



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2020

Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken

Bieser, Jan ; Hintemann, Ralph ; Beucker, Severin ; Schramm, Stefanie ; Hilty, Lorenz ; et al ; Kühn, Melissa

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-190091>

Published Research Report

Published Version

Originally published at:

Bieser, Jan; Hintemann, Ralph; Beucker, Severin; Schramm, Stefanie; Hilty, Lorenz; et al; Kühn, Melissa (2020).
Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Berlin: Bitkom e.V..



**University of
Zurich** ^{UZH}

*Jan Bieser
Ralph Hintemann
Severin Beucker
Stefanie Schramm
Lorenz Hilty*

Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken: Kurzstudie

TECHNICAL REPORT – No. IFI-2020.01

2020

University of Zurich
Department of Informatics (IFI)
Binzmühlestrasse 14, CH-8050 Zürich, Switzerland



Jan Bieser, Ralph Hintemann, Severin Beucker, Stefanie Schramm, Lorenz Hilty
Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken: Kurzstudie
Technical Report No. IFI-2020.01
Informatics and Sustainability Research
Department of Informatics (IFI)
University of Zurich
Binzmuehlestrasse 14, CH-8050 Zurich, Switzerland
<http://www.ifi.uzh.ch/isr>



Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken

Kurzstudie

Herausgeber

Bitkom e.V.
Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
Albrechtstraße 10 | 10117 Berlin

Ansprechpartner

Melissa Kühn | Referentin Nachhaltigkeit
T 030 27576-405 | m.kuehn@bitkom.org

Autoren

Jan Bieser | Ralph Hintemann | Severin Beucker | Stefanie Schramm | Lorenz Hilty

Forschungspartner

- Borderstep Institut
- Universität Zürich

Satz & Layout

Sabrina Flemming | Bitkom

Titelbild

© Halfpoint – stock.adobe.com

Copyright

Bitkom 2020

Diese Publikation stellt eine allgemeine unverbindliche Information dar. Die Inhalte spiegeln die Auffassung im Bitkom zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider. Obwohl die Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurden, besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und /oder Aktualität, insbesondere kann diese Publikation nicht den besonderen Umständen des Einzelfalles Rechnung tragen. Eine Verwendung liegt daher in der eigenen Verantwortung des Lesers. Jegliche Haftung wird ausgeschlossen. Alle Rechte, auch der auszugswweisen Vervielfältigung, liegen beim Bitkom.

Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken

Kurzstudie

Inhaltsverzeichnis

1	Digitalisierung und Klimaschutz	7
2	Zielsetzung und Vorgehen dieser Studie	9
3	Direkte Effekte	11
3.1	Direkte Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz	11
3.2	Untersuchungen direkter Effekte der Digitalisierung	11
3.3	Vorgehen	12
3.4	Studienergebnisse im Überblick	13
3.5	Beiträge zu den THG-Emissionen in den einzelnen Bereichen	22
3.6	Zusammenfassende Betrachtung der direkten Effekte und Schlussfolgerungen für Deutschland	25
4	Indirekte Effekte	28
4.1	Indirekte Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz	28
4.2	Untersuchungen indirekter Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz	28
4.3	Vergleich der geschätzten THG-Reduktionspotenziale	29
4.4	Risiken der Digitalisierung für den Klimaschutz	32
4.5	Differenzierung nach Anwendungsfällen und Sektoren	35
4.7	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Deutschland	42
4.8	Diskussion des methodischen Ansatzes	43
5	Schlussfolgerungen	45
	Anhang	49
	Quellen	49
	Studienergebnisse der Anwendungsfälle nach Sektor	55

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1 – Spannweite der Ergebnisse der betrachteten Studien zur Höhe der direkten THG-Emissionen der IKT im Jahr 2020 _____ 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Betrachtete Studien zum THG-Fußabdruck der IKT _____ 12

Tabelle 2 – Ergebnisse der GeSI-Studien zum THG-Fußabdruck der IKT _____ 17

Tabelle 3 – Entwicklung des Bedarfs an elektrischer Energie nach Szenario in Terawattstunden (TWh) pro Jahr von 2010 bis 2030 _____ 19

Tabelle 4 – Berücksichtigte Studien zum THG-Reduktionspotenzial digitaler Anwendungen _____ 29

Tabelle 5 – Zeitlicher und regionaler Fokus, Anzahl der berücksichtigten digitalen Anwendungsfälle, THG-Reduktionspotenziale (absolut und anteilig an Gesamtemissionen im Betrachtungsjahr), sowie Enablement-Faktoren der berücksichtigten Studien _____ 30

Tabelle 6 – Anwendungsfälle mit signifikantem THG-Reduktionspotenzial _____ 41

Tabelle 7 – Studien mit Betrachtungsjahr 2030, angegeben mit normierten Enablement-Faktoren auf Basis eines einheitlichen Intervalls für den prognostizierten THG-Fußabdruck des IKT-Sektors _____ 46

Tabelle 8 – Vergleich der Studienergebnisse nach Sektor, Anwendungsfällen, berücksichtigten Rebound- und Induktionseffekten, absoluten und anteiligem THG-Reduktionspotenzial _____ 58

1 Digitalisierung und Klimaschutz

1 Digitalisierung und Klimaschutz

Die Digitalisierung verändert die Wirtschaft und alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens grundlegend. Ein im April 2019 veröffentlichtes Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) unterstreicht, dass die Digitalisierung in allen wirtschaftlichen, sozialen und gesellschaftlichen Systemen tiefgreifende Veränderungen bewirkt und »eine immer größere transformative Wucht entfaltet, die den Menschen, die Gesellschaften und den Planeten zunehmend fundamental beeinflusst und daher gestaltet werden muss« (WBGU, 2019, S. 1).

Digitale Technologien wirken sich auf zwei Arten auf die Umwelt aus: Zu den direkten Umweltauswirkungen zählen die Ressourcenverbräuche und Emissionen, die durch die Herstellung, Verwendung und Entsorgung der Hardware verursacht werden. Indirekte Umwelteffekte durch die Anwendung der Technologie sind induzierte Veränderungen der Konsum- und Produktionsmuster auch in anderen Bereichen und die ökologischen Auswirkungen dieser Veränderungen (Berkhout & Hertin, 2001; Fichter et al., 2012; Hilty & Aebischer, 2015). Während direkte Effekte ausschließlich zu einer Erhöhung der Emissionen und des Ressourcenverbrauchs führen, können indirekte Effekte aus Sicht des Umweltschutzes positive oder negative Ausprägungen haben.

Sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen werden seit rund zwei Jahrzehnten wissenschaftlich untersucht und (teilweise auch kontrovers) diskutiert. Das öffentliche Interesse an entsprechenden Ergebnissen ist stark angestiegen, seit im Zuge der Klimadebatte auch die durch digitale Technologien verursachten Treibhausgas(THG)-Emissionen ins Medieninteresse gerückt sind. Auf der Konferenz »Bits und Bäume« diskutierten in Berlin in 2018 mehr als 1'300 Personen aus Wissenschaft, Politik, Wirtschaft, Medien und Öffentlichkeit die Umweltauswirkungen der Digitalisierung, was die Relevanz des Themas unterstreicht (Höfner & Frick, 2019). Diese Kurzstudie fasst den aktuellen Wissenstand zu direkten und indirekten Effekten der Digitalisierung auf den Klimaschutz zusammen.

2 Zielsetzung und Vorgehen dieser Studie

2 Zielsetzung und Vorgehen dieser Studie

Der Fokus dieser Kurzstudie liegt darauf, einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu direkten und indirekten Auswirkungen der Digitalisierung auf den Klimaschutz zu geben.

Folgende Forschungsfragen werden beantwortet:

- Wie ist der aktuelle Wissensstand zum THG-Fußabdruck des gesamten Lebenszyklus der digitalen Hardware? Welche wesentlichen Ansatzpunkte existieren, um diese Klimawirkungen in Zukunft zu reduzieren (»Green ICT«)?
- Was sind vielversprechende Anwendungen digitaler Technologien, die zur Reduzierung der THG-Emissionen in anderen Sektoren beitragen können (»Greening through ICT«)? Besteht das Risiko, dass gegenläufige Effekte zu einer Erhöhung der THG-Emissionen durch Digitalisierung führen?

Abschließend werden direkte und indirekte Effekte gegenübergestellt und erste Empfehlungen formuliert, wie das Potenzial der Digitalisierung für den Klimaschutz genutzt und Risiken gemindert werden können.

Da es sich um eine Kurzstudie handelt, liegt der Schwerpunkt auf der Zusammenfassung und dem Vergleich bereits durchgeführter Studien aus Wissenschaft und Praxis (siehe ↗Tabelle 1 und ↗Tabelle 4). Die meisten dieser Studien analysieren Effekte oder Auswirkungen auf internationaler Ebene.

Die Kurzstudie hat folgenden Aufbau: ↗Kapitel 3 vergleicht Studien zu direkten Auswirkungen und ↗Kapitel 4 zu indirekten Auswirkungen der Digitalisierung auf den Klimaschutz. In der Schlussfolgerung (↗Kapitel 5) werden beide Effekte gegenübergestellt und die Ergebnisse zusammengefasst.

3 Direkte Effekte

3 Direkte Effekte

3.1 Direkte Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz

Direkte Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz entstehen vor allem durch den Energiebedarf und die THG-Emissionen beim Betrieb und bei der Herstellung von digitalen Endgeräten und Infrastrukturen. Diesem Thema wird in jüngerer Vergangenheit zunehmende Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit zuteil. Ein Beispiel, wenn nicht sogar Mitauslöser für gesteigerte Aufmerksamkeit ist ein Beitrag in der Zeitschrift Nature »How to stop data centres from gobbling up the world's electricity« (Jones, 2018). In diesem Beitrag wird eine Studie der Huawei-Forscher Andrae und Edler (2015) zitiert, in der davon ausgegangen wird, dass sich der Elektrizitätsbedarf digitaler Technologien in Zukunft stark erhöht. Studien des Shift-Projects aus Frankreich (2019) oder der kanadischen Forscher Belkhir und Elmeligi (2018) kommen in ihren Prognosen ebenfalls zu sehr hohen Zunahmen von Energiebedarf und THG-Emissionen. Daneben existieren aber auch Studien, die von einer wesentlich moderateren Entwicklung ausgehen, wie z. B. von den schwedischen Forschern Malmodin und Lundén (2018a) oder von der Global e-Sustainability Initiative (GeSI) (2012; 2015; 2019).

3.2 Untersuchungen direkter Effekte der Digitalisierung

Ein Ziel der vorliegenden Kurzstudie ist es, wesentliche Ergebnisse internationaler Studien zu direkten Effekten der Digitalisierung auf den Klimaschutz zusammenzufassen. Hierbei werden sowohl die Endgeräte in Haushalten und Unternehmen als auch die digitalen Infrastrukturen wie Rechenzentren und Telekommunikationsnetze betrachtet. Zu den Telekommunikationsnetzen zählen Mobilfunknetze und Festnetze. Dabei werden die über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung digitaler Endgeräte und Infrastrukturen) verursachten THG-Emissionen berücksichtigt.

Die betrachteten internationalen Studien ziehen unterschiedliche Systemgrenzen hinsichtlich der berücksichtigten Geräte und Lebenszyklusphasen, wodurch der Vergleich der Ergebnisse erschwert wird. Insbesondere die Frage, ob Geräte der Unterhaltungselektronik wie Fernsehgeräte in die Betrachtung einbezogen werden sollten, wird unterschiedlich beantwortet. Im Rahmen dieser Kurzstudie wird jeweils dargelegt, welche konkreten Abgrenzungen die verschiedenen Autoren vornehmen. In der zusammenfassenden Betrachtung wird dann unterschieden, ob die Unterhaltungselektronik mitberücksichtigt wird oder nicht.

Einige der internationalen Studien berechnen den Energiebedarf der IKT und nicht die THG-Emissionen. Die Kurzstudie berücksichtigt die Ergebnisse dieser Studien in ihrer Analyse, indem die von der Internationalen Energieagentur für das Jahr 2018 publizierte THG-Intensität des Strommixes von 475 g CO_{2e}/kWh weltweit (IEA, 2019) zugrunde gelegt wird.

3.3 Vorgehen

Die betrachteten Studien (siehe Tabelle 1) zu den direkten Effekten der Digitalisierung wurden nach drei Kriterien ausgewählt. Zum einen sollen die Studien möglichst umfassend alle direkten Effekte der Digitalisierung betrachten, also sowohl die Endgeräte als auch Rechenzentren und Telekommunikationsnetze. Zum anderen sollten die in den Studien vorgenommenen Modellannahmen möglichst transparent sein, um die verschiedenen Berechnungsansätze und -ergebnisse besser vergleichen zu können. Schließlich wurden die Studien so ausgewählt, dass die Ergebnisse möglichst die ganze Bandbreite der direkten THG-Emissionen der Digitalisierung widerspiegeln.

Neben den für die Detailanalyse ausgewählten Studien werden weitere Untersuchungen in die Betrachtung einbezogen. Dies sind z. B. die Ergebnisse einer Metastudie der Deutschen Energie-Agentur (dena) (2017), der IEA-Report zu Digitalisierung & Energie (Turk & Cozzi, 2017) und die BMWi-Studie zur Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs (Stobbe et al., 2015). Auch die Ergebnisse einzelner Publikationen, die sich mit Teilbereichen der IKT befassen, wie z. B. eine aktuelle Untersuchung zum Energiebedarf der Rechenzentren weltweit (Masanet et al., 2020), werden bei der Analyse berücksichtigt.

Kürzel	Titel	Auftraggeber / Herausgeber	Auftragnehmer / Autoren	Erscheinungsjahr	Betrachtungsjahr(e)	Betrachtungsbereich
SMARTer2020	SMARTer 2020	GeSI	The Boston Consulting Group	2012	2020	Global
SMARTer2030	SMARTer 2030	GeSI	Accenture Strategy	2015	2030	Global
SMARTer2030+	Digital with Purpose: Delivering a SMARTer 2030	GeSI	Deloitte	2019	2030	Global
Ericsson2015	The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015	Ericsson, Telia Company	Malmödin, Lundén	2018	2015	Global
Huawei2030a	Prediction Studies of Electricity Use of Global Computing in 2030	Huawei	Andrae	2019	2030	Global
Huawei2030b	Comparison of Several Simplistic High-Level Approaches for Estimating the Global Energy and Electricity Use of ICT Networks and Data Centers	Huawei	Andrae	2019	2030	Global
Huawei2030c	On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030	Huawei	Andrae, Edler	2015	2030	Global
JCP2040	Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations	McMaster University	Belkhir, Elmeligi	2018	2020, 2040	Global

Tabelle 1 – Betrachtete Studien zum THG-Fußabdruck der IKT

Im Folgenden werden zunächst die ausgewählten internationalen Studien zum Energiebedarf und zu den THG-Emissionen im Überblick dargestellt (↗ Abschnitt 3.4). Dabei werden jeweils Inhalt und Methodik erläutert. Bei der Darstellung der genannten Studien werden jeweils die Publikationen von GeSI (SMARTer2020, SMARTer2030, SMARTer2030+) sowie von Andrae (Huawei2030a/b/c) zusammen betrachtet. Damit kann der folgende Überblick in vier Bereiche (nach Studien) gegliedert werden:

- (1) Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations (JCP2040)
- (2) Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015 (Ericsson2015)
- (3) Studien der Global e-Sustainability Initiative (SMARTer2020, SMARTer2030, SMARTer2030+)
- (4) Studien von Andrae bzw. Andrae & Edler (Huawei2030a/b/c)

Im Anschluss an die Darstellung der Studien werden die Ergebnisse zu den direkten Effekten auf den Klimaschutz in den drei Subsystemen der IKT – Endgeräte, Rechenzentren und Telekommunikationsnetze – jeweils gegenübergestellt (↗ Abschnitt 3.5). ↗ Abschnitt 3.6 fasst die Erkenntnisse zu den direkten Effekten der Digitalisierung auf den Klimaschutz zusammen, zieht erste Schlussfolgerungen und diskutiert die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Deutschland.

3.4 Studienergebnisse im Überblick

3.4.1 Studie von Belkhir und Elmeligi (2018)

Die Forscher Lofti Belkhir und Ahmed Elmeligi von der McMaster University in Hamilton, Kanada, haben im Jahr 2018 im Journal of Cleaner Production einen Artikel veröffentlicht, in dem sie die Ergebnisse ihrer Berechnungen zu den globalen THG-Emissionen der IKT vorstellen. In der Untersuchung werden drei Sektoren voneinander abgegrenzt:

- IKT-Endgeräte (Desktops, Notebooks, LCD Displays, CRT Displays, Smartphones, Tablets)
- Rechenzentren
- Telekommunikationsnetze

Explizit nicht betrachtet werden Drucker, TV-Geräte und Settop-Boxen, wie Satelliten oder Kabelreceiver.

Belkhir und Elmeligi gehen detailliert auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen in der Nutzung von Endgeräten sowie den Energiebedarf für die Herstellung und den Transport der Endgeräte ein. Dazu werden auf Basis unterschiedlicher Quellen, insbesondere zu Verkaufszahlen und durchschnittlichen Nutzungszeiten der Bestand der jeweiligen Endgeräte für den Zeitraum von 2007 bis 2020 ermittelt. Mit Hilfe von Annahmen zum Energiebedarf und bzw. den THG-Emissionen in der Nutzungsphase der einzelnen Geräte sowie zu den THG-Emissionen in der

Herstellung werden die jährlichen THG-Emissionen der einzelnen Geräte berechnet. Dabei wird auf Basis der verfügbaren Daten jeweils ein Minimal- und ein Maximalwert für den CO₂-Fußabdruck angegeben. Auf dieser Grundlage berechnen Belkhir und Elmeligi die jährlichen THG-Emissionen des weltweiten Bestands an IKT-Endgeräten. Auch wenn in der Publikation die Werte für das Jahr 2020 nicht explizit angegeben sind, so lassen sich diese mit den Angaben in der Studie berechnen. Für das Jahr 2020 ergeben sich danach jährliche THG-Emissionen der von ihnen betrachteten Endgeräte zwischen 322 Mt CO_{2e} und 622 Mt CO_{2e}.

