

Abschlussbericht

Die Umweltbilanz von Digitalisierungsstrategien im Rahmen von (Ultra-) Effizienzansätzen in der Produktion (UDEP)

Teilprojekt „Ultraeffizienz und Digitalisierung, Teil 2“ im Rahmen des Vorhabens
„Ultraeffizienzfabrik-Symbiotisch-verlustfreie Produktion im urbanen Umfeld“

von

Mario Schmidt, Eloy Melian, Kerstin Anstatt, Nadine Rötzer, Philipp Schäfer

Hochschule Pforzheim

Förderkennzeichen: L75 18002

Laufzeit: 01.01.2018 - 31.12.2020

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Dezember 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

I	Einleitung.....	1
II	IKT und Life Cycle Assessment.....	2
II.a	Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) – Endgeräte.....	2
II.b	Rechenzentren	7
II.c	Datenübertragungsnetze	8
II.d	Verkehr	12
II.e	IKT in der Produktion.....	17
II.f	Rohstoffbedarfe der Elektrizitätsbereitstellung.....	18
III	Indikatorenfrage.....	21
IV	Methodik von Gesamtszenarien	25
V	Konzeptvorschlag	30
VI	IKT in der Produktion.....	33
VII	Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft	37
VIII	Schlussfazit	41
	Literaturverzeichnis.....	42

I Einleitung

Die Digitalisierung spielt hinsichtlich der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung eine zentrale Rolle. Die Auswirkung der Digitalisierung auf unsere Umwelt ist jedoch umstritten. Es stehen zwei gegenläufige Effekte im Vordergrund: Zum einen benötigt die Digitalisierung, oder allgemeiner Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) elektrische Energie und ist somit mit Umweltbelastungen verbunden. Zum anderen trägt sie zur intelligenten Steuerung und Überwachung von Geräten und Prozessen bei und kann somit zur Reduktion des Energiebedarfs und der damit verbundenen Umweltbelastungen führen. Um beide Effekte einzubeziehen und somit eine ganzheitliche ökologische Bewertung der Digitalisierung vorzunehmen, bedarf es einer systematischen Konzeption und soliden Datenbasis. Beides ist bislang nicht vorhanden, sondern es existieren lediglich einzelne exemplarische Studien. Es besteht daher die Notwendigkeit, die Datengrundlage zu sondieren, methodische Zugänge zu prüfen und einen konzeptionellen Rahmen für die ökologische Bewertung solcher Ansätze wie der Digitalisierung der Produktion bzw. der Ultraeffizienzfabrik zu entwickeln. In Kapitel II wird dazu der Stand der Forschung dargelegt und ausgewertet. Darauf aufbauend wird in Kapitel III erörtert, welche Indikatoren im Rahmen einer ökologischen Bewertung der Digitalisierung berücksichtigt werden sollten. Kapitel IV geht der Frage nach, wie die anfangs aufgezeigten gegenläufigen Effekte der Digitalisierung, also Nutzen und Aufwand einer Technologie oder gar ganzer Technologiebereiche gegeneinander aufgerechnet werden können. Basierend auf diesen Überlegungen wird in Kapitel V ein Konzeptvorschlag erarbeitet. Kapitel VI und VII befassen sich detaillierter mit dem Einsatz von IKT in den Bereichen Produktion und Kreislaufwirtschaft. Ein abschließendes Fazit wird in Kapitel VIII gezogen.

II IKT und Life Cycle Assessment

Das LCA ist die am weitesten entwickelte Methode zur ökologischen Bewertung von Produkten oder Handlungen. Es arbeitet mit einem großen Indikatorensatz, die Analysen sind umfangreich und beziehen sich meistens nur auf wenige Produkte bzw. Einzelkomponenten. Für den IKT-Bereich gibt es vergleichsweise wenige veröffentlichte LCA. Bei Elektronik kommt es entscheidend auch auf den Einsatz von geringen Materialmengen (z.B. Dotierungen, Goldkontakten etc.) an, die aber von den Herstellern meistens vertraulich behandelt werden. Deshalb ist die Abschätzung der ökologischen Auswirkungen des IKT-Einsatzes schwierig. In diesem Arbeitsschritt werden umfangreiche Recherchen über entsprechende Fachliteratur und Datenbanken vorgenommen, zusammengestellt und ausgewertet. Insbesondere sollen dabei auch die Hot Spots der ökologischen Wirkungen von IKT benannt werden.

Einer der großen globalen Megatrends ist die Digitalisierung. Von schnellerem mobilem Internet, über autonomes Fahren, bis zur Industrie 4.0, die Digitalisierung schreitet in allen Bereichen der Gesellschaft und Wirtschaft voran. Welche ökologischen Folgen damit verbunden sind, ist bereits seit mehreren Jahren Forschungsgegenstand. Die Erkenntnisse sind bisher jedoch sehr überschaubar. Nachfolgend ist ein aktueller Stand der Forschung wiedergegeben. Das weitläufige Feld der Digitalisierung bzw. der damit einhergehenden Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)¹ ist dabei in folgende Cluster eingeteilt: (1) IKT-Endgeräte, (2) Rechenzentren, (3) Datenübertragungsnetze, (4) Verkehr, (5) Industrie 4.0. Zu den Datenübertragungsnetzen und Endgeräten der IKT Branche sind zudem Abschätzungen über den Rohstoffbedarf vorgenommen. Abschließend werden basierend auf den Ergebnissen der Literaturanalyse mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Forschung identifiziert.

II.a Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) – Endgeräte

Bereits im Jahr 2006 haben Hilty et al. (2006) die Umweltwirkungen der IKT Anwendungen bis zum Jahr 2020 für die Europäische Union abgeschätzt. Die Ergebnisse sind aufgrund der Unsicherheiten dieser Zukunftsprognose in Bandbreiten angegeben. Die prognostizierten Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 weisen im Vergleich zum Basisjahr 2000 nur geringfügige Änderungen auf. Wesentlich Gründe hierfür sind die prognostizierten steigende energetische Effizienz der Endgeräte, die den Gesamtenergiebedarf trotz der zunehmenden Anzahl an Endgeräten auf einem weitestgehend konstanten Niveau hält. Auch Malmodin et al. (2013), die ebenfalls den Zeithorizont bis 2020 ausgewählt haben, verweisen auf diese Effizienzsteigerungen, rechnen allerdings mit einem deutlichen Anstieg der Treibhausgasemissionen, wie er auch bereits in der Vergangenheit zu beobachten war (van Heddeghem et al. 2014). Der globale Energiebedarf (Elektrizität) für die reine Nutzung der IKT-Endgeräte lag im Jahr 2012 bei 307 TWh (van Heddeghem et al. 2014).

Malmodin et al. (2014) haben eine sehr umfangreiche Studie über die Umweltwirkungen von IKT Anwendungen in Schweden angefertigt. So ist hier u.a. zwischen den möglichen mobilen Daten (Breitband; mobile Daten 2G, 3G) differenziert und die Netzinfrastruktur mitberücksichtigt. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die Herstellung und Nutzung der IKT-Endgeräte ca. 50 % der Gesamtemissionen ausmachen. Die Netzinfrastruktur (Antennen, Leitungen etc.) nimmt nach den

¹ Unter IKT werden alle Komponenten und Infrastruktur verstanden, die die moderne Datenverarbeitung ermöglichen.

Berechnungen dieser Studie einen nur geringen Anteil ein. In einer aktuellen Studie haben dieselben Autoren die Analyse für einen globalen Untersuchungsrahmen durchgeführt. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass derzeit 6,4 % des globalen Energiebedarfs (Elektrizität) und 2,6 % der globalen Treibhausgasemissionen auf die Nutzung von IKT² zurückzuführen ist (Malmodin und Lundén 2018).

Neben den oben zitierten Studien können noch zahlreiche weitere aufgeführt werden (u.a. Andrae und Edler 2015a; Fehske et al. 2011; GeSI 2015b; Stobbe et al. 2015b) – es existiert also eine gute Datenbasis, die umfangreiche und detaillierte Untersuchungen der (Energie-)Aufwände der ITK-Nutzung erlaubt. Die positiven Effekte der fortschreitenden IKT-Brache und damit dieses Bereiches der Digitalisierung zu erfassen, ist weniger fundiert. Eine Literaturübersicht von Bieser und Hilty (2018a) zeigt auf, dass zwar erste Forschungsansätze in diesem Bereich betrieben wird, allerdings noch wesentliche Inkonsistenzen und Wissenslücken bestehen. In einer weiteren Studie zeigen diese Autoren auf, dass die Quantifizierung der positiven Effekte durch fehlende methodische Fundierung zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen kann und somit auch gerne überschätzt wird (Bieser und Hilty 2018b). Eine jüngst veröffentlichte Studie von Lange et al. (2020), hat sich ebenfalls mit dieser Fragestellung befasst und kommt, basierend auf einem theoretischen Modell, das durch zahlreiche Literaturwerte gespeist wurde, zu dem Ergebnis, dass die positiven Effekte der IKT Nutzung durch die damit verbundenen Aufwände überkompensiert werden und die Digitalisierung damit mehr Energie benötigt als sie einspart. Verantwortlich dafür sind u.a. Rebound-Effekte und die Energiebedarfe der IKT-Geräte, die zusätzlich zu den Energiebedarfen der Volkswirtschaften hinzukommen. Zudem trägt das Wachstum des IKT-Sektors entscheidend dazu bei, dass auch die gesamte Wirtschaft wächst. Eine Studie von Higón et al. (2017) – ebenfalls eine makroskopische Untersuchung – kommt zu einem gegenteiligen Ergebnis. Es herrschen also noch deutliche Unsicherheiten. Weitere Informationen zur vollumfänglichen Bewertung von Digitalisierung bzw. deren Maßnahmen sind in Kapitel IV enthalten.

Ein Teilbereich der Aufwände der IKT-Branche ist bis dato noch kaum bzw. wenig detailliert untersucht – der Rohstoffaufwand. Laut Cabarnard (2019) ist der globale Material Footprint durch IKT von 1995 bis 2015 um das 4-fache gestiegen. Materialien verursachen rund 60 % der globalen Treibhausgasemissionen. Räumlich gesehen entstehen die meisten Emissionen in China, da dort viele der Rohstoffe und Energieträger für die Produktion der IKT abgebaut und Materialien produziert werden. Umfangreiche Hochrechnungen zum Rohstoffbedarf der Endgeräte des IKT Sektors lassen sich bis dato noch keine in der Literatur finden. Daher wurde eine Abschätzung der Entwicklung der Rohstoffbedarfe der weltweit auf den Markt gebrachten wesentlichsten Endgeräte (Desktops, Notebooks, Tablets, Smartphones, Mobiltelefone) vorgenommen. Dabei ist die Zeitspanne von 2010-2023 untersucht.

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Stückzahlen der untersuchten Produkte. Deutlich zu erkennen ist der Technologiewechsel von den klassischen Mobiltelefonen zu den Smartphones, die nach Stückzahlen die mit Abstand dominierende Produktgruppe sind. In Summe über alle untersuchten Produktgruppen hinweg haben sich jedoch kaum Änderungen ergeben. Der Absatz aller untersuchten IKT Geräte soll im Jahr 2023 2.123 Mio. Stück betragen und wird damit nur um ca. 8 % über den Absatzzahlen des Jahres 2010 liegen. Mögliche Änderungen der Verkaufszahlen ab 2020 durch die aktuelle Corona-Krise sind in dieser Auswertung nicht erfasst.

² inkl. der Nutzung der IKT aus Unterhaltungszwecken

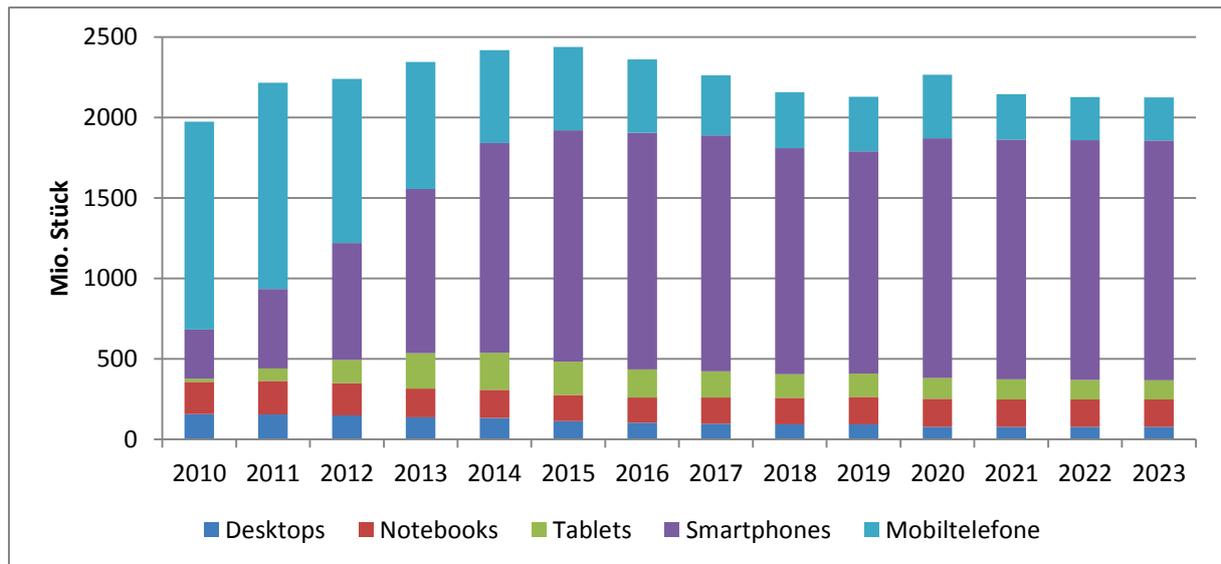


Abbildung 1: Stückzahl der jährlich auf den Markt gebrachten Endgeräte des IKT Sektors (nach Auswertungen von Tenzer (2019, 2020a, 2020b))

Die reine Masse des Bedarfs an Metallen, die notwendig ist, um die IKT-Endgeräte zu produzieren, ist über die untersuchte Zeitspanne um 60 % gesunken – siehe Abbildung 2. Das ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass der globale Absatz an Desktops seit 2010 abgenommen hat und diese Produktgruppe trotz verhältnismäßig geringer Stückzahl den größten Massenanteil ausmacht.

Entwicklungen die ebenfalls dazu beigetragen haben, dass sich der Rohstoffbedarf über die vergangenen Jahre verringert hat, sind die Miniaturisierung von Produkten und Bauteilen sowie gezielte Materialeinsparungen. So konnte z.B. nur durch die Miniaturisierung von Tantalkondensatoren die Entwicklung von Smartphones ermöglicht werden, die mehr Leistung auf kleinerem Raum unterbringen müssen. Seit 1970 konnte die Größe der Tantalkondensatoren im den Faktor 200 gesenkt werden, bei einer gleichzeitigen Kapazitätssteigerung um den Faktor 15 (Both 2016). Nach Ueberschaar et al. (2017) liegt der durchschnittliche Tantalgehalt heutiger Smartphones, der auf die Kondensatoren zurückzuführen, ist bei 7 % des Tantalgehaltes von klassischen Mobiltelefonen. Auch bei anderen Metallen sind über die Jahre abnehmende Konzentrationen zu beobachten. So haben Edelmetalle und Kupfer in Elektrogeräten allgemein signifikant abgenommen (Schäfer 2020). Ein weiteres produktspezifisches Beispiel sind Mobiltelefone, die ebenfalls deutliche Konzentrationsminderungen in zahlreichen Edel- und Technologiemetallen über die letzten zwei Jahrzehnte aufweisen (Christian et al. 2014). Es ist anzunehmen, dass die über die Jahre gesunkenen Metallkonzentrationen nicht nur den Rohstoffbedarf gesenkt haben, sondern dadurch auch das Recycling maßgeblich gehemmt wurde bzw. einen höheren Aufwand im Recycling bedingt (Schäfer und Schmidt 2019).

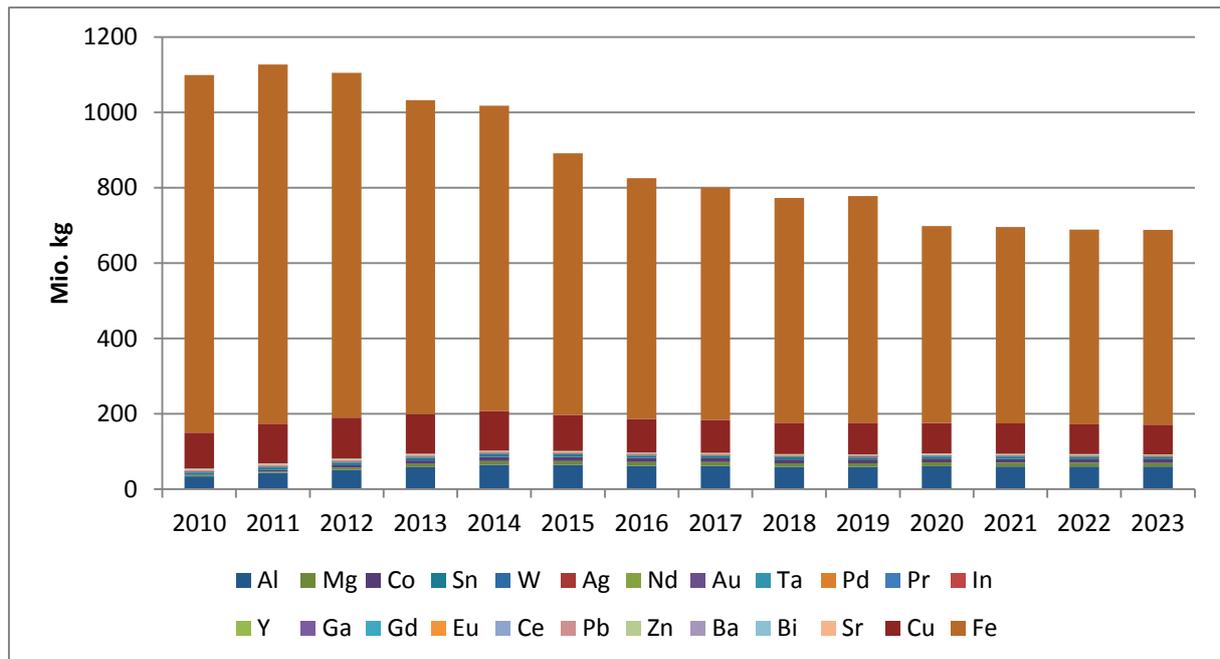


Abbildung 2: Globale Rohstoffbedarfe der IKT-Endgeräte (Desktops, Notebooks, Tablets, Smartphones und Mobiltelefone; eigene Berechnung: stoffliche Zusammensetzung nach Angaben von Manhart et al. (2016) und Oguchi et al. (2011), Produktgewicht nach Ueberschaar et al. (2017), Verkaufszahlen nach Tenzer (2019, 2020a, 2020b))³

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass die Massenmetalle – insbesondere Eisen, Kupfer und Aluminium – den größten Massenanteil der Rohstoffbedarfe ausmachen. Gemessen an ihrer Weltjahresproduktion sind diese Mengen aber vernachlässigbar. Im Falle der Edel- und Technologiemetalle hingegen, die einen nur sehr geringen Massenanteil ausmachen, fließt ein nennenswerter Anteil ihrer Weltjahresproduktion des Jahres 2018 in die Produktion der IKT-Endgeräte. Siehe hierzu Abbildung 3.

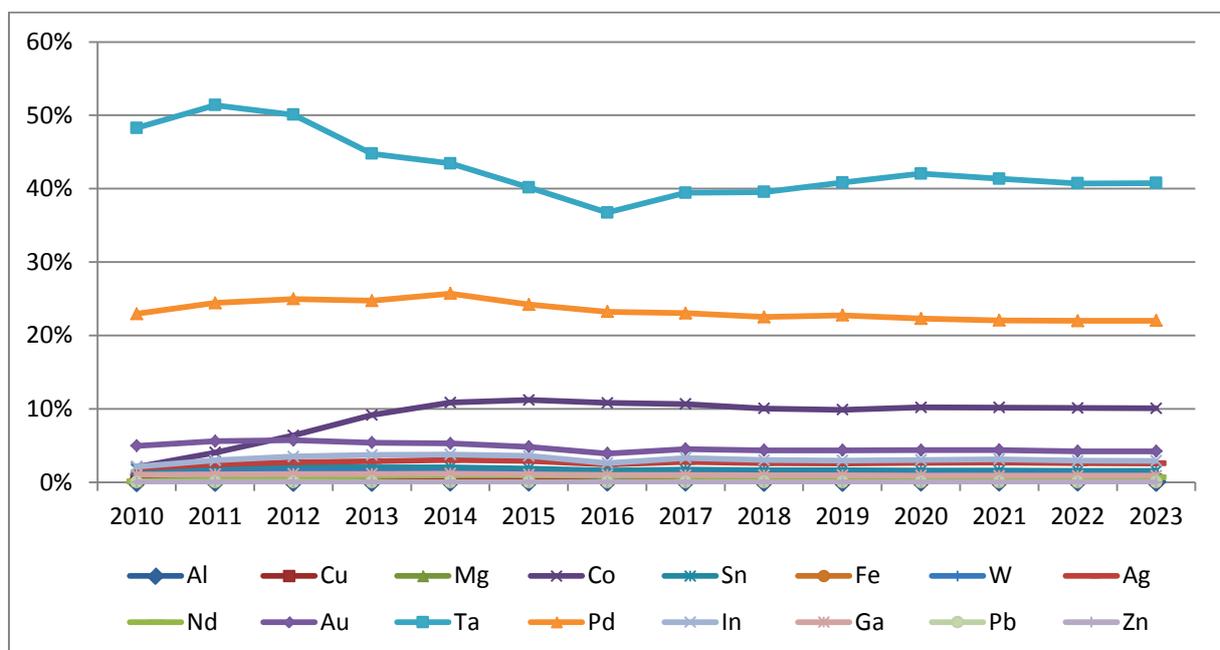


Abbildung 3: Anteile der Metallbedarfe für die IKT-Endgeräte an deren Weltjahresproduktion 2018 (eigene Berechnung nach Abbildung 2 und U.S. Geological Survey (USGS) (2019))

³ Änderungen in den stofflichen Zusammensetzungen der IKT-Endgeräte können aufgrund fehlender Daten nicht betrachtet werden

Der Rohstoffbedarf der IKT-Endgeräte ist also insbesondere im Falle von Edel- und Technologiemetallen relevant. Ein wesentlicher Aspekt der Rohstoffbereitstellung ist der dafür notwendige Energiebedarf bzw. die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen (Schmidt et al. 2020). Abbildung 4 zeigt, welche Energiebedarfe notwendig sind, um die Rohstoffe der IKT-Endgeräte bereitzustellen.

