vernetzte Produktionskomponenten zu lokalen Ausfällen und umweltschädlichen Substitutionseffekten führen können, ist derzeit wenig behandelt.

### **6.3 Herausforderungen an ein Gesamtsystem nachhaltiger Entscheidungen**

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

#### **6.3.1 Digitalakteure in den Blick nehmen**

Zunächst gilt es die Rolle von Digitalakteuren 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 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 häufig je nach Kund/-in 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.

### **6.3.2 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.

### **6.3.3 Rahmen für eine nachhaltige Digitalpolitik bereitstellen**

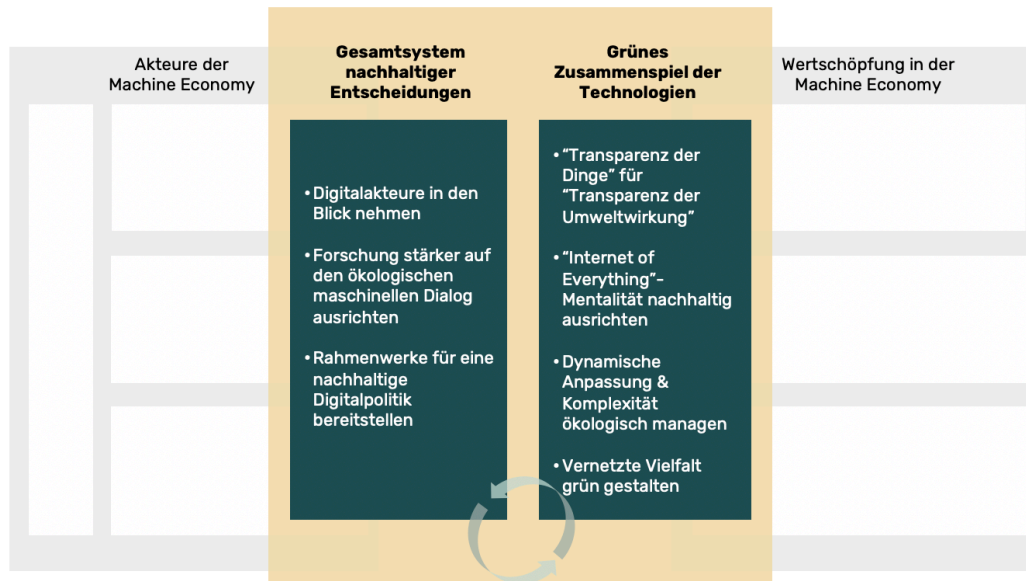
Die Verbindung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit rückt immer stärker in den Fokus des politischen Handelns, aber es mangelt an belastbaren Rahmenwerken für eine nachhaltige Steuerung der Machine Economy. Aufgrund der mehrdimensionalen Abhängigkeiten und Komplexität im industriellen Digitalsystem 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.



## 7 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 Akteuren.



**Abbildung 3: Gestaltungsraum für eine "Grüne Governance der Machine Economy" (eigene Darstellung)**

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 Akteuren 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/-innen im dynamischen digitalen Wandel handlungsfähig machen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Albreem, M. A., Sheikh, A. M., Alsharif, M. H., Jusoh, M., & Mohd Yasin, M. N. (2021). Green Internet of Things (GIoT): 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. (2020). 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](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf)
- Blechsmidt, 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](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](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-international-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](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., & Nicolaï, 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](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 CO<sub>2</sub>-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](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-europachancen-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](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>
- 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 (GIoT): Vision, applications and research challenges. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100448. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.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 CO<sub>2</sub>-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](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>