Im Vergleich zu den detaillierten Berechnungen und Datenrecherchen bei IKT-Endgeräten werden die THG-Emissionen von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen in der Untersuchung nur grob abgeschätzt. Auf eine Abschätzung der Herstellphase wird verzichtet, da angenommen wird, dass diese nur einen kleinen Anteil an den THG-Emissionen von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen hat. Auf Basis der Angaben in anderen Studien (Chang et al., 2010; Lambert et al., 2012; Pickavet et al., 2008; Van Heddeghem et al., 2014; Vereecken et al., 2009) und einer Annahme zur CO₂-Intensität in der Stromerzeugung (0,5 kg CO₂/kWh) werden die THG-Emissionen für Rechenzentren und Netzwerke in den Jahren 2007 sowie 2008 berechnet. Die Entwicklung der Emissionen bis zum Jahr 2020 wird unter der Annahme konstanter Wachstumsraten abgeschätzt. Im Fall der Rechenzentren gehen die Autoren von einem Anstieg der Emissionen von 10 Prozent pro Jahr aus, im Falle der Telekommunikationsnetze von einem Anstieg von 12 Prozent pro Jahr.¹ Für das Jahr 2020 ermitteln Belkhir und Elmeligi jährliche THG-Emissionen aus dem Betrieb der weltweiten Rechenzentren von 495 Mt CO_{2e} und von 269 Mt CO_{2e} aus dem Betrieb von Telekommunikationsnetzen.

Belkhir und Elmeligi kommen mit ihren Analysen insbesondere zu folgenden Ergebnissen. Die direkten THG-Emissionen der IKT steigen seit 2007 kontinuierlich an. Während der Anteil der durch IKT verursachten THG-Emissionen an den weltweiten THG-Emissionen im Jahr 2007 noch zwischen 1,2 und 1,6 Prozent lag, wird dieser bis zum Jahr 2020 auf 3,0 bis 3,6 Prozent ansteigen. Setzt sich der Anstieg der THG-Emissionen bis 2040 mit den gleichen Wachstumsraten fort, so berechnen die Autoren für dieses Jahr einen Anteil von etwa 14 Prozent an den weltweiten THG-Emissionen. Ein wesentlicher Treiber für den Anstieg der THG-Emissionen sind nach Belkhir und Elmeligi die Rechenzentren. Ihr Anteil an den THG-Emissionen der IKT steigt zwischen 2010 und 2020 von 33 auf 45 Prozent. Auch die Telekommunikationsnetze haben mit 24 Prozent an den THG-Emissionen der IKT im Jahr 2020 einen bedeutenden Anteil. Bei den Endgeräten dominieren die Smartphones, die im Jahr 2020 einen Anteil von 11 Prozent an den THG-Emissionen der IKT haben. Dieser hohe Anteil ist insbesondere durch die THG-Emissionen bei der Herstellung der Geräte bedingt, verbunden mit hohen Stückzahlen und kurzer Nutzungsdauer.

¹ An dieser Stelle sei angemerkt, dass die von Belkhir und Elmeligi gemachten Annahmen und Quellenangaben an einigen Stellen nicht nachvollziehbar sind. Die Angabe zum Energiebedarf von Rechenzentren findet sich nicht in der genannten Quelle. Außerdem entsprechen die in den Berechnungen verwendeten Wachstumsraten pro Jahr nicht den Angaben im Text. So wird z. B. bei Rechenzentren mit einer Wachstumsrate von 12 Prozent pro Jahr gerechnet und nicht mit 10 Prozent.

Aus diesen Ergebnissen leiten die Autoren Handlungsempfehlungen ab. Zum einen erscheint es insbesondere für Rechenzentren wichtig, diese mit regenerativen Energien zu betreiben. Auch bei den Telekommunikationsnetzen ist ein Betrieb mit regenerativen Energien anzustreben, allerdings ist dies aufgrund der verteilten Strukturen deutlich schwieriger umzusetzen, weswegen hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Die durch die Herstellung von Smartphones verursachten THG-Emissionen sollten zukünftig reduziert und die durchschnittliche Nutzungsdauer der Geräte von zwei auf vier Jahre erhöht werden. Bei den anderen Endgeräten sollte möglichst effiziente Geräte wie Tablets genutzt werden. Insbesondere bei Bildschirmen soll der steigende CO₂-Fußabdruck von Herstellern von der Politik in den Fokus genommen werden. Hier sollen zum einen die produktionsbedingten THG-Emissionen gesenkt sowie an energiesparenden Bildschirmtechnologien geforscht werden.

In einer Analyse und einem Vergleich ihrer Ergebnisse mit anderen Studien, insbesondere von Andrae und Edler (2015), kommen Belkhir und Elmeligi zu dem Schluss, dass die Ergebnisse weitgehend bestätigt werden.

3.4.2 Studie von Malmodin und Lundén (2018)

Jens Malmodin von Ericsson und Dag Lundén von Telia Company haben im Jahr 2018 im Journal Sustainability einen Beitrag zum Energiebedarf und den THG-Emissionen der weltweiten IKT und des Entertainment- und Mediensektors (E&M) in den Jahren 2010 und 2020 publiziert (Malmodin & Lundén, 2018a). Der Beitrag basiert auf Berechnungen der Autoren aus den Vorjahren (Malmodin et al., 2010, 2013; Malmodin & Lundén, 2018b), die weiterentwickelt und deren Annahmen und Ergebnisse detaillierter dargestellt werden.

Der Fokus der Untersuchung ist neben dem IKT-Sektor auch der E&M-Sektor. Beim IKT-Sektor werden die Bereiche Endgeräte, Zugangsnetze und Rechenzentren inkl. Unternehmensnetze unterschieden. Es werden jeweils die THG-Emissionen in der Nutzungsphase sowie die THG-Emissionen in der Herstellung und für den Transport der Geräte und Infrastrukturen berechnet. In der Untersuchung wird eine große Zahl von IKT-Endgeräten berücksichtigt: Mobiltelefone, Smartphones, Festnetztelefone, Tablets, Router, Modems, Desktop Computer, Laptops, öffentliche Displays und andere mit dem Internet verbundene Geräte. Im E&M-Sektor werden Fernsehgeräte, Fernsehgeräte-Peripherie, Fernseh-Netzwerke, andere Unterhaltungselektronik sowie Papier und Drucker betrachtet.

Die THG-Emissionen der Endgeräte werden auf Basis von Verkaufszahlen, durchschnittlichen Nutzungsdauern sowie den in der Herstellung und Nutzungsphase verursachten THG-Emissionen pro Gerät berechnet. Der Berechnungsansatz ist mit dem von Belkhir und Elmeligi vergleichbar, wobei Malmodin und Lundén deutlich mehr Endgeräte berücksichtigen. Für die verschiedenen Endgeräte aus dem Bereichen IKT und E&M dokumentieren Malmodin und Lundén sehr gut die verwendeten Daten zu den Gerätebeständen. Auch die Annahmen bzgl. Energiebedarf und THG-Emissionen durch die Nutzung sowie in der Herstellung und im Transport sind transparent dokumentiert. Nach Angaben von Malmodin und Lundén wurden der Energiebedarf und die THG-Emissionen in selbst durchgeführten Lebenszyklusanalysen ermittelt.

Für das Jahr 2015 ermitteln die Autoren einen weltweiten Energiebedarf durch IKT-Endgeräte von 340 TWh im Jahr. Für E&M-Endgeräte wird ein Energiebedarf von 510 TWh im Jahr berechnet. Die THG-Emissionen der IKT-Endgeräte betragen im Jahr 2015 395 Mt CO_{2e} und der E&M-Endgeräte 420 Mt CO_{2e}. Im IKT-Sektor ist der CO₂-Fußabdrucks der Endgeräte etwa zu 50 Prozent durch die Herstellung und den Transport bedingt, im E&M-Sektor zu etwa 30 Prozent.

Für Rechenzentren und Netze liegen nach Angaben von Malmodin und Lundén ähnlich detaillierte Berechnungsmodelle vor wie für Endgeräte. Allerdings werden die zugrundeliegenden Annahmen und Daten nicht dokumentiert. Die Autoren berechnen einen Energiebedarf der Rechenzentren und Unternehmensnetzwerke im Jahr 2015 von 245 TWh pro Jahr. Für die Telekommunikationsnetze wird ein Energiebedarf von 220 TWh im Jahr 2015 berechnet, der sich etwa jeweils zur Hälfte auf Mobilfunk- und Festnetz aufteilt. Die THG-Emissionen der Rechenzentren und Unternehmensnetzwerke betragen im Jahr 2015 160 Mt CO_{2e} und für Telekommunikationsnetze 180 Mt CO_{2e}. Sowohl bei den Rechenzentren als auch bei den Netzwerken liegt der Anteil der durch die Herstellung verursachten THG-Emissionen bei etwa 10 Prozent der gesamten THG-Emissionen.

In ihrer Zusammenfassung weisen die Autoren darauf hin, dass die THG-Emissionen im IKT-Sektor nach ihren Berechnungen zwischen 2010 und 2015 in Summe praktisch konstant geblieben sind. Im E&M-Sektor ist sogar ein Absinken der THG-Emissionen feststellbar. Lediglich bei den Telekommunikationsnetzen ist ein leichter Anstieg festzustellen. Die Autoren machen darauf aufmerksam, dass ihre Ergebnisse damit den meisten anderen vorliegenden Analysen widersprechen, die von einem Anstieg der THG-Emissionen ausgehen. Sie schließen aus ihren Analysen, dass das Zeitalter der Dematerialisierung endlich gekommen zu sein scheint.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Malmodin und Lundén den IKT- und E&M Sektor umfangreich abgebildet und auf Basis detaillierter Daten die THG-Emissionen erhoben haben. Lediglich für Rechenzentren und Telekommunikationsnetze sind ihre Annahme nicht publiziert und können daher nicht mit anderen Studien verglichen werden.

3.4.3 Studien der Global e-Sustainability Initiative

Die Global e-Sustainability Initiative (GeSI), in der neben führenden IKT-Unternehmen, Verbände, Beratungsunternehmen sowie Nichtregierungsorganisationen Mitglied sind, hat seit dem Jahr 2008 eine Reihe von Studien zu den Zusammenhängen und Potentialen von IKT und Nachhaltigkeit herausgegeben. In der vorliegende Untersuchung werden die drei letzten Berichte SMARTer2020, SMARTer2030 und SMARTer2030+ berücksichtigt (GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & BCG, 2012; GeSI & Deloitte, 2019).

Der Schwerpunkt der Studien liegt auf der der Berechnung indirekter Effekte der Digitalisierung auf THG-Emissionen. Geschätzt werden zum Vergleich jedoch auch die direkten THG-Emissionen aus Herstellung und Betrieb von IKT-Endgeräten (PC, Peripheriegeräte, Drucker, Tablets, Smartphones), Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren.

Da alle Studien aufeinander aufbauen, wird der Rechenansatz nicht in allen Fassungen beschrieben. Die letzte Fassung, die die Vorgehensweise detaillierter beschreibt ist SMARTer2020. Da die Studien jeweils von anderen Beratungsunternehmen (2012: Boston Consulting Group, 2015: Accenture Strategy 2019: Deloitte) erstellt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der Berechnungsansatz weitestgehend beibehalten und Annahmen und Daten aktualisiert wurden.

Für THG-Emissionen von Endgeräten, Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren werden länderspezifische Entwicklungen der THG-Emissionen ausgewiesen und diese zu globalen Werten zusammengefasst. Die Berechnung basiert auf Datenquellen von Marktforschungsinstituten (z. B. Gartner, Forrester), Daten der IEA, Daten aus industrieller Forschung (z. B. Malmodin et al., 2010), Experteninterviews und Schätzungen von Beratungsunternehmen sowie der Autoren.

Die geschätzten THG-Emissionen aus Herstellung Betrieb der Endgeräte (ohne Unterhaltungselektronik), Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren variieren in den Studien gering (siehe Tabelle 2).

Kürzel	Betrachtungsjahr	THG-Emissionen [Mt CO _{2e}]				Anteil an globalen THG-Emissionen
		Endgeräte	Netzwerke	Rechenzentren	Total	
SMARTer2020	2020	670	300	290	1'270	2,3%
SMARTer2030	2030	590	300	360	1'250	2,0%
SMARTer2030+	2030	k. A.	k. A.	k. A.	903 ²	1,7%

Tabelle 2 – Ergebnisse der GeSI-Studien zum THG-Fußabdruck der IKT

In SMARTer2030+ erfolgt keine exakte Aufschlüsselung nach Endgeräten, Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren; es werden aber Tendenzen angegeben: (1) Effizienzsteigerung der Rechenzentren von jährlich 6 Prozent, (2) sinkende THG-Emissionen in der Herstellung sowie steigende Energieeffizienz im Betrieb der Endgeräte, (3) steigende Emissionen der Telekommunikationsnetze aufgrund neuer Netztechnologien und verstärktem Netzausbau.

Während die älteren GeSI-Studien in sich konsistente Schätzungen liefern, weicht SMARTer2030+ davon ab. Grund hierfür ist unter anderem die Nutzung neuer Daten der IEA für Rechenzentren. An dieser Stelle sei nochmals in Erinnerung gerufen, dass der Fokus der GeSI-Studien auf indirekten Effekten liegt und die ermittelten direkten Effekte lediglich dem Vergleich mit den indirekten Effekten dienen.

² In der Studie wird darauf verwiesen, dass dieser Wert auch um 70 Mt CO_{2e} niedriger ausfallen könnte, wenn in Anlehnung an die IEA-Szenarien ein ambitioniertes Dekarbonisierungsziel für den Energie- und IKT-Sektor verfolgt werden würde (GeSI & Deloitte, 2019, 22).

3.4.4 Studien von Andrae (2019) und Andrae & Edler (2015)

Die Studie »On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030« von den Huawei Forschern Anders Andrae und Tomas Edler wurde im April 2015 im Open Access Journal Challenges veröffentlicht. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf einer Schätzung des weltweiten Bedarfs an elektrischer Energie durch die IKT zwischen 2010 und 2030. Hierzu wurde ein Modell verwendet, welches unter Berücksichtigung von Wachstumsraten und Effizienzsteigerungen die Energiebedarfe prognostiziert.³ Stromverbräuche wurden für die folgenden Kategorien geschätzt:

- Nutzungsphase der Endgeräte (Desktop Computer, Laptops, Monitore, Smartphones, Tablets, Mobiltelefone, Phablets und Unterhaltungselektronik)
- Nutzungsphase der Telekommunikationsnetze
- Nutzungsphase der Rechenzentren
- Herstellung der Geräte und Infrastrukturen in den drei vorher genannten Kategorien

Mit einer Top-Down-Analyse wurden drei verschiedene Szenarien – das Beste, das zu Erwartende und das Schlechteste – aufgestellt. Die Szenarien unterscheiden sich durch unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der Anzahl verkaufter Geräte, der Wachstumsraten der IKT-Leistungen sowie der Entwicklung der Energieeffizienz der verschiedenen Geräte und Infrastrukturen.

Für die Herstellung und Nutzung der Endgeräte wurde die Zahl der Geräte, welche von 2010 bis 2030 jedes Jahr produziert werden, ihre Lebensdauer, ihre Stromleistungsaufnahme im Betrieb sowie der Bedarf an elektrischer Energie in der Herstellung abgeschätzt. Außerdem wurden Annahmen zur jährlichen Verbesserung der Energieeffizienz in der Herstellung und der Nutzung getroffen.

Für die Nutzung der Festnetz-Zugangsnetze wurde das jährlich zu erwartende Wachstum des kabelgebundenen Datenverkehrs mit festem Zugang und des Wireless-LAN-Datenverkehrs mit festem Zugang zwischen 2010 und 2030 ermittelt. Auch hierfür wurden Annahmen zur jährlichen Verbesserung der Energieeffizienz von 2010 bis 2030 getroffen.

Für die Nutzung von Mobilfunknetzen wurde das jährliche Wachstum des Sprachverkehrs, das Wachstum des mobilen Datenverkehrs und der Energiebedarf für Sprach- und Datenverkehr für verschiedenen Mobilfunkgenerationen (2G bis 5G) erfasst. Zudem wurde der Anteil der verschiedenen Mobilfunkgenerationen am gesamten Mobilfunkverkehr (von 2010 bis 2030) und die jährliche Verbesserung der Energieeffizienz abgeschätzt.

³ Im eigentlichen Zeitschriftenbeitrag werden nur die Energiebedarfe berechnet und dargestellt. In den ergänzenden Informationen zum Beitrag finden sich auch Berechnungen der THG-Emissionen.

Für Rechenzentren wurde auf Basis bestehender Literatur der Energiebedarf im Basisjahr 2010 geschätzt. Für 2030 wurde der Strombedarf der Rechenzentren über Annahmen zur jährlichen Zunahme des Datenverkehrs von Rechenzentren und Verbesserungen der Energieeffizienz geschätzt.