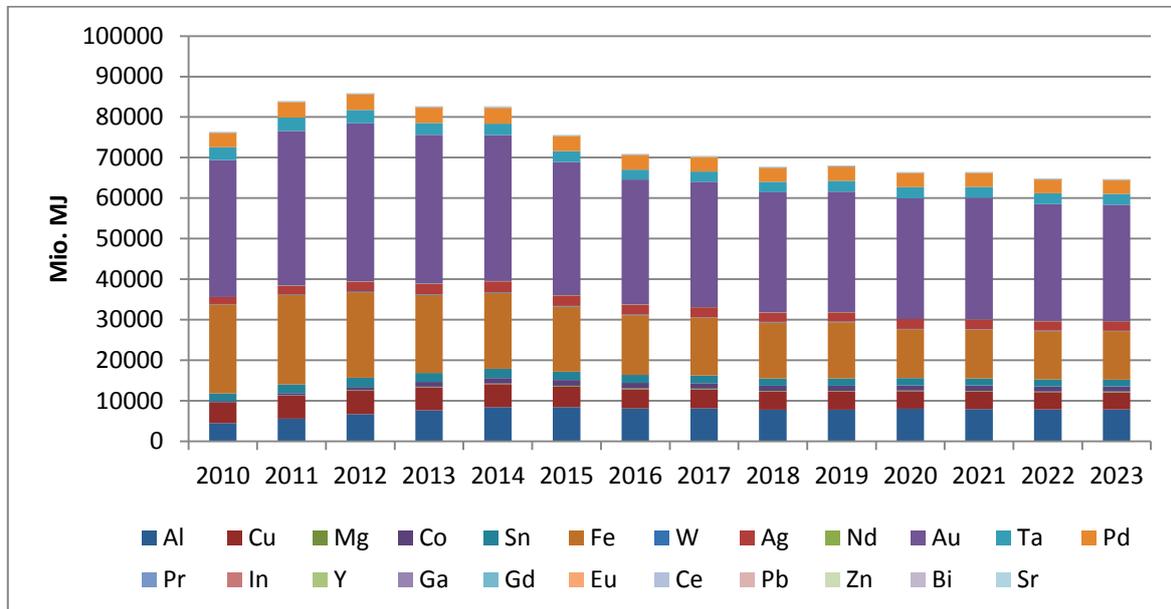


Abbildung 4: Kumulierter Energiebedarf der Metallbereitstellung für die Produktion der IKT-Endgeräte (eigene Berechnung nach Abbildung 2 und metallspezifischen Energiewerten nach Nuss und Eckelman (2014))

Der jährliche kumulierte Energiebedarf (KEA) für die Bereitstellung der Metalle für die Produktion der IKT-Endgeräte folgt in etwa dem Verlauf des Rohstoffbedarfs aus Abbildung 2. Er ist jedoch über das vergangene Jahrzehnt um nur 18 % gesunken und hat damit deutlich weniger abgenommen als der massenbilanzielle Rohstoffbedarf. Durch den Rückgang von Desktops, die einen hohen Eisenanteil aufweisen (insbesondere Gehäuse), wurde ein deutlicher Rückgang des massenbilanziellen Rohstoffbedarfs realisiert (siehe Abbildung 2). Da Eisen jedoch einen verhältnismäßig niedrigen KEA pro Masseneinheit in der (primären) Produktion benötigt (Nuss und Eckelman 2014), sind die Auswirkungen auf den KEA der gesamten Metallbereitstellung relativ gering.

Abbildung 4 veranschaulicht nochmals die Bedeutung des Bedarfes der Edel- und Technologiemetalle für die IKT-Branche. Trotz relativ geringer Massenanteile macht Gold ca. 44 % des gesamten KEA der gesamten Metallbereitstellung aus. Auch Tantal, Palladium und Silber machen jeweils ca. 4-5 % aus. In Summe wurden im Jahr 2019 ca. 19 TWh an KEA benötigt, um die Metalle für die (in diesem Jahr produzierten) IKT-Endgeräte Desktops, Notebooks, Tablets, Smartphones und Mobiltelefone bereitzustellen. Das entspricht weniger als 1 % des KEA des jährlichen Strombedarfs dieser Endgeräte (van Heddeghem et al. 2014; Malmodin und Lundén 2018).

Hischier et al. (2015) und Malmodin und Lundén (2018) zeigen anhand beispielhafter Untersuchungen von IKT-Geräten, dass die Herstellungsphase einen großen Anteil der lebenszyklusübergreifenden Energiebedarfe und auch zahlreichen weiteren Umweltwirkungen ausmachen kann. Beide Studien verweisen zudem darauf, dass der Trend hin zu kleineren Endgeräten, wie z.B. vom Desktop zum Notebook zum Tablet, tendenziell weniger Energie in der Nutzung wie auch der Produktion benötigt, wobei bei mit abnehmender Größe der IKT-Endgeräten

die Herstellungsphase dominanter wird. Ein Laptop hat bereits einen größeren „inhärenten Energiegehalt“ – bestimmt durch die eingesetzten Rohstoffe und den Herstellungsaufwand – als er Energie in der Nutzungsphase benötigt. Der Anteil der reinen Rohstoffbereitstellung (z.B. Metallproduktion) an der gesamten Herstellungsphase ist dabei allerdings verhältnismäßig gering. Malmodin und Lundén (2018) haben über zahlreiche IKT-Endgeräte hinweg einen Anteil der Rohstoffbereitstellung an den Treibhausgasemissionen der Herstellungsphase von ca. 15 % ermittelt. Die verbleibenden 75 % der Treibhausgasemissionen sind den Aufwänden (insbesondere Energieaufwände) der Herstellungsprozesse der IKT-Endgeräte bzw. den zahlreichen Halbzeugen/Zwischenprodukten (z.B. Wafer, Kondensatoren etc.) zuzuschreiben.

II.b Rechenzentren

Die Rechenzentren sind unmittelbar mit der IKT-Branche verbunden und daher auch in den meisten Untersuchungen mitberücksichtigt (siehe z.B. Malmodin et al. 2014). Viele Publikationen untersuchen auch explizit nur Rechenzentren, denn durch aktuelle Entwicklungen der IKT-Brache wie z.B. Cloud-Computing wird in Zukunft eine immer höhere Rechenleistung benötigt werden (Avgerinou et al. 2017). Hinzu kommen weitere Technologien wie z.B. das autonome Fahren, die ebenfalls von Rechenzentren abhängig sind (Hecht 2016). Nach Angaben der International Energy Agency (IEA) wurden im Jahr 2014 ca. 200 TWh an elektrischer Energie für den Betrieb von Rechenzentren benötigt. Das entspricht etwa 1% des globalen Stromverbrauchs. Trotz der prognostizierten Verdreifachung der Rechenleistung bis 2020, rechnet die IEA nur mit einem marginalen Anstieg des Strombedarfs von 3%. Dieses Phänomen ist durch Effizienzgewinne begründet (IEA 2017). Detaillierte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz sind u.a. in Habibi Khalaj et al. (2016) vorgeschlagen.

Die zentrale Kenngröße bei der Effizienzbewertung von Rechenzentren ist die „Power Usage Effectiveness“ (PUE). Dabei wird der gesamte Strombedarf eines Rechenzentrums ins Verhältnis zum Strombedarf für die reine Rechenleistung gesetzt. Je geringer der PUE, desto höher die Effizienz des Rechenzentrums. Optimal wäre ein PUE von 1. In diesem Fall würde kein Stromverbrauch für die unterstützende Infrastruktur wie z.B. Kühlung, Umwandlungsverluste etc. benötigt. Der Großteil der in Europa lokalisierten Rechenzentren weist einen PUE von 1,4-2,0 aus (Avgerinou et al. 2017).

Die PUE Kennzahl als Effizienzindikator steht vielfach in der Kritik. Eine wesentliche Schwachstelle ist dabei, dass Effizienzgewinne bei der Rechenleistung (geringerer Strombedarf bei gleicher Rechenleistung) nicht zwingend zu einer besseren Gesamteffizienz im Sinne des PUE führen. Das ist dann der Fall, wenn der Strombedarf für die Rechenleistung durch Effizienzgewinne abnimmt, der Strombedarf der Infrastruktur aber konstant bleibt. Der PUE verschlechtert sich. Zudem ermöglicht der PUE keine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Rechenzentren. Ein Beispiel hierfür ist die Standortabhängigkeit, da bereits das Klima des jeweiligen Standortes die Effizienz des Rechenzentrums beeinflusst (mehr Kühlleistung an wärmeren Orten) (Zoie et al. 2017). Ein weiteres Problem ist, dass der PUE meist die einzige Kennzahl ist, die von Betreibern veröffentlicht wird. Aus dieser Kennzahl lässt sich jedoch keine Aussage über den tatsächlichen Energiebedarf treffen. Eben dieser Energiebedarf ist jedoch maßgeblich, wenn die Umweltwirkung der Rechenzentren bzw. der Technologien, die auf die Rechenleistung zurückgreifen, ermittelt werden soll (Reddy et al. 2017). Es ist also eine umfangreichere und differenziertere Berichterstattung der Betreiber notwendig, um die Energiebedarfe und Umweltwirkungen der Rechenzentren besser zu erfassen.

Einer Abschätzung von Borderstep (2012) zufolge beträgt der Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland 16.500 t Stahl, 6.500 t Kunststoff, 5.600 t Aluminium., 4.400 t Kupfer und 4.000 t Glas/Keramik. Die enthaltene Bestandsmasse an Edelmetallen ist auf 15 t geschätzt. Davon sind etwa 50 % auf Silber und 12 % auf Gold zurückzuführen (Borderstep 2012).

II.c Datenübertragungsnetze

Ebenso wie die Rechenzentren sind auch die Internet-Datenübertragungsnetze auf die IKT-Nutzung zurückzuführen (IEA 2017) und in den oben zitierten IKT-spezifischen Untersuchungen bereits inkludiert. Die rasanten Entwicklungen in den vergangenen zwei Jahrzehnten sowie die noch zu erwartenden technologischen Neuerungen der Datenübertragung (siehe u.a. Hecht 2016) benötigen allerdings eine differenzierte Betrachtung. Bereits im Jahr 2015 wurden weltweit für die Datenübertragung 185 TWh an elektrischer Energie benötigt. Dieser Wert entspricht 1 % des globalen Strombedarfs. 75 % davon sind auf die mobile Internetnutzung zurückzuführen, die pro übertragene Datenmenge wesentlich mehr Energie benötigen als die Festnetzübertragung. Dabei ist die Technologie von entscheidender Bedeutung. Während ein Festnetzanschluss im Schnitt $<0,1$ kWh/GB benötigt, verbraucht die 2G Technologie >10 kWh/GB, die 3G Technologie >1 kWh/GB und die 4G Technologie nur noch zwischen 0,1 und 1 kWh/GB. Die mobile Datenübertragung wird in Zukunft immer wichtiger werden (IEA 2017). Auch die neue 5G Technologie wird einen intensiven Ausbau erfahren, denn nur durch sie ist z.B. das autonome Fahren möglich (Hecht 2016). Wie hoch der Energiebedarf der 5G Technologie genau ist, wurde bis dato noch nicht veröffentlicht. Bekannt ist jedoch, dass die 5G Technologie wesentlich weniger Energie pro übertragene Datenmenge benötigt als die derzeit gängigen Technologien (Frenger und Tano 2019). In Bieser et al. (2020) wird hierzu ein konkreter Wert von 30,3 g CO₂-Äq/GB übertragene Datenmenge durch die 2-4 G Technologien und lediglich 4,5 g CO₂-Äq/GB für die 5 G Technologie genannt. Gleichzeitig ist jedoch davon auszugehen, dass die weltweit übertragene Datenmenge steigen wird, denn pro Zeiteinheit kann durch 5G ein Vielfaches an Datenmenge übermittelt werden, als mit derzeit gängigen Technologien. Bereits im vergangenen Jahrzehnt war ein überproportionaler Anstieg der global übertragenen Datenmengen zu beobachten, insbesondere durch mobile Daten und WLAN, genutzt durch mobile Endgeräte wie z.B. Smartphone (IEA 2017). Der Entwicklungsschritt auf 5G wird also in Bezug auf den Energiebedarf aller Wahrscheinlichkeit nach durch starke Reboundeffekte begleitet werden.

Wie sich zukünftig der gesamte Energiebedarf der Datenübertragung entwickeln wird, hängt stark von der Energieeffizienz ab, die realisiert werden kann. Nach Angaben der IEA (2017) kann der globale Energiebedarf um 70 % steigen (moderate Effizienzgewinne) oder um 15 % fallen (hohe Effizienzgewinne). Zu den derzeitigen und zukünftigen Energiebedarfen der Datenübertragung gibt es noch weitere umfassende Untersuchungen (u.a. Andrae und Edler 2015a; IEA 2017; Pihkola et al. 2018; Ericsson 2015).

Ein Aspekt, der bei einem verstärkten Ausbau der 5G Technologie noch berücksichtigt werden muss, ist die Infrastruktur. Erste praktische Untersuchungen in Tokio haben gezeigt, dass für eine flächendeckende Gigabitversorgung mit der 5G Technologie die Antennen maximal 75-100 Meter voneinander entfernt sein dürfen (Wernik et al. 2016). Nach Angaben eines Mitarbeiters der Deutschen Funkturm GmbH beträgt die Distanz max. 200 Meter (Cools 2019).

In einem jüngst erschienenen Bericht von Bieser und Kollegen sind die Energiebedarfe, die mit dem Ausbau der 5G Technologie in der Schweiz verbunden sind, analysiert. Untersucht wurden die Herstellung und der Betrieb der erforderlichen Netzinfrastruktur des Anbieters Swisscom. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass durch diese Aktivitäten im Jahr 2030 voraussichtlich 0,018 Mt CO₂-Äq emittiert werden. Diese Emissionen teilen sich zu 57 % auf die Herstellungsphase (Momentaufnahme der bestehenden Infrastruktur des Jahres 2030) und zu 43 % auf die Nutzungsphase auf. Neben diesen direkten Effekten, wie sie von den Autoren bezeichnet werden, werden durch den Ausbau der 5G Technologie auch Anwendungen ermöglicht, die zu Einsparungen an Treibhausgasemissionen führen können – die sogenannten indirekten Effekte. In der Studie wurden vier Anwendungen untersucht, die als besonders vielversprechend eingeschätzt werden: flexibles Arbeiten, Smart Grid, automatisiertes Fahren und Präzisionslandwirtschaft. Je nach Szenario kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass sich, alleine durch diese vier Anwendungen 0,1-2,1 Mt CO₂-Äq/Jahr einsparen lassen. Damit wäre der prognostizierte Ausbau der 5G Technologie in jedem Szenario emissionsmindernd. Neben der Infrastruktur des 5G Ausbaus, werden jedoch auch zusätzliche Informations- und Kommunikationstechnologien notwendig (z.B. Roboter und Drohnen für die Landwirtschaft). Die damit verbundenen Emissionen (Herstellung und Nutzung) schätzen die Autoren auf ca. 0,16 Mt CO₂-Äq/Jahr (Bieser et al. 2020).

Die prognostizierten Auswirkungen der zukünftigen infrastrukturellen Entwicklungen der 5G Technologie deuten also auf Treibhausgasemissionsminderungen durch die damit verbundenen Digitalisierungsmaßnahmen hin. Um einen etwas umfassenderen und vor allem aktuellen Überblick über die Aufwände, die mit der Infrastruktur der Digitalisierung verbunden sind, zu bekommen, werden nachfolgend die dafür notwendigen Rohstoffbedarfe ermittelt und bewertet.

In den 90er Jahren hat die digitale Vernetzung der Welt durch das Internet in nennenswertem Umfang begonnen. Um die Jahrtausendwende lagen bereits 1 Mio. km an Internetkabel in den Weltmeeren und an Land. Dieser Anstieg ist insbesondere auf den sprunghaften Ausbau der Onshore Internetverbindung Ende der 90er Jahre zurückzuführen. Bis zum Jahr 2021 werden knapp 3 Mio. km an Onshore und Offshore Kommunikationskabeln verlegt sein (Infrapedia 2019). Mit dieser Länge könnte die Erde 75-mal umrundet werden. Abbildung 5 veranschaulicht diese Entwicklung.

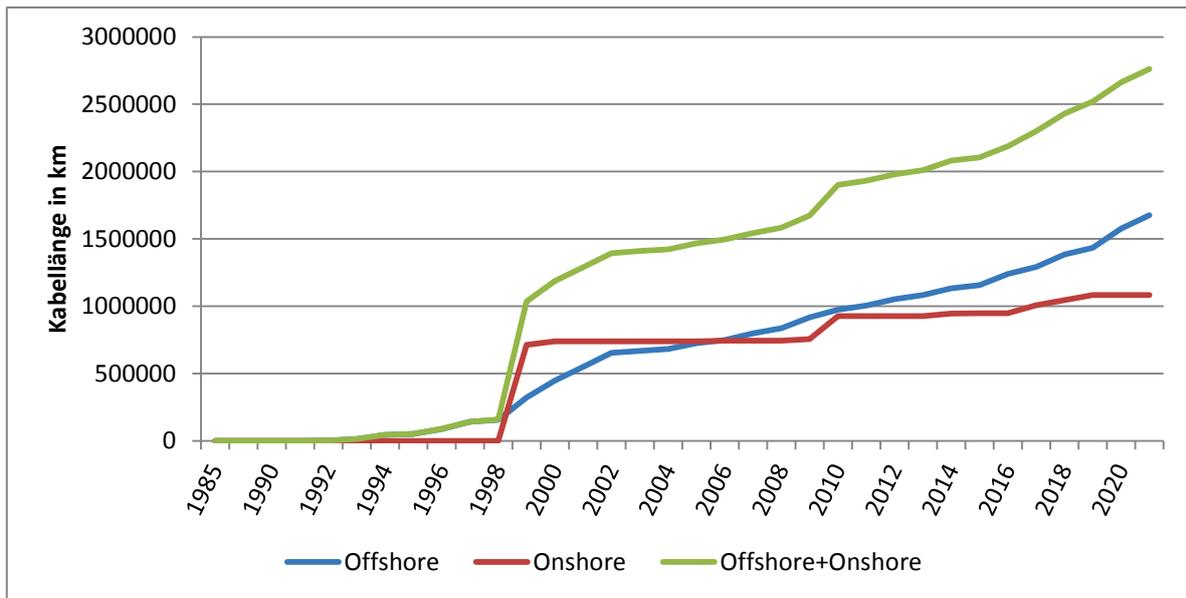


Abbildung 5: Bestand der Onshore und Offshore Internetkabel über die vergangenen Jahrzehnte (Daten nach Infrapedia (2019))

Der für den jährlichen Ausbau benötigte Rohstoffbedarf ist in Abbildung 6 dargestellt. Hier muss die logarithmische Skalierung der Ordinate beachtet werden. Stahl, der lediglich als schützende Ummantelung benötigt wird, macht den größten Massenanteil eines Onshore- bzw. Offshorekabels aus. Glasfasern, die die eigentliche Datenübertragung ermöglichen, nehmen einen verschwindend geringen Anteil an der Gesamtmasse ein.

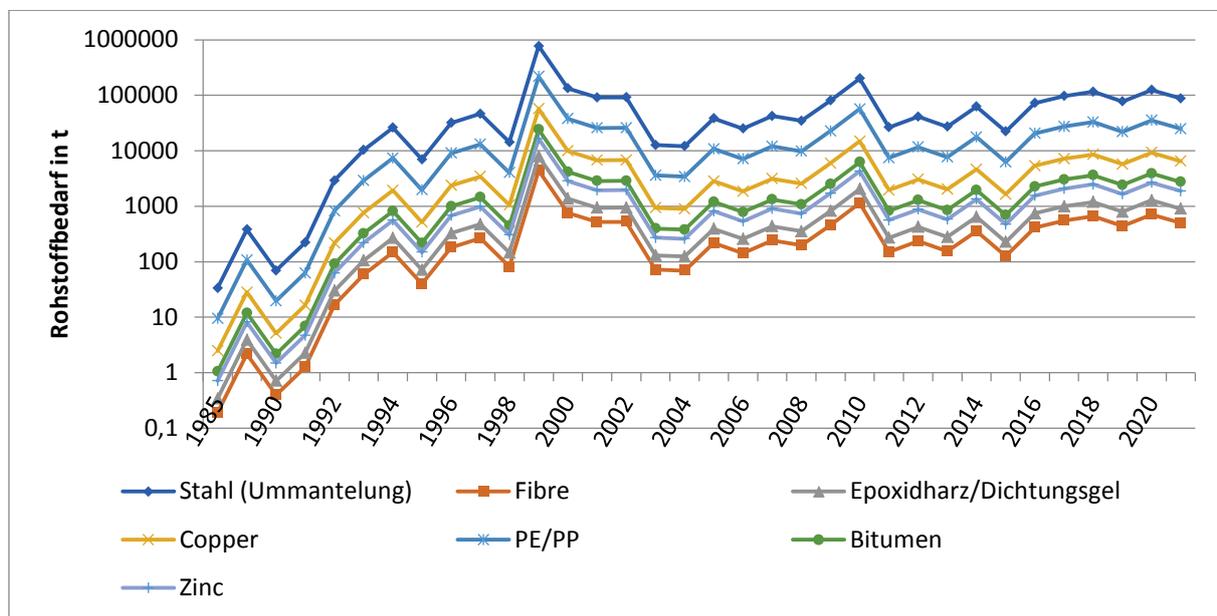


Abbildung 6: Jährlicher Rohstoffbedarf für den Ausbau der Onshore und Offshore Internetkabel (Daten nach Infrapedia (2019) und Donovan (2009))

Vergleicht man die Werte aus Abbildung 6 mit den jährlichen globalen Produktionsmengen der Rohstoffe, so fällt auf, dass es sich anteilig um verschwindend geringe Mengen handelt. So macht selbst der über die Jahre kumulierte Stahlbedarf der Internetkabel (Bestand 2021) nur 0,15 % der globalen Produktionsmenge des Jahres 2018 aus. Bei Kupfer beträgt dieser Wert 0,77 %, bei Zink etwa 0,38 % (Deutsche Rohstoffagentur (DERA) 2019).

Auch der Betrieb dieser Internetnetze ist mit 34 GJ/1000 km Kabel und Jahr (Donovan 2009) und damit 94 TJ für den globalen Bestand 2021 verhältnismäßig gering.⁴ Zum Vergleich: der genannte globale Energiebedarf für die Datenübertragung von 94 TJ durch die Kabelnetzwerke im Jahr 2021 liegt in etwa in der Größenordnung von 0,01 % des jährlichen Energiebedarfes der Schweiz. Der Großteil des oben genannten Energiebedarfs für die Datenübertragung von 185 TWh, welcher insgesamt rund 1 % des globalen Energiebedarfs entspricht, ist also nicht auf die langen interkontinentalen Übertragungsdistanzen, sondern auf die lokale Verteilung zurückzuführen. Hier ist insbesondere die mobile Datenverteilung ausschlaggebend (IEA 2017).