Die Bestimmung des Bedarfs an elektrischer Energie für die Herstellung von Geräten und Anlagen für Telekommunikationsnetze und Rechenzentren basiert auf einem geschätzten dem Anteil des Energiebedarfs in der Nutzung am gesamten elektrischen Energiebedarf der Telekommunikationsnetze und Rechenzentren. Die hierzu in der Literatur gefundenen Daten wurden im Rahmen des Modells unter Berücksichtigung verschiedener Wachstumsraten extrapoliert. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Betrachtete Kategorien	Erwartetes Szenario			Bestes Szenario			Schlechtestes Szenario		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Nutzungsphase Endgeräte	1'050	970	670	800	590	328	1'200	1'300	1'108
Nutzungsphase kabelgebundene Netzwerke mit festem Zugang	0	500	2'641	0	200	825	0	900	7'912
Nutzungsphase Wireless LAN mit festem Zugang	0	250	889	0	100	153	0	400	4'529
Nutzungsphase Mobilfunknetz	204	99	196	137	30	33	330	570	2'700
Nutzungsphase Rechenzentren	200	700	2'967	200	400	1'137	200	1'300	7'933
Herstellung Geräte, Netzwerke & Rechenzentren	400	600	903	300	400	221	800	1'800	6'467

Tabelle 3 – Entwicklung des Bedarfs an elektrischer Energie nach Szenario in Terawattstunden (TWh) pro Jahr von 2010 bis 2030

Für die Nutzungsphase der Endgeräte ergibt sich bis zum Jahr 2030 in jedem Szenario eine Verringerung des Bedarfs an elektrischer Energie. Dagegen ist für die Nutzungsphase der Telekommunikationsnetze mit einem deutlichen Anstieg des Strombedarfs in allen drei Szenarien zu rechnen. Im Bereich der Mobilfunknetze wird im erwarteten Szenario mit einem weitgehend konstanten Energiebedarf gerechnet. Im besten Fall gehen Andrae und Edler sogar von einer Reduktion auf 33 TWh bis zum Jahr 2030 aus. Im schlechtesten Fall wäre auch ein sehr starker Anstieg auf etwa 2'700 TWh im Jahr 2030 möglich. Für Rechenzentren werden in allen drei Szenarien deutliche Anstiege des elektrischen Energiebedarfs berechnet. Im erwarteten Fall steigt der Energiebedarf der Rechenzentren von 196 TWh im Jahr 2010 auf 2'967 TWh bis zum Jahr 2030. Im besten Fall wird mit einem Anstieg auf 1'137 TWh und im schlechtesten Fall mit einem Anstieg auf 7'933 TWh bis zum Jahr 2030 gerechnet.

Für die Herstellungsphase der Endgeräte, Telekommunikationsnetze und Rechenzentren berechnen Andrae und Edler im besten Fall einen moderaten rückläufigen Trend auf etwa 400 TWh im Jahr 2020 und 221 TWh im Jahr 2030. Im erwarteten Fall wird ein Anstieg von aktuell 600 TWh auf 903 TWh im Jahr 2030 berechnet. Im schlechtesten Fall errechnen die Autoren einen sehr starken Anstieg von etwa 800 TWh im Jahr 2020 auf 6'467 TWh im Jahr 2030.

In Summe wird für den besten Fall im Jahr 2030 mit einem Energiebedarf der IKT von 2'698 TWh gerechnet. Im erwarteten Fall wären es 8'265 TWh und im schlechtesten Fall 30'715 TWh. Somit läge nach Berechnungen der Autoren der Anteil am globalen Bedarf an elektrischer Energie im besten Fall bei 8 Prozent, im erwarteten Fall bei 21 Prozent und im schlechtesten Fall bei 51 Prozent.⁴ In der Studie wird darauf hingewiesen, dass sich der schlechteste Fall von 51 Prozent des weltweiten elektrischen Energiebedarfs vor allem dann bestätigen wird, wenn sich die Effizienz von drahtlosen Zugangsnetzen, festen Zugangsnetzen und Rechenzentren nicht erhöht. Die Autoren sehen eine Entwicklung des Energiebedarfs der IKT entlang eines Durchschnitts der besten und erwarteten Szenarien als eher wahrscheinlich an. Die dargestellten Projektionen, insbesondere für die besten und erwarteten Szenarien, wurden mit anderen Studien, welche die Entwicklung zwischen 2010 und 2020 vorhersagen (z. B. Van Heddeghem et al., 2014) verglichen.

Wichtige Erkenntnisse aus den Analysen von Andrae und Edler sind, dass – unabhängig vom Szenario – der Anteil des Energiebedarfs in der Nutzungsphase bei den Endgeräten abnimmt und auf die Netzwerke und Rechenzentren übertragen wird.

Außerdem wird hervorgehoben, dass sich der mobile Datenverkehr in den kommenden 15 Jahren stark erhöhen wird. Im Jahr 2030 wird für mobile Endgeräte mit 1,4 Geräten pro Person weltweit und einer täglichen Nutzungsdauer von 1,5 Stunden gerechnet. Dies führt zu einem Datenverkehr von 51'400 Exabyte.

Die Studie »Prediction Studies of Electricity Use of Global Computing in 2030« von Anders Andrae wurde im März 2019 im International Journal of Science and Engineering Investigations veröffentlicht. In dieser Untersuchung wurde der globale elektrische Energiebedarf der Rechenleistung in Servern und anderen Computern für das Jahr 2030 prognostiziert. Mit dem Ansatz soll der Energiebedarf der Datenverarbeitung in den Rechenzentren, den Telekommunikationsnetzen und den Endgeräten bestimmt werden. Die reine Datenübertragung sowie die Herstellung der Geräte werden nicht betrachtet. THG-Emissionen wurden nicht untersucht.

Für die Berechnung wurde ein Modell entwickelt, welches den globalen elektrischen Energiebedarf abschätzt, der mit den Rechenanweisungen in Servern und Computern verbunden ist. Das Modell basiert auf den folgenden Parametern: Befehle pro Sekunde, Strombedarf pro Transistor und Transistoren pro Befehl sowie eine Unterscheidung zwischen allgemeinen und speziellen Rechenaufgaben.

Die Vorhersagen für die Berechnung des Jahres 2030 schwanken sehr stark zwischen 1 und 4'487 TWh, je nachdem, welche Transistortechnologie maßgeblich im Einsatz sein wird. Für das Jahr 2020 lassen sich aus dieser Studie keine Ergebnisse ableiten.

⁴ Andrae und Edler gehen in ihren Berechnungen davon aus, dass der weltweite nicht IKT-bedingte Energiebedarf seit 2010 mit einer Rate von 3 Prozent pro Jahr ansteigt (Andrae & Edler, 2015, S.136)

Trends wie die exponentielle Zunahme der Nachfrage nach Daten z. B. durch Video-Streaming, aber auch bisher unvorhergesehene Datenanforderungen werden zukünftig zu einer Zunahme des Stromverbrauchs der IKT führen. Darüber hinaus ist nicht klar, ob künstliche Intelligenz (KI) den Stromverbrauch weltweit insgesamt erhöhen oder reduzieren wird. Allerdings ist laut Andrae davon auszugehen, dass die neuronalen Netze der KI-Anwendungen wahrscheinlich mehr Daten und Rechenaufgaben erzeugen und damit den Energiebedarf erhöhen werden.

Andrae stellt die Hypothese auf, dass die auf Servern ausgeführten Rechenbefehle im Jahr 2030 einen Strombedarf von mehreren Tausend Terawattstunden verursachen könnten, wenn nicht im nächsten Jahrzehnt Durchbrüche in der Energieeffizienz der Halbleitertechnologie erreicht werden.

In einer weiteren Untersuchung aus dem Jahr 2019 mit dem Titel »Comparison of Several Simplistic High-Level Approaches for Estimating the Global Energy and Electricity Use of ICT Networks and Data Centers« (Andrae, 2019a), veröffentlicht im International Journal of Green Technology, ging Andrae der Frage nach, welcher Ansatz die glaubwürdigsten und systematischsten Vorhersagen für den Energiebedarf von IKT-Netzen und Rechenzentren in der Nutzungsphase im Jahr 2030 ermöglicht. Zentral waren dabei folgende Überlegungen: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Energiebedarf von IKT-Netzwerken und Rechenzentren um das 5- bis 10-fache steigen wird? Ist der Energiebedarf von Rechenzentren in den letzten Jahren aufgrund von verbesserter Energieeffizienz weitgehend konstant geblieben?

Anhand von Angaben zum Energiebedarf in 2010, 2015 und 2020 in der Literatur und der zu erwartenden Entwicklung verschiedener Metriken (z. B. Datenverkehr, Anzahl Abonnenten von Telekommunikationsdienstleistungen) wurden die Energiebedarfe für 2025 und 2030 geschätzt. Für das Festnetz ergibt sich für das Jahr 2030 ein elektrischer Energiebedarf zwischen 104 und 448 TWh, für das Mobilfunknetz zwischen 62 und 1'413 TWh und für Rechenzentren zwischen 163 und 1'495 TWh. Insgesamt liegt der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze und der Rechenzentren im Jahr 2030 zwischen 328 und 2'991 TWh.

Für das Jahr 2020 ergibt sich für das Festnetz ein Energiebedarf zwischen 90 und 171 TWh, für das Mobilfunknetz von 136 TWh und für Rechenzentren zwischen 207 und 651 TWh.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Anders Andrae eine Reihe von Berechnungen veröffentlicht hat, die mit unterschiedlichen Annahmen und Ansätzen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen und Prognosen kommen.

3.5 Beiträge zu den THG-Emissionen in den einzelnen Bereichen

3.5.1 Rechenzentren

Wie die obigen Ausführungen zeigen, kommen die verschiedenen Studien hinsichtlich der THG-Emissionen der Rechenzentren zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Dies ist insbesondere auch auf die insgesamt nur wenig frei verfügbaren Daten zu Rechenzentren zurückzuführen (Hintemann, 2014). Die genauen Berechnungsgrundlagen werden in den betrachteten Studien entweder nicht publiziert oder die Berechnung erfolgt nur sehr grob mit Hilfe von exponentiellen Wachstumsfunktionen. Die Studienergebnisse ergeben eine Spannweite für den Energiebedarf der Rechenzentren von etwa 200 bis 1'000 TWh im Jahr 2020. Für die THG-Emissionen liegt die Spannweite der Ergebnisse für das Jahr 2020 zwischen etwa 100 Mt CO_{2e} und 500 Mt CO_{2e}.⁵ Bei diesen Werten ist jeweils der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt, inklusive Herstellung und Transport der Geräte und Infrastrukturen. Der Energiebedarf in der Nutzungsphase ist nach aktuellen Informationen für etwa 90 Prozent der THG-Emissionen verantwortlich (Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeligi, 2018; Malmodin & Lundén, 2018a).

etwa
90%
der THG-Emissionen aus
Rechenzentren entstehen
in der Nutzungsphase

Vergleicht man dies mit Ergebnissen weiterer Studien zum Energiebedarf von Rechenzentren, so bestätigt sich das diffuse Bild. Das Shift Project errechnet für Rechenzentren Energiebedarfe von 900 TWh im Jahr 2020, die am oberen Ende der oben genannten Spannweite liegen (The Shift Project, 2019). Auch die von der Deutschen Energie-Agentur durchgeführte Metastudie hat eine sehr große Spannweite der Energiebedarfe von Rechenzentren ermittelt (Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2017). Es gibt allerdings auch ein Autorenteam aus den USA, das von deutlich geringeren Energiebedarfen der Rechenzentren ausgeht. In einem aktuellen Artikel im Science Magazin stellen sie Berechnungsergebnisse vor, bei denen nur ein sehr geringer Anstieg des weltweiten Energiebedarfs der Rechenzentren von 194 TWh im Jahr 2010 auf 205 TWh im Jahr 2018 erwartet wird (Masanet et al., 2020). Die Berechnungen werden nicht weiter erläutert, stellen aber nach Angaben der Autoren eine Übertragung der Annahmen einer Studie für die USA aus dem Jahre 2016 (Shehabi et al., 2016) auf globale Ebene dar. Die Ergebnisse der Berechnungen von Masanet et al. wurden auch in einem IEA-Bericht zu Digitalisierung und Energy aus dem Jahr 2017 (Turk & Cozzi, 2017) veröffentlicht. Masanet et. al gehen von sehr hohen weltweiten Effizienzgewinnen aus. Diese sind insbesondere durch einen Übergang zu sehr großen, sogenannten Hyperscale Rechenzentren und anderen Cloud Rechenzentren begründet, die Rechenleistung sehr viel effizienter bereitstellen können.

Die Berechnungen von Masanet et al. sind allerdings kaum mit anderen verfügbaren Daten vereinbar. So wird erwartet, dass allein der zusätzliche Energiebedarf für das Bitcoin Mining aktuell weltweit in der Größenordnung von 50 bis 80 TWh pro Jahr liegt (CBECI, 2019; Digiconomist, 2019; Kamiya, 2019; Rauchs et al., 2018; Stoll et al., 2019). Für Europa und Asien gehen

5 Da nicht alle Studien auch die THG-Emissionen berechnen, wurde für Vergleichszwecke die Energiebedarfe in THG-Emissionen umgerechnet. Hierzu wurde die von der Internationalen Energieagentur für das Jahr 2018 publizierte THG-Intensität von 475gCO_{2e}/kWh zugrunde gelegt (IEA, 2019). Da die Studie von Malmodin und Lundén (2018) nur Werte für das Jahr 2010 und 2015 publiziert, wurden diese im Trend bis zum Jahr 2020 fortgeschrieben.

Masanet et al. von nahezu konstanten Energiebedarfen der Rechenzentren aus, die im Jahr 2018 für Asien bei ca. 70 TWh im Jahr und für Europa bei ca. 40 TWh liegen. Diese Annahmen scheinen angesichts anderer Untersuchungen kaum haltbar. Die Vorbereitungsstudie zur Ökodesign-Richtlinie (Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM, 2016) und eigene Berechnungen der Autoren (Hintemann, 2019) kommen für Europa zu etwa doppelt so hohen Energiebedarfen. Gemäß der Analysen des Immobiliendienstleisters CBRE hat sich das Rechenzentrums-Angebot in den vier Städten London, Frankfurt, Amsterdam und Paris von 2010 bis 2020 etwa vervierfacht (CBRE, 2017, 2020). Für China hat Greenpeace gemeinsam mit der North China Electric Power University einen Energiebedarf der Rechenzentren von 161 TWh im Jahr 2018 ermittelt (Greenpeace & North China Electric Power University, 2019).⁶

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kein einheitliches Meinungsbild und auch keine belastbaren Berechnungsergebnisse zum Energiebedarf und zu den THG-Emissionen der Rechenzentren vorliegen. Aus Sicht der Autoren wird ein moderater Anstieg der THG-Emissionen in den vergangenen 10 Jahren als wahrscheinlich angesehen. Bei aller bestehenden Unsicherheit wird eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der Rechenzentren im Jahr 2020 von 200 bis 250 Mt CO_{2e} (inklusive Herstellung) als plausibel angesehen.

Die THG-Emissionen der Rechenzentren werden zu etwa 60 Prozent durch die IT-Komponenten wie Server, Speichersysteme und Netzwerke verursacht. 40 Prozent der THG-Emissionen sind auf die Infrastrukturen für Kühlung, Klimatisierung, sichere Stromversorgung etc. zurückzuführen. Diese Abschätzung ergibt sich aus aktuellen Analysen der PUE-Werte⁷ der Rechenzentren, die weltweit im Durchschnitt bei etwa 1,6 bis 1,7 liegen (Avgerinou et al., 2017; Hintemann, 2019; Masanet et al., 2020; Shehabi et al., 2016; Stobbe et al., 2015; Uptime Institute, 2019).

3.5.2 Telekommunikationsnetze

Auch bei den Telekommunikationsnetzen liegen die in den Studien errechneten Energiebedarfe und THG-Emissionen weit auseinander. Im Jahr 2020 liegt der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze etwa zwischen 200 TWh und 550 TWh. Die Internationale Energieagentur geht in ihrem Bericht zur Digitalisierung – ohne weiter auf die Art der Berechnung einzugehen – von einem Energiebedarf zwischen 160 und 320 TWh pro Jahr aus (Turk & Cozzi, 2017). Für die THG-Emissionen liegt die Spannweite in den betrachteten Studien etwa zwischen 140 und 300 Mt CO_{2e}. Wie bei Rechenzentren wird davon ausgegangen, dass der Energiebedarf in der Nutzungsphase für etwa 90 Prozent der gesamten THG-Emissionen verantwortlich ist. Aktuell wird in den meisten Fällen davon ausgegangen, dass sich die Energiebedarfe und THG-Emissionen der Telekommunikationsnetze je etwa zur Hälfte auf das Mobilfunknetz und das Festnetz aufteilen. Die genaue Aufteilung ist dabei abhängig von den Systemgrenzen, z. B. ob die Kernnetze im

200 bis 250 Mt

CO_{2e} weltweit aus Rechenzentren im Jahr 2020 inkl. Herstellung

60%

der THG-Emissionen der Rechenzentren entstehen durch IT-Komponenten wie Server, Speichersysteme und Netzwerke

90%

der THG-Emissionen aus Telekommunikationsnetzen entstehen in der Nutzungsphase

⁶ Eine Bewertung der Studie von Greenpeace und der North China Electric University kann im Rahmen dieser Untersuchung leider nicht vorgenommen werden. Es liegt nur die Zusammenfassung auf englisch vor. Die detaillierte Studie gibt es nur auf chinesisich.

⁷ Der PUE-Wert (PUE = Power Usage Effectiveness) ist der Quotient aus dem gesamten Energiebedarf eines Rechenzentrums und dem Energiebedarf der IT-Komponenten.

Mobilfunk zu Mobilfunknetzen oder zu Festnetzen gezählt werden. Für die Zukunft wird insbesondere für Mobilfunknetze ein Wachstum des Energiebedarfs erwartet (Andrae, 2019b; Andrae & Edler, 2015; Malmodin & Lundén, 2018a).

Aus Sicht der Autoren ist auch bei den Telekommunikationsnetzen davon auszugehen, dass der Energiebedarf und die THG-Emissionen in den vergangenen Jahren moderat angestiegen sind und auch in Zukunft ansteigen werden. Wie bei den Rechenzentren wird für das Jahr 2020 eine Größenordnung von 200 bis 250 Mt CO_{2e} inklusive der Herstellung der Geräte und Anlagen als plausibel angesehen.

200 bis 250 Mt

CO_{2e} weltweit aus Telekommunikationsnetzen im Jahr 2020 inkl. Herstellung

3.5.3 Endgeräte

Im Vergleich zu den Berechnungen zu Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen sind die Ergebnisse der verschiedenen Studien zu den Endgeräten konsistenter. Abweichungen ergeben sich im Wesentlichen dadurch, dass unterschiedliche Gerätetypen berücksichtigt wurden. Werden nur die reinen IKT-Geräte wie Desktop Computer, Notebooks, Tablets und Smartphones berücksichtigt, so erhält man für das Jahr 2020 eine Spannweite von etwa 320 bis 700 Mt CO_{2e}. Für Geräte der Unterhaltungselektronik (TV-Geräte, Settop-Boxen, etc.) ist von etwa 400 bis 500 Mt CO_{2e} im Jahr 2020 auszugehen.

400 bis 500 Mt

CO_{2e} durch Geräte der Unterhaltungselektronik (TV-Geräte, Settop-Boxen, etc.) im Jahr 2020

Anders als bei den Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen liegt der Anteil der THG-Emissionen aus der Herstellung und dem Transport von IKT-Endgeräten (abhängig vom Gerätetyp) oft bei über 50 Prozent der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Eine Zunahme der Energieeffizienz in der Nutzung, steigende Gerätezahlen und einer Zunahme der Komplexität in der Herstellung führen dazu, dass dieser Anteil in Zukunft voraussichtlich noch weiter ansteigt (Belkhir & Elmeligi, 2018; Malmodin & Lundén, 2018a; Stobbe et al., 2015). Bei Unterhaltungselektronik dominieren Fernsehgeräte mit einem verhältnismäßig hohen Energiebedarf in der Nutzungsphase. Die durch die Herstellung verursachten THG-Emissionen werden in diesem Bereich auf etwa 30 Prozent der gesamten THG-Emissionen geschätzt (Malmodin & Lundén, 2018a).

Aus Sicht der Autoren erscheint eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der IKT- und Unterhaltungselektronik-Endgeräte von etwa 900 bis 1'100 Mt CO_{2e} als plausibel. Ohne Unterhaltungselektronik liegen die THG-Emissionen aus Sicht der Autoren bei etwa 500 bis 600 Mt CO_{2e}.

500 bis 600 Mt

CO_{2e} durch IKT-Endgeräte (Laptops, Smartphones, etc.) im Jahr 2020

3.6 Zusammenfassende Betrachtung der direkten Effekte und Schlussfolgerungen für Deutschland

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus den betrachteten Studien ziehen.

Die Datenbasis der Studien ist heterogen und in einigen Fällen nicht eindeutig nachvollziehbar. In vielen Studien werden vereinfachende Annahmen getroffen, die große Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

Die Ergebnisse der Studien weichen um mehrere Größenordnungen voneinander ab. In Abbildung 1 ist die Spannweite der Ergebnisse und die in der vorliegenden Kurzstudie als wahrscheinlich eingeschätzte Größenordnung der THG-Emissionen dargestellt. Einige Trends sind trotz der großen Variation der Ergebnisse klar erkennbar.

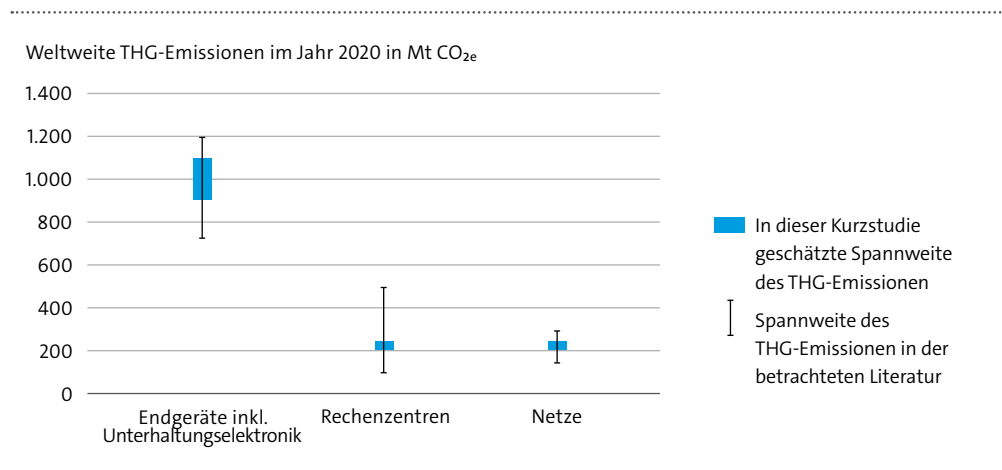


Abbildung 1 – Spannweite der Ergebnisse der betrachteten Studien zur Höhe der direkten THG-Emissionen der IKT im Jahr 2020

Bei digitalen Infrastrukturen (Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) liegen die Studienergebnisse zum Energiebedarf und zu den THG-Emissionen sehr weit auseinander. Aufgrund der zunehmenden Verlagerung von Anwendungen in zentrale Infrastrukturen (z. B. durch Online-Gaming, Video-Streaming, soziale Netzwerke) ist davon auszugehen, dass der Anteil der durch Infrastrukturen verursachten THG-Emissionen an den gesamten THG-Emissionen des IKT-Sektors zunimmt.

Bei Infrastrukturen sind bisher vor allem die THG-Emissionen in der Nutzungsphase relevant – die Herstellung wird in den bisherigen Untersuchungen entweder nicht betrachtet oder ihr Anteil als eher gering (ca. 10 Prozent) eingeschätzt. Mit weiter stark ansteigender Energieeffizienz und der Verwendung von erneuerbaren Energien in der Nutzung kann aber auch die Herstellungsphase in Zukunft eine höhere Bedeutung bekommen. Vor allem bei großen und zentralen Rechenzentren können über die Verwendung von erneuerbaren Energien hohe absolute THG-Reduktionen erreicht werden. Außerdem bieten sich hier Potenziale für die Nutzung von Abwärme (Belkhir & Elmeligi, 2018; Funke et al., 2019; Masanet et al., 2020).

IKT-Endgeräte und Unterhaltungselektronik sind aktuell für den größten Anteil der THG-Emissionen der IKT insgesamt verantwortlich. Die Energiebedarfe in der Nutzungsphase der einzelnen Geräte sinken durch die erreichten Effizienzgewinne deutlich. Die gesamten THG-Emissionen der Endgeräte steigen in Zukunft jedoch voraussichtlich weiter an, insbesondere aufgrund der THG-intensiven Herstellung und aufgrund wachsender Gerätezahlen. Eine Reduktion der THG-Emissionen kann daher insbesondere erreicht werden, wenn die Herstellung mit weniger THG-Emissionen erfolgt und die Nutzungsdauer durch höherwertige, langlebigere Geräte sowie Wiederaufbereitung und Wiederverwendung gesteigert werden kann.

Fasst man die Ergebnisse der verschiedenen betrachteten Studien zusammen, so liegen aktuell die THG-Emissionen der IKT zwischen etwa 700 Mt CO_{2e} und 2'000 Mt CO_{2e}.⁸ Damit liegt der aktuelle Anteil der IKT an den weltweiten THG-Emissionen zwischen etwa 1,5 und 4 Prozent. Aus Sicht der Autoren ist im Jahr 2020 ein Anteil der IKT an den weltweiten THG-Emissionen von 1,8 bis 3,2 Prozent wahrscheinlich. Zur unteren Abschätzung gelangt man mit oben aufgeführten unteren Grenzen der als realistische angesehenen Spannweiten für die THG-Emissionen und ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik. Die obere Abschätzung ergibt sich mit den oberen Grenzen der Spannweiten und mit Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik.

Wie die Situation in Deutschland zu bewerten ist, muss detailliert untersucht werden. Für den Energiebedarf in der Nutzung liegen detaillierte Ergebnisse zu allen Endgeräten, Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren einer Untersuchung für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aus dem Jahre 2015 vor (Stobbe et al., 2015). Wie diese Ergebnisse im Angesicht neu verfügbarer Informationen zu Markt- und Technikentwicklung und neuerer internationalen Studien bewertet werden können und welche Schlussfolgerung auf Basis der neueren internationalen Studien zu ziehen sind, muss im Einzelnen untersucht werden. Herausforderungen stellt die Bewertung der THG-Emissionen der elektrischen Energie dar, die bei der Nutzung von den Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren sowie bei der Herstellung der Geräte und Anlagen anfällt.

1,8 bis 3,2 %

an den weltweiten
THG-Emissionen ist im Jahr 2020
auf IKT zurückzuführen

8 Für das Jahr 2030 ist die Spannweite der Studienergebnisse noch deutlich höher. Die Studie »Digital With Purpose« geht im optimistischen Szenario von 741 Mt CO_{2e} im Jahr 2030 aus (GeSI & Deloitte, 2019), Belkhir und Elmeligi errechnen im sog. Maximum-Fall 2'620 Mt CO_{2e} (Belkhir & Elmeligi, 2018). Bei dieser Betrachtung sind die Studien von Andres Andrae nicht berücksichtigt, da allein seine verschiedenen Publikationen eine noch viel größere Spannweite an Berechnungsergebnissen liefern.

4 Indirekte Effekte

4 Indirekte Effekte

4.1 Indirekte Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz

Indirekte Effekte sind Veränderungen bestehender Produktions- und Konsummuster, welche sich aus der Anwendung digitaler Technologien ergeben (Bieser & Hilty, 2018a). Im Gegensatz zu den direkten Effekten können diese Veränderungen in beiden Richtungen wirken, also THG-Emissionen erhöhen oder senken. Beispielsweise kann der Einsatz von Videokonferenz-Systemen Geschäftsreisen und die damit verbundenen THG-Emissionen vermeiden. Andererseits haben Flugbuchungsplattformen durch Verschärfung des Wettbewerbs zur Entstehung des Billigflugsektors (Moreno-Izquierdo et al., 2015) und damit zu einer Zunahme von Flugreisen und den damit verbundenen THG-Emissionen beigetragen. Ob und wie sich indirekte Effekte in spezifischen Anwendungsbereichen digitaler Technologien auf den Klimaschutz auswirken, kann daher nur durch eine differenzierte Analyse und für ein klar definiertes Bezugssystem ermittelt werden.

4.2 Untersuchungen indirekter Effekte der Digitalisierung auf den Klimaschutz

Untersuchungen von indirekten Effekten der Digitalisierung auf den Klimaschutz beruhen in der Regel auf Methoden, um die Auswirkungen der Anwendung digitaler Technologien auf THG-Emissionen abzuschätzen (Bieser & Hilty, 2018a). Sie fokussieren entweder auf einzelne Anwendungsfälle (z. B. E-Commerce), die dann relativ genau untersucht werden, oder versuchen eine grobe Abschätzung mehrerer Anwendungsfälle über verschiedene Sektoren hinweg vorzunehmen (Bieser & Hilty, 2018a).

Methodisch basieren die Untersuchungen einzelner Anwendungsfälle häufig auf einem Vergleich der Ökobilanz zweier Produktsysteme – vor und nach der Anwendung der digitalen Technologie. Beispielsweise vergleichen Moberg et al. (2011) und Coroama et al. (2015) die THG-Emissionen der Herstellung eines konventionellen, papier-basierten Buches mit denen eines E-Book-Readers, bezogen auf ein gelesenes Buch als funktionale Einheit.

Sektorübergreifende Studien sind häufig zukunftsgerichtet und versuchen THG-Reduktionspotenziale unter der Annahme bestimmter Akzeptanzraten von Anwendungsfällen abzuschätzen. Zum Beispiel schätzt die Studie »SMARTer 2030« (GeSI & Accenture Strategy, 2015) die THG-Reduktionspotenziale von 12 Anwendungsfällen (z. B. mobiles Arbeiten, intelligentes Heizen) in verschiedenen Sektoren (z. B. Gebäude, Elektrizität und Wärme, Transport). Da das Ziel solcher Studien die Identifikation und der Vergleich von THG-Reduktionspotenzialen ist, ist ihr Rechenansatz meist weitaus einfacher als der einer Ökobilanz und basiert auf der Identifikation so genannter THG-Reduktionshebel und auf groben Überschlagsrechnungen (Bieser & Hilty, 2018a). Solche Studien sollten nicht als Vorhersagen interpretiert werden, sondern als Quellen von Hinweisen, wie man Maßnahmen der Digitalisierung priorisieren, gestalten und umsetzen soll, um die THG-Reduktionspotenziale optimal auszuschöpfen.

Der Fokus dieser Kurzstudie liegt auf sektorübergreifenden Studien, welche THG-Reduktionspotenziale digitaler Anwendungen quantitativ abschätzen (Tabelle 4). Über diese acht Studien hinaus fließen Erkenntnisse aus weiteren Studien und Metastudien in die Diskussion und Interpretation der Ergebnisse ein.

Kürzel	Titel	Auftraggeber / Herausgeber	Auftragnehmer / Autoren	Erscheinungsjahr	Betrachtungsjahr(e)	Betrachtungsbereich
SMART2020	SMART 2020	GeSI, The Climate Group	McKinsey & Company	2008	2020	Global
SMARTer2020	SMARTer 2020	GeSI	The Boston Consulting Group	2012	2020	Global
SMARTer2030	SMARTer 2030	GeSI	Accenture Strategy	2015	2030	Global
SMARTer2030+	Digital with Purpose: Delivering a SMARTer 2030	GeSI	Deloitte	2019	2030	Global
Ericsson2030	Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030	Ericsson	Malmödin, Bergmark	2015	2030	Global
WWF2030	The Potential Global CO ₂ Reductions from ICT Use	WWF Sweden	Pamlin	2008	2030	Global
CA2020	Innovating toward a Low-Carbon Canada	WWF Canada	Gibson, Bein, Plamondon	2008	2020	Kanada
CH2025	Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland	Swisscom, WWF Schweiz, Uni Zürich	Hilty, Bieser	2017	2015, 2025	Schweiz

Tabelle 4 – Berücksichtigte Studien zum THG-Reduktionspotenzial digitaler Anwendungen

4.3 Vergleich der geschätzten THG-Reduktionspotenziale

In [Tabelle 5](#) sind die Studien nach ihrem (in der Zukunft liegenden) Betrachtungsjahr sortiert. Um einen Eindruck von der Breite der jeweiligen Studie zu geben, ist die Anzahl der berücksichtigten Anwendungsfälle aufgeführt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Studien sind:

- das insgesamt geschätzte THG-Reduktionspotenzial in Megatonnen CO₂-Äquivalenten,
- der Anteil dieses Reduktionspotenzials an den Gesamt-THG-Emissionen (letztere für das Betrachtungsjahr prognostiziert),
- der Enablement-Faktor.

Der Enablement-Faktor ist der Quotient von THG-Reduktionspotenzial und THG-Fußabdruck des IKT-Sektors. Die SMARTer 2030 Studie postuliert beispielsweise einen Enablement-Faktor von 9,7, das THG-Reduktionspotenzial wird hier also auf das 9,7-Fache des eigenen Fußabdrucks der IKT geschätzt (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Ein Enablement-Faktor kleiner als eins würde

bedeuten, dass der THG-Fußabdruck des IKT Sektors größer ist als die Summe der THG-Reduktionspotenziale der betrachteten Anwendungsfälle.

Einige Studien haben bis zu drei Zukunftsszenarien gerechnet, die sich in den getroffenen Annahmen unterscheiden (z. B. Annahmen zur zukünftigen Verbreitung bestimmter Anwendungen). Üblicherweise sind Schätzungen für ein »worst case« und ein »best case« Szenario enthalten, die in Tabelle 5 neutral mit »min« und »max« überschrieben sind.

Kürzel	Betrachtungsjahr	Anzahl Anwendungsfälle	THG-Reduktionspotenzial [Mt CO _{2e}]		THG-Reduktionspotenzial relativ [%]		Enablement-Faktor	
			min	max	min	max	min	max
SMART2020	2020	39	7'800	7'800	15,0 %	15,0 %	5,5	5,5
SMARTer2020	2020	35	9'100	9'100	16,5 %	16,5 %	7,2	7,2
CA2020	2020 (Kanada)	9	19,1	36	k. A.	k. A.	19,1*	36*
CH2025	2025 (Schweiz)	10	0,72	6,99	k. A.	k. A.	0,26	3,37
WWF2030	2030	13	1'168	8'711	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Ericsson2030	2030	17	4'699*	9'716*	7,4%	15,3%	k. A.	k. A.
SMARTer2030	2030	12	12'080	12'080	20,0%	20,0 %	9,7	9,7
SMARTer2030+	2030	7	668	3'496*	1,3%*	8,9%*	0,7*	4,7*

Tabelle 5 – Zeitlicher und regionaler Fokus, Anzahl der berücksichtigten digitalen Anwendungsfälle, THG-Reduktionspotenziale (absolut und anteilig an Gesamtemissionen im Betrachtungsjahr), sowie Enablement-Faktoren der berücksichtigten Studien

* Eigene Berechnung basierend auf Angaben in der jeweiligen Studie

Wie zu sehen ist, sind die Studien aufgrund ihres unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Fokus nur teilweise vergleichbar. Für das Jahr 2020 sind die ersten beiden, SMART2020 und SMARTer2020 untereinander vergleichbar. SMARTer2020 (publiziert 2012) ist vier Jahre später entstanden als SMART2020 und hat den Enablement-Faktor nach oben korrigiert. Diese Studien sind heute eher von historischem Interesse, das sie prospektive Aussagen über das Jahr 2020 machen.