In Deutschland existieren derzeit 72.680 Standorte mit Mobilfunkantennen (Bundesnetzagentur 2020a). An einem Standort sind durchschnittlich 11 Mobilfunkantennen verbaut,⁵ was eine gesamte Anzahl von 807.318 Antennen in Deutschland bedeutet (Stand Januar 2020). Die Studie von Scharp (2011) hat grobe Abschätzungen zu dem Rohstoffbedarf der Mobilfunkstationen vorgenommen. Dabei sind neben den reinen Antennen und unterstützenden Systemen auch die infrastrukturellen Bestandteile erfasst. Dieser Rohstoffbedarf ist über die Anzahl der Standorte (für Infrastruktur) und der Antennen an die derzeitige Situation angepasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet. Auch diese Rohstoffbedarfe sind im relativen Vergleich kaum nennenswert. So entspricht z.B. der gesamte Kupferbestand der Mobilfunkstationen in etwa 4 % der jährlich in Deutschland in sekundären Quellen anfallenden Kupfermasse. Die im Bestand verbaute Elektronik macht ca. 0,6 % der jährlich in Deutschland anfallenden Masse Elektroschrott aus (Schäfer und Schmidt 2019).

Tabelle 1: Rohstoffbestand Mobilfunkstationen in Deutschland (Stand Januar 2020)

Kupfer	Stahl	Aluminium	Elektronik	Sonstiges
14.728 t	56.273 t	7.054 t	8.675 t	21.083 t

Für die Bereiche der Internetübertragung – von der interkontinentalen Übertragung bis zur lokalen Distribution – kann festgehalten werden, dass die tatsächlichen Rohstoffbedarfe im relativen Vergleich vernachlässigbar sind. Die Energiebedarfe für den Betrieb sind hingegen von entscheidender Bedeutung – insbesondere bei der lokalen Datendistribution. Gleiches gilt für die Rechenzentren.

Die oben geschilderte Lage zu den Ressourcenbedarfen der Telekommunikationsnetze ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Stobbe et al. (2015b) weisen auf die begrenzte Datenverfügbarkeit über z.B. Anzahl und Art der Mobilfunkanlagen und Basisstationen in Deutschland sowie die mit der weiteren Entwicklung der Rechenzentren verbundenen Unsicherheiten hin.

Borderstep (2012) bemängeln zusätzlich, dass sich die bisherigen Untersuchungen lediglich auf den Energiebedarf von IKT beziehen. Prognosen zum verbundenen Ressourcenbedarf fehlen noch weitgehend, obwohl dieser erheblich ist. Hierzu ist mit den obigen Auswertungen ein Beitrag geleistet.

⁴ Über das in den Kabeln enthaltene Kupfer wird Strom zu den Repeatern geleitet, die in Abständen von 40-110 km installiert sind und die Übertragung der Daten gewährleisten.

⁵ Ermittelt über eine umfangreiche Stichprobe im ländlichen und urbanen Raum (N=100)

Grundsätzlich werden die positiven Effekte, also eine Ressourceneinsparung durch IKT, höher eingeschätzt, was zu einer Netto-Ressourcen-Einsparung führt. Ein diesbezüglich weiter zu berücksichtigender Faktor sind die sogenannten Reboundeffekte (Borderstep 2012; Herring und Roy 2007). So kann z.B. eine Einsparung zu einer Veränderung der Nutzungsgewohnheiten führen, welche sich negativ auswirken. Dies trifft auf alle Bereiche zu.

II.d Verkehr

Auch im Bereich des Verkehrs bzw. des Transportes hat die Digitalisierung Einzug erhalten und mehrere Entwicklungen angestoßen. Die IEA (2017) verweist darauf, dass der Verkehr grundsätzlich smarter und besser vernetzt ist bzw. weiterhin werden wird. Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander, aber auch mit der umgebenden Infrastruktur, lassen die Nutzung der individuellen Fahrzeuge und das Gesamtsystems effizienter werden (Narla 2013; Li et al. 2012). So können Echtzeitinformationen über den aktuellen Standort, die geplante Route und die aktuelle Verkehrslage⁶ die Fahrtstrecke und Fahrzeiten einzelner Fahrzeuge aber auch ganzer Flotten entscheidend minimieren. Die zunehmende Vernetzung im Verkehrssektor ermöglicht eine Vielzahl weiterer Maßnahmen, wie u.a. die Zugbildung (Platooning) von Lastkraftwagen oder die Überprüfung des Ladezustandes der Batterien von Elektroautos (IEA 2017).

Im klassischen Straßenverkehr konnten durch die bessere Vernetzung im Zuge der Digitalisierung die Sharing-Konzepte etabliert werden. Prognosen zufolge, könnte die Anzahl der weltweiten Mitglieder bzw. Nutzer von Car-Sharing Konzepten von 7 Mio. (2015) auf 36 Mio. bis zum Jahr 2025 ansteigen (Frost & Sullivan 2016; zitiert nach IEA 2017). Gleichzeitig wurden auch Alternativkonzepte zum klassischen Taxi, wie z.B. Uber möglich. Zukünftig wird insbesondere das Thema des autonomen Fahrens mehr an Bedeutung gewinnen (IEA 2017). In diesem Zusammenhang ist neben den viel diskutierten rechtlichen und auch ethischen Fragestellungen insbesondere der Ausbau der 5G Technologie der mobilen Datenübertragung notwendig (Hecht 2016).

Aktuell benötigt der Transport- bzw. Verkehrssektor 28 % des globalen Energiebedarfs und verursacht 23 % der globalen Treibhausgasemissionen, die aus der Verbrennung fossiler Energieträger resultieren (IEA 2017). Die Studie von Wadud et al. (2016) kommt zu dem Ergebnis, dass sich der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen durch das autonome Fahren von einer Verdopplung bis zu einer Halbierung des Status Quo entwickeln können. Entscheidend sind dabei die einzelnen Technologien und in welchem Umfang sie sich durchsetzen werden, welche Energiequellen zum Einsatz kommen, wie die Politik agiert und wie das Verhalten der Konsumenten ausfällt. Die Studie geht von einer Zunahme des Verkehrs um etwa die Hälfte des derzeitigen Werts aus. Fulton et al. (2017) kommen zu dem Ergebnis, dass die alleinige Elektrifizierung und das autonome Fahren einen weiteren Anstieg der Treibhausgasemissionen nicht verhindern können. Sharing-Konzepte und der intensive Ausbau der öffentlichen Verkehrsmittel sollten stärker gefördert werden, um eine absolute Verringerung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors zu realisieren.

Eine Möglichkeit die sich mit der Digitalisierung ergibt und ebenfalls in die Kategorie Verkehr und Transport fällt, ist der Transport mit Drohnen. Erste Untersuchungen kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass die potenziellen Einsparmöglichkeiten an Energie und Treibhausgasemissionen durch

⁶ Aktuelle Verkehrsdaten werden meist über die in den Autos verbaute Elektronik oder die Smartphones des Fahrzeugnutzers ermitteln.

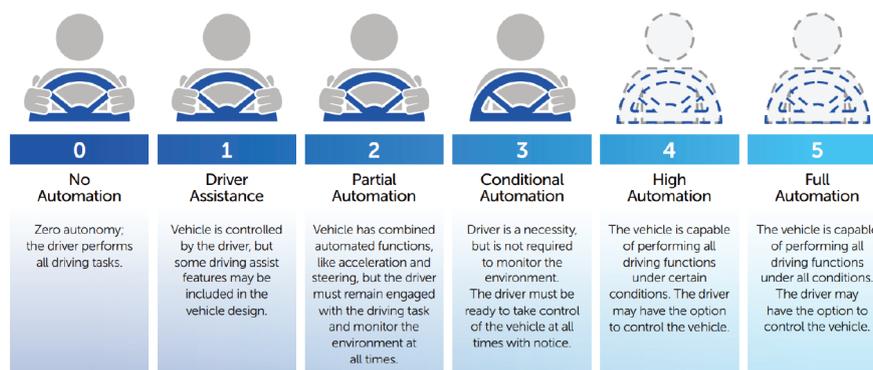
diese Liefermöglichkeit vermutlich sehr eingeschränkt und stark kontextabhängig sind (Goodchild und Toy 2018).

Eine Entwicklung der Digitalisierung auf das Einkaufsverhalten der Endkonsumenten ist das Online-Shopping. Diese Entwicklung hat zudem nennenswerte Auswirkungen auf den Sektor Verkehr und Transport, wie eine Studie schwedischer Wissenschaftlerinnen zeigt (Smidfelt Rosqvist und Winslott Hiselius 2016). Grundsätzlich hat Online-Shopping das Potenzial den Individualverkehr zu reduzieren. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass durch das weiterhin zunehmende Online-Shopping in Schweden, die Treibhausgasemissionen des Individualverkehr bis zum Jahr 2030 um 2 % im Vergleich zum Jahr 2012 gesenkt werden können (Smidfelt Rosqvist und Winslott Hiselius 2016).

Weitere indirekte Effekte, wie z.B. durch vermehrte Heimarbeit, haben großes Potenzial den Verkehr und die damit verbundenen Umweltwirkungen zu reduzieren. Allerdings kommen mehrere Studien zu dem Ergebnis, dass die Gesamtersparnis durch Heimarbeit durch Reboundeffekte auch negativ ausfallen kann, durch z.B. erhöhten Energieverbrauch zuhause oder Änderungen im Mobilitätsverhalten (Kim et al. 2015; Melo und Abreu e Silva 2017; Larson und Zhao 2017). Auch die Art und Weise der Fertigungstechnik können die Umweltbelastungen des Verkehrs beeinflussen. So ist es mittlerweile durch den 3D-Druck möglich, signifikante Gewichtsreduktionen bei Flugzeugkomponenten zu erzielen, was sich unmittelbar auf den Treibstoffbedarf auswirkt (Huang et al. 2016).

Autonomes Fahren

Das Autonome Fahren kann in fünf Stufen eingeteilt werden (siehe Abbildung 7). Dabei entspricht das Stufenmodell auch der geplanten Weiterentwicklung des Autonomen Fahrens selbst. Derzeit sind wir bei Stufe zwei angekommen. Für jede Stufe werden unterschiedliche Anforderungen an das Auto und insbesondere an die Infrastruktur gestellt. Die Auswirkungen dieser Anforderungen auf den Energiebedarf werden im Folgenden diskutiert.



Source: U.S. Department of Transportation, *Automated Driving Systems 2.0, A Vision for Safety*

Abbildung 7: die 5 Stufen von Autonomem Fahren (U.S. Energy Information Administration 2018)

Energiebedarf selbstfahrende Autos

Laut einer Studie der Universität Michigan, welche den Energiebedarf des Ford Fusion untersucht hat, wird der zusätzliche Energiebedarf eines Autos, welches fähig ist autonom zu fahren, maßgeblich durch die integrierten Computer bestimmt.

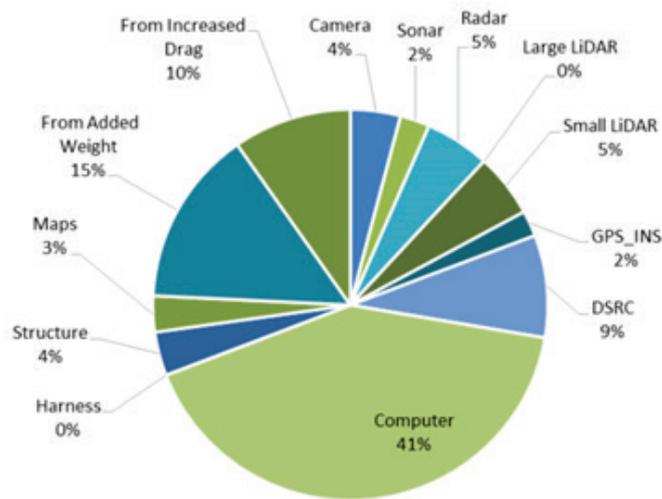


Abbildung 8: Anteil Energieverbrauch im Autonomes Autos (Fairley 2018)

Wie hoch jedoch der Gesamtenergiebedarf ist, ist umstritten. So schwanken Schätzungen von etwa 200W (Baxter et al. 2018 - 2018) bis 2500W (Richart 2020). Ein Grund für die hohe Differenz ist u.a. der Einbezug zusätzlicher Computer und Sensoren, die bei einem Ausfall des eigentlichen Systems einspringen. Zudem schwankt der Energiebedarf auch mit der Art der gefahrenen Strecke. Autobahnen bieten eine weniger komplexe Umgebung als Städte. In Städten müssen deshalb deutlich mehr Berechnungen durchgeführt werden, was zu einem höheren Energiebedarf führt (Richart 2020). Dies macht sich auch beim Vergleich mit "herkömmlichem" Fahren bemerkbar. Die Energiebedarfe zwischen Fahrten mit und ohne Autonomes Fahren unterscheiden sich besonders im Stadtverkehr stark (siehe Abbildung 9). Bei Autobahnfahrten sind die Reichweiten fast identisch. Auf eine Batterieladung bezogen, werden durchschnittlich etwa 10% der Ladung auf Autobahnen, 20% für gemischte Fahrten und 30% für Stadtfahren verwendet (Richart 2020).

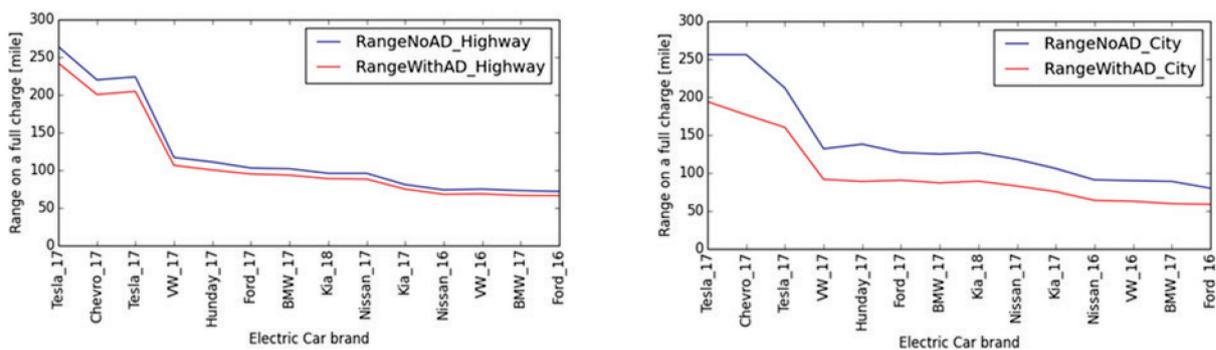


Abbildung 9: Unterschied Reichweite von Autonomes Fahren bei den verschiedenen Modellen, Innerorts und Außerorts (Richart 2020)

Energiebedarf Infrastruktur

Durch das “Autonome Fahren” ergeben sich viele neue Möglichkeiten, die z.B. zur Verkehrssicherheit und Reduktion der Umweltwirkungen beitragen können. Wollen wir diese Möglichkeiten ausnutzen, wird neben dem Auto selbst noch weitere Infrastruktur benötigt, die eine Kommunikation des Autos mit anderen Autos (V2V) und weiterer Infrastruktur (V2I) bzw. beidem (V2X) erlaubt. Dadurch werden neue Dienste und Konzepte möglich wie bspw.:

- V2I (Vehicle to Infrastructure)
 - Echtzeit-Berechnung optimaler Routen durch Echtzeit-Verkehrsinformationen
 - Optimierte “Grüne Welle” anhand der Kommunikation der Ampeln mit den Autos
- V2V (Vehicle to Vehicle)
 - Platooning (elektronische Deichsel = enge Aneinanderreihung von Fahrzeugen)
- V2X
 - Optimierte Parkplatzsuche
 - Mobilität als Dienstleistung

Diese neuen Dienste und Konzepte beeinflussen ebenfalls den Energiebedarf. Eine Analyse möglicher Effekte wurde von der Energy Information Administration (EIA) durch die Auswertung zweier Studien vorgenommen. Die Ergebnisse sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 2: Faktoren des Energieverbrauchs beim autonomen Fahren (U.S. Energy Information Administration 2018)

Determinant	Factor (with source)	Range of effect		Mode	Drive type	Penetration
		less energy / more energy				
Travel	less hunting for parking (2)	-5% to -11%		LDV	city	n/a
Travel	ridesharing (2)	0% to -12%		LDV	city	n/a
Travel	Mobility as a Service (1)	0% to -20%		LDV	any	any
Travel	empty miles (2)	0% to +11%		LDV	city	n/a
Travel	underserved population (1)	+2% to +10%		LDV	any	any
Travel	underserved population (2)	+2% to +40%		LDV	any	n/a
Travel	mode switch (walk/transit/regional air) (2)	+7%		LDV	any	n/a
Travel	reduced perceived cost of driving (1)	+6% to +60%		LDV + HDV	any	any
Travel	ease of travel (traffic flow/crash avoidance/reduced cost of driving) (2)	+20% to +160%		LDV	any	n/a
Efficiency	eco-driving (1)	0% to -20%		LDV + HDV	city	any
Efficiency	congestion mitigation (1)	-2% to -4%		LDV + HDV	city	medium-high
Efficiency	collision avoidance (2)	0% to -2%		LDV	any	n/a
Efficiency	drive profile + traffic flow smoothing (2)	-5% to -23%		LDV	any	n/a
Efficiency	intersection-vehicle communication (2)	-2% to -6%		LDV	city	n/a
Efficiency	platooning (1)	-3% to -25%		LDV	highway	any
Efficiency	platooning (2)	-13% to -25%		LDV	highway	n/a
Efficiency	de-emphasize performance (1)	-5% to -23%		LDV	any	any
Efficiency	smaller vehicles (crash avoidance) (1)	-6% to -23%		LDV	any	high
Efficiency	platooning (1)	-10% to -25%		HDV	highway	any
Efficiency	“right-sizing” of vehicles (1)	-21% to -45%		LDV	any	high
Efficiency	vehicle/powertrain resizing (2)	0% to -50%		LDV	any	n/a
Efficiency	faster travel (2)	0% to +40%		LDV	highway	n/a
Efficiency	faster travel (1)	+7% to +22%		LDV	highway	medium-high
Efficiency	increased feature content (1)	0% to +11%		LDV	Any	Any

Notes: Similar factors may be listed differently for each study.

Wie ersichtlich ist, besteht sowohl Potential zur Reduktion des Energiebedarfs als auch die Möglichkeit, dass der Energiebedarf steigt. Durch das Autonome Fahren kann ökologischer gefahren werden (eco-driving) und der Energiebedarf laut der in Tabelle 2 aufgelisteten Studien um bis zu 20% reduziert werden. Auch das Platooning, welches besonders für den Güterverkehr interessant ist, kann zu einer Senkung von bis zu 25% führen. Demgegenüber stehen aber sogenannte Rebound-Effekte. Durch das Autonome Fahren wird die Nutzung des Autos als Verkehrsmittel zunehmend attraktiver und das Reisen stark vereinfacht (ease of travel), was zur Zunahme des Verkehrs und somit zur Erhöhung des Energiebedarfs um bis zu 160% führen kann. Ebenfalls wird das Auto auch für andere Nutzergruppen wie ältere Menschen oder Jugendliche zugänglich (underserved population), was zu einer weiteren Erhöhung des Energiebedarfs um bis 40% führen kann.

Des Weiteren muss die Infrastruktur z.B. in Form von Edge-Rechenzentren zur Verfügung gestellt werden. Deren Betrieb verursacht ebenfalls Kosten.

Nach Giust (2018) sind bestimmte Dienstleistungen beim Autonomen Fahren für die Rechenzentren am Straßenrand (Multi-Access Edge Computing, MAC) besonders rechenaufwendig und somit energieintensiv. Diese Rechenzentren verbinden sich mit dem 5G-Netzwerk, um eine besonders schnelle Kommunikation (geringere Latenzzeit) und große Bandbreite zu gewährleisten. Beispiele für energieintensive Dienstleistungen sind zum Beispiel:

- Echtzeit-Überwachung und Mitteilen von Straßenbedingungen
- Videostream von Verkehrslage im Voraus
- Risikobewertung und Mitteilen möglicher Kollisionen
- Software-Updates

Radgen (2020), deren Studie sich auf Baden-Württemberg bezieht, weist darauf hin, dass der flächendeckende Ausbau von Edge-Rechenzentren für "Smart City" und "Autonomes Fahren" mit einem erheblichen Energiebedarf verbunden ist. Nach Radgen (2020) wären im Jahr 2025 durch die Rechenzentren zusätzlich bis zu 479 GWh Energie in Baden-Württemberg notwendig, was mit einem erheblichen Ausstoß von CO₂-Emissionen verbunden ist (Tabelle 3).

Tabelle 3: Energiebedarf der Edge-Rechenzentren in Baden-Württemberg nach Radgen (2020) und entsprechende CO₂ Ausstoß.

	GWh/a	kt CO ₂ /a
Moderate Edge-RZ Entwicklung	130	65
Verstärkte Edge-RZ Entwicklung	479	239,5

Leider ist die Studie und die verwendete Methode nur bedingt transparent, somit ist eine Validierung der Daten nicht möglich⁷. Z.B. wird durch die verfügbaren Informationen nicht klar, welchen Anteil die beiden Felder "Autonomes Fahren" und "Smart Cities" am Gesamtenergiebedarf bei der "Verstärkten Edge-RZ Entwicklung" haben. Zudem wird nicht deutlich, welche Dienste im "Autonomen Fahren" enthalten sind und den Rechenzentren zugerechnet werden.

⁷ Der Projektbericht ist noch nicht vom Projektgeber freigegeben.

II.e IKT in der Produktion

Der Einfluss der Digitalisierung auf die Industrie kann in zwei Bereiche unterteilt werden: (1) Handlungen deren Implikationen unmittelbar im Unternehmen stattfinden („inside the plant“) und (2) Handlungen deren Implikationen hinter der Unternehmensgrenze stattfinden („beyond the plant fence“). Siehe hierzu Abbildung 10.