Direkt vergleichbar sind auch die letzten vier Studien in Tabelle 5, die sich alle auf 2030 und den globalen IKT-Sektor beziehen. Bei WWF2030 und Ericsson2030 lässt sich allerdings kein Enablement-Faktor angeben, da diese Studien keine direkten Effekte abschätzen. Vergleicht man die absoluten Reduktionspotenziale, so fällt auf, dass die optimistischen Schätzungen der ersten drei Studien in der gleichen Größenordnung liegen (um die 10'000 Mt CO_{2e}), während die neueste Studie, SMARTer2030+ (erschieden 2019), mit rund 3'500 Mt diesen Optimismus deutlich dämpft. Der »worst case« ist hier mit 668 Mt CO_{2e} mit großem Abstand am niedrigsten eingeschätzt. Es ist allerdings zu beachten, dass die älteren Studien mit Betrachtungsjahr 2030 12-17 Anwendungsfälle berücksichtigen, SMARTer2030+ dagegen nur 7.

Betrachtet man die relativen THG-Reduktionspotenziale (in Prozent der für das jeweilige Jahr geschätzten Gesamtemissionen), so ist ein Vergleich unabhängig von Region und Betrachtungsjahr möglich. Allerdings haben nicht alle Studien eine Schätzung der THG-Gesamtemissionen im Betrachtungsjahr vorgenommen. Bei den anderen Studien liegt dieser Wert zwischen 1,3 Prozent und 20 Prozent und fällt damit sehr unterschiedlich aus (zweitletzte Spalte in Tabelle 5). Betrachtet man nur die optimistischen Szenarien, ergibt sich immer noch eine Spannbreite von 8,9 bis 20 Prozent. Allerdings ist zu beachten, dass diese Zahlen nicht nur von den angenommenen Effekten der Digitalisierung, sondern auch vom jeweils angenommenen Referenzszenario für die Entwicklung der THG-Gesamtemissionen abhängig sind und somit eine zusätzliche Unsicherheit transportieren.⁹

8,9 bis 20%

der weltweiten THG Emissionen können in optimistischen Szenarien reduziert werden.

Die Spannbreite des Enablement-Faktors, also der Unterschied zwischen »worst case« und »best case«, ist am höchsten bei der Studie CH2025 über die Schweiz im Jahr 2025. Die Autoren berechnen unter pessimistischen Annahmen einen Enablement-Faktor von nur 0,26 (der niedrigste Faktor aus allen acht Studien) und unter optimistischen Annahmen von 3,37. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Szenarien in dieser Studie insgesamt etwas konservativer sind und insbesondere für den »worst case« sehr wenig positive Annahmen beinhalten. Die Hauptaussage dieser Studie lautet, dass ein Enablement-Faktor deutlich über 1,0 nur dann erreicht wird, wenn die beteiligten Akteure auf dieses Ziel hinarbeiten. Mehr Digitalisierung wird nicht »automatisch« mehr THG-Emissionen reduzieren, sondern nur wenn der politische Wille und das zielgerichtete Handeln aller Beteiligten gegeben sind. In der Logik dieser Studie erscheinen Studien, die nur ein einziges Szenario berechnen (SMART2020, SMARTer2020, SMARTer2030) als optimistisch.

Weil die für dieses Kapitel ausgewählten Studien ihren Schwerpunkt auf die indirekten Effekte legen, ist die Unsicherheit bei der Schätzung der zukünftigen direkten Effekte durch diese Studien möglicherweise besonders hoch. Diese zusätzliche Unsicherheit geht aber in die Berechnung jedes einzelnen Enablement-Faktors ein. Es bietet sich deshalb an, die Enablement-Faktoren stattdessen an den Ergebnissen zu den direkten Effekten aus ↗ Kapitel 3 zu normieren. Damit wird es außerdem möglich, für alle vier 2030er-Studien Enablement-Faktoren anzugeben. Dies ist im letzten Kapitel (↗ Kapitel 5) in ↗ Tabelle 7 gezeigt.

»Alle Studien erkennen ein substantielles THG-Reduktionspotenzial der Digitalisierung.«

Als vorläufiges Fazit lässt sich festhalten, dass alle Studien ein substantielles THG-Reduktionspotenzial der Digitalisierung erkennen, das – ggf. unter optimistischen Annahmen – deutlich größer ausfällt als der eigene THG-Fußabdruck des IKT-Sektors. Die Enablement-Faktoren reichen hier von 3,37 bis 36.

⁹ Allerdings könnte man auch umgekehrt argumentieren: Wenn die Gesamtemissionen stärker zunehmen, so wird auch der reduzierende Effekt durch Digitalisierung in absoluten Zahlen höher ausfallen. Wenn beispielsweise mehr fossile Energie genutzt wird, so werden smarte Maßnahmen zur Energieeinsparung mehr THG-Reduktion bewirken können. Folglich sind die Ergebnisse dieser Studien auch davon abhängig, ob man sich THG-Reduktionseffekte kausal eher als fixe oder proportionale Effekte vorstellt (oder mit einer komplexeren Wirkungs dynamik). Damit zeigt sich, dass die Unsicherheiten in den hier besprochenen Studien nicht ohne komplexere Modellbildung reduziert werden können. Zur systemdynamischen Modellierung von Auswirkungen der IKT auf die Umwelt siehe auch Hilty et al. (2004).

Für eine unvoreingenommene Interpretation ist zu berücksichtigen, dass diese Studien sich auf Anwendungen mit THG-Reduktionspotenzial konzentrieren und negative Auswirkungen der Digitalisierung fast ausschließlich auf der Ebene der direkten Effekte berücksichtigen. Auf der Ebene der indirekten Effekte suchen die Studien primär nach Chancen der Digitalisierung für den Klimaschutz und nur ausnahmsweise auch nach Risiken wie z. B. Anwendungen, welche zu einer Erhöhung der THG-Emissionen führen könnten, oder dynamischen Marktreaktionen wie Rebound-Effekte. Eine generelle Diskussion dieser Risiken erfolgt deshalb im nächsten Abschnitt.

4.4 Risiken der Digitalisierung für den Klimaschutz

Rebound- und Backfire-Effekte

Rebound- und Backfire-Effekte werden in der Literatur über die Nachhaltigkeit von effizienzsteigernden Technologien häufig diskutiert (Madlener & Alcott, 2011).

Von einem Rebound-Effekt spricht man, wenn eine effizienzsteigernde Maßnahme zu einer Steigerung der Nachfrage in einer Wirtschaft führt, so dass die absolute Einsparung eines Inputfaktors hinter den sogenannten »engineering savings« zurückbleibt. Das sind die Einsparungen, die bei konstanter Nachfrage, allein aufgrund der Effizienzsteigerung, theoretisch eintreten würden (Madlener & Alcott, 2011). Als Inputfaktor wird häufig Energie betrachtet, aber auch beispielsweise die Aufnahmekapazität der Erdatmosphäre für Treibhausgase im Sinne eines »carbon budget« ist ökonomisch gesehen ein Inputfaktor.

Der Rebound-Effekt wird in Prozent der theoretischen Einsparungen angegeben. Ein Rebound von 60 Prozent bedeutet, dass nur 40 Prozent der erwarteten Einsparungen eingetreten sind, weil die Nachfrage (z. B. stimuliert durch niedrigere Preise aufgrund der Effizienzsteigerung) entsprechend zugenommen hat. Das Eintreten eines Rebound-Effekts impliziert nicht, dass die Effizienzsteigerung keine positiven Auswirkungen im Sinne der erhofften Gesamteinsparung hätte. Wenn beispielsweise Glühbirnen durch Energiesparlampen ersetzt werden und die Nutzer mehr davon installieren oder sie länger brennen lassen, unter dem Strich aber dennoch weniger Energie für Beleuchtung verbraucht wird als zuvor, ist das immer noch als Fortschritt im Sinne der Schonung von Energieressourcen zu werten. Ein Rebound-Effekt kann 100 Prozent überschreiten und wird dann auch als »Backfire-Effekt« bezeichnet (Madlener & Alcott, 2011). Das wäre der Fall, wenn nach dem Umstieg von Glühbirnen zu Energiesparlampen insgesamt mehr Energie verbraucht würde.

Häufig werden drei Arten von Rebound-Effekten unterschieden (Erdmann & Hilty, 2010; Greening et al., 2000):

- Direkter Rebound-Effekt: Infolge einer Effizienzsteigerung sinken die Preise für ein Gut, so dass die Nachfrage nach dem gleichen Gut zunimmt. Beispielsweise führen energieeffizientere Fahrzeuge zu einer Senkung der variablen Kosten pro Kilometer, wodurch grösser Strecken gefahren werden.

- Indirekter Rebound-Effekt: Durch Effizienzsteigerung bleibt Kaufkraft übrig, die nicht für das gleiche Gut sondern auf andere Weise eingesetzt wird. Beispielsweise können Haushalte in der Mobilität eingespartes Einkommen für anderen Konsum ausgeben, welcher ebenfalls mit Energieverbrauch verbunden ist.
- Gesamtwirtschaftlicher Rebound-Effekt: Die auf Mikroebene beschriebenen direkten und indirekten Rebound-Effekte aggregieren sich auf komplexe Weise zu einem gesamtwirtschaftlichen Effekt. Aufgrund der wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den Sektoren und auch der Rolle des Staates gibt es keine einfachen Modelle für diese Aggregation.

Madlener und Alcott weisen darauf hin, dass aus Umwelt- oder Nachhaltigkeitssicht nur der gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekt (»Gesamtrebound«) entscheidend sei. Nach ihrer Auffassung handelt es sich nicht um einen dritten Typ von Effekt, sondern um die makroökonomische Aggregation aller direkten und indirekten Rebound-Effekte (Madlener & Alcott, 2011).

Rebound-Effekte digitaler Technologien werden in der Literatur ausführlich diskutiert (Coroama & Mattern, 2019; Gossart, 2015). Der Fortschritt in den digitalen Technologien führt häufig zu Effizienzsteigerungen bezüglich Inputfaktoren wie Energie, Material, Raum und Zeit, was sich wiederum auf die monetären oder auch nichtmonetären Kosten von Aktivitäten auswirkt (Bieser & Hilty, 2020; Börjesson Rivera et al., 2014; Sorrell & Dimitropoulos, 2008).

Gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekte können auch als zunehmender Wohlstand interpretiert werden, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass alle externen Kosten des zusätzlichen Konsums (z. B. gesamtgesellschaftliche Kosten des Klimawandels) mitberücksichtigt sind (Llorca & Jamasb, 2017).

Induktionseffekte

Als Induktionseffekt bezeichnet man durch eine technische Anwendung motivierten Konsum, der (anders als beim Rebound-Effekt) nicht auf der Reallokation von durch eine Effizienzsteigerung gesparten Inputfaktoren beruht. Induktionseffekte durch Fortschritte in der IKT wurden schon früh beschrieben. Beispielsweise können durch Telekommunikation physische Distanzen überbrückt und Beziehungen geknüpft werden, was den Wunsch wecken kann, diese Menschen und Orte zu besuchen, was zusätzliche Nachfrage nach Reisen induziert (Mokhtarian, 1990).

In vielen Fällen handelt es sich um die Nachfrage nach Komplementärgütern, wie z. B. die Möglichkeit, im Home-Office einen Drucker zu betreiben, zu einer zusätzlichen Nachfrage nach Druckerpapier führen kann.

Im Falle von E-Commerce berücksichtigen manche Studien Induktionseffekte im Bereich des Transports. Zwar können durch E-Commerce Einkaufsfahrten von Haushalten vermieden werden, allerdings wird zusätzliche Transportnachfrage nach Verteilung der Waren von den Lagern zu den Haushalten induziert (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Die Betrachtung von Induktions-

effekten bleibt in der Literatur und insbesondere in den von uns ausgewählten Studien aber punktuell. Ein systematischer Ansatz, der für alle Anwendungsfälle auch Induktionseffekte abschätzen oder gar nach Anwendungsfällen mit relevanten Induktionseffekten suchen würde, ist bisher nicht bekannt.

Bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung können die Grenzen zwischen Rebound- und Induktionseffekten verschwimmen.

Veränderungen im Konsumverhalten

Eine große Unbekannte bei der Abschätzung der Auswirkungen digitaler Technologien liegt im Konsumverhalten, das nicht immer mit einem »homo oeconomicus«-Modell des Nutzers oder der Nutzerin erklärt werden kann. Fragen der Akzeptanz, der Weltanschauung, des Vertrauens in Unternehmen und staatliche Institutionen, die Einschätzung von Cyberrisiken und weitere Determinanten des individuellen Verhaltens sind schwer einschätzbar. Hinzu kommt, dass das Konsumverhalten gerade in der digitalen Welt stark von Netzwerkeffekten und Lock-In-Effekten mitbestimmt ist.

Wenn Digitalisierung in den Dienst des Klimaschutzes gestellt werden soll, so bergen folglich die unweigerlich zu treffenden Annahmen über zukünftiges Nutzungsverhalten ein hohes Risiko, von der Realität ad absurdum geführt zu werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass gerade im IKT-Bereich viele Preise relativ niedrig oder gar Null (bzw. verschleiert) sind, so dass sie im Kalkül der Nutzenden kaum relevant sind und folglich nicht-monetäre Einflussfaktoren des Verhaltens ein relativ höheres Gewicht erlangen.

Auch die Energiekosten sind allein oft nicht ausreichend, um Verhaltensänderungen zu motivieren. Beispielsweise berichten Richard und Vogel (2017, S. 27) über digitale Energiedienstleistungen: »Allerdings machen für viele Privathaushalte die Energiekosten keinen so großen Anteil aus, dass der zu erwartende monetäre Nutzen allein ausreicht, um sie dazu zu bewegen, digitale Energiedienstleistungen zu nutzen. Anbieter sollten daher bei der Entwicklung digitaler Energiedienstleistungen über den unmittelbaren monetären Nutzen durch Energieeinsparung hinaus auch über andere Wege nachdenken, um für den Kunden Kosten zu senken und monetären Nutzen zu maximieren. Dabei ist zukünftig verstärkt im Ökosystem des Kunden zu denken: Was verbindet den Kunden mittelbar mit der Nutzung von digitalen Energiedienstleistungen? Welche von der eigentlichen Funktion abweichenden Vorteile bietet die digitale Anwendung für die jeweilige Kundengruppe und wie steigert sie den Gesamtnutzen für den Kunden?«.

Der Ansatz der »digitalen Suffizienz« von Lange und Santarius geht davon aus, dass Technologien mit Verhaltensänderungen für Nachhaltigkeit zusammenkommen müssen, damit die benötigte absolute Absenkung von Ressourcen- und Energieverbräuchen erreichbar wird. Im Rahmen dieses Ansatzes ist die Erkenntnis entscheidend, »dass gesellschaftliche Probleme nicht allein durch neue Technologien, sondern nur im Zusammenspiel mit Verhaltensänderungen gelöst werden können« (Lange & Santarius, 2018, S. 151).

Kritische Rohstoffe

Die Herstellung der digitalen Hardware ist von der Verfügbarkeit zahlreicher Metalle abhängig, die nur an wenigen Orten abgebaut werden und deren langfristige Zugänglichkeit aus geologischen oder geopolitischen Gründen in Frage steht. Wenn Versorgungsrisiken und die Vulnerabilität von Systemen im Falle von Versorgungsengpässen zusammenkommen, spricht man von Kritikalität (Wäger et al., 2015). Keine der hier ausgewerteten Studien zum Klimaschutz durch digitale Technologien berücksichtigt die Kritikalität der Ressourcen in ihren Abschätzungen. Die Studien gehen von der Annahme aus, dass es auch in Zukunft gelingen wird, die benötigte Hardware in ausreichenden Mengen herzustellen.

Sicherheitsrisiken

Mangelnde IT-Sicherheit und resultierende Bedrohungen der Privatsphäre, aber auch der physischen Sicherheit (z. B. durch Cyber-Angriffe auf Infrastrukturen und Industrieanlagen) stehen in einem latenten Zielkonflikt mit dem Ziel, die Digitalisierung für den Klimaschutz zu nutzen. Denn die Optimierung von Prozessen durch zunehmende Vernetzung und Automatisierung (Internet of Things, Industrie 4.0) schafft zunehmende Abhängigkeiten von immer komplexeren digitalen Infrastrukturen, wodurch Datenschutz- und Datensicherheitsprobleme tendenziell zunehmen (Hilty & Bieser, 2017). Die »Dinge« im Internet der Dinge (Meyer et al., 2015) sind nur mit Energie- und Ressourcenaufwand informationstechnisch zu sichern. Ein Tradeoff zwischen IT-Sicherheit und Energieeffizienz zeigt sich beispielsweise bei Cyberwährungen (Li et al., 2019) und in der Diskussion um die Cybersicherheit beim Aufbau der 5G-Infrastruktur (Kaska et al., 2019). Keine der hier ausgewerteten Studien zum Klimaschutz durch digitale Technologien berücksichtigt das Risiko, dass digitale Energieeffizienzmaßnahmen aufgrund von IT-Sicherheitsrisiken abgelehnt werden, oder dass die Einsparungseffekte durch energieintensive IT-Sicherheitsmaßnahmen ausgeglichen werden.

4.5 Differenzierung nach Anwendungsfällen und Sektoren

Im Folgenden erläutern wir die in den Studien genannten Anwendungsfälle nach Sektoren. Nicht berücksichtigt wurden die SMARTer 2020 und SMART 2020 Studie, da sie Vorläufer der SMARTer 2030 Studie sind, sowie die Studie von Ericsson, da die in dieser Studie betrachteten Anwendungsfälle weitgehend mit denjenigen aus SMARTer 2020 übereinstimmen.

Insgesamt konnten sechs Sektoren identifiziert werden: Elektrizität und Wärme, Transport, Gebäude, Industrieproduktion, Landwirtschaft und Medien. Im Folgenden, erläutern wir für jeden Sektor die wichtigsten Anwendungsfälle zur Vermeidung von THG-Emissionen. Dem Anhang kann eine Tabelle mit allen in den Studien quantifizierten Anwendungsfällen entnommen werden.

4.5.1 Elektrizität und Wärme

Im Elektrizitäts- und Wärmesektor können THG-Emissionen durch Reduktion von Energieverbräuchen und den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger erreicht werden. Genannte Anwendungsfälle sind:

- Verhaltensänderung durch Messung und Darstellung des Energieverbrauchs (sog. »Energy Feedback Systeme« wie intelligente Strom- oder Wärmehähler)
- Anpassung der Energienachfrage an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und dadurch die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien (entweder durch flexibles Verhalten oder durch Laststeuerung, engl. »demand side management«)
- Reduktion von Übertragungsverlusten

Diese Potenziale werden in der Wissenschaft teils kritisch diskutiert. Einerseits ist umstritten, ob und unter welchen Bedingungen Systeme, welche Nutzern ihren Energieverbrauch anzeigen überhaupt zu einer Verhaltensänderung führen (Serrenho et al., 2015). Andererseits, sind für die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien andere Technologien maßgeblich (z. B. Windkraft, Solarenergie). Die Praxis, diese Potenziale digitalen Technologien zuzuschreiben und dem THG-Fußabdruck des IKT-Sektors gegenüberzustellen kann hinterfragt werden (Bieser & Hilty, 2018b). Dennoch sind digitale Anwendungen für den Übergang von der Nutzung fossiler Energieträgern zur Nutzung erneuerbarer Energieträger (»Energiewende«) essentiell (GeSI & Accenture Strategy, 2015; Turk & Cozzi, 2017).

4.5.2 Transport

Potenziale durch digitale Technologien THG-Emissionen im Transportsektor zu vermeiden beruhen auf unterschiedlichen Mechanismen, welche wir wie folgt kategorisiert haben: virtuelle Mobilität, geteilte Mobilität, intelligenter Verkehr und intelligente Logistik.

Virtuelle Mobilität

Im Bereich virtuelle Mobilität werden tatsächliche Fahrten mit virtueller Präsenz und dem Fernzugriff auf Daten ersetzt. Dies spart THG-Emissionen, da der physische Transport einer Person (speziell durch motorisierten Individualverkehr) weit mehr THG-Emissionen verursacht als der Austausch von Daten über IKT-Infrastrukturen und Endgeräte für den gleichen Zweck (mobitool, 2016; Warland & Hilty, 2016). Häufig genannte Anwendungsfälle in diesem Bereich sind:

- Vermeidung von Pendelfahrten durch mobiles Arbeiten (z. B. Telearbeit von zu Hause oder einem lokalen »Coworking Space«)
- Vermeidung von Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings (z. B. Videokonferenzen)

- Reduktion von Einkaufswegen durch E-Commerce
- Reduktion von Wegen zur Bank durch E-Banking
- Reduktion von Ausbildungswegen durch E-Learning
- Reduktion von Wegen zu Ärzten durch E-Health

Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass das THG-Vermeidungspotenzial von mobilem Arbeiten und Videokonferenzen am höchsten ist. Das THG-Vermeidungspotenzial durch E-Commerce, E-Banking, E-Learning und E-Health wird als geringer eingeschätzt. Im Falle von E-Commerce berücksichtigen einige Studien auch den zusätzlich induzierten Verkehr für den Transport der Waren zu den Haushalten (Induktionseffekt). Dieser verringert das THG-Reduktionspotenzial.

Geteilte Mobilität

Im Bereich geteilte Mobilität wird durch den Einsatz digitaler Technologien (z. B. Sharing-Plattformen) der Zugang zu Transportinfrastruktur koordiniert, um dadurch die Auslastung dieser zu verbessern. Dies kann durch zwei Effekte THG-Emissionen vermeiden: (1) Zurückgelegte Strecken können reduziert werden. (2) Durch die Erhöhung der Auslastung von Fahrzeugen werden weniger Fahrzeuge benötigt und die THG-Emissionen, welche in deren Produktion entstehen können vermieden werden. Genannt werden meist zwei Anwendungsfälle:

- Reduktion der Anzahl an Fahrzeugen und ggf. Wegstrecken durch Carsharing
- Reduktion der Wegstrecken durch Fahrgemeinschaften (engl. »ride sharing«)

Das THG-Reduktionspotenzial dieser Anwendung wird vergleichsweise gering eingeschätzt, da sie nicht weit verbreitet sind. An sich, ist das Potenzial zur Vermeidung von THG-Emissionen durch Fahrgemeinschaften jedoch hoch, da heute die durchschnittliche Auslastung eines PKWs niedrig ist (1,5 Personen pro PKW in Deutschland) und Auto fahren sehr THG-intensiv ist (mobitool, 2016; Umweltbundesamt, 2019). Geteilte Mobilität birgt zusätzlich das Risiko den motorisierten Individualverkehr (THG-intensiv) auf Kosten anderer (THG-effizienterer) Verkehrsmittel zu fördern.

Intelligenter Transport

Der Bereich intelligenter Transport beinhaltet Anwendungsfälle, welche den eigentlichen Transportprozess effizienter gestalten und dadurch THG-Emissionen vermeiden. Häufig werden folgende Anwendungsfälle genannt:

- Optimierte Routenplanung
- Intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung
- Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Auto (z. B. effizientere Motorsteuerung)
- Verbesserung in der Planung von Transportsystemen (z. B. durch Computersimulationen)
- Verlagerung der Verkehrsmittelwahl von motorisiertem Individualverkehr zu anderen (THG-effizienteren) Verkehrsmitteln (z. B. durch intermodale Mobilitätsplattformen)

Die THG-Reduktionspotenziale in diesem Bereich werden hoch eingeschätzt, vor allem durch den Einsatz digitaler Technologien im Auto, durch die Steuerung von Verkehrsströmen und die Veränderung der Verkehrsmittelwahl. Die Potenziale sind vor allem hoch, da Transport ein Hauptverursacher von THG-Emissionen ist und erwartet wird, dass die genannten Lösungen in der Breite angewandt werden.

Zu berücksichtigen ist auch, dass die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs Auswirkungen auf die THG-Emissionen des Transports haben. Diese hängen von den für die Gewinnung von Elektrizität eingesetzten Energieträgern ab.

Intelligente Logistik

In der Logistik zielen die Anwendungsfälle darauf ab Tonnenkilometer zu reduzieren, und zwar durch folgende Anwendungsfälle:

- Höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und Vermeidung von Wegstrecken und Leerfahrten (z. B. durch bessere Routenplanung und geteilte Logistik)
- Optimierte Routenplanung
- Vorausschauende Instandhaltung (engl. »predictive maintenance«)

Die THG-Reduktionspotenziale in diesem Bereich werden hoch eingeschätzt, vor allem da die Logistik maßgeblich auf THG-intensiven Transportmitteln (z. B. LKWs) beruht, welche häufig nicht voll ausgelastet sind (Hilty & Bieser, 2017). Beispielsweise legen schwere LKWs in Deutschland jährlich 30 Mrd. km auf Fernstraßen zurück und sind im Schnitt nur zu einem Drittel beladen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, n. d.).

4.5.3 Gebäude

Im Gebäudesektor zielen digitale Anwendung vor allem darauf ab die Energieeffizienz von Gebäuden zu verbessern, durch:

- Überwachung des Energieverbrauchs von Gebäuden und Erhöhung der Verbrauchstransparenz
- Automatisierte Gebäudesteuerung (z. B. adaptive Heizungs- und Lüftungssteuerung)
- Verbesserungen in der Gebäudeplanung (z. B. durch Computersimulationen)

Die Potenziale können sowohl bei Wohn- als auch Gewerbegebäuden erzielt werden. Vor allem die Heizung- und Kühlung von Gebäuden ist energieintensiv und bietet Optimierungspotenziale. Dies gilt insbesondere für Länder mit einem hohen Gebäudebestand und Sanierungsbedarf (Beucker et al., 2016). In Deutschland benötigen Privathaushalte mehr als zwei Drittel ihres Endenergieverbrauchs zum Heizen (Umweltbundesamt, 2018). Prinzipiell gilt, je energieeffizienter ein Gebäude ist (z. B. durch gute Dämmung), desto geringer ist das Potenzial zur Vermeidung von THG-Emissionen durch digitale Anwendungen (Hilty & Bieser, 2017). Die Erhöhung der Auslastung von Gebäudeflächen und eine damit verbundene Reduktion von (beheizten) Flächen spielt keine Rolle in den betrachteten Studien. Dennoch birgt dies ein erhebliches Potenzial, gerade da Flächen teilweise nur gering ausgelastet sind (Windlinger et al., 2016).

4.5.4 Industrieproduktion

In der industriellen Produktion können bestehende Abläufe durch den Einsatz digitaler Technologien effizienter gestaltet und so Ressourcen- und Energieverbräuche verringert werden. Die Anwendung in diesem Feld wird häufig mit Smart Manufacturing oder Industrie 4.0 beschrieben. In den betrachteten Studien werden folgende Anwendungsfälle erwähnt:

- Produktionsprozessoptimierung (z. B. Fernwartung)
- Intelligente Motorsteuerung
- Entwicklung von Materialien welche in der Herstellung, Nutzung und Entsorgung wenig THG-Emissionen verursachen (z. B. durch Computersimulationen)

Die THG-Vermeidungspotenziale in diesem Bereich werden als sehr hoch eingeschätzt, da die Produktion THG-intensiv ist (z. B. aufgrund eines THG-intensiven Strommixes). Die Prozessoptimierungen können auf vielfältige Weise realisiert werden, z. B. durch die automatisierte Abschaltung von Maschinen in Leerzeiten oder Fernwartung. Allerdings haben nur weniger der betrachteten Studien die Potenziale quantifiziert (und dies nur anhand sehr grober Schätzung), vermutlich da die Produktionsprozesse sowie Anwendungsmöglichkeiten digitaler Technologien sehr vielfältig sind und deren tatsächlicher Einfluss schwer zu bestimmen ist.

4.5.5 Landwirtschaft

Digitale Anwendungen können dabei helfen landwirtschaftliche Produktionsprozesse effizienter zu gestalten und so Ressourcen- und Energieverbräuche zu senken. Beispielsweise können mit Hilfe digitaler Anwendungen zur Messung von Umweltfaktoren in Böden Düngemittel bedarfsgerecht eingesetzt werden und so THG-Emissionen (z. B. CO₂- und N₂O-Emissionen) verringert werden. In den betrachteten Studien werden folgende Anwendungsfälle erwähnt:

- Produktionsprozessoptimierung in der Landwirtschaft (z. B. durch Automatisierung)
- Verbesserte Überwachung und Steuerung von landwirtschaftlichen Maschinen
- Überwachung des Gesundheitszustands von Nutztieren und optimierte Fütterung
- Weniger Einsatz von Düngemitteln (z. B. durch Überwachung von Umweltfaktoren auf Feldern mit Sensoren oder Drohnen)
- Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten durch Erhöhung der Transparenz entlang der Wertschöpfungskette

Nur zwei Studien berücksichtigen die THG-Reduktionspotenziale in der Landwirtschaft und dies nur anhand sehr grober Schätzung (GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & Deloitte, 2019). Ein Grund dafür kann in der großen Vielfalt und Komplexität landwirtschaftlicher Prozesse und möglicher digitaler Anwendungen liegen.

4.5.6 Medien

Im Bereich digitale Medien können THG-Reduktionen erzielt werden indem physische (z. B. Papier) durch digitale Varianten ersetzt werden. Die genannten Anwendungsfälle sind:

- Ersatz von Papierdokumenten durch digitale Dokumente (z. B. Rechnungen, Steuererklärung, Zeitungen)
- Ersatz von physischen Geräten durch virtuelle Geräte (z. B. Anrufbeantworter)
- Ersatz von physischen Datenträgern für audiovisuelle Medien durch Datenhaltung in der Cloud oder auf Speichermedien (z. B. Musik und Filme über Streaming-Plattformen verteilen und nicht über CDs/DVDs).

Die Potenziale in diesen Bereichen THG-Reduktionen zu erzielen werden verhältnismäßig gering eingeschätzt, da die Herstellung von Datenträgern für Medien (z. B. Papier, CDs) deutlich weniger THG-Emissionen verursacht als andere betrachtete Prozesse (z. B. Transport, Heizen von Gebäuden). Auch ist ein digitaler Prozess zur Bereitstellung von Medien nicht stets THG-effizienter als ein analoger. Z. B. zeigt ein Vergleich der Ökobilanzen von papier-basierten Büchern und E-Book-Readern, dass die Herstellung des E-Book-Readers etwa so viel THG-Emissionen verursacht wie die Herstellung von 30-40 Papierbüchern (Moberg et al., 2011). Demnach lohnt sich der Einsatz eines E-Book-Readers erst, wenn er die Produktion von 30-40 traditionellen Büchern vermeidet.

Eine Studie aus den USA in 2014 vergleicht DVDs mit Video-Streaming und zeigt, dass das Ansehen eines Films auf DVD deutlich mehr THG-Emissionen verursacht als Video-Streaming, speziell, wenn für den Kauf der DVD Wegstrecken zurückgelegt werden (Shehabi et al., 2014). Aufgrund einer Studie von The Shift Project (2019) wird derzeit der Einfluss von Video-Streaming auf Energieverbräuche und THG-Emissionen intensiv diskutiert. Die Studie löste insbesondere eine mediale Debatte aus, die zu teilweise irreführenden Vergleichen von Video-Streaming mit Flugreisen führte (Fuster, 2019; Hilty, 2019). Eine IEA-Studie vom Februar 2020 widerlegt die Ergebnisse der Studie von The Shift Project (Kamiya, 2020). Dennoch sollte der zunehmende Datenverkehr über das Internet (vor allem aufgrund von Videos) und dessen Auswirkungen auf Energieverbräuche und THG-Emissionen kritisch begleitet werden.

4.6 Übersicht über die Anwendungsfälle mit signifikantem Reduktionspotenzial

In Tabelle 6 haben wir auf Basis der Erkenntnisse aus den betrachteten Studien die Anwendungsfälle mit signifikantem THG-Reduktionspotenzial dargestellt. Die höchsten Potenziale bestehen in den Sektoren Elektrizität und Wärme, Transport, Gebäude, Industrieproduktion und Landwirtschaft. Das ist dadurch zu erklären, dass (1) diese Sektoren erhebliche THG-Emissionen verursachen, (2) digitale Anwendungen bestehen, welche THG-Emissionen vermeiden können und (3) erwartet wird, dass diese auch in der Breite umgesetzt werden.

Sektor	Anwendungsfälle
Elektrizität und Wärme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laststeuerung
Transport: Virtuelle Mobilität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Pendelwegen durch mobiles Arbeiten ▪ Vermeidung von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen
Transport: Intelligenter Transport	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierte Routenplanung ▪ Intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung ▪ Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Fahrzeug (z. B. effizientere Motorsteuerung)
Transport: Logistik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und Vermeidung von Wegstrecken und Leerfahrten
Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierung der Gebäudesteuerung
Industrieproduktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsprozessoptimierung (z. B. Fernwartung) ▪ Intelligente Motorsteuerung
Landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsprozessoptimierung in der Landwirtschaft (z. B. Automatisierung) ▪ Verbesserte Überwachung und Steuerung von landwirtschaftlichen Maschinen ▪ Überwachung des Gesundheitszustands von Nutztieren und optimierte Fütterung ▪ Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten durch Erhöhung der Transparenz entlang der Wertschöpfungskette

Tabelle 6 – Anwendungsfälle mit signifikantem THG-Reduktionspotenzial

In folgenden Bereichen wird das THG-Reduktionspotenzial als eher gering eingeschätzt:

- Virtuelle Medien: Da die Produktion physischer Medien verhältnismäßig wenig THG-Emissionen verursacht, kann weniger vermieden werden.
- Geteilte Mobilität: Die zukünftige Verbreitung von Anwendungen geteilter Mobilität (z. B. Fahrgemeinschaften) wird im Vergleich zu anderen Anwendungsfällen im Transportsektor geringer eingeschätzt. Das könnte sich durch neue Angebote für geteilte Mobilität sowie durch eine Veränderung der Mobilitätsbedürfnisse in Zukunft aber auch ändern (Clewlow, 2019).

4.7 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Deutschland

Die SMARTer 2030 Studie schätzt, dass digitale Anwendungen in Deutschland in 2030 etwa 290 Mt CO_{2e} vermeiden können (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Vergleicht man dies mit einem THG-Referenzszenario für Deutschland (Kirchner & Matthes, 2009), würde dies etwa 37 Prozent der THG-Emissionen in Deutschland im Jahr 2030 entsprechen. Somit wird das relative THG-Reduktionspotenzial digitaler Technologien in der SMARTer 2030 Studie für Deutschland höher eingeschätzt als im globalen Durchschnitt aller Länder. Die höchsten Potenziale liegen laut SMARTer 2030 in der Industrieproduktion und im Gebäudesektor, gefolgt vom Transport- und Energiesektor.