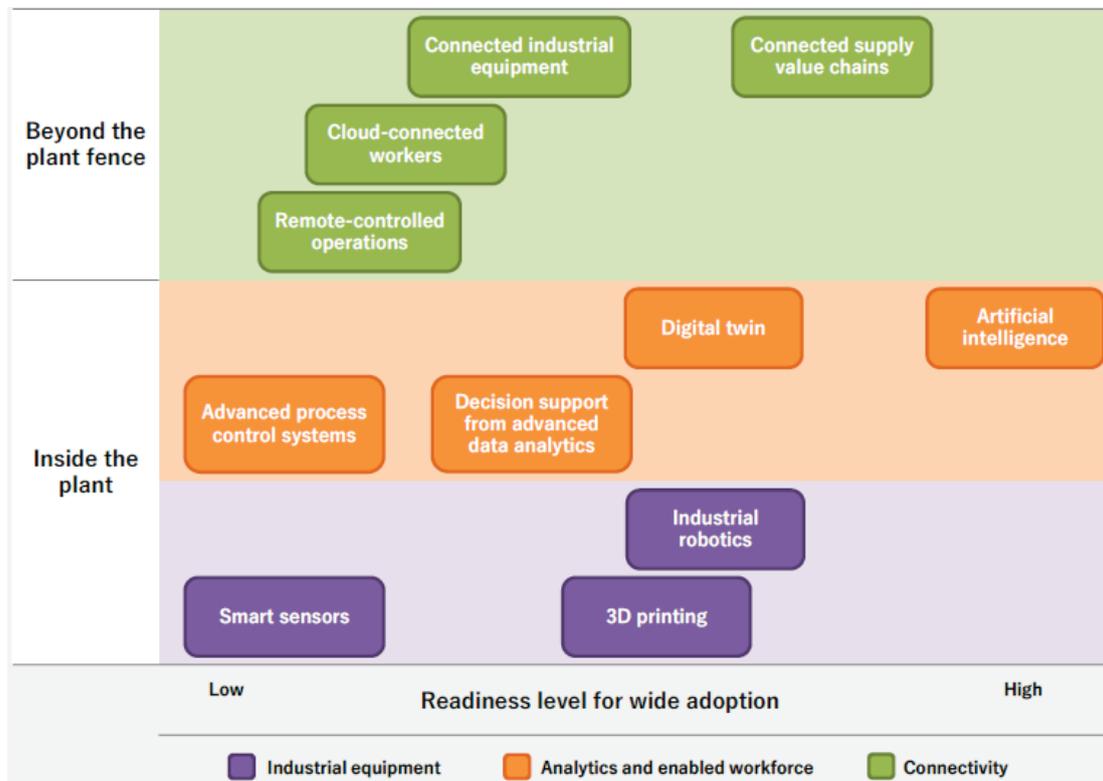


Abbildung 10: Einordnung der Digitalisierungsmaßnahmen nach Reichweite der Implikationen und Umsetzungsgrad (IEA 2017)

Eine Digitalisierungsmaßnahme, deren Implikationen vorrangig innerhalb der Unternehmensgrenzen stattfindet, ist die digitale Prozesskontrolle (auch Monitoring genannt). Darunter ist in erster Linie die Erfassung bestimmter Prozessparameter mithilfe von Sensorik zu verstehen. Dadurch können u.a. Prozesseffizienzen aufgedeckt werden, die Betriebsbedingungen optimiert werden, sowie Betriebs- und Wartungspläne erstellt und Ausfallzeiten minimiert werden (IEA 2017). Nach Australian Government (AG) (2013) kann der Digitalisierungsstand der Prozesskontrolle in drei Stufen unterteilt werden: (1) Digitale Erfassung der Daten, Kontrolle und Optimierungen manuell gesteuert; (2) digitale Erfassung und Optimierung, gesteuert durch Algorithmen, aber manuell implementiert; (3) digitale Erfassung und Optimierung, die auch automatisch implementiert wurde. Schischke et al. (2009) kommen für die deutsche Industrie zu dem Ergebnis, dass im Bereich der digitalen Prozesskontrolle noch große Optimierungspotenziale liegen. Den größten Stellhebel sehen Schischke et al. (2009) im Bereich der Antriebe (Motoren, Pumpen und Kompressoren) von Maschinen und der Automatisierungstechnik. Diese Bereiche verursache ca. 25 % des Energieverbrauchs der gesamten Industrie. Die ökonomische Hürde, Maßnahmen der digitalen Prozesskontrolle im Unternehmen zu etablieren, ist grundsätzlich eher gering und kann langfristig zu signifikanten Einsparungen führen. Das zeigt eine Auswertung von kleinen und mittleren Unternehmen in den USA. Die durchschnittliche Amortisationsdauer von Maßnahmen der digitalen Prozesskontrolle lag im Durchschnitt bei unter

einem Jahr, die kumulierten Ersparnisse bei über 300 Mio. USD (Industrial Assessment Center (IAC) 2020).

Die Digitalisierung kann nicht nur dazu beitragen, bestehende Prozesse transparenter zu machen und darauf aufbauend zu optimieren, sondern auch von Grund auf neue Prozesse ermöglichen. Beispiele hierfür sind intelligente Robotik oder auch der 3D-Druck. So kann beispielsweise durch den 3D-Druck im Vergleich zur konventionellen Fertigung der Ausschuss an Material entschieden gesenkt, die räumlichen Kapazitäten verringert und auch die Produktionszeit minimiert werden (Ford und Despeisse 2016). Neben den direkten Implikationen sind hier auch die indirekten entschieden, wie z.B. die Möglichkeit des Leichtbaus, der wiederum Einsparungen im Verkehrssektor ermöglicht (siehe Kapitel Verkehr).

Digitalisierungsmaßnahmen, die über die Unternehmensgrenze hinausgehen, sind z.B. die digitale Vernetzung von Unternehmen. Eine bessere unternehmensübergreifende Vernetzung kann eine Vielzahl an Vorteilen bringen, die in Einsparungen an Energie und Umweltwirkungen resultieren – man spricht in diesem Zusammenhang auch von Industrie 4.0 –. So kann durch Echtzeit-Datenübertragung die gesamte Supply Chain optimiert werden, indem Anlagen maximal ausgelastet und Transportaufwände minimiert werden (IEA 2017).

Den Einsparmaßnahmen durch Digitalisierung in der Industrie stehen auch Aufwände gegenüber. Zum einen der direkte Aufwand, wie z.B. der Energiebedarf für die Sensorik. Gleichzeitig entstehen jedoch auch indirekte Aufwände. So benötigen die Erfassung von Prozessdaten oder der Datenaustausch zwischen den Unternehmen Kapazitäten in Rechenzentren und in den Datenübertragungssystemen, was wiederum in Energiebedarfen resultiert (Waibel et al. 2017). Ersten qualitativen Abschätzungen zufolge, ist allerdings davon auszugehen, dass die positiven Effekte – also die Ersparnisse – überwiegen. Um den Beitrag einer Digitalisierungsmaßnahme zu einer nachhaltigen Entwicklung sicher zu stellen, sind begleitende Untersuchungen, wie z.B. Ökobilanzen, empfohlen (Bonilla et al. 2018).

II.f Rohstoffbedarfe der Elektrizitätsbereitstellung

In den obigen Kapiteln sind die direkten Rohstoffbedarfe der Digitalisierung ermittelt. Unter diesen direkten Rohstoffbedarfen sind die IKT-Endgeräte, die Datenübertragungsnetze (lokale und globale Distributionsnetze) sowie die Rechenzentren subsumiert. Doch der Megatrend der Digitalisierung verursacht auch indirekte Rohstoffbedarfe durch den Bedarf an Elektrizität. Mit anderen Worten: ein Teil der für die Stromerzeugung notwendigen Infrastruktur ist aufgrund ihrer Strombedarfe der Digitalisierung zuzurechnen. Die in Abbildung 11 illustrierten Auswertungsergebnisse zeigen die Rohstoffbedarfe, die für die Anlagen zur Stromerzeugung benötigt werden, die notwendig sind, um den globalen Elektrizitätsbedarf der Digitalisierung zu decken. Es sind der Status quo, basierend auf dem globalen Strommix, erfasst, sowie zwei Zukunftsszenarien. Das Szenario 2040 Stated Policies, basiert auf dem Strommixszenario der IEA, das von den aktuellen politischen Zielen ausgeht. Das Szenario 2040 Renewable Energies geht von demselben IEA-Szenario aus, jedoch ohne den Anteil der konventionellen Energieerzeugung. Die Zukunftsszenarien gehen nur von einer Änderung des Strommixes aus. Die benötigte Strommenge ist als konstant angenommen. Die Rohstoffbedarfe sind als Anteil der Weltjahresproduktion 2018 angegeben.

Derzeit sind signifikante Anteile der Weltjahresproduktion 2018 von Chrom, Gallium, Nickel und Titan in der für die Digitalisierung notwendigen Elektrizitätserzeugungsinfrastruktur verbaut. Auch von Kupfer, Gold, Eisen, Mangan und Tantal sind meist über 10 % verbaut. Die Zukunftsszenarien zeigen bei konstanter Strommenge noch wesentlich höhere Rohstoffbedarfe. Das ist unmittelbar auf den Ausbau der Erneuerbaren Energie zurückzuführen, die pro erzeugte Strommenge ein Vielfaches an Rohstoffen benötigen als die konventionelle Stromerzeugung. Das betrifft auch insbesondere die Technologiemetalle (Kleijn et al. 2011; Hund et al. 2020).

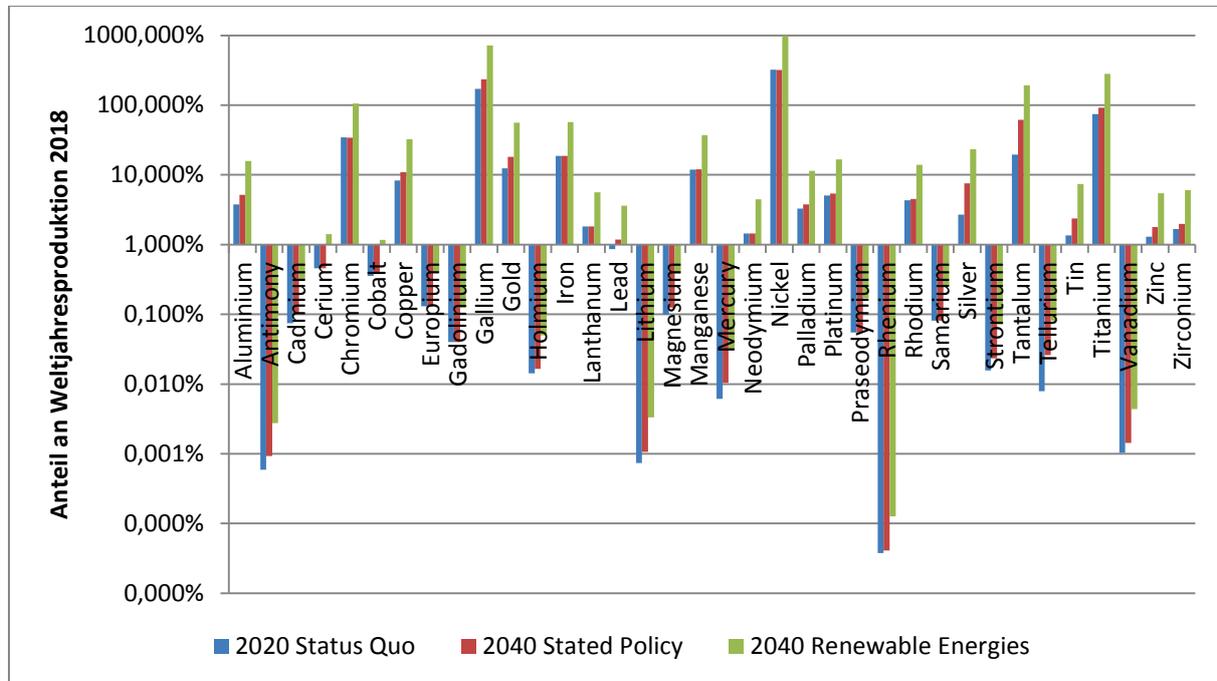


Abbildung 11: Rohstoffbedarfe der Strombereitstellung für die Digitalisierung, Werte anteilig an der Weltjahresproduktion der Rohstoffe des Jahres 2018, logarithmische Skala (eigene Darstellung, Werte nach IEA und Ecoinvent und Ergebnissen aus den obigen Kapiteln)

Zwischenfazit: Die existierenden Untersuchungen zu den ökologischen Auswirkungen des IKT-Sektors befassen sich hauptsächlich mit den Energiebedarfen und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Die für die Herstellung der IKT-Endgeräte benötigten KEA sind in derselben Größenordnung wie die KEA der Nutzungsphase. Zur vollständigen Nutzung der IKT-Endgeräte kommen zudem die Aufwände der Rechenzentren und Datenübertragungsnetze hinzu, die maßgeblich durch die Energiebedarfe der Nutzung bestimmt sind. Die zitierten sowie die eigens vorgenommenen Untersuchungen zeigen, dass die energetischen Aufwände und treibhausgasrelevanten Emissionen der Rohstoffgewinnung im relativen Vergleich zu den Aufwänden des gesamten Lebenszyklus des Sektors nur marginal sind. Aus Sicht der globalen Rohstoffbedarfe ist der IKT-Sektor allerdings ein wesentlicher Nachfrager nach Technologie- und Edelmetallen. Die indirekten Rohstoffbedarfe durch die Elektrizitätsbedarfe der Digitalisierung sind um Größenordnungen höher. In Zukunft werden diese Rohstoffbedarfe noch signifikant zunehmen, was auf die höhere Rohstoffintensität pro erzeugte Energieeinheit der Erneuerbaren Energien zurückzuführen ist.

Ob die Digitalisierung ökologische und energetische Vorteile bewirkt, ist in der Literatur noch umstritten. Die wohl fundiertesten Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Digitalisierung mehr

Energie benötigt, als sie einspart. Das sind jedoch makroskopische Untersuchungen, die nur eine erste Einschätzung über die Digitalisierung als Sektor treffen können und nicht über die einzelnen Digitalisierungsmaßnahmen.

III Indikatorenfrage

Auf Arbeitsschritt I aufbauend soll geklärt werden, ob es ausreicht, beim IKT-Einsatz auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen zu fokussieren, oder ob weitere ökologische Wirkungsindikatoren zu berücksichtigen sind. Diese Frage stellt sich insbesondere in Hinblick auf die Nutzung abiotischer Rohstoffe bzw. kritischer Rohstoffe. Die Bedeutung des Rohstoffeinsatzes durch IKT soll auch für Energie und Klima abgeschätzt werden. Dazu wird auf Ergebnisse aus dem NEXUS-Projekt zurückgegriffen und entsprechende Modellrechnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse aus Kapitel II zeigen, dass die existierenden Untersuchungen zu den Umweltwirkungen von Digitalisierungsmaßnahmen bzw. der IKT-Branche sich meist auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen beschränken. Einige wenige Studien beziehen auch weitere Umweltwirkungskategorien mit ein (z.B. Hischer et al. (2015)). Die beiden entscheidenden Lebenszyklusphasen sind die Herstellungs- und die Nutzungsphase, die in etwa in gleichem Maße KEA benötigen und Treibhausgasemissionen verursachen. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, dass der KEA ein geeigneter Indikator ist, um einige Umweltwirkungen von Transport-, Energiebereitstellungs- und Produktproduktionsprozessen zu erfassen (Huijbregts et al. 2006). Nachfolgend wird untersucht, ob der KEA auch als Indikator für den spezifischen Fall der ökologischen Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen geeignet ist oder ob weitere Umweltwirkungskategorien separat erfasst werden sollten, um die ökologische Performance der Digitalisierung zu bewerten.

Die Umweltwirkungen der Nutzungsphase von Digitalisierungsmaßnahmen sind ausschließlich auf den Einsatz an elektrischer Energie bestimmt. Elektrische Energie bestimmt auch zu großen Teilen die Umweltwirkungen der Herstellung der IKT-Endgeräte und der IKT-Infrastruktur. Insbesondere die Treibhausgasemissionen sind durch die Elektrizitätsbedarfe der Herstellungsprozesse dominiert. In Abbildung 12 ist am Beispiel der Herstellung eines Notebooks veranschaulicht, welche Prozesse in welchem Umfang zu bestimmten Umweltwirkungskategorien beitragen. Dabei sind nur die direkten Emissionen der Prozesse bzw. Prozesskategorien berücksichtigt. Im Falle der Elektrizität bedeutet das z.B. dass nur die tatsächliche Stromerzeugung und –distribution in die Bewertung mit einfließen. Die Umweltwirkungen der Gewinnung der dafür notwendigen Energieträger und Rohstoffe sind in eigenen Prozesskategorien verortet. Diese Analyse zeigt, dass der Energiebedarf als vollumfänglicher Indikator für die Umweltwirkungen der Herstellungsprozesse nicht ausreichend zu sein scheint bzw. nur stark approximativ verwendet werden kann. So sind bspw. die Umweltwirkungskategorien Frischwassereutrophierung und Frischwasserökotoxizität fast ausschließlich auf die Abfallbehandlung zurückzuführen. Die Energie (Wärme, Energieträger oder Elektrizität) spielt hier kaum eine Rolle. Im Falle der Umweltwirkungskategorien Photooxidantienbildung, Versauerung und Ökotoxizität der Böden machen bspw. die direkten Emissionen der Herstellungsprozesse große Anteile aus.

Als Zwischenfazit kann an dieser Stelle also festgehalten werden, dass der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen die Umweltwirkungen der Nutzungsphase ausreichend abdecken. Als Indikator für die Herstellungsphase ist der Energiebedarf jedoch zu ungenau, da viele Umweltwirkungen auf die direkten Emissionen anderer Prozesse, wie z.B. den Herstellungsprozessen, zurückzuführen sind. Zudem findet in den meisten Fällen die Herstellung der finalen Produkte, wie auch der zahlreichen Zwischenprodukte, nicht in Deutschland,⁸ sondern vor allem in China statt.

⁸ Für die Nutzungsphase ist Deutschland angenommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen der länderspezifischen Strommixe (bspw. hat China einen deutlich höheren Anteil an Kohlestrom), fallen pro Energieeinheit unterschiedliche Umweltwirkungen an. Abbildung 13 zeigt die Abweichungen in den Umweltwirkungen des deutschen Strommixes vom chinesischen pro Energieeinheit (Endenergie und KEA). Liegt der Wert bei 1, gibt es keine Abweichungen zwischen dem deutschen und chinesischen Strommix in dieser Umweltwirkung. Werte kleiner 1 bedeuten, dass der deutsche Strommix geringere Umweltwirkungen verursacht. Werte größer 1 entsprechend vice versa. Liegt der Wert bei 2, so würde der deutsche Strommix doppelt so viele Umweltwirkungen pro KEA bzw. Energieeinheit verursachen wie der chinesische.

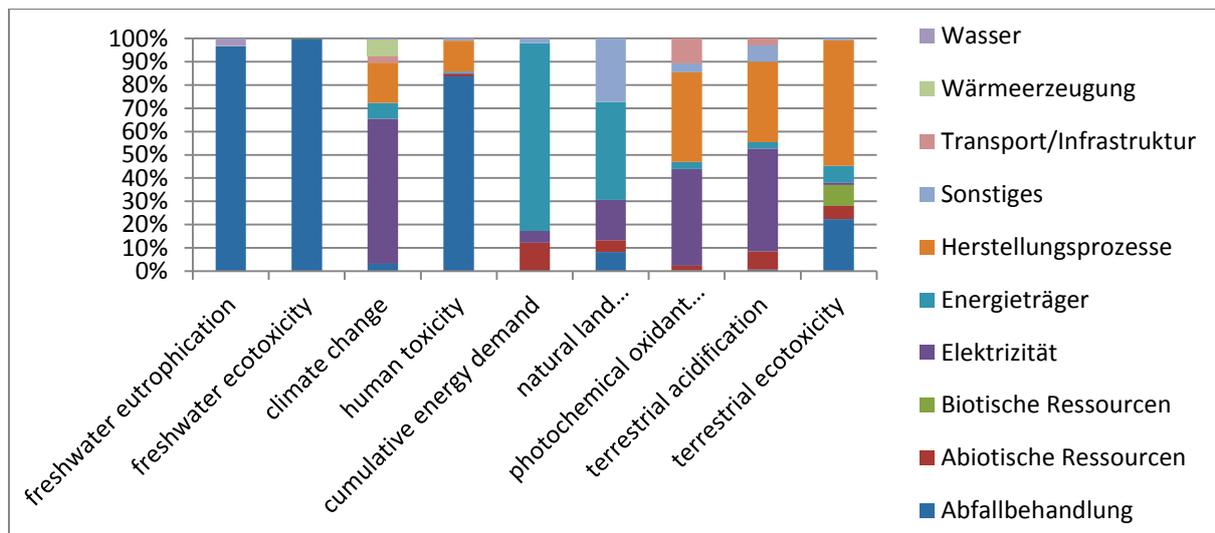


Abbildung 12: Prozentualer Beitrag der Prozesse einer Notebookproduktion an den Umweltwirkungskategorien (eigene Darstellung, Daten aus ecoinvent)

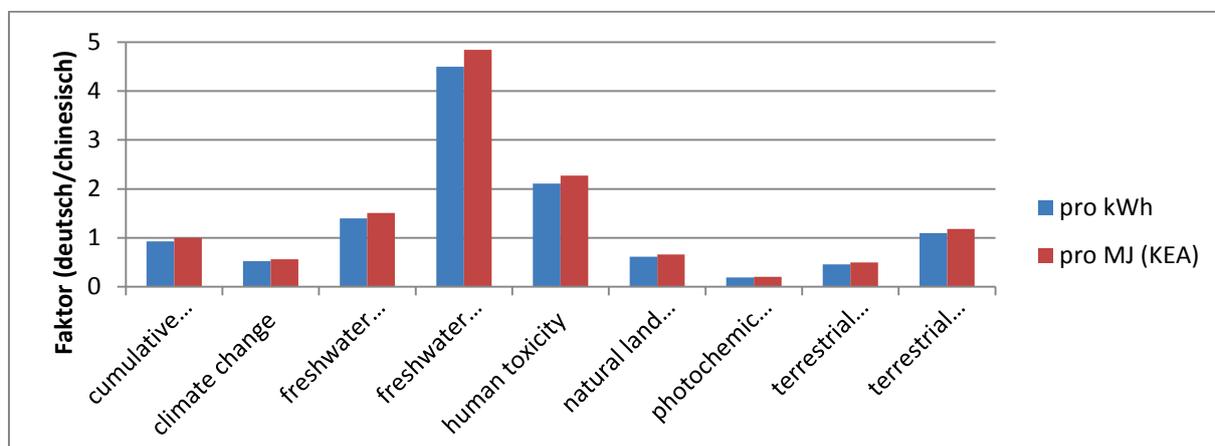


Abbildung 13: Vergleich der Umweltwirkungen des Strommixes in China und Deutschland (eigene Darstellung, Daten aus ecoinvent). Werte kleiner 1 bedeuten, dass der deutsche Strommix geringere Umweltwirkungen hat, größer 1 bedeutet höhere Umweltwirkungen.

Die Tatsache, dass sich die Strommixe in ihren Umweltwirkungen – insbesondere auch in den Treibhausgasemissionen – signifikant unterscheiden, unterstreicht die oben getroffene Aussage, dass der Energiebedarf nur als stark approximativer Indikator für die ökologische Performance von Digitalisierungsmaßnahmen verwendet werden kann.