Betrachtet man beispielhaft die bestehenden Produktions- und Konsummuster im Energie-, Transport- und Gebäudesektor, bestätigt dies die Resultate der SMARTer 2030 Studie:

- Die Energiebereitstellung in Deutschland beruht zu einem erheblichen Teil auf THG-intensiven Energieträgern) (Agentur für Erneuerbare Energien, 2018; Umweltbundesamt, 2020b). Dadurch bestehen Potenziale durch die Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Automatisierung, die energetische Optimierung industrieller Produktionsprozesse und durch Laststeuerung.
- Der motorisierte Individualverkehr ist in Deutschland der bevorzugte Verkehrsmodus im Personenverkehr, dabei sind die Fahrzeuge schlecht ausgelastet (Statistisches Bundesamt, 2020; Umweltbundesamt, 2019, 2020a). Dadurch bestehen Potenziale durch intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung.
- Ein Großteil der Gebäude wurde »ohne verpflichtende Berücksichtigung von Energieeffizienzstandards« errichtet und ist noch nicht saniert (Agentur für Erneuerbare Energien, 2018; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015, S. 29). Dadurch bestehen Potenziale durch Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Automatisierung.

Bis zu

37%

der THG-Emissionen in Deutschland könnten durch digitale Anwendungen in Deutschland bis 2030 vermieden werden

4.8 Diskussion des methodischen Ansatzes

Ziel der berücksichtigten Studien ist die Identifikation und der Vergleich von THG-Reduktionspotenzialen digitaler Anwendungen. Der methodische Ansatz aller Studien basiert auf einer groben Überschlagsrechnung in fünf Schritten (Bieser & Hilty, 2018b):

- (1) Identifikation der THG-Reduktionshebel
- (2) Schätzung eines Referenzszenarios
- (3) Schätzung der erwarteten Marktdurchdringen der Anwendung
- (4) Schätzung des Einflusses auf die THG-Emissionen bei Anwendung
- (5) In manchen Fällen die Schätzung erwarteter Rebound- oder Induktionseffekte

Auch wenn dieser Ansatz geeignet ist, um Potenziale grob zu vergleichen, so birgt er einige grundlegende Probleme:

- Wie will man die zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen in einem Baseline-Szenario (auch »business-as-usual«- oder Referenzszenario) definieren, von der die geschätzten Reduktionspotenziale entscheidend abhängig sind?
- Wie geht man damit um, dass die Effekte selbst einzelner Anwendungsfälle eigentlich nur im gesamtwirtschaftlichen Systemzusammenhang abzuschätzen sind? Hierfür wäre eine dynamische Modellierung unter Berücksichtigung einer Vielzahl von sozioökonomischen Variablen notwendig.
- Die meisten Studien wählen systematisch Anwendungsfälle mit positivem THG-Reduktionspotenzial aus und vernachlässigen Anwendungsfälle mit Potenzial zur Erhöhung der THG-Emissionen.

Diese und weitere methodische Fragen werden in mehreren Artikeln diskutiert (Bieser & Hilty, 2018a, 2018b; Hilty et al., 2014).

5 Schlussfolgerungen

5 Schlussfolgerungen

Direkte Effekte

Ein Vergleich der bestehenden Studien zeigt, dass die durch die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung digitaler Endgeräte und Infrastrukturen verursachten THG-Emissionen heute zwischen 1,8 und 3,2 Prozent der weltweiten THG-Emissionen liegen. Diese werden vor allem durch die große Zahl der verwendeten Endgeräte verursacht, wobei die Herstellung der Geräte einen steigenden Anteil hat. Insgesamt wird aus Sicht der Autoren eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der IKT- und Unterhaltungselektronik-Endgeräte von etwa 900 bis 1'100 Mt CO_{2e} im Jahr 2020 als plausibel angesehen. Rechenzentren und Netze sind nach dieser Abschätzung jeweils für etwa 200 bis 250 Mt CO_{2e} im Jahr 2020 verantwortlich.

Es ist davon auszugehen, dass die THG-Emissionen aufgrund weiterwachsender digitaler Infrastrukturen (Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) und weiter ansteigender Ausstattung von privaten Haushalten und Unternehmen mit digitalen Geräten in der nächsten Dekade deutlich zunehmen werden. Bei Ausnutzung der bestehenden Reduktionspotenziale ist aber auch ein Absenken der THG-Emissionen möglich. Die wichtigsten Hebel zur Reduktion der Emissionen sind:

- Konsequente Ausschöpfung von bestehenden und neuen Energieeffizienzpotenzialen
- Betrieb der digitalen Infrastrukturen mit erneuerbaren Energien
- Verringerung der THG-Emissionen in der Herstellung von Endgeräten
- Verlängerung der Nutzungsdauer von Endgeräten

Indirekte Effekte

Die größten Potenziale, durch digitale Technologien THG-Emissionen zu vermeiden, liegen in den Sektoren Energie (Elektrizität und Wärme), Gebäude und Transport. In der landwirtschaftlichen und der industriellen Produktion liegen ebenfalls relevante Potenziale, diese sind bisher jedoch weniger gut untersucht.

Als wichtigste Hebel digitaler Anwendungen zur Vermeidung von THG-Emissionen lassen sich in den ausgewerteten Studien die folgenden identifizieren:

- Reduktion der THG-Intensität des Personenverkehrs (z. B. Förderung öffentlicher Verkehrsmittel und intermodaler Mobilität sowie effizientere Motorsteuerung)
- Reduktion der Verkehrsleistung in Personenkilometern (z. B. durch virtuelle Mobilität oder intelligente Verkehrssteuerung) und Tonnenkilometern (z. B. durch Teilen von Logistikinfrastruktur, Erhöhung der Auslastung bestehender Kapazitäten und Reduktion von Leerfahrten)
- Vermeidung von unnötigem Heizen und Kühlen in Gebäuden durch automatisierte Gebäudeüberwachung und -steuerung
- Energetische Optimierung von Produktionsprozessen in Industrie und Landwirtschaft
- Steuerung der Energienachfrage zugunsten der Integration erneuerbarer Energiequellen (Laststeuerung)

Eine erste Einschätzung der Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse aus internationalen Studien zeigt, dass diese Potenziale auch in Deutschland realisierbar sind. Generell gilt jedoch, dass zur Erschließung der Potenziale zielgerichtete Maßnahmen und eine koordinierte Umsetzung durch Gesetzgeber, Unternehmen und Privathaushalte notwendig sind. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Rebound-Effekte einen erheblichen Teil der Reduktionspotenziale kompensieren und weitere unerwünschte Auswirkungen digitaler Anwendungen auftreten, so dass die Chance verspielt werden könnte, die Digitalisierung in den Dienst des Klimaschutzes zu stellen.

Verhältnis der indirekten zu den direkten Effekten: Enablement-Faktor

Der Enablement-Faktor drückt das Verhältnis zwischen THG-Reduktionspotenzial und THG-Fußabdruck des IKT-Sektors aus. Es liegt nahe, die Enablement-Faktoren aus verschiedenen Studien zu normieren, da sie sich aus zwei Komponenten zusammensetzen, die beide von Studie zu Studie variieren: direkte und indirekte Effekte. Wir halten die direkten Effekte, also den THG-Fußabdruck des IKT-Sektors, im Folgenden konstant. Aufgrund der Unsicherheit wird diese Konstante durch ein relativ großes Intervall ausgedrückt.

Als Fußabdruck des IKT-Sektors in 2030 nehmen wir 741 Mt CO_{2e} als Minimalwert (GeSI & Accenture Strategy, 2015) und 2'620 Mt CO_{2e} als Maximalwert (Belkhir & Elmeligi, 2018) an. Die im pessimistischen und erwarteten Szenario von Andrae & Edler (2015) geschätzten, in der Literatur umstrittenen Werte von 4'789 CO_{2e} und 19'947 Mt CO_{2e} betrachten wir als Ausreißer und verwenden sie deshalb nicht.

Tabelle 7 zeigt die am Intervall (741, 2'620) normierten Enablement-Faktoren der vier Studien, die Reduktionspotenziale für das Jahr 2030 abschätzen. Die Spannbreite zwischen dem jeweils minimalen und maximalen Enablement-Faktor erscheint nun sehr groß, da die optimistischen (d.h. hohen) Werte für das Reduktionspotenzial durch die optimistischen (d.h. niedrigen) Werte für den Fußabdruck dividiert wurden, und umgekehrt. Im Ergebnis zeigt sich die Unsicherheit solcher Abschätzungen deutlich.

Kürzel	Betrachtungsjahr	THG-Fußabdruck IKT-Sektor [Mt CO _{2e}]		THG-Reduktionspotenzial [Mt CO _{2e}]		Resultierender Enablement-Faktor	
		min	max	min	max	min	max
WWF2030	2030	741	2'620	1'168	8'711	0,4	11,8
Ericsson2030				4'699	9'716	1,8	13,1
SMARTer2030				12'080	12'080	4,6	16,3
SMARTer2030+				668	3'496	0,3	4,7

Tabelle 7 – Studien mit Betrachtungsjahr 2030, angegeben mit normierten Enablement-Faktoren auf Basis eines einheitlichen Intervalls für den prognostizierten THG-Fußabdruck des IKT-Sektors

Bemerkenswert ist, dass Enablement-Faktoren unter 1,0 auftreten können, wenn man pessimistische Annahmen zugrunde legt. Umso wichtiger erscheint es, dass aus diesen Studien die Information gewonnen wird, unter welchen Voraussetzungen eine erwünschte Entwicklung (d.h. ein maximaler Enablement-Faktor) zu erwarten ist. Weitere Forschung sollte sich also darauf konzentrieren, die Bedingungen für eine aus Sicht des Klimaschutzes positive Entwicklung zu präzisieren.

Anhang

Anhang

Quellen

- Agentur für Erneuerbare Energien. (2018). Der Wärmemix in Deutschland 2016. Agentur Für Erneuerbare Energien. Retrieved March 21, 2020, from <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/der-waermemix-in-deutschland-2016>
- Andrae, A. (2019a). Comparison of Several Simplistic High-Level Approaches for Estimating the Global Energy and Electricity Use of ICT Networks and Data Centers. *International Journal of Green Technology*, 5, 51.
- Andrae, A. (2019b). Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030. Preprint.
- Andrae, A. & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Avgerinou, M., Bertoldi, P., & Castellazzi, L. (2017). Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. *Energies*, 10(10), 1470. <https://doi.org/10.3390/en10101470>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463.
- Berkhout, F., & Hertin, J. (2001). Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: Speculations and evidence (Report to the OECD). <http://www.oecd.org/sti/inno/1897156.pdf>
- Beucker, S., Bergesen, J. D., & Gibon, T. (2016). Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 223–233. <https://doi.org/10.1111/jiec.12378>
- Bieser, J., & Hilty, L. (2018a). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Bieser, J., & Hilty, L. (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, & S. I. Ahmed (Eds.), *ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability* (Vol. 52, pp. 68–81). EasyChair. <https://doi.org/10.29007/lx7q>
- Bieser, J., & Hilty, L. (2020). Conceptualizing the Impact of Information and Communication Technology on Individual Time and Energy Use. *Telematics and Informatics*, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101375>
- Bio by Deloitte, & Fraunhofer IZM. (2016). Ecodesign Preparatory Study on Enterprise Servers and Data Equipment. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6ec8bbe6-b8f7-11e5-8d3c-01aa75ed71a1>
- Börjesson Rivera, M., Håkansson, C., Svenfelt, Å., & Finnveden, G. (2014). Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling & Software*, 56, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (n.d.). Optimierung der Auslastung im LKW-Fernverkehr durch Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen—Cargonexx. Retrieved March 21, 2020, from <https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/cargonexx.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2015). Energieeffizienzstrategie Gebäude (Langfassung).
- CBECI. (2019). Methodology—Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). <https://www.cbeci.org/methodology/>
- CBRE. (2017). European Data Centres Market Review. Q4 2016. <https://www.cbre.de/de-de/research/European-Data-Centres-MarketView-Q4-2016>

- CBRE. (2020). Europe Data Centres Q4 2019. <https://www.cbre.de/en/global/research-and-reports/featured-reports-global/featured-reports-emea>
- Chang, J., Meza, J., Ranganathan, P., Bash, C., & Shah, A. (2010). Green server design: Beyond operational energy to sustainability. *Memory*, 4(10), 50.
- Clelow, R. (2019). Disruptive Transportation: The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride Hailing in the United States. *Transfers*, Spring 2019(3), Article UCD-ITS-RR-17-07. <https://trid.trb.org/view/1485471>
- Coroama, V., & Mattern, F. (2019). Digital Rebound—Why Digitalization Will not Redeem us our Environmental Sins. ICT4S2019. 6th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability, 2382. <http://ceur-ws.org/Vol-2382/>
- Coroama, V., Moberg, Å., & Hilty, L. (2015). Dematerialization Through Electronic Media? In L. Hilty, B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 405–421). Springer.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH. (2017). Dena-Metastudie: Analyse Der Mit Erhöhtem IT-Einsatz Verbundenen Energieverbräuche Infolge Der Zunehmenden Digitalisierung. https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9232_dena-Metastudie_Analyse_IT-Einsatz_Energieverbraeuche_Digitalisierung.pdf
- Digiconomist. (2019). Bitcoin Energy Consumption Index. Digiconomist. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Erdmann, L., & Hilty, L. (2010). Scenario Analysis: Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 826–834.
- Fichter, K., Hintemann, R., Beucker, S., & Behrendt, S. (2012). Gutachten zum Thema »Green IT - Nachhaltigkeit« für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages (Gutachten No. Ausschussdrucksache 17(24)058). Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT).
- Funke, T., Hintemann, R., Kaup, C., Maier, C., Müller, S., Paulußen, S., Süß, J., & Terrahe, U. (2019). Abwärmenutzung im Rechenzentrum: Ein Whitepaper vom NeRZ in Zusammenarbeit mit dem eco – Verband der Internetwirtschaft e. V.
- Fuster, T. (2019). Streaming ist das neue Fliegen – wie der digitale Konsum das Klima belastet. NZZ. Retrieved March 21, 2020, from <https://www.nzz.ch/wirtschaft/streaming-ist-das-neue-fliegen-wie-der-digitale-konsum-das-klima-schaedigt-ld.1474563>
- GeSI, & Accenture Strategy. (2015). #SMARTer2030. ICT Solutions for 21st Century Challenges.
- GeSI, & BCG. (2012). SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future. GeSI, The Boston Consulting Group.
- GeSI, & Deloitte. (2019). Digital with Purpose – Delivering a SMARTer 2030.
- GeSI, The Climate Group, & McKinsey. (2008). SMART 2020. Enabling the low carbon economy in the information age. GeSI, The Climate Group.
- Gossart, C. (2015). Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. In L. Hilty, B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 435–448). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26
- Greening, L., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption—The rebound effect—A survey. *Energy Policy*, 28(6), 389–401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5)

- Greenpeace, & North China Electric Power University. (2019). Powering the Cloud: How China's Internet Industry Can Shift to Renewable Energy (Summary). https://secured-static.greenpeace.org/eastasia/PageFiles/299371/Powering%20the%20Cloud%20_%20English%20Briefing.pdf?_ga=2.134490865.1643020916.1584627591-1230699852.1584179778
- Hilty, L. (2019). Video-Streaming ist weit weniger klimabelastend als Fliegen. Retrieved March 21, 2020, from <https://www.nzz.ch/meinung/video-streaming-ist-weit-weniger-klimabelastend-als-fliegen-ld.1485255?reduced=true>
- Hilty, L., & Aebischer, B. (2015). ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In L. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 3–36). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_1
- Hilty, L., Aebischer, B., & Rizzoli, A. E. (2014). Modeling and evaluating the sustainability of smart solutions. *Environmental Modelling & Software*, 56, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.001>
- Hilty, L., & Bieser, J. (2017). Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland. University of Zurich. http://www.zora.uzh.ch/id/eprint/141128/1/Study_Digitalization_Climate_Protection_Oct2017.pdf
- Hilty, L., Wäger, P., Lehmann, M., Hirsch, R., Ruddy, T., & Binswanger, M. (2004). The future impact ICT on environmental sustainability. Fourth Interim Report. Refinement and Quantification. (Technical Report Fourth Interim Report). Institute for Prospective Technological Studies (IPTS).
- Hintemann, R. (2014). Consolidation, Colocation, Virtualization, and Cloud Computing – The Impact of the Changing Structure of Data Centers on Total Electricity Demand. In L. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 125-136), Springer.
- Hintemann, R. (2019). Energy demand of cloud computing, development and trends: Data center energy demand. Workshop on research and technological development (R&TD) of energy efficiency in cloud computing. <https://www.cloudefficiency.eu/workshop1>
- Höfner, A., & Frick, V. (Eds.). (2019). Was Bits und Bäume verbindet. *oekom*. <https://www.oekom.de/buch/was-bits-und-baeume-verbindet-9783962381493?p=1>
- IEA. (2019). Emissions – Global Energy & CO₂ Status Report 2019 – Analysis. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>
- Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity—The energy-efficiency drive at the information factories that serve us Facebook, Google and Bitcoin. *Nature*. https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y?WT.ec_id=NATURE-20180913&utm_source=nature_etoc&utm_medium=email&utm_campaign=20180913&spMailingID=57356737&spUserID=MTQyOT-QwOTY4MDcS1&spJobID=1481695484&spReportId=MTQ4MTY5NTQ4NAS2
- Kamiya, G. (2019). Bitcoin energy use: Mined the gap. <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/july/bitcoin-energy-use-mined-the-gap.html>
- Kamiya, G. (2020). Factcheck: What is the carbon footprint of streaming video on Netflix? *CarbonBrief*. https://www.carbonbrief.org/factcheck-what-is-the-carbon-footprint-of-streaming-video-on-netflix?utm_content=buffer59e55&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer
- Kaska, K., Beckvard, H., & Minárik, T. (2019). Huawei, 5G and China as a Security Threat. NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence. <https://ccdcoe.org/library/publications/huawei-5g-and-china-as-a-security-threat/>
- Kirchner, A., & Matthes, F. (2009). *Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*. WWF Deutschland, Prognos, Öko-Institut.