Für eine detaillierte Erfassung der ökologischen Performance von Digitalisierungsmaßnahmen müssen alle Umweltwirkungen ermittelt werden. Nachfolgend soll nun untersucht werden, ob einige der Umweltwirkungen relevanter sind als andere. Abbildung 14 zeigt eine Auswertung des Anteils

der durch die globale IKT-Branche entstehenden Umweltwirkungen⁹ an den globalen jährlichen Umweltwirkungen. Dabei ist zwischen der Herstellungsphase der IKT Endgeräte und deren Nutzungsphase inklusive den Aufwänden der Datenübertragungsnetzen und der Rechenzentren unterschieden. Die größten Beiträge zu den globalen Umweltwirkungen leistet die IKT-Branche bei den Umweltwirkungskategorien Ionisierende Strahlung (3,8 %) und Kanzerogene Effekte (3,1 %). Der Beitrag zu den globalen Treibhausgasemissionen liegt bei etwa 1,5 %. Die Kernaussage des Diagramms ist, dass es bis auf den Ozonabbau keine Umweltwirkung gibt, die im Kontext des Beitrags zu den globalen Emissionen vernachlässigbar wäre. Ebenfalls ist keine der Umweltwirkungen zu bevorzugen. Da alle Umweltwirkungen der IKT-Branche in ihrem Beitrag an den globalen Umweltwirkungen in derselben Größenordnung liegen, sind die von besonderer Relevanz, deren Planetare Grenzen bereits überschritten wurden bzw. kurz vor einer Überschreitung stehen. Das betrifft für die in Abbildung 14 aufgeführten Umweltwirkungskategorien insbesondere den Klimawandel, die Versauerung sowie die Eutrophierung (Steffen et al. 2015).

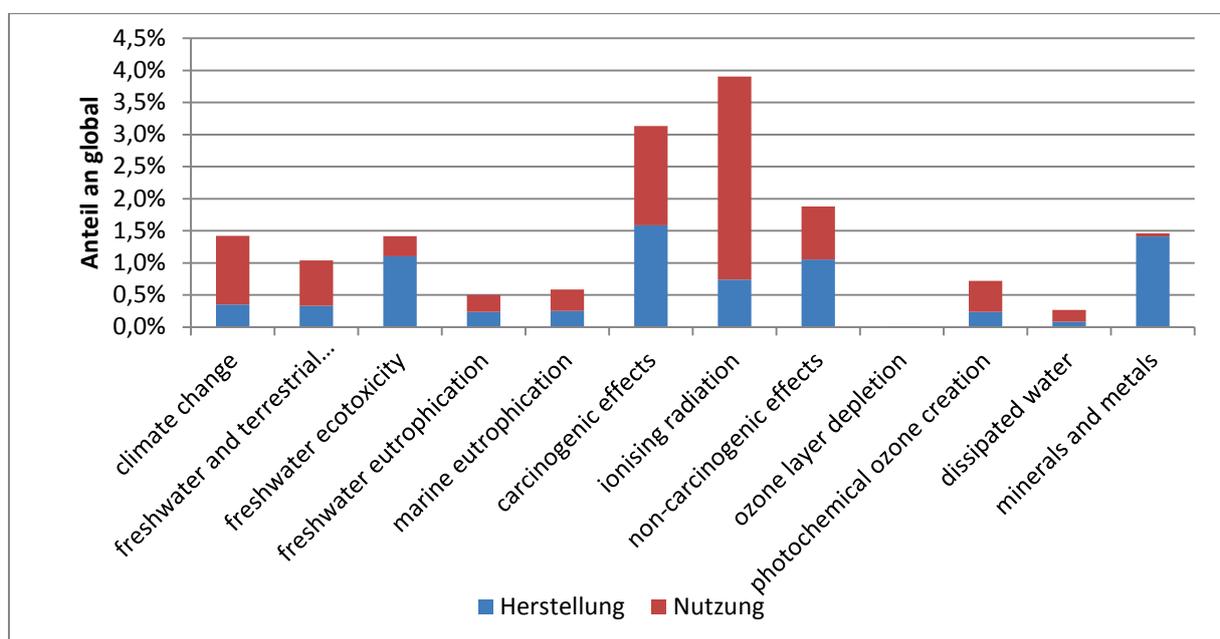


Abbildung 14: Anteil der Umweltwirkungen der IKT-Branche an den globalen Umweltwirkungen (eigene Darstellung, Daten der Analyse entstammen aus ecoinvent, den Analysen aus Kapitel II sowie Crenna et al. (2019), IEA (2017) und van Heddeghem et al. (2014))

Bisher wurden lediglich die Aufwände und Umweltwirkungen der Digitalisierungsmaßnahmen durch deren Herstellung und Nutzung betrachtet. In der Fachliteratur wird hier häufig von den direkten (Umwelt-)Effekten gesprochen. Ganz wesentlich sind jedoch auch indirekten (Umwelt-)Effekte der Digitalisierungsmaßnahmen, die durch deren Anwendung entstehen. Das können Einsparungen, wie z.B. Einsparungen an reisebedingten Treibhausgasemissionen durch die Möglichkeit der Heimarbeit sein oder aber auch weitere Aufwände durch z.B. Rebound-Effekte (Bieser und Coroamă 2020). Börjesson Rivera et al. (2014) geben einen Überblick über die verschiedenen Arten der indirekten (Umwelt-)Effekte. Dieser Überblick macht deutlich, dass im Falle der indirekten (Umwelt-)Effekte von Digitalisierungsmaßnahmen ein breites Spektrum vorliegt. Es kann sich u.a. um Ersparnisse oder

⁹ Dabei handelt es sich um eine ungefähre Hochrechnung, basierend auf den im Jahr 2018 weltweit verkauften IKT-Endgeräte sowie den globalen Energiebedarfen der 2012 in Gebrauch gewesenen IKT-Endgeräte und den globalen Energiebedarfen der Rechenzentren und Datenübertragungsnetzen.

Aufwände an Material, Transport oder Energie handeln. Auch hier kann also ein Indikator nur approximativer Natur sein.

Bei der ganzheitlichen ökologischen Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen müssen direkten und indirekten (Umwelt-)Effekte aufgerechnet werden. Die obigen Analysen haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen und Effekte unterschiedliche Auswirkungen auf die verschiedenen Umweltwirkungen haben. Soll ein genaues Bild über die ökologische Performance einer Digitalisierungsmaßnahme ermittelt werden, dann müssen alle Umweltwirkungen erhoben werden. Um darauf aufbauend eine Entscheidung über die ökologische Sinnhaftigkeit der Digitalisierungsmaßnahme treffen zu können oder bei mehreren Maßnahmen die ökologisch vorteilhafteste zu bestimmen, kann es, wenn es darum geht, wie welche Umweltwirkungskategorie zu bewerten ist, zu multikriteriellen Entscheidungsproblemen kommen. Diese müssen zwangsläufig über Gewichtungen der einzelnen Umweltwirkungskategorien aufgelöst werden. Denkbar wäre z.B. eine Gewichtung anhand des Konzeptes der Planetaren Grenzen.

Neben den ökologischen Auswirkungen können auch soziale Aspekte eine wichtige Rolle spielen. Die Auswertungen in Kapitel II zeigen, dass nennenswerte Anteile der Weltjahresproduktion einiger Technologie- und Edelmetalle (insbesondere Tantal, Platin und Kobalt) in die Herstellung von IKT-Endgeräten fließen. Insbesondere die Technologiemetalle wie Kobalt oder Tantal sind durch ihre oft kleinbergbauliche Gewinnung durch starke soziale Belastungen geprägt (Mancheri et al. 2018; Al Barazi et al. 2018).

Die direkten und indirekten (Umwelt-)Effekte können zwar pro Einheit eingesetzter Energie unterschiedliche Ausprägungen in den unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien haben, die tatsächlichen physikalischen Aufwände und Ersparnisse, die dahinter stecken, sind jedoch immer auf den Einsatz von Energie zu reduzieren. Die Art des eingesetzten Energieträgers, die Effizienz der Energiegewinnung oder die direkten Emissionen von Produktionsprozessen führen zu den oben aufgezeigten Unterschieden in den Umweltwirkungen. Die reine physikalische Effizienz (Energieeinsatz durch Energieersparnis) von Digitalisierungsmaßnahmen ist also durch die Energie definiert.

Zwischenfazit: Eine Bewertung der ökologischen Performance von Digitalisierungsmaßnahmen kann, aufgrund der teils starken unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Umweltwirkungen der Lebenszyklusphasen sowie den direkten und indirekten (Umwelt-)Effekten, nur durch eine vollumfängliche Ökobilanz vorgenommen werden. Eine erste und stark approximative Abschätzung der Umweltwirkungen kann anhand des Energieindikators vorgenommen werden. Finden die Herstellung und Nutzung der Digitalisierungsmaßnahme mit demselben Strommix statt, nimmt die Genauigkeit des Energieindikators zu. Die Energie gibt zudem die tatsächliche physikalische Effizienz von Digitalisierungsmaßnahmen an.

IV Methodik von Gesamtszenarien

Wie rechnet man Nutzen und Aufwand einer Technologie oder eines Produktes gegeneinander auf? Solche Fragen sind bereits mehrfach aufgetaucht und kritisch diskutiert worden, z. B. zu Dämmstoffen aus der chemischen Industrie, die einerseits Emissionen verursachen, andererseits Energie einsparen helfen. Die Schwierigkeit liegt hier in der Modellierung von geeigneten Vergleichsszenarien, in denen Entscheidungssituationen definiert sind. Es macht wenig Sinn, einen allg. technologischen Trend einzelnen technischen Innovationen zuzurechnen, da nicht abgeschätzt werden kann, welche Entwicklung ohne diese Innovation erfolgt wäre. Noch problematischer ist das für ganze Technologiebereiche, die zudem Reboundeffekte usw. nach sich ziehen können. Die vorhandenen Studien (GeSI, METI usw.) sollen vor dem Hintergrund der seriösen Technikfolgenabschätzungstheorie kritisch bewertet werden.

Bieser und Hilty (2018b) untersuchen in ihrer Arbeit den Ansatz der Smarter 2030 Studie welche im Jahr 2016 explizit auf die Schweiz angewandt wurde (Accenture 2016). Dazu überprüften sie gemachte Annahmen und erweiterten die Methodik. Insgesamt zeigten sich deutliche Unterschiede in den Ergebnissen, was unter anderem auf methodische Freiheiten, unterschiedliche Definitionen sowie unterschiedliche Abschätzung von Effekten zurückzuführen ist. Abschließend weisen sie darauf hin, dass es sehr wichtig ist, diese methodischen Herausforderungen anzugehen, um somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Studien zu verbessern.

Es stellt sich die Frage, wodurch sich eine gute Studie auszeichnet und wie bisherige Arbeiten einzuordnen sind.

Seriöse Technikfolgenabschätzungstheorie – was ist das?

In den letzten Jahren wird vermehrt Kritik an der Wissenschaft laut. Betrug und Missverhalten sind ein Teil des Problems, welche die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft in Frage stellen. Hinzu kommt eine Verschlechterung der Qualität der Forschung und eine Vielzahl falscher und nicht nachvollziehbarer Ergebnisse und z. T. sogar die Nutzung sogenannter „Fake Paper Generators“ (Saltelli et al. 2016; Ioannidis 2014). Bislang wurden auch schon einzelne Maßnahmen zur Behebung einiger Probleme eingeführt, wie die Reproducibility Initiative (Science Exchange), die sich hauptsächlich auf experimentelle Studien bezieht sowie die San Francisco Declaration on Research Assessment (Declaration on Research Assessment). Des Weiteren wird eine bessere Ausbildung in Statistik gefordert und die Bitte wird laut, sich nicht ausschließlich auf Journal Impact Factors zu verlassen, um die Qualität eines Beitrags zu bewerten. Verantwortlich für die Krise ist u. a. ein strukturelles Problem. „Big science“ wie es De Solla Price, D. J. (1963) nennt, führt dazu, dass die Abstände zwischen den Forschern immer größer werden und somit der persönliche Kontakt geringer. Und auch eine Umstrukturierung hin zu nicht-öffentlich geförderter Forschung birgt ein Risiko durch einen höheren Zeit- und auch Budgetdruck (Saltelli et al. 2016). Wie kann diesen Problemen nun entgegengetreten werden und wodurch wird gute Forschung gekennzeichnet? Ioannidis (2014) hat dazu eine Art Checkliste publiziert:

- Verbundforschung (im großen Stil)
- Übernahme einer Replikationskultur
- Registrierung von Studien, Protokollen, Datensätzen etc.
- Teilen von Daten, Protokollen und anderen Werkzeugen
- Reproduzierbarkeitspraktiken

- Verringerung der Konflikte zwischen Sponsoren und Autoren
- Geeignete statistische Methoden
- Standardisierung von Definitionen und Analysen
- Strengere Schwellenwerte für die Inanspruchnahme von Entdeckungen oder "Erfolgen"
- Verbesserung der Standards für das Studiendesign
- Verbesserungen bei der Begutachtung, Berichterstattung und Verbreitung von Forschungsergebnissen
- Bessere Ausbildung der wissenschaftlichen Mitarbeiter in Methoden und statistischer Kompetenz

Er bezieht sich dabei hauptsächlich auf medizinische und experimentelle Forschung, jedoch sind seine Aussagen auch auf andere Gebiete anwendbar. Ziel der vorgeschlagenen Maßnahmen ist u. a. die Reduktion des Einflusses von Vorurteilen und Interessenskonflikten.

Jedoch ist grundsätzlich niemand frei von Vorurteilen, auch Wissenschaftler nicht, besonders wenn ein Thema stark politisiert ist (Pielke, JR. 2020). Nach Pielke, JR. (2020) gibt es fünf Arten von Wissenschaftlern. Den „Pure Scientist“, einem Forscher, der aus eigener Motivation und Lust an dem forscht, was ihn bewegt. Dieser ist aber in der Realität nicht aufzufinden, da die Finanzierung einer Forschung nach bestimmten Kriterien wie der Bedeutung für die Stakeholder vergeben wird. Den „Science Arbiter“, der Entscheidungsträger mit empirischer Forschung unterstützt. Seine Arbeit ist sehr politiknah. Den „Issue Advocate“, der sich für zielgerichtet für eine Sache ausspricht und versucht die Entscheidungsmöglichkeiten (dahingehend) zu reduzieren. Dabei sollte dies nicht nur negativ verstanden werden, da manche Dinge ja durchaus unterstützenswert sind. Als letzten nennt er den „Honest Broker“, er zeigt Handlungsoptionen auf und erweitert diese. In einem gut funktionierenden System sind alle Rollen vertreten, wichtig ist nur, dass man sich der verschiedenen Rollen bewusst ist und die Entscheidungsfindung unterstützt und nicht bestimmt wird.

Im Speziellen mit der Zukunftsforschung, die durch Szenarien ja betrieben wird, beschäftigt sich Grunwald (2013). Er weist darauf hin, dass es im Zusammenhang mit der Zukunftsforschung nicht nur eine Wahrheit gibt, sondern mehrere. Ihre Qualität zeigt sich aber vor allem in einer schlüssigen Argumentation. Damit diese gegeben ist, müssen die Ergebnisse der Zukunftsforschung sprachlich formuliert werden können, um so einen Diskurs zu erlauben. Denn nicht nur das Ergebnis ist entscheidend, sondern auch der Herstellungsprozess. Ein guter Herstellungsprozess folgt einer konditionalen Struktur (wenn-dann-Kette), die transparent und nachvollziehbar ist. Ergebnis ist dann eine Komposition von Zutaten. Beides, sowohl Herstellungsprozess als auch Zutaten, müssen gewisse Standards erfüllen bzw. darstellen. Bei den Zutaten können dies disziplinäre Standards sein, beim Herstellungsprozess anerkannte Vorgehensweisen der Modellierung wie Expertenschätzungen. Und nicht nur die Konsistenz und interne Schlüssigkeit müssen gegeben sein, sondern auch der Bezug bzw. die Schnittstellen zur Außenwelt (außerhalb der Systemgrenze) müssen schlüssig sein. Um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen, sind z. B. Sensitivitäts- oder Robustheitsanalysen ein geeignetes Instrument. Doch all dies funktioniert nur, wenn alle notwendigen Informationen transparent sind oder zumindest eine Rekonstruktion erlauben.

Fasst man dies zusammen, so lassen sich folgende Bewertungskriterien festlegen:

- Transparenz (Modellbeschreibung, Datenverfügbarkeit)
- Kausale Kette (wenn-dann)
- Handlungsoptionen aufgezeigt
- Analysen von Einflussfaktoren
- Alternative Ergebnisse und Handlungsoptionen vorhanden
- Diskussion der Ergebnisse
- Wo veröffentlicht (Review?)
- Förderung (wer?)

Um eine Aussage über die Qualität der bereits existierenden Studien treffen zu können, sollen diese anhand der festgelegten Kriterien bewertet werden. Es sollen die folgenden Studien in die Bewertung einbezogen werden: Shift Project (The Shift Project) (Andrae und Edler 2015b) , Smarter 2030 (GeSI 2015a)¹⁰, BMWi (Stobbe et al. 2015a).

Das Ergebnis ist in Abbildung 15 dargestellt. Leider ist der Großteil der Studien nicht ausreichend transparent, was eine objektive Einschätzung der Studien schwierig macht und auch deren Glaubwürdigkeit einschränkt. Positiv zu sehen ist, dass drei der vier bewerteten Studien alternative Ergebnisse aufzeigen und Handlungsoptionen benennen. Dennoch fehlt bei zwei Studien die Diskussion der Ergebnisse gänzlich. Insgesamt lässt sich also festhalten, dass keine der Studien bei allen Kriterien überzeugen kann, zwei der vier Studien dennoch nutzbare Ergebnisse liefern, die eine gute Ausgangsbasis für weitere Bewertungen darstellen.

Studie	Wer	Wo	Indikator	Räumlicher Bezug	Lebensphasen	Ergebnisse	Transparenz & Nachvollziehbarkeit	Alternative Ergebnisse	Handlungsoptionen	Diskussion
Shift Project	Think Tank	Report, online	Energie	Global	Produktion & Nutzung	Aufwand: 2015: 2,4 PWh 2025: 3,9-6,3 PWh				
Andrae u. Edler (2015)	Huawei	Paper, peer-review	Energie	Global	Produktion & Nutzung	Aufwand: 2015: 2,3-3,7 PWh 2025: 4,4-12,4 PWh				
Smarter 2030	Interessensgemeinschaft	Report, online	CO₂-Einsparung & weitere	Einzelne Länder, Global	Nutzung	Einsparung: 12 Gt CO ₂ Aufwand: 1 Gt CO ₂				
BMWi	Behörde	Report, online	Energie	Deutschland	Nutzung	Aufwand: 2010: 56 TWh 2025: 46 TWh				

Abbildung 15: Bewertung der Studien nach den Maßstäben der seriösen Technikfolgenabschätzung

Im November 2020 wurden die ersten Zwischenergebnisse einer weiteren Studie zu den „Klimaeffekten der Digitalisierung“ in Deutschland veröffentlicht (siehe bitkom 2020). Die Studie wurde von bitkom in Auftrag gegeben und wird von Accenture durchgeführt. Die Methodik basiert auf der Smarter 2030 Studie (bitkom und Accenture 2020), die im Rahmen des hier durchgeführten Projekts (siehe Abbildung 15) analysiert wurde. Für die Smarter 2030 Studie konnten Defizite hinsichtlich ihrer Transparenz identifiziert werden, wodurch auch die Ergebnisse der neuen Studie in Frage gestellt werden könnten.

¹⁰ Auch auf Nachfrage wollte GeSi keine detaillierteren Informationen zur Verfügung stellen. Eine weitere Studie ist nicht geplant.

Wie die unterschiedlichen Ergebnisse der Gesamtszenarien und auch die in Kapitel II genannten Arbeiten zeigen, ist es nach derzeitigem Wissenstand kaum oder nicht möglich eine fundierte Aussage darüber zu treffen, ob der Megatrend der Digitalisierung zu Netto-Einsparungen an Energie- und Treibhausgasemissionen führt und damit eine nachhaltige Entwicklung unterstützt. Neben den derzeit noch sehr schwer zu quantifizierenden Effekten, wie z.B. die verstärkte IKT-Nutzung durch Endkonsumenten (Nutzung sozialer Medien, positive Effekte des Streamings etc.), existiert eine starke Vernetzung der Digitalisierungsmaßnahmen mit zahlreichen Auswirkungen, die derzeit ebenfalls noch nicht vollumfänglich erfasst werden. Beispiele hierfür sind u.a. die Auswirkung der Möglichkeit der digitalen Heimarbeit auf den Verkehr und gleichzeitig auf den Energieverbrauchs der Eigenheime und die benötigte Kapazität in Rechenzentren oder die Auswirkungen des autonomen Fahrens auf die lokale Datenübertragung und den Energiebedarf der notwendigen Rechenleistung. Zwar wurden diese in einer Studie teilweise berücksichtigt, jedoch fehlt es hier deutlich an Transparenz, weshalb die Ergebnisse nur schwer zu quantifizieren sind. Hier bedarf es noch einer ersten umfänglichen qualitativen Untersuchung und Veranschaulichung der Auswirkungen der Digitalisierungsmaßnahmen. Aufgrund der Vielfältigkeit der Digitalisierungsmaßnahmen und der daraus resultierenden Auswirkungen bietet sich z.B. die Netzplantechnik zu Visualisierung an.

Bei den bewerteten Studien handelt es sich meist um Bottom-Up-Ansätze, die ausgehend von Entwicklungen in einzelnen Bereichen, eine Gesamtentwicklung ableiten. Bewertungen sind aber auch auf einer makroskopischen Ebene möglich.

Ein Beispiel hierfür ist die Arbeit von Higón et al. (2017). Die Forscher haben versucht die Effekte der Digitalisierung auf die Treibhausgasemissionen auf einer globalen Ebene zu ermitteln. Dafür haben sie den Digitalisierungsgrad¹¹ zahlreicher Volkswirtschaften (116 Entwicklungsländer, 24 Industrieländer) abgeschätzt und in Bezug zu deren jährlichen Treibhausgasemissionen gesetzt. Die Korrelation dieser beiden Variablen weist eine „U-Form“ auf, d.h. dass mit zunehmendem Digitalisierungsgrad auch die Treibhausgasemissionen bis zu einem gewissen Punkt zunehmen. Nach diesem Punkt nehmen bei weiter zunehmendem Digitalisierungsgrad die Treibhausgasemissionen der Volkswirtschaft ab. Dieses Ergebnis kann im Grunde als eine moderne Form der „Umwelt-Kuznets Curve“ verstanden werden. Demnach wäre durch einen Technologietransfer auch der sogenannte Effekt der „Untertunnelung der Kuznets-Curve“ möglich (Munasinghe 1999). Allerdings muss die Forschung von Higón et al. (2017) dahingehen kritisch hinterfragt werden, ob die ermittelte Korrelation einer Kausalität unterliegt. Die Auswertungen zeigen, dass Industrieländer – also Länder mit einem höheren Entwicklungsstand – tendenziell auch einen höheren Digitalisierungsgrad aufweisen. Nun muss der Digitalisierungsgrad nicht zwingend der Grund für die positive wie ab einem gewissen Punkt negative Entwicklung der Treibhausgasemissionen sein. Genauso gut könnten es Aspekte sein, die mit dem Digitalisierungsgrad und dem Entwicklungsstand einer Volkswirtschaft korrelieren, wie z.B. der Ausbau der Erneuerbaren Energien oder der Einsatz von effizienteren und umweltfreundlicheren Technologien.

Durch einen solchen globalen Ansatz, kann angenommen werden, dass hier durchaus mehr Effekte berücksichtigt sind, als bei einem Bottom-Up-Ansatz. Jedoch ist die Analyse der Auswirkungen einzelner Effekte schwieriger.

¹¹ Abgeschätzt über den Einsatz an IKT.

Zwischenfazit: Aus den Anforderungen der Technikfolgenabschätzung und der darauf basierenden Analyse vorhandener Studien lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen und Ansatzpunkte für weitere Arbeiten identifizieren:

- Nur transparente und nachvollziehbare Studien bieten einen Mehrwert
- Szenarien zur Abbildung unterschiedlicher möglicher Entwicklungen sind wichtig, da niemand mit Sicherheit sagen kann, welche Entwicklung eintritt
- Den Studien fehlt es an Transparenz sowie einer Diskussion der Ergebnisse
- Bottom-Up vs. Top-Down Ansätze
 - o Bottom-Up: detailliertere Analysen möglich
 - o Top-Down: umfassender hinsichtlich positiver u. negativer Effekte
- Auswirkungen verschiedener Sektoren aufeinander sind bislang kaum in Studien einbezogen, eine qualitative wie auch quantitative Erfassung wäre wünschenswert.

V Konzeptvorschlag

Aufbauend auf den Überlegungen in Schritt III wird ein Vorschlag erarbeitet, wie entsprechende Analysen entscheidungsorientiert durchgeführt werden können, welche Bilanzgrenzen dabei einzuhalten sind usw. Zusammen mit Ergebnissen aus den anderen Vorhaben zur Ultraeffizienzfabrik II werden Entscheidungssituationen herausgearbeitet, die für Politik und Wirtschaft relevant sind.

Kapitel II zeigt, dass noch deutlicher Forschungsbedarf darin besteht, die ökologischen Auswirkungen der Digitalisierung zu erfassen. Dabei sind die direkten Aufwände, die durch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der IKT-Endgeräte bzw. weiterer Produkte, die Digitalisierungsmaßnahmen ermöglichen, anfallen nicht die eigentliche Herausforderung, sondern die indirekten Effekte. Diese können unterschiedlicher Natur sein, wie bspw. zusätzliche Aufwände durch Rebound Effekte, Einsparung von Material, Energie oder Transport oder auf makroskopischer Ebene ein durch die Digitalisierung forciertes Wirtschaftswachstum. Diese unterschiedlichen Auswirkungen – ob positiver oder negativer Natur – müssen identifiziert und quantifiziert werden. Dass es hierbei zu stark unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann, ist in Kapitel IV diskutiert. Die unterschiedlichen Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer transparenten und einheitlichen Vorgehensweise.

Bei der ökologischen Bewertung von Gesamtszenarien sind die Systemgrenzen und der Untersuchungsrahmen grundsätzlich so zu wählen, dass alle relevanten Prozesse der Herstellung, Nutzung und Entsorgung sowie deren geografische Lage mitberücksichtigt werden. So findet die Herstellung der IKT-Endgeräte, die bereits einen Großteil der lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen verursacht, in den meisten Fällen in China statt. Da wie in Kapitel III aufgezeigt, die Emissionen der länderspezifischen Strommixe teils stark unterschiedlich sein können, müssen diese Informationen bekannt sein und in die Auswertungen mit einfließen.

Grundsätzlich muss bei der konzeptionellen Vorgehensweise der (ökologischen) Bewertung der Digitalisierung unterschieden werden, ob bereits existierende Digitalisierungsmaßnahmen bzw. der aktuelle Stand der Digitalisierung bewertet werden soll, oder zukünftige Entwicklungen. In beiden Fällen müssen Vergleichsszenarien erstellt werden, um die ökologische Performance der Digitalisierungsmaßnahmen zu bewerten. Bei prospektiven Untersuchungen muss mit die zukünftigen Entwicklungen betreffenden Unsicherheiten umgegangen werden. Dabei sind die in Kapitel IV erläuterten Kriterien zu erfüllen: Transparenz, kausale Kette, das Aufzeigen von Handlungsoptionen sowie die Analyse von Einflussfaktoren. Somit ist bei prospektiven Untersuchungen das Erstellen von Szenarien notwendig.

Exkurs: Durch Corona bedingte Entwicklungen als Annäherung für die Effekte einer zunehmenden Digitalisierung

Durch das Coronavirus haben sich viele Veränderungen ergeben, die zu einem Voranschreiten der Digitalisierung geführt haben. So haben z. B. zahlreiche Arbeitnehmer von zuhause gearbeitet, wodurch der Verkehr z. T. drastisch reduziert wurde. Meetings und Dienstreisen wurden abgesagt und durch digitale Alternativen ersetzt. Dies bietet die Möglichkeit, „reale“ Daten zu erfassen und die Effekte der Digitalisierung hinsichtlich des arbeitsbedingten Verkehrsaufkommens sowie des Datenverkehrs zu quantifizieren.

Anhand mehrerer Szenarien wird die Veränderung der Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 durch die benannten Effekte abgeschätzt.

Der Datenverkehr (Festnetz, mobile Daten sind aufgrund der geringen Menge zu vernachlässigen) ist seit Beginn des 21. Jahrhunderts kontinuierlich gestiegen. 2019 betrug der jährliche Datenverkehr rund 52 Mrd. GB (Bundesnetzagentur 2020b, S. 52). Dies entspricht einer Steigerung von rund 13 % gegenüber dem Vorjahr. Dies ist auch die geringste Steigerung des Datenverkehrs der letzten zehn Jahre. Die höchste jährliche Steigerung des Datenverkehrs lag bei rund 65 % im Jahr 2016, durchschnittlich liegt die Steigerung bei etwa 31 %. Mit dieser durchschnittlichen Steigerungsrate ergibt sich ein Datenverkehr von 68 Mrd. GB für das Jahr 2020.

Der Lockdown hatte zur Folge, dass der Datenverkehr zusätzlich gestiegen ist. Vom Jahr 2016 auf 2019 betrug die jährliche Wachstumsrate des Datenverkehrs am Knotenpunkt in Frankfurt ca. 14 %. Anfang April diesen Jahres gab es einen Anstieg von über 30% auf 6470 Gbps gegenüber dem durchschnittlichen Wert von April 2019 bis März 2020 (4854 Gbps) (DE-CIX 2020)¹². Mitte Mai betrug der Anstieg zum Vergleichswert noch etwa 19% (5789 Gbps), Anfang Oktober lag der Wert bei 6129 Gbps, was einem Anstieg von rund 26 % im Vergleich zum Durchschnittswert vor Corona entspricht.

Nimmt man nun an, dass die Steigerung des Datenverkehrs am Netzknoten Frankfurt repräsentativ für ganz Deutschland ist, führt dies zu einer weiteren Erhöhung des für 2020 prognostizierten Datenverkehrs um ca. 15 %. Als Unter- und Obergrenze für den zusätzlichen Anstieg des Datenverkehrs durch zunehmendes Homeoffice werden 10 % bzw. 30 % angenommen.

Die ermittelten Datenverbräuche wurden zur Bestimmung des Treibhausgaspotentials mit einem Energiebedarf von 0,2 kWh/GB (Shehabi et al. 2014) sowie einem GWP von 0,5 kg CO₂/kWh (UBA 2020) bewertet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 16.

Den Effekten, die durch den zusätzlichen Datenverkehr entstehen, müssen die Effekte durch eine Reduktion des Pendlerverkehrs gegengerechnet werden. Im Jahr 2017 betrug der motorisierte Individualverkehr rund 936 Mrd. Personenkilometer (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019, S. 219). Nach Nobis et al. (2019, S. 60) lag der Anteil des Verkehrsaufkommens durch den Arbeitsweg 2017 bei 21 %. Dieser Wert hat sich seit 2002 nur geringfügig geändert. Der berechnete beruflich bedingte Pendlerverkehr ist die letzten Jahre ebenfalls relativ konstant. Im Jahr 2017 lag der Wert 196 Mrd. Personenkilometer, dieser Wert wird als Annäherung für 2020 angenommen.

Laut Alipour et al. (2020) lag der Anteil der Arbeitnehmer, die während der Corona-Pandemie die Möglichkeit hatten, von zuhause zu arbeiten bei 56 %. Unter 50 % nutzten diese Möglichkeit. Es wird daher angenommen, dass etwa 25 % der Arbeitnehmer von zuhause arbeiteten. Um eine mögliche Spannweite abzudecken, werden in den Szenarien ein Mindestwert von 10 % (177 Mrd. Pkm pro Jahr) und ein Maximalwert von 50 % (98 Mrd. Pkm pro Jahr) abgebildet.

Die ermittelte Strecke für den jährlichen Personenverkehr wurde anschließend mit einem Emissionsfaktor von 120 g/km (UBA 2018) bewertet.

Basierend auf den gemachten Annahmen, die in Tabelle 4 zusammengefasst sind, ergeben sich die die in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse für die drei Szenarien.

¹² Daten wurden am 02.04.2020, 11.05.2020 und 07.08.2020 abgerufen.

Tabelle 4: Annahmen für Berechnung der Szenarien.

	Basis	Telearbeit mittel	Telearbeit gering	Telearbeit hoch
Pendlerverkehr in Mrd. Pkm/Jahr	196	147	177	98
Datenverkehr in Mrd. GB/Jahr	68	79	75	89

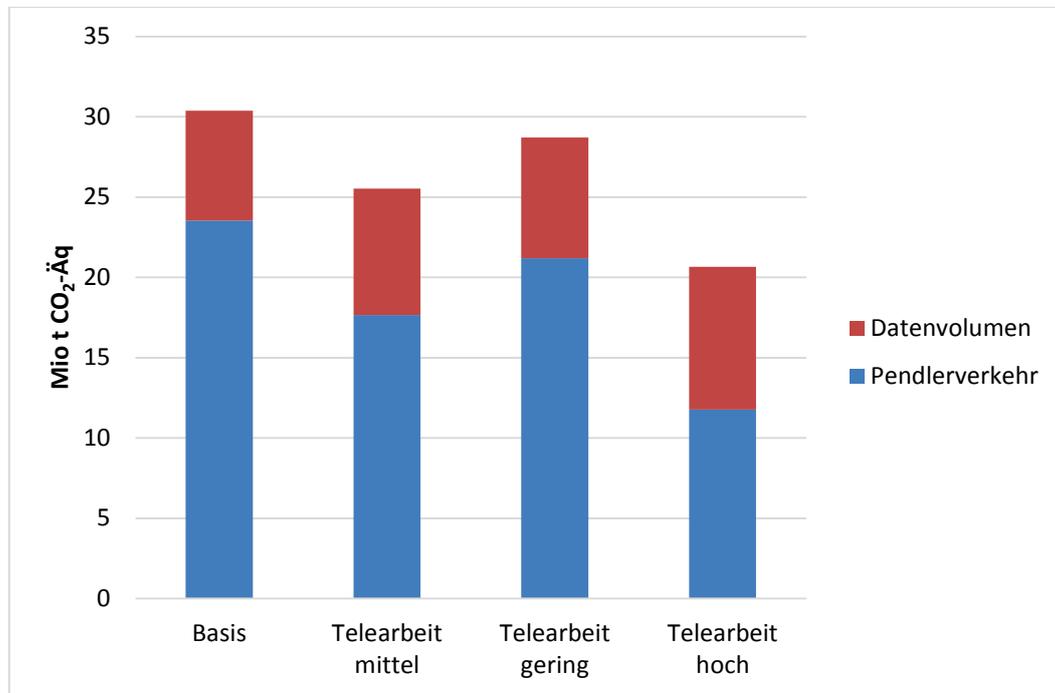


Abbildung 16: Szenarien zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen durch vermehrte Telearbeit.

Es wird deutlich, dass durch eine Zunahme der Telearbeit die jährlichen Gesamtemissionen gesenkt werden können. Die Auswirkungen der Reduktion des Pendlerverkehrs überwiegen den Anstieg der Emissionen durch den vermehrten Datenverkehr. Durch eine erneuerbare Energiebereitstellung sind weitere Einsparungen möglich, da diese sich lediglich auf den Energieverbrauch des Datenverkehrs auswirken.

Die Analysen sind als erste Abschätzungen zu verstehen.

Zwischenfazit: Für die Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Digitalisierung wird ein Szenario-basierter Ansatz empfohlen, da so die Unsicherheit hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen einbezogen werden kann.

Die vorgenommenen Berechnungen deuten darauf hin, dass die Einsparungen, die durch das Homeoffice erreicht werden können, höher sind als der verursachte Mehraufwand durch den zusätzlichen Datenverkehr. Diese Aussage lässt sich jedoch nicht auf die Digitalisierung insgesamt anwenden. Dazu sind weitere Arbeiten notwendig, die weitere Maßnahmen und Effekte einbeziehen.

VI IKT in der Produktion

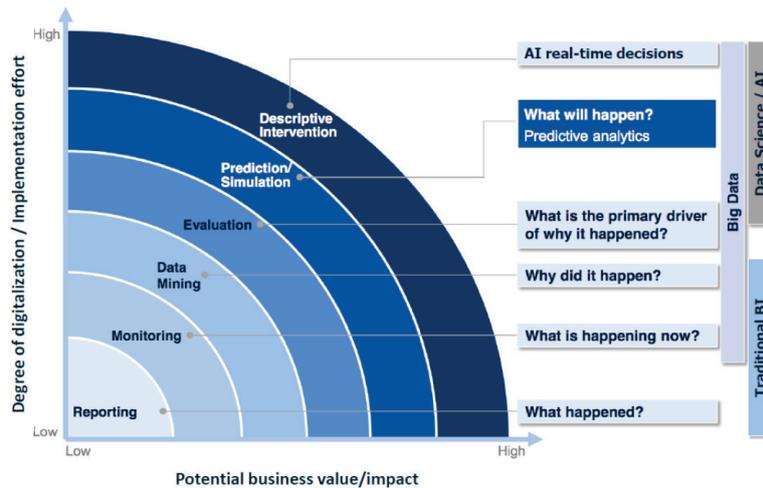
Mit den konkreten technologischen Vorschlägen aus den anderen Vorhaben zur Ultraeffizienzfabrik II werden erste Abschätzungen exemplarisch vorgenommen, welche Umweltbelastungen und Einsparpotenzialen durch IKT-Einsatz in der Produktion vorliegen und wie belastbar die Zahlen sind. Es wird aufgezeigt, ob ein weiterer Analysebedarf besteht und wie hierbei vorgegangen werden kann.

Laut einer Studie des BMWi (Weber et al. 2018) geben mehr als 80% der deutschen Unternehmen an, dass die Digitalisierung eine hohe Bedeutung für sie hat. Trotzdem werden die vorhandenen innovativen digitalen Technologien von den Wenigsten eingesetzt. Folgende Liste gibt eine Übersicht über die Technologien und deren Nutzung in der Industrie (Weber et al. 2018):

- **Big Data:** Zusammenführung und Auswertung großer Datenmengen aus unterschiedlichen Quellen und deren Nutzung für die Optimierung von Unternehmensstrategien und -prozessen. Wird von 9 % der befragten Firmen benutzt.
- **Blockchain:** Dezentrale, gemeinsam genutzte Datenbank, die eine wachsende Liste von Transaktionsdatensätzen beinhaltet, die nicht verändert werden können. Wird nur von 8 % der befragten Firmen eingesetzt.
- **Cloud Computing:** Nutzung von IT-Infrastruktur über das Internet, z. B. Speicherplatz oder Software. Wird von 43 % der befragten Unternehmen verwendet.
- **3D-Druck:** Herstellungsverfahren zur Produktion von Werkzeugen, Fertigteilen oder Prototypen. 10 % der befragten Firmen nutzen den 3D-Druck.
- **Künstliche Intelligenz:** Softwaresysteme, die selbstständig handeln und dazulernen können, z. B. maschinelles Lernen. Wird lediglich von 5 % der befragten Firmen eingesetzt.
- **Robotik und Sensorik:** Sammelbezeichnung für innovative Prozesse der Produktion. 17% der befragten Firmen nutzen diese Technologie.
- **Smart Services:** Digitalisierung von Dienstleistungen für Privatpersonen und Geschäftsprozesse. Wird von 29 % der befragten Unternehmen benutzt.
- **Internet der Dinge:** Digitale Vernetzung von Geräten, Gegenständen, Gebäuden und Anlagen. 39% der befragten Firmen nutzen das Internet der Dinge.
- **Industrie 4.0:** Intelligente, vernetzte Systeme, mit denen die gesamte Wertschöpfungskette optimiert werden kann, im Kontext dieses Reports auch die unternehmens- und standortübergreifende Vernetzung bisher einzeln betriebener Prozesse oder Systeme. Wird von 5% der befragten Unternehmen benutzt.

Industrie 4.0

Nach Kagermann (2017) ist das produzierende Gewerbe das Rückgrat der deutschen Wirtschaft, weshalb die Implementierung der „Industrie 4.0“ in Deutschland von hoher Relevanz ist. Beispielsweise liegt im Vergleich der Anteil des produzierenden Gewerbes am BIP in Deutschland bei 22,4%, in den USA liegt bei 11,9%, in Frankreich und Großbritannien bei jeweils 10% (Heymann und Vetter 2013). Nach Schaefer und Neligan (2019) kann die Industrie 4.0 in die folgende Schritte unterteilt werden:



Quelle: McKinsey and Company

Abbildung 17: Grad der Digitalisierung und potenzieller unternehmerischer Mehrwert (Schaefer und Neligan 2019)

Beim „Monitoring“ werden Prozesse mithilfe der Digitalisierung in Echtzeit überwacht und ermöglichen somit eine schnellere Reaktion auf auftretende Ereignisse. Ein Beispiel dafür ist die Firma Zeller+Gmelin GmbH & Co KG, die durch den Einsatz einer computergestützten Dosierung von Druckfarben die Fehlerquote auf null senken konnte (Schmidt et al. 2017). Ein weiteres Beispiel ist die Firma John Deere GmbH & Co KG, die eine sensorbasierte Steuerung der Spülbäder-Kaskaden in der Lackiertechnik eingeführt hat. Dadurch wird die Wasserqualität der Spülbäder automatisch überwacht und der aktuelle Zustand der Spülbäder online und in Echtzeit sowie kostengünstig und dennoch zuverlässig bestimmt. Durch diese Maßnahme konnte der Wasserverbrauch Wassernachdosierung um 30% reduziert werden. Die Investitionskosten amortisierten sich schon im ersten Betriebsjahr (Schmidt et al. 2017).

Auf einem fortgeschrittenen Niveau der Konnektivität befindet sich die Mader GmbH & Co. KG. Das Unternehmen hat eine App entwickelt mit welcher der Druckluftsystem-Lieferant aus Baden Württemberg in Echtzeit die Druckluftsysteme seiner Kunden überwachen kann. Dadurch lässt sich auch der Energieverbrauch der Systeme überwachen, wodurch bereits bemerkenswerte Ersparnisse erreicht wurden. Im Falle einer Leckage kann die Mader GmbH & Co. KG die passenden Ersatzteile frühzeitig bestellen und sofort einbauen. Dies führt zu einer schnelleren und effizienteren Behebung der Leckagen sowohl für den Kunden als auch für den Druckluftsystem-Lieferanten (Schmidt et al. 2019; Schebek et al. 2017).

Aus den hier aufgeführten sowie weiteren betrachteten Beispielen (siehe Abbildung 18) lassen sich verschiedene Strategien identifizieren:

- **Effizientere Materialnutzung:** Durch Digitalisierung wird die Menge an eingesetzten Materialien reduziert. Beispielsweise in der Firma Ulrich GmbH & Co. KG (Ulrich medical) wurde durch die Überwachung von Produktionsprozessen in Echtzeit der Verschleiß und somit der Bedarf an Hartmetall (Wolframcarbide und Kobalt) massiv reduziert (Schmidt et al. 2017).
- **Effizientere Energienutzung:** Es gibt mehrere Beispiele in der Literatur, die aufzeigen wie die Digitalisierung zur Senkung des Energieverbrauchs beigetragen hat. Diese Reduktion kann sowohl in der Produktion als auch im Bereich des Gebäudemanagements stattfinden.

Beispiele dafür sind „Optimierte Geschäftsprozesse“ bei der C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH (Schebek et al. 2017) oder „Software zur Steuerung der Beleuchtung und Jalousien durch die Mitarbeiter“ bei der Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG. (Schmidt et al. 2019).

- **Dematerialisierung:** Im Falle einer Dematerialisierung werden analoge Prozesse oder Teilprozesse durch virtuelle Alternativen ersetzt, was u.a. zu einer Materialeinsparung führt. Ein Beispiel ist das Projekt „Data-on-a-Stick“ der Firma Sensitec GmbH. Im Unternehmen wurde die Dokumentation in der Lagerhaltung auf Papier vorgenommen, was in diesem Fall mit besonderen Kosten verbunden war, da die Firma Reinraumpapier nutzen musste. 2011 beschloss diese Firma eine Umstellung hin zu einer papierlosen Produktion. Dadurch wurde das Reinraumpapier durch einen USB-Stick ersetzt. Laut der Studie des VDI konnten dadurch Material- und Energieeinsparungen von 25% und 33% erreicht werden (Schebek et al. 2017). Eigene Berechnung zeigten, dass ein USB Stick, der ca. 12 g wiegt und über ca. 10 000 Lesezyklen verfügt, mindestens 2,5 kg Papier ersetzt. Dadurch können unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs des USB-Sticks, konservativ geschätzt, die CO₂-Emissionen um 75% reduziert werden. Die bei der Verwendung von Papier notwendigen Schreibstifte wurden nicht berücksichtigt, würden das Einsparpotential jedoch erhöhen. Auf die Höhe der CO₂-Einsparungen hat auch der Strommix einen hohen Einfluss. Die Verwendung erneuerbarer Energien würde zu einer weiteren Erhöhung der Einsparung führen.