- Lambert, S., van Heddeghem, W., Vereecken, W., Lanoo, B., Colle, D., & Pickavet, M. (2012). Worldwide electricity consumption of communication networks. *Optics Express*, 20(26), B513–B527.
- Lange, S., & Santarius, T. (2018). *Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit*. Oekom.
- Li, J., Li, N., Peng, J., Cui, H., & Wu, Z. (2019). Energy consumption of cryptocurrency mining: A study of electricity consumption in mining cryptocurrencies. *Energy*, 168, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.046>
- Llorca, M., & Jamsb, T. (2017). Energy efficiency and rebound effect in European road freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101(C), 98–110.
- Madlener, R., & Alcott, B. (2011). Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkopplung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum. Enquete-Kommission »Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität« des Deutschen Bundestages.
- Malmodin, J., & Bergmark, P. (2015). Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030. In V. Kvist Johanssen, S. Jensen, V. Wolgemuth, C. Preist, Eriksson, E. (Eds.), *Proceedings of EnviroInfo and ICT for Sustainability 2015*, 37–46. <https://pdfs.semanticscholar.org/fc3d/1fb8e9eaa461224197bc47e86e-e3d2099d0e.pdf>
- Malmodin, J., Bergmark, P., & Lundén, D. (2013). The future carbon footprint of the ICT and E&M sectors. *On Information and Communication Technologies*, 12.
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018a). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027.
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018b). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. In B. Penzenstadler, S. Easterbrook (Eds.), *Proceedings of the ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, Toronto, Canada, 3027.
- Malmodin, J., Moberg, A., Lundén, D., Finnveden, G., & Lövehaugen, N. (2010). Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 770–790.
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- Meyer, S., Ruppen, A., & Hilty, L. (2015). The Things of the Internet of Things in BPMN. In A. Persson & J. Stirna (Eds.), *Advanced Information Systems Engineering Workshops* (pp. 285–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19243-7_27
- Moberg, Å., Borggren, C., & Finnveden, G. (2011). Books from an environmental perspective—Part 2: E-books as an alternative to paper books. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 238–246. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0255-0>
- mobitool. (2016). *Umweltdaten & Emissionsfaktoren von mobitool: Treibhauspotenzial*.
- Mokhtarian, P. (1990). A typology of relationships between telecommunications and transportation. *Transportation Research Part A: General*, 24(3), 231–242. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90060-J](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90060-J)
- Moreno-Izquierdo, L., Ramón-Rodríguez, A., & Perles Ribes, J. (2015). The impact of the internet on the pricing strategies of the European low cost airlines. *European Journal of Operational Research*, 246(2), 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.013>

- Pamlin, D. (2008). The Potential Global CO₂ Reductions from ICT Use: Identifying and Assessing the Opportunities to Reduce the First Billion Tonnes of CO₂. WWF Sweden. <http://scholar.google.com/scholar?cluster=10856060364310679381&hl=en&oi=scholar>
- Pickavet, M., Vereecken, W., Demeyer, S., Audenaert, P., & Vermeulen, B. (2008). Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking. ANTS 2008 : 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems.
- Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G., Recanatini, M., & Zhang, B. (2018). 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Available at SSRN 3306125. <https://cdn.crowdfundinsider.com/wp-content/uploads/2018/12/2018-ccaf-2nd-global-cryptoasset-benchmarking-study.pdf>
- Richard, P., & Vogel, L. (2017). Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz (Analysen und Dialogprozesse zur Unterstützung der Digitalisierung im Bereich Energie, Energieeffizienz und Erneuerbare Energien). dena.
- Serrenho, T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2015). Energy Feedback Systems: Evaluation of Meta-studies on energy savings through feedback (EUR 27992 EN; Energy Efficiency Directive Articles 9-11 on Feedback, Billing and Consumer Information). JRC-IET Renewables and Energy Efficiency Unit.
- Shehabi, A., Smith, S., Sartor, D., Brown, R., Herrlin, M., Koomey, J., Masanet, E., Horner, N., Azevedo, I., & Lintner, W. (2016). United States Data Center Energy Usage Report (LBNL-1005775). Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-1005775_v2.pdf
- Shehabi, A., Walker, B., & Masanet, E. (2014). The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States. *Environmental Research Letters*, 9(5), 054007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/054007>
- Sorrell, S., & Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65(3), 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.013>
- Statistisches Bundesamt. (2020). Pendeln in Deutschland: 68 % nutzen Auto für Arbeitsweg. Destatis. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/im-Fokus-Pendler.html>
- Stobbe, L., Hintemann, R., Proske, M., Clausen, J., Zedel, H., & Beucker, S. (2015). Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland—Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer IZM und Borderstep Institut. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Stoll, C., Klaaßen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*, 3(7), 1647-1661.
- The Shift Project. (2019). Lean ICT. Towards digital sobriety. [Report of the working group directed by Hugues Ferreboeuf for the think tank The Shift Project]. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/en/lean-ict-2/>
- Turk, D., & Cozzi, L. (2017). Digitalization & Energy. OECD, IEA.
- Umweltbundesamt. (2018). Energieverbrauch privater Haushalte. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- Umweltbundesamt. (2019). Mobilität privater Haushalte. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/mobilitaet-privater-haushalte#verkehrsaufwand-im-personentransport>
- Umweltbundesamt. (2020a). Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und »Modal Split«. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#die-meisten-personenkilometer-fur-die-freizeit-starke-zunahme-der-geschäftsreisen->

Umweltbundesamt. (2020b). Stromerzeugung erneuerbar und konventionell. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromerzeugung-erneuerbar-konventionell#-regionale-unterschiede-in-der-struktur-der-stromerzeugung>

Uptime Institute. (2019). Is PUE actually going UP? - Uptime Institute Blog. <https://journal.uptimeinstitute.com/is-pue-actually-going-up/>

Van Heddeghem, W., Lambert, S., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2014). Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012. *Computer Communications*, 50, 64–76.

Vereecken, W., Deboosere, L., Simoens, P., & Vermeulen, B. (2009). Energy efficiency in thin client solutions. <https://biblio.ugent.be/publication/872599/file/1138181.pdf>

Wäger, P., Hischier, R., & Widmer, R. (2015). The Material Basis of ICT. In L. Hilty, B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 209–221). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_21

Warland, L., & Hilty, L. (2016). Factsheet: Business Travel. University of Zurich. https://www.sustainability.uzh.ch/dam/jcr:b885ad2f-bf2b-4a6a-bcde-e3de15598459/2016-08-17_Factsheet_business%20travel.pdf

WBGU. (2019). *Unsere gemeinsame digitale Zukunft*.

Windlinger, L., Lange, S., & Cui, Y. (2016). Belegungsanalysen – Auslastung von Büroarbeitsplätzen (Newsletter TRANSFER; S. 4). Kompetenzgruppe Betriebsökonomie und Human Resources, Institut für Facility Management, ZHAW.

WWF Canada. (2008). *Innovating toward a low-carbon Canada: Using technology to transform tomorrow*.

Studienergebnisse der Anwendungsfälle nach Sektor

Sektor	Kürzel	Anwendungsfälle	Berücksichtigte Rebound- oder Induktionseffekte	Vermiedene Emissionen (optimistischstes Szenario) [Mt CO ₂ (e)]	Anteil an gesamten Vermeidungspotenzial, das in der jeweiligen Studie geschätzt wurde
Elektrizität und Wärme	SMARTer2030+	Verbesserung der Energieeffizienz	Nein	370,00	27,67 %
Elektrizität und Wärme	SMARTer2030+	Verbesserte Integration erneuerbarer Energieträger	Nein	70,00	5,24 %
Elektrizität und Wärme	SMARTer2030	Verhaltensänderung durch Messung und Darstellung des Energieverbrauchs (sog. »Energy Feedback Systeme« wie intelligente Stromzähler) und Reduktion von Übertragungsverlusten	Nein	1'610,00	13,35 %
Elektrizität und Wärme	SMARTer2030	Laststeuerung und Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien	Nein	1'770,00	14,67 %
Elektrizität und Wärme	WWF2030	Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien durch optimierte Netzbetrieb	Teilweise	127,70	1,47 %
Elektrizität und Wärme	CH2025	Verhaltensänderung durch Messung und Darstellung des Energieverbrauchs (sog. »Energy Feedback Systeme« wie intelligente Stromzähler) und Reduktion von Übertragungsverlusten	Reduktion des Energieverbrauchs erhöht den Energieverbrauch für andere Zwecke	0,82	11,79 %
Elektrizität und Wärme	CA2020	Verhaltensänderung durch Messung und Darstellung des Energieverbrauchs (sog. »Energy Feedback Systeme« wie intelligente Stromzähler)	Nein	10,90	30,34 %
Gebäude	SMARTer2030	Überwachung des Energieverbrauchs von Gebäuden und Automatisierung der Gebäudesteuerung	Nein	780,00	6,47 %
Gebäude	WWF2030	Überwachung des Energieverbrauchs von Gebäuden und Automatisierung der Gebäudesteuerung	Teilweise	969,00	11,12 %
Gebäude	WWF2030	Verbesserungen in der Gebäudeplanung	Teilweise	832,00	9,55 %
Gebäude	CH2025	Überwachung des Energieverbrauchs von Gebäuden und Automatisierung der Gebäudesteuerung	Reduktion des Energieverbrauchs erhöht den Energieverbrauch für andere Zwecke	1,15	16,48 %
Gebäude	CA2020	Überwachung des Energieverbrauchs von Gebäuden und Automatisierung der Gebäudesteuerung	Nein	12,20	33,95 %
Transport (Geteilte Mobilität)	SMARTer2030	Reduktion der Anzahl an PKWs und der Wegstrecken durch Carsharing und Fahrgemeinschaften	Nein	770,00	6,38 %

Sektor	Kürzel	Anwendungsfälle	Berücksichtigte Rebound- oder Induktionseffekte	Vermiedene Emissionen (optimistischstes Szenario) [Mt CO ₂ (e)]	Anteil an gesamten Vermeidungspotenzial, das in der jeweiligen Studie geschätzt wurde
Transport (Geteilte Mobilität)	CH2025	Reduktion der Anzahl an PKWs und der Wegstrecken durch Carsharing und Fahrgemeinschaften	Kosteneinsparung im Transport kann Transport erhöhen	0,05	0,71 %
Transport (Geteilte Mobilität)	CA2020	Reduktion der zurückgelegten Wegstrecken durch Fahrgemeinschaften	Nein	2,50	6,96 %
Transport (Geteilte Mobilität)	CA2020	Reduktion der Anzahl an PKWs und der Wegstrecken durch Carsharing	Nein	0,20	0,56 %
Transport (intelligenter Transport)	SMARTer2030+	Intelligente Transportsysteme	Nein	390,00	29,17 %
Transport (intelligenter Transport)	SMARTer2030	Optimierte Routenplanung, intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung, Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Auto und Verlagerung der Verkehrsmittelwahl von motorisierten Individualverkehr zu öffentlichem Verkehr	Nein	760,00	6,30 %
Transport (intelligenter Transport)	WWF2030	Verbesserung in der Planung von Transportsystemen	Teilweise	380,00	4,36 %
Transport (intelligenter Transport)	WWF2030	Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Auto	Teilweise	1'460,00	16,76 %
Transport (intelligenter Transport)	WWF2030	Verlagerung der Verkehrsmittelwahl von motorisierten Individualverkehr zu öffentlichem Verkehr	Teilweise	760,00	8,73 %
Transport (intelligenter Transport)	CH2025	Optimierte Routenplanung, intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung und Verlagerung der Verkehrsmittelwahl von motorisierten Individualverkehr zu öffentlichem Verkehr	Kosteneinsparung im Transport kann Transport erhöhen	1,94	27,76 %
Transport (intelligenter Transport)	CA2020	Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Auto	Nein	3,90	10,85 %
Transport (intelligenter Transport)	CA2020	Optimierte Routenplanung	Nein	2,00	5,57 %
Landwirtschaft	SMARTer2030+	Verbesserte Gärungs- und Verdauungsprozesse sowie weniger Einsatz von Düngemitteln	Nein	170,00	12,72 %
Landwirtschaft	SMARTer2030+	Reduktion von Lebensmittelabfällen	Nein	5,00	0,37 %
Landwirtschaft	SMARTer2030+	Begrenzung der Abholzung	Nein	2,00	0,15 %

Sektor	Kürzel	Anwendungsfälle	Berücksichtigte Rebound- oder Induktionseffekte	Vermiedene Emissionen (optimistischstes Szenario) [Mt CO ₂ (e)]	Anteil an gesamten Vermeidungspotenzial, das in der jeweiligen Studie geschätzt wurde
Landwirtschaft	SMARTer2030	Produktionsprozessoptimierung in der Landwirtschaft (z. B. Fernwartung), verbesserte Überwachung und Steuerung von landwirtschaftlichen Maschinen, optimierte Fütterung, weniger Einsatz von Düngemitteln durch Überwachung von Umweltfaktoren auf Feldern (z. B. mit Sensoren) und Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten durch Erhöhung der Transparenz entlang der Wertschöpfungskette	Nein	2'020,00	16,75 %
Transport (Logistik)	SMARTer2030	Geteilte Logistik und damit verbunden höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und Vermeidung von Wegstrecken und Leerfahrten, optimierte Routenplanung und Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Fahrzeug (z. B. effizientere Motorsteuerung)	Nein	1'260,00	10,45 %
Transport (Logistik)	WWF2030	Höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und optimierte Routenplanung	Teilweise	426,00	4,89 %
Transport (Logistik)	CH2025	Geteilte Logistik und damit verbunden höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und Vermeidung von Wegstrecken und Leerfahrten, optimierte Routenplanung und Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Fahrzeug (z. B. effizientere Motorsteuerung)	Kosteneinsparung im Gütertransport erhöhte die Nachfrage nach Gütertransport	2,22	31,79 %
Medien	WWF2030	Ersatz physischer Medien durch digitale Medien (z. B. Filme, Rechnungen, Zeitungen)	Teilweise	158,00	1,81 %
Medien	CA2020	Ersatz von Papierrechnungen durch digitale Rechnungen	Nein	0,03	0,08 %
Industrieproduktion	SMARTer2030+	Industrie 4.0	Nein	330,00	24,68 %
Industrieproduktion	SMARTer2030	Produktionsprozessoptimierung (z. B. Fernwartung) und Erhöhung der Energieeffizienz durch intelligente Motorsteuerung	Nein	2'120,00	17,57 %
Industrieproduktion	WWF2030	Vielzahl an verschiedenen Anwendungen (z. B. Produktionsprozessoptimierung)	Teilweise	1'530,00	17,57 %
Industrieproduktion	WWF2030	Entwicklung THG-effizienter Materialien	Teilweise	1'006,00	11,55 %
Transport (virtuelle Mobilität)	SMARTer2030	Vermeidung von Pendelfahrten durch mobiles Arbeiten und von Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings	Nein	400,00	3,32 %
Transport (virtuelle Mobilität)	SMARTer2030	Reduktion von Einkaufswegen durch E-Commerce	Zusätzlich benötigte Logistik	300,00	2,49 %
Transport (virtuelle Mobilität)	SMARTer2030	Reduktion von Wegen zur Bank, von Büroflächen und Papierverbrauch durch E-Banking	Erhöhung der Flächen für zusätzlich notwendige Mitarbeiter	3,00	0,02 %

Sektor	Kürzel	Anwendungsfälle	Berücksichtigte Rebound- oder Induktionseffekte	Vermiedene Emissionen (optimistischstes Szenario) [Mt CO ₂ (e)]	Anteil an gesamten Vermeidungspotenzial, das in der jeweiligen Studie geschätzt wurde
Transport (virtuelle Mobilität)	SMARTer2030	Reduktion von Ausbildungswegen durch E-Learning	Nein	70,00	0,58 %
Transport (virtuelle Mobilität)	SMARTer2030	Reduktion von Wegen zu Ärzten und Krankenhausflächen durch E-Health	Nein	200,00	1,66 %
Transport (virtuelle Mobilität)	WWF2030	Vermeidung von Pendelfahrten durch mobiles Arbeiten	Teilweise	256,00	2,94 %
Transport (virtuelle Mobilität)	WWF2030	Vermeidung von Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings	Teilweise	148,00	1,70 %
Transport (virtuelle Mobilität)	WWF2030	Reduktion von Einkaufswegen durch E-Commerce	Zusätzlich benötigte Logistik	657,70	7,55 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CH2025	Vermeidung von Pendelfahrten durch mobiles Arbeiten und von Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings	Reduktion des Transports für die Arbeit kann Transport für andere Zwecke erhöhen	0,18	2,62 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CH2025	Reduktion von Einkaufswegen durch E-Commerce	Zusätzlich benötigte Logistik und Erhöhung des Transports für andere Zwecke	0,26	3,75 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CH2025	Reduktion von Wegen zur Bank, von Büroflächen und Papierverbrauch durch E-Banking	Erhöhung des Transports für andere Zwecke und der Flächen für zusätzlich notwendige Mitarbeiter	0,05	0,77 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CH2025	Reduktion von Ausbildungswegen durch E-Learning	Reduktion des Transports für die Ausbildung kann Transport für andere Zwecke erhöhen	0,30	4,26 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CH2025	Reduktion von Wegen zu Ärzten und Krankenhausflächen durch E-Health	Reduktion des Transports zu Ärzten kann Transport für andere Zwecke erhöhen	