Neben den genannten Strategien gibt es noch weitere Ziele wie eine erhöhte Zuverlässigkeit, Nachverfolgbarkeit und Prozessverbesserungen, welche sich aber nicht direkt auf die verursachten Umweltwirkungen auswirken und somit schwer zu quantifizieren sind.

		Effiziente Materialnutzung	Effiziente Energienutzung	Dematerialisierung	Erhöhte Zuverlässigkeit	Erhöhte Nachverfolgbarkeit im Prozess
PA 1	„Optimierte Geschäftsprozesse“ C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH	✔	✔			✔
PA 2	„Druckluft-Leckage-App“ Mader GmbH & Co. KG		✔		✔	✔
PA 3	„One Piece Flow“ J. Schmalz GmbH	✔				✔
PA 4	„Warehouse Management System“ MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG	✔		✔		✔
PA 5	„Data on a Stick“ Sensitec GmbH			✔		✔
PA 6	„Virtuelle Produktsimulation“ Sensitec GmbH	✔		✔		
PA 7	„Business-Warehouse-System“ Hermos AG	✔		✔		✔
PA 8	„Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau“ Sanner GmbH	✔		✔		✔
PA 9	„Cloud-basierte Fertigung“ Sanner GmbH				✔	✔
PA 10	„FoamCreator“ Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co	✔		✔		✔

Abbildung 18: Beispiele und identifizierte Strategien, eine Zuordnung der Beispiele ist nicht immer eindeutig.

Zwischenfazit: Die Industrie 4.0 ist für die deutsche Wirtschaft von hohem Interesse, da die Industrie 4.0 insbesondere das produzierende Gewerbe betrifft. Im Streben nach mehr Digitalisierung verfolgt die Industrie unterschiedliche Strategien: von einer effizienteren Materialnutzung über eine effizientere Energienutzung und Virtualisierung von Prozessen bis zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit oder Nachverfolgbarkeit eines Prozesses. Diese Strategien können sehr positive Auswirkungen auf die Umwelt haben. Leider sind diese Auswirkungen kaum quantitativ bewertet und in Berichten veröffentlicht.

VII Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft

Darüber wie Digitalisierungsmaßnahmen eingesetzt werden können, um das Konzept der Circular Economy (CE, zu Deutsch Kreislaufwirtschaft) zu unterstützen und Materialien und Rohstoffe im Wirtschaftskreislauf zu halten, finden sich in der Literatur zahlreiche Vorschläge. Insbesondere im Bereich der Nachverfolgbarkeit der Produkte bzw. der zukünftigen sekundären Rohstoffquellen über z.B. Sensorik (Satellitentechnologie, RFID) und Block-Chain-Lösungen sind vielfach vorgeschlagen (Wilts und Berg 2017; GeSI 2015b; World Economic Forum (WEF) 2019). Kennzeichnungen der Produkte wie z.B. Fluoreszenz-, RFID-, oder DNA-Marker sollen dabei für eine eindeutige Identifikation bzw. Informationsweitergabe sorgen. Eine Nachverfolgung der Produkte kann u.a. dafür eingesetzt werden, die Sammlung und darauffolgende Sortierung zu verbessern. Über die gleichen bzw. verwandten Ansätze kann zudem die Informationsweitergabe von z.B. der genauen materiellen Zusammensetzung der Produkte erfolgen. Diese Informationen sind notwendig, um die Ausbeute im Recyclingprozess zu optimieren (Reuter et al. 2018). Praktische Umsetzungen solcher Digitalisierungsmaßnahmen gibt es bis dato jedoch noch keine.

Eine weitere Digitalisierungsmaßnahme in der Kreislaufwirtschaft ist die computergestützte Sensortechnik, die eine verbesserte Sortierung von Abfallströmen ermöglicht. Hier gibt es bereits einige praktische Anwendungsbeispiele. Im Bereich der Kunststoffe sind hier insbesondere die Sortieranlagen der Firma Metso in Gerlingen und der Systec Plastics GmbH in Thüringen. In Gerlingen werden Kunststoffabfälle aus dem Gelben Sack bzw. der Gelben Tonne sortenrein sortiert. So können die Kunststoffe HDPE, PP und PET mit einer Reinheit von 94-98 % separiert und einer erneuten Nutzung zugeführt werden. Da die Kunststoffe zwar fast 100 % sortenrein aber nicht noch zusätzlich nach Farbe separiert sind, können sie nicht wieder für hochwertige Kunststoffanwendungen verwendet werden, sondern erfahren ein Downcycling. Dennoch wird durch die Sortieranlage der Firma Metso ein stoffliches Recycling von Kunststoffen ermöglicht, die ansonsten über eine thermische Verwertung entsorgt werden würden. Die Systec Plastics GmbH bereitet ebenfalls Verpackungsabfälle aus dem dualen System auf. Die Aufbereitung beginnt mit dem Zerkleinern und Reinigen der Kunststoffe. Über Dichtentrennverfahren werden die unterschiedlichen Kunststoffsorten voneinander getrennt und über eine anschließende computergestützte Sensorik nach Farben getrennt. Aus den nach Farbe sortieren sortenreinen Kunststoffen werden Granulate erzeugt, die eine so hohe Reinheit besitzen, dass sie erneut als Kunststoffverpackung eingesetzt werden können. Es kann also eine Rückführung des Materials in den ursprünglichen Stoffkreislauf realisiert werden (VDI ZRE 2018). Ein alternativer Weg zur sensorgestützten Sortierung von Kunststoffabfällen kann das chemische Recycling sein. Dabei werden die Kunststofffraktionen in ihre chemischen Bestandteile bzw. Bauteile zerlegt, die wiederum als Inputstoff für die chemische Industrie genutzt werden können. Erste Untersuchungen hierzu zeigen, dass für bestimmte, sehr unreine Kunststofffraktionen, das chemische Recycling im Vergleich zur sensorgestützten Sortierung und mechanischen Aufbereitung ökologisch und ökonomisch besser abschneiden kann (Stallkamp et al. 2020).

Sensorgestützte Sortierung kann auch im Metallrecycling gewinnbringend eingesetzt werden. Eine zentrale Herausforderung beim Recycling von Aluminium sind die unterschiedlichen Legierungen. Werden die Legierungen nicht nach Sorten oder zumindest nach Serien voneinander getrennt, so vermischen sich die unterschiedlichen Legierungselemente in der Metallurgie. Eine metallurgische Separation bestimmter Legierungselemente ist nicht möglich (Nakajima et al. 2010). Der Output ist eine Legierung mit zahlreichen Legierungsbestandteilen, die die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Legierungen nicht mehr erfüllt. So ist der übliche Gang beim Aluminiumrecycling

entweder das Downcycling zu Gusslegierungen, deren Anforderungen an die Legierungszusammensetzung geringen sind, oder eine Verdünnung des Sekundäraluminiums mit reinem primärem Aluminium, um die Konzentrationen unerwünschter Legierungsbestandteile zu senken (Rombach 2004). Die Hydro Aluminium Recycling Deutschland GmbH betreibt in Dormagen eine Anlage zur Aufbereitung von Aluminiumschrotten, die sie mit einer Röntgentransmissions-Sortieranlage ausgestattet haben. Diese sensorgestützte Sortierung ermöglicht eine sortenreine Sortierung der Aluminiumlegierungen und verhindert so das bisher vorherrschende systematische Downcycling bzw. die Zugabe von Primäraluminium. Nach Angaben der Anlagenbetreiber können so pro Jahr 176.033 t CO₂ durch die Substitution von Primärmaterial eingespart werden. Durch eine deutschlandweite Ausweitung dieser Technologie könnte eine jährliche CO₂-Einsparung von 3.634.445 t realisiert werden (Kurth und Kurth 2014).

Neben der klassischen mechanischen Aufbereitung (Zerkleinern und Sortieren) gewinnt insbesondere bei komplexen sekundären Quellen, wie z.B. Elektroaltgeräte, die Demontage immer mehr an Bedeutung. Neueste Ansätze befassen sich mit der robotergestützten Demontage (Alvarez-de-los-Mozos und Renteria 2017). Apple kann als Pionier der robotergestützten Demontage verstanden werden. Der Demontageroboter „DAISY“, die verbesserte Version des Vorgängermodells „LIAM“ aus dem Jahr 2016, ist in der Lage 200 iPhones pro Stunde zu demontieren (Apple 2019).

Das Land Baden-Württemberg fördert im Rahmen des Projektes „Digitalisierung und Ultraeffizienz“ die Entwicklung einer robotergestützten Demontagefabrik. Erste Voruntersuchungen zeigen, dass die Demontage mit Robotern im Gegensatz zu manuellen Demontage wirtschaftlich sein kann. Untersucht wurden Industrie-Elektromotoren, deren Demontage die gezielte Rückgewinnung von im Wesentlichen Eisen, Kupfer, Aluminium und Neodym-Eisen-Bor-Magneten ermöglicht. In Tabelle 5 sind die Kosten des Schrottankaufes, der robotergestützten Demontage und allen damit in Verbindung stehenden Kosten sowie die Erlöse der erzeugten Metall- bzw. Bauteilfraktionen aufgeführt. Nach diesen Werten, die von den Projektverantwortlichen veröffentlicht wurden, kann durch die Demontage ein Reingewinn von ca. 4.500 € erzielt werden (Zeller et al. 2016). Das entspricht lediglich 0,01 % des Umsatzes (generierter Materialwert). Eine mögliche Alternative zur Demontage ist das direkte Einbringen der Elektromotoren in die Kupfermetallurgie. Dabei können das enthaltene Kupfer, sowie mögliche Edelmetalle in den elektronischen Komponenten vollständig und in hoher Reinheit rückgewonnen werden. Eisen, Aluminium und der Neodym-Eisen-Bor Anteil verschlacken in diesem Prozess. Die entstehende Schlacke kann als Eisensilikatsand als Baustoff verwendet werden. Durch dieses Verfahren werden zwar deutlich weniger Metalle stofflich rückgewonnen, allerdings sind die entstehenden Aufwände signifikant geringer (siehe Tabelle 5). Kupfer macht zwar nur ca. 10 % der gesamten Masse eines Elektromotors aus aber über 50 % des ökonomischen Materialwertes. Durch die Aufbereitung über die Kupfermetallurgie wird Kupfer zudem nicht nur separiert, sondern zu höchster Reinheit raffiniert, was den Materialwert vom Schrottpreis (nach Demontage) auf tatsächlichen Metallpreis erhöht.

Tabelle 5: Wirtschaftlichkeit des robotergestützten Demontage von Elektromotoren und der direkten Einbringung in die Kupfermetallurgie (Werte nach Zeller et al. (2016) und Schäfer (2020))

	Roboterdemontage [€]	Metallurgie (direkt) [€]
Kosten Schrottankauf	-21.133.927,00	-21.133.927,00
Kosten Roboter	-15.456.000,00	
Kosten Transport	-4.528.699,00	-4.528.699,00
Kosten Kaliumhydroxid	-112.568,00	
Kosten Entsorgung Lauge	-633.195,00	
Kosten Metallurgie		-6.690.177,40
Erlös Sekundärrohstoffe	41.868.924,00	
Erlös Kupfer (raffiniert)		35.460.000,00
Erlös Elektroschrott (übernommen)		491.299,00
Erlös Eisensilikatsand		953,46
Netto-Erlös	4.535,00	3.599.449,06

Nach der Auswertung in Tabelle 5 schneidet die Aufbereitung der Elektromotoren über das direkte Einbringen in die Kupfermetallurgie mit einem realisierbaren Gewinn von 3,6 Mio. € wesentlich besser ab als die robotergestützte Demontage. Damit die Demontage mit der direkten metallurgischen Aufbereitung konkurrieren kann, müssten die Demontageaufwände um mindestens 23 % gesenkt werden. Vor einem reinen wirtschaftlichen Hintergrund ist die robotergestützte Demontage noch weit davon entfernt, die zu präferierende Option zu sein. Wesentlichen Grund hierfür ist, dass die Magnete der Elektromotoren, die gezielt demontiert werden, zwar einen hohen ökonomischen Wert pro Masseneinheit haben, aber einen nur sehr geringen Massenanteil am Elektromotor. Sie machen damit nur 0,3 % am Erlös der gewonnenen Sekundärrohstoffe aus. An dieser Stelle sollte jedoch der Forschungscharakter des Vorhabens und die damit verbundene Technologieentwicklung nicht vergessen werden. Demontageprozesse können durchaus sinnvoll sein, insbesondere, wenn sich werthaltige Edel- und Technologiemetalle auf gut zu demontierenden Bauteilen befinden. In solchen Fällen, kann eine Demontage auch zu entscheidenden ökologischen Vorteilen führen (Schäfer 2020). Zudem kann es in bestimmten Fällen sinnvoll sein, kritische Metalle (wie z.B. die seltene Erde Neodym) auch zu höheren ökonomischen und ggf. ökologischen Aufwänden aus strategischen Gründen rückzugewinnen.

Nach der mechanischen Aufbereitung und Demontage, die wie gezeigt durch Digitalisierungsmaßnahmen bzw. digitaler Unterstützung verbessert werden kann, erfolgt beim Recycling von Metallen die metallurgische Aufbereitung. Auch hier kann die Digitalisierung einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, die Prozesse effizienter zu gestalten und die stofflichen Ausbeuten zu erhöhen. Reuter (2016) spricht hier von dem metallurgischen Internet-of-Things. Ziel ist es, mithilfe der Digitalisierung die metallurgische Infrastruktur untereinander besser zu vernetzen und gleichzeitig Informationsrückflüsse zu den Produktherstellern zu ermöglichen. So sollen die stofflichen Ausbeuten erhöht und Informationen für recyclinggerechtere Produkte bereitgestellt werden. Die metallurgischen Prozesse selbst können durch Simulationen optimal ausgelegt und über Prozessüberwachung optimal gefahren werden (Reuter 2016).

In ihrem Literatur-Review kommen Pagoropoulos et al. (2017) zu dem grundsätzlichen Ergebnis, dass es einen Konsens darüber gibt, dass die Digitalisierung eine wichtige Rolle hin zu einer zirkulären

Wirtschaft einnimmt. Über den Reifegrad der möglichen Digitalisierungsmaßnahmen herrscht jedoch noch Uneinigkeit. Nach Büchele und Andrä (2016) befindet die CE im Bereich der Digitalisierung noch in den Kinderschuhen. Es bestehen noch signifikante Forschungsbedarfe, um die Chancen und Herausforderungen von Digitalisierungsmaßnahmen für die CE vollumfänglich verstehen zu können (Antikainen et al. 2018).

Neben den aufgezeigten positiven Auswirkungen, die die Digitalisierung auf die Kreislaufwirtschaft haben kann, stellt die Digitalisierung die Kreislaufwirtschaft auch vor ganz maßgebliche Herausforderungen. In Kapitel II ist aufgezeigt, dass der Materialbedarf der IKT-Endgeräte über das vergangene Jahrzehnt zwar gefallen ist und damit das daraus resultierende Abfallaufkommen ebenfalls gesunken sein muss bzw. weiterhin sinken wird.¹³ Allerdings werden die Produkte immer komplexer, d.h. die Materialvielfalt nimmt zu, die Materialverbindungen und -mischungen werden immer vielfältiger und die Konzentrationen der Materialien nehmen ab. Diese Entwicklungen stellen das Recycling vor enorme Herausforderungen und sind häufig Grund dafür, dass bestimmte Materialien nicht recycelt werden. Dabei gehen insbesondere die Materialien bzw. Metalle verloren, deren Primärgewinnung hohe Umweltwirkungen verursacht und zudem meist als kritisch eingestuft sind (Schäfer und Schmidt 2019). Die oben beschriebenen Maßnahmen die durch Digitalisierung ermöglicht werden, können entscheidend dazu beitragen, diese – u.a. durch IKT-Endgeräte ausgelöste Situation – zu verbessern.

Zwischenfazit: Digitalisierungsmaßnahmen wie z.B. sensorgestützte Sortierung können die Qualität von Recyclingprozessen entscheidend verbessern. Das zeigen Ergebnisse aus der Praxis. In Zukunft wird der Einsatz von Digitalisierung in der Recyclingbranche aller Voraussicht nach noch weiter zunehmen. Insbesondere im Bereich der sicheren Weitergabe von Produktinformationen existiert großes Potenzial. Grundsätzlich gilt jedoch, dass jede Maßnahme durch begleitende Untersuchungen auf ihre Sinnhaftigkeit überprüft werden sollte.

¹³ Das Abfallaufkommen ist abhängig von der Lebensdauer der Produkte.

VIII Schlussfazit

Der globale Megatrend der Digitalisierung ist für Deutschland und insbesondere seinen größten Industriestandort Baden-Württemberg von hoher Relevanz. Großes Potenzial bietet die Digitalisierung u. a. im Bereich der sicheren Weitergabe von Produktinformationen zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft. Trotzdem werden die vorhandenen innovativen digitalen Technologien bislang nur zögerlich eingesetzt. Dies ist auch dadurch bedingt, dass keine zuverlässige Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung von Maßnahmen existiert.

Die vorhandenen Studien fokussieren zu stark auf den Energiebedarf als alleinigen Indikator. Dieser ist als stark approximative Schätzung der Umweltwirkungen zu verstehen. Insbesondere für die Bewertung der Herstellung von IKT-Geräten sollten weitere Indikatoren herangezogen werden, da die Herstellungsphase wesentlich zu anderen Wirkungskategorien wie z. B. der Versauerung beiträgt. Eine ganzheitliche Bewertung der ökologischen Performance von Digitalisierungsmaßnahmen kann daher nur durch eine vollumfängliche Ökobilanz vorgenommen werden.

Studien zum Rohstoffbedarf von IKT-Geräten und dem damit verbundenen energetischen Aufwand der Herstellung und Nutzung fehlen gänzlich. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Analysen zeigen zwar, dass die Rohstoffgewinnung nur unwesentlich zu den gesamten verursachten Energieaufwendungen und Treibhausgasemissionen beiträgt, jedoch ist der IKT-Sektor aus Sicht der globalen Rohstoffbedarfe ein wesentlicher Nachfrager von Technologie- und Edelmetallen. So werden ca. 40 % der Weltjahresproduktion von Tantal in IKT-Endgeräten verbaut. Dies ist dahingehend kritisch zu betrachten, da die Miniaturisierung und die damit einhergehende niedrige Konzentration der Metalle in den Produkten das Recycling negativ beeinflussen. Betrachtet man den Rohstoffbedarf, der sich aus dem zusätzlichen Energiebedarf der Digitalisierung ergibt, dann ist dieser um Größenordnungen höher als der Rohstoffbedarf der Herstellung der IKT-Geräte. Dieser Trend wird sich durch den Ausbau erneuerbarer Energien zukünftig noch verstärken.

Insgesamt bedarf es zur ökologischen Bewertung von Entwicklungen und Maßnahmen im Bereich der Digitalisierung noch einer einheitlichen Vorgehensweise und Methodik, welche die Auswirkungen ganzheitlich erfasst. Vor dem Hintergrund der Technikfolgenabschätzung bieten Studien nur dann einen Mehrwert, wenn sie transparent sind, kausale Zusammenhänge berücksichtigen, Einflussfaktoren analysieren und Handlungsempfehlungen aufzeigen. Daher empfiehlt sich für die Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen und der Digitalisierung im Allgemeinen der Einsatz vergleichender Szenarien. Dies gilt insbesondere bei der Bewertung zukünftiger Entwicklungen, da nur so die damit verbundenen Unsicherheiten abgebildet werden können. Besonderer Wert ist auf die Definition der Systemgrenzen zu legen, welche alle relevanten Prozesse der Herstellung, Nutzung und Entsorgung sowie deren geografische Lage umfassen sollten. Zudem ist es notwendig, neben den direkten auch die indirekten, teilweise sektorenübergreifenden Effekte der Maßnahmen, wie z. B. den Rückgang des Personentransports durch vermehrtes Homeoffice, zu erfassen und zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- Accenture (2016): #SMARTer2030 follow up. Business Case Analysis for Swisscom.
- Al Barazi, Siyamend; Schmidt, Michael; Vetter, Sebastian; Brandenburg, Torsten; Kuhn, Thomas (2018): DERA Rohstoffinformationen. Rohstoffrisikobewertung - Kobalt.
- Alipour, Jean-Victor; Falck, Oliver Falck; Schüller, Simone (2020): Homeoffice während der Pandemie und die Implikationen für eine Zeit nach der Krise. In: *ifo Schnelldienst* 73 (7/2020), S. 30–36. Online verfügbar unter <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2020-07-alipour-falck-schueller-homeoffice.pdf>, zuletzt geprüft am 01.10.2020.
- Alvarez-de-los-Mozos, Esther; Renteria, Arantxa (2017): Collaborative Robots in e-waste Management. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 55–62. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.133.
- Andrae, Anders; Edler, Tomas (2015a): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. In: *Challenges* 6 (1), S. 117–157. DOI: 10.3390/challe6010117.
- Andrae, S. G.; Edler, T. (2015b): On Global Electricity Usage of Communication TEchnology. Trends to 2030. In: *Challenges* 2015 (6), S. 117–157. DOI: 10.3390/challe6010117.
- Antikainen, Maria; Uusitalo, Teuvo; Kivikytö-Reponen, Päivi (2018): Digitalisation as an Enabler of Circular Economy. In: *Procedia CIRP* 73, S. 45–49. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.027.
- Apple (2019): Environmental Responsibility Report. 2019 Progress Report, covering fiscal year 2018.
- Australian Government (AG) (2013): Case Studies in System Optimisation to Improve Energy Productivity.
- Avgerinou, Maria; Bertoldi, Paolo; Castellazzi, Luca (2017): Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. In: *Energies* 10 (10), S. 1470. DOI: 10.3390/en10101470.
- Baxter, Jared A.; Merced, Daniel A.; Costinett, Daniel J.; Tolbert, Leon M.; Ozpineci, Burak (2018 - 2018): Review of Electrical Architectures and Power Requirements for Automated Vehicles. In: 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Long Beach, CA, 13.06.2018 - 15.06.2018: IEEE, S. 944–949.
- Bieser, Jan; Hilty, Lorenz (2018a): Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. In: *Sustainability* 10 (8), S. 2662. DOI: 10.3390/su10082662.
- Bieser, Jan; Salieri, Beatrice; Hischier, Roland; Hilty, Lorenz M. (2020): Next generation mobile networks. Problem or opportunity for climate protection?
- Bieser, Jan C. T.; Coroamă, Vlad C. (2020): Direkte und indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie. In: *NachhaltigkeitsManagementForum* 24 (S1), S. 515. DOI: 10.1007/s00550-020-00502-4.
- Bieser, Jan C. T.; Hilty, Lorenz M. (2018b): Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT. In: B. Penzenstadler, S. Easterbrook, C. Venters und S. I. Ahmed (Hg.): ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability: EasyChair (EPiC Series in Computing), 68-53.

bitkom (2020): Digitalisierung kann fast die Hälfte zu den deutschen Klimazielen beitragen. Pressemitteilung. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierung-kann-fast-die-Haelfte-zu-den-deutschen-Klimazielen-beitragen>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.

bitkom; Accenture (2020): Erste Ergebnisse der Bitkom-Studie „Klimaeffekte der Digitalisierung“. Hg. v. bitkom. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Klimaschutz#:~:text=Erste%20Ergebnisse%20der%20Bitkom%2DStudie,Digitalverbands%20Bitkom%2C%20durchgef%C3%BChrt%20von%20Accenture>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.

Bonilla, Silvia; Silva, Helton; Terra da Silva, Marcia; Franco Gonçalves, Rodrigo; Sacomano, José (2018): Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges. In: *Sustainability* 10 (10), S. 3740. DOI: 10.3390/su10103740.

Borderstep, I. Z.T. (2012): Gutachten zum Thema "Green IT - Nachhaltigkeit". für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestags, zuletzt geprüft am 16.07.2019.

Börjesson Rivera, Miriam; Håkansson, Cecilia; Svenfelt, Åsa; Finnveden, Göran (2014): Including second order effects in environmental assessments of ICT. In: *Environmental Modelling & Software* 56, S. 105–115. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.02.005.

Both, Jens (2016): Electrolytic capacitors from the postwar period to the present. In: *IEEE Electr. Insul. Mag.* 32 (2), S. 8–26. DOI: 10.1109/MEI.2016.7414227.

Bücheler, Ralph; Andrä, Patrick (2016): Die Digitalisierung in der GreenTech-Branche. Handlungsbedarfe für Unternehmen der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz in Deutschland.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFilehttps://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Bundesnetzagentur (2020a): EMF: Bundesland Übersicht. Online verfügbar unter https://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/statistiken/12_Bundesland_%C3%9Cbersicht_Internet_20200101.pdf.

Bundesnetzagentur (2020b): Jahresbericht 2019: Netze für die digitale Welt. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

Cabarnard, Livia (2019): Global supply chain analysis of material-related impacts in ICT. LCA Discussion Forum 73, 21.11.2019.

Christian, Beverley; Romanov, Alexandre; Romanova, Irina; Turbini, Laura J. (2014): Elemental Compositions of Over 80 Cell Phones. In: *Journal of Electronic Materials* 43 (11), S. 4199–4213. DOI: 10.1007/s11664-014-3310-3.

Cools, Jasmin (2019): Neuer Funkmast kommt trotz Ablehnung. Hg. v. Schwarzwälder Bote. Online verfügbar unter <https://www.schwarzwaelder-bote.de/inhalt.epfendorf-neuer-funkmast-kommt-trotz-ablehnung.fcfc729f-b9da-424d-8cce-9db9c9b33624.html>, zuletzt geprüft am 22.01.2020.

- Crenna, Eleonora; Secchi, Michela; Benini, Lorenzo; Sala, Serenella (2019): Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. In: *Int J Life Cycle Assess* 24 (10), S. 1851–1877. DOI: 10.1007/s11367-019-01604-y.
- De Solla Price, D. J. (1963): *Little science, big science*. New York: Columbia University Press.
- DE-CIX (2020): DE-CIX Frankfurt Statistics. Hg. v. DE-CIX Management. Online verfügbar unter <https://www.de-cix.net/en/locations/germany/frankfurt/statistics>, zuletzt geprüft am 03.09.2020.
- Declaration on Research Assessment: San Francisco Declaration on Research Assessment. Online verfügbar unter <https://sfdora.org/>.
- Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2019): DERA Rohstoffinformationen. DERA-Rohstoffliste 2019.
- Donovan, Craig (2009): Twenty thousand leagues under the sea: A life cycle assessment of fibre optic submarine cable systems.
- Ericsson (2015): Ericsson Mobility Report. On the pulse of the Networked Society.
- Fairley, Peter (2018): Exposing the Power Vampires in Self-Driving Cars. Hg. v. IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/exposing-the-power-vampires-in-self-driving-cars>.
- Fehske, A.; Fettweis, G.; Malmudin, J.; Biczók, G. (2011): The Global Footprint of Mobile Communications. The Ecological and Economic Perspective. In: *IEEE Communications Magazine* (August 2011), S. 55–62.
- Ford, Simon; Despeisse, Mélanie (2016): Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. In: *Journal of Cleaner Production* 137, S. 1573–1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- Frenger, Pal; Tano, Richard (2019): More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption. In: *IEEE*, S. 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746600.
- Frost & Sullivan (2016): Future of Car Sharing Market to 2025. Technology Advancements, Market Consolidation and Government Initiatives to Influence Market Growth Over the Next Decade.
- Fulton, Lew; Mason, Jacob; Meroux, Dominique (2017): Three Revolutions in Urban Transportation. How to achieve the full potential of vehicle electrification, automation and shared mobility in urban transportation systems around the world by 2050.
- GeSI (2015a): #SMARTer2030. ICT Solutions for 21st Century Challenges. Hg. v. Global e-Sustainability Initiative (GeSi). Brussels.
- GeSI (2015b): Smarter 2030 Report. accenturestrategy.com.
- Giust, Fabio; Sciancalepore, Vincenzo; Sabella, Dario; Filippou, Miltiades C.; Mangiante, Simone; Featherstone, Walter; Munaretto, Daniele (2018): Multi-Access Edge Computing: The Driver Behind the Wheel of 5G-Connected Cars. In: *IEEE Comm. Stand. Mag.* 2 (3), S. 66–73. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1800013.
- Goodchild, Anne; Toy, Jordan (2018): Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 61, S. 58–67. DOI: 10.1016/j.trd.2017.02.017.

Grunwald, A. (2013): Wissenschaftliche Validität als Qualitätsmerkmal der Zukunftsforschung. In: *Zeitschrift für Zukunftsforschung* 1 (22). Online verfügbar unter <http://www.zeitschrift-zukunftsforschung.de/ausgaben/jahrgang-2013/ausgabe-2/3694>.

Habibi Khalaj, Ali; Scherer, Thomas; K. Halgamuge, Saman (2016): Energy, environmental and economical saving potential of data centers with various economizers across Australia. In: *Applied Energy* 183, S. 1528–1549. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.09.053.

Hecht, Jeff (2016): The Bandwidth Bottleneck. Researchers are scrambling to repair and expand data pipes worldwide — and to keep the information revolution from grinding to a halt. In: *nature* (536), S. 139–142.

Herring, Horace; Roy, Robin (2007): Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. In: *Technovation* 27 (4), S. 194–203. DOI: 10.1016/j.technovation.2006.11.004.

Heymann, Eric; Vetter, Stefan (2013): Re-Industrialisierung Europas: Anspruch und Wirklichkeit. Online verfügbar unter https://www.dbresearch.de/PROD/RPS_DE-PROD/PROD000000000444476/Re-Industrialisierung_Europas%3A_Anspruch_und_Wirkli.PDF?undefined&reload=mVkwcmWklp8mGAYAbE0zpt7MZsa5~uRG7MiYeljsyIgtX4W8KicjHAPtYaccZZTz.

Higón, Dolores Añón; Gholami, Roya; Shirazi, Farid (2017): ICT and environmental sustainability: A global perspective. In: *Telematics and Informatics* 34 (4), S. 85–95. DOI: 10.1016/j.tele.2017.01.001.

Hilty, Lorenz M.; Arnfalk, Peter; Erdmann, Lorenz; Goodman, James; Lehmann, Martin; Wäger, Patrick A. (2006): The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability – A prospective simulation study. In: *Environmental Modelling & Software* 21 (11), S. 1618–1629. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.05.007.

Hischier, Roland; Coroama, Vlad; Schien, Daniel; Achachlouei, Mohammad (2015): Grey Energy and Environmental Impactsof ICT Hardware. In: Lorenz M. Hilty und Bernard Aebischer (Hg.): *ICT Innovations for Sustainability*. Cham: Springer International Publishing (310), S. 171–189.

Huang, Runze; Riddle, Matthew; Graziano, Diane; Warren, Joshua; Das, Sujit; Nimbalkar, Sachin et al. (2016): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. In: *Journal of Cleaner Production* 135, S. 1559–1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.

Huijbregts, Mark A. J.; Rombouts, Linda J. A.; Hellweg, Stefanie; Frischknecht, Rolf; Hendriks, A. Jan; van de Meent, Dik et al. (2006): Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products? In: *Environmental science & technology* 40 (3), S. 641–648. DOI: 10.1021/es051689g.

Hund, Kirsten; La Porta, Daniele; Fabregas, Thao P.; Laing, Tim; Drexhage, John (2020): Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition.

IEA (2017): *Digitalization & Energy*.

Industrial Assessment Center (IAC) (2020): IAC Download Data. Online verfügbar unter <https://iac.university/download>.

Infrapedia (2019): The worlds largest network and datacenter infrastructure atlas. Online verfügbar unter <https://live.infrapedia.com/>.

- Ioannidis, John P. A. (2014): How to make more published research true. In: *PLoS medicine* 11 (10), e1001747, zuletzt geprüft am 12.02.2020.
- Kagermann, Henning (2017): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 237–248.
- Kim, Seung-Nam; Choo, Sangho; Mokhtarian, Patricia L. (2015): Home-based telecommuting and intra-household interactions in work and non-work travel: A seemingly unrelated censored regression approach. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 80, S. 197–214. DOI: 10.1016/j.tra.2015.07.018.
- Kleijn, René; van der Voet, Ester; Kramer, Gert Jan; van Oers, Laurant; van der Giesen, Coen (2011): Metal requirements of low-carbon power generation. In: *Energy* 36 (9), S. 5640–5648. DOI: 10.1016/j.energy.2011.07.003.
- Kurth, Gregor; Kurth, Boris (2014): BMU-Umweltinnovationsprogramm. Abschlussbericht zum Vorhaben: Röntgentrennung für Aluminiumrecycling. Aktenzeichen: NKa3-002020.
- Lange, Steffen; Pohl, Johanna; Santarius, Tilman (2020): Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? In: *Ecological Economics* 176, S. 106760. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2020.106760.
- Larson, William; Zhao, Weihua (2017): Telework: Urban Form, Energy Consumption, and Greenhouse Gas Implications. In: *Econ Inq* 55 (2), S. 714–735. DOI: 10.1111/ecin.12399.
- Li, Keqiang; Chen, Tao; Luo, Yugong; Wang, Jianqiang (2012): Intelligent Environment-Friendly Vehicles: Concept and Case Studies. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 13 (1), S. 318–328. DOI: 10.1109/TITS.2011.2170680.
- Malmodin, J.; Bergmark, P.; Lundén, D. (2013): The future carbon footprint of the ICT and E&M sectors. In: *ICT4S 2013: Proceedings of the First International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainability*, S. 12–20. DOI: 10.3929/ETHZ-A-007337628.
- Malmodin, Jens; Lundén, Dag (2018): The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. In: *Sustainability* 10 (9), S. 3027. DOI: 10.3390/su10093027.
- Malmodin, Jens; Lundén, Dag; Moberg, Åsa; Andersson, Greger; Nilsson, Mikael (2014): Life Cycle Assessment of ICT. In: *Journal of Industrial Ecology* 18 (6), S. 829–845. DOI: 10.1111/jiec.12145.
- Mancheri, Nabeel A.; Sprecher, Benjamin; Deetman, Sebastiaan; Young, Steven B.; Bleischwitz, Raimund; Dong, Liang et al. (2018): Resilience in the tantalum supply chain. In: *Resources, Conservation and Recycling* 129, S. 56–69. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.018.
- Manhart, A.; Blepp, M.; Fischer, C.; Graulich, K.; Prakash, S.; Priess, R. et al. (2016): Resource Efficiency in the ICT Sector. Final Report, November 2016.
- Melo, Patrícia C.; Abreu e Silva, João de (2017): Home telework and household commuting patterns in Great Britain. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 103, S. 1–24. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.011.
- Munasinghe, Mohan (1999): Is environmental degradation an inevitable consequence of economic growth: tunneling through the environmental Kuznets curve. In: *Ecological Economics* 29, S. 89–109.

- Nakajima, Kenichij; Takeda, Osamu; Miki, Takahiro; Matsubae, Kazuyo; Nakamura, Shinichiro; Nagasaka, Tetsuya (2010): Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling. In: *Environmental science & technology* 44 (14), S. 5594–5600. DOI: 10.1021/es9038769.
- Narla, Siva R.K. (2013): The Evolution of Connected Vehicle Technology: From Smart Drivers to Smart Cars to... Self-Driving Cars. In: *ITE Journal*, 22-26.
- Nobis; Claudia. Kuhnimhof; Tobias. Follmer; Robert. Bäumer; Marcus (2019): Mobilität in Deutschland – MiD. Zeitreihenbericht 2002 – 2008 – 2017. Ergebnisbericht. BMVI, infas, DLR, IVT, infas 360. Bonn, Berlin. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2020.
- Nuss, Philip; Eckelman, Matthew J. (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: *PLoS ONE* 9 (7), e101298. DOI: 10.1371/journal.pone.0101298.
- Oguchi, Masahiro; Murakami, Shinsuke; Sakanakura, Hirofumi; Kida, Akiko; Kameya, Takashi (2011): A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. In: *Waste Management* 31 (9-10), S. 2150–2160. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.009.
- Pagoropoulos, Aris; Pigosso, Daniela C.A.; McAloone, Tim C. (2017): The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review. In: *Procedia CIRP* 64, S. 19–24. DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.047.
- Pielke, R., JR. (2020): Five Modes of Science Engagements. Roger Pielke Jr. auf Blogspot.com. Online verfügbar unter <https://rogerpielkejr.blogspot.com/2015/01/five-modes-of-science-engagement.html>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2020.
- Pihkola, Hanna; Hongisto, Mikko; Apilo, Olli; Lasanen, Mika (2018): Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking. In: *Sustainability* 10 (7), S. 2494. DOI: 10.3390/su10072494.
- Radgen, Peter (2020): Rechenzentren im Vergleich. Hg. v. Forschungsverbund Nachhaltige Rechenzentren Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/ap1/>.
- Reddy, V. Dinesh; Setz, Brian; Rao, G. Subrahmanya V.R.K.; Gangadharan, G. R.; Aiello, Marco (2017): Metrics for Sustainable Data Centers. In: *IEEE Trans. Sustain. Comput.* 2 (3), S. 290–303. DOI: 10.1109/TSUSC.2017.2701883.
- Reuter, Markus A. (2016): Digitalizing the Circular Economy. In: *Metall and Materi Trans B* 47 (6), S. 3194–3220. DOI: 10.1007/s11663-016-0735-5.
- Reuter, Markus A.; van Schaik, Antoinette; Ballester, Miquel (2018): Limits of the Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the Limits. In: *World of Metallurgy - ERZMETALL* 71 (2), S. 68–79.
- Richart, Daniel (2020): Autonomous Cars’ Big Problem: The energy consumption of edge processing reduces a car’s mileage with up to 30%. Unter Mitarbeit von TERAKE GmbH. Hg. v. medium.com. Online verfügbar unter <https://medium.com/@teraki/energy-consumption-required-by-edge-computing-reduces-a-autonomous-cars-mileage-with-up-to-30-46b6764ea1b7>.
- Rombach, Georg (2004): Optimum der Nutzung von Sekundärmetallen - Ökonomische und ökologische Grenzen des Metallrecyclings. In: Chancen und Risiken der Rohstoffgewinnung.

Fallbeispiele primärer und sekundärer Metallerzeugung. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft, 5), S. 7–74.

Saltelli, A.; Ravetz, J.; Funtowicz, S. O. (2016): Who will solve the crisis in science? In: A. Benessia, S. O. Funtowicz und Giampietro M. (Hg.): The rightful place of science. The rightful place of science: science on the verge. Tempe, AZ: Consortium for Science, Policy & Outcomes, S. 1–30.

Schaefer, Thilo; Neligan, Adriana (2019): Unternehmen zum Thema Ressourceneffizienz mit Digitalisierungsbefragen. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft. Köln.

Schäfer, Philipp (2020): Recycling - ein Mittel zu welchem Zweck? Modellbasierte Ermittlung der energetischen Aufwände des Metallrecyclings für einen empirischen Vergleich mit der Primärgewinnung. Dissertation: KIT Verlag.

Schäfer, Philipp; Schmidt, Mario (2019): Discrete-Point Analysis of the Energy Demand of Primary versus Secondary Metal Production. In: *Environmental science & technology*. DOI: 10.1021/acs.est.9b05101.

Scharp, Michael (2011): Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess).

Schebek, Liselotte; Kannengießer, Jan; Campitelli, Alessio; Fischer, Julia; Abele, Eberhard; Bauerdick, Christoph et al. (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Unter Mitarbeit von Andreas Schlegel, Stefan Kirmes, Christof Oberender und Martin Vogt. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Berlin. Online verfügbar unter https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

Schischke, Karsten; Beucker, Severin; Clausen, Jens; Niedermayer, Michael (2009): Innovations- und Technikanalyse Autonomer Verteilter Mikrosysteme.

Schmidt, Mario; Schäfer, Philipp; Rötzer, Nadine (2020): Die Klimarelevanz der Bereitstellung von Primär- und Sekundärmetallen. In: Holm, Olaf, Thomé-Kozmiensky, Elisabeth, Daniel Goldmann und Bernd Friedrich (Hg.): Recycling und Sekundärrohstoffe. Band 13. Berlin: TK Verlag.

Schmidt, Mario; Spieth, Hannes A.; Bauer, Joa; Haubach, Christian (2017): Praxisbeispiele aus der produzierenden Wirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (SpringerLink Bücher, Band 1). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz479361924cov.htm>.

Schmidt, Mario; Spieth, Hannes A.; Haubach, Christian; Preiß, Marlene; Bauer, Joa (2019): Praxisbeispiele und Erfolgsfaktoren. Berlin: Springer Berlin (100 Betriebe für Ressourceneffizienz, / Mario Schmidt, Hannes Spieth, Joa Bauer, Christian Haubach ; Band 2). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Science Exchange: Reproducibility Initiative. Online verfügbar unter <http://validation.scienceexchange.com>.

Shehabi, Arman; Walker, Ben; Masanet, Eric (2014): The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States. In: *Environ. Res. Lett.* 9 (5), S. 54007. DOI: 10.1088/1748-9326/9/5/054007.

- Smidfelt Rosqvist, Lena; Winslott Hiselius, Lena (2016): Online shopping habits and the potential for reductions in carbon dioxide emissions from passenger transport. In: *Journal of Cleaner Production* 131, S. 163–169. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.054.
- Stallkamp, Christopher; Schultmann, Frank; Stapf, Dieter; Steins, Justus; Volk, Rebecca; Yogish, Savrina (2020): Klimaneutrale, ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe – Schwerpunkt „Chemisches Recycling“. Strategischer Industriekreis, 10. Juli 2020.
- Steffen, Will; Richardson, Katherine; Rockström, Johan; Cornell, Sarah E.; Fetzer, Ingo; Bennett, Elena M. et al. (2015): Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. In: *Science (New York, N.Y.)* 347 (6223), S. 1259855. DOI: 10.1126/science.1259855.
- Stobbe, L.; Proske, M.; Zedel, H.; Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S. (2015a): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Abschlussbericht. Hg. v. Fraunhofer IZM und Borderstep Institut.
- Stobbe, L.; Zedel, H.; Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S. (2015b): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie Projekt-Nr. 29/14, zuletzt geprüft am 16.07.2019.
- Tenzer, F. (2019): Statistiken zu Smartphones. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/themen/581/smartphones/>.
- Tenzer, F. (2020a): Prognose zum weltweiten Absatz von Desktop-PCs bis 2023. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160874/umfrage/prognose-zum-weltweiten-absatz-von-desktop-pc-seit-2009/>.
- Tenzer, F. (2020b): Prognostizierter Absatz von Tablets und PCs bis 2023. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/183419/umfrage/prognose-zum-weltweiten-absatz-von-pcs-nach-kategorie/>.
- The Shift Project: The Shift « Lean ICT » project. Hg. v. The Shift Project. Online verfügbar unter <https://theshiftproject.org/>.
- U.S. Energy Information Administration (2018): Autonomous Vehicles: Uncertainties and Energy Implications. Issue in Focus from the Annual Energy Outlook 2018. Hg. v. U.S. Department of Energy.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2019): Mineral Commodity Summaries 2019.
- UBA (2018): EU: CO₂-Ausstoß von Neuwagen 2017 höher als im Vorjahr. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/eu-co2-ausstoss-von-neuwagen-2017-hoehere-als-im>, zuletzt geprüft am 07.08.2020.
- UBA (2020): Bilanz 2019: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. Deutschland verkauft mehr Strom ins Ausland als es importiert. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>, zuletzt geprüft am 07.08.2020.
- Ueberschaar, Maximilian; Dariusch Jalalpoor, Daniel; Korf, Nathalie; Rotter, Vera Susanne (2017): Potentials and Barriers for Tantalum Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 700–714. DOI: 10.1111/jiec.12577.

van Heddeghem, Ward; Lambert, Sofie; Lannoo, Bart; Colle, Didier; Pickavet, Mario; Demeester, Piet (2014): Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012. In: *Computer Communications* 50, S. 64–76. DOI: 10.1016/j.comcom.2014.02.008.

VDI ZRE (2018): Plastikmüll als Rohstoff - VDI ZRE veröffentlicht Film zum Kunststoffrecycling. Online verfügbar unter <https://www.ressource-deutschland.de/news/aktuelles/news/artikel/neuer-film-kunststoffrecycling-ressourceneffizienz-durch-optimierte-sortierverfahren>.

Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, S. 1–18. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

Waibel, M. W.; Steenkamp, L. P.; Moloko, N.; Oosthuizen, G. A. (2017): Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements. In: *Procedia Manufacturing* 8, S. 731–737. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.094.

Weber, Tobias; Bertscheck, Irene; Ohnemus, Jörg; Ebert, Martin (2018): Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2018. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/monitoring-report-wirtschaft-digital-2018-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

Wernik, Christian; Queder, Fabian; Strube Martins, Sonia; Gries, Christin; Tenbrock, Sebastian; Bender, Christian (2016): Gigabitnetze für Deutschland.

Wilts, Henning; Berg, Holger (2017): Digitale Kreislaufwirtschaft. Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoff kreisläufe.

World Economic Forum (WEF) (2019): Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the Circular Economy. Consumer Electrics and Plastics Packing.

Zeller, Torsten; Birkenfeld, Sven; Keich, Oliver; Nawothnig, Bernd; Seelig, Jan (2016): Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung.

Zoie, Rădulescu Constanța; Mihaela, Rădulescu Delia; Alexandru, Sipică (2017): An analysis of the Power Usage Effectiveness metric in Data Centres. October 20-22, 2017, Galați, Romania : proceedings (Xplore compliant). In: *5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8125502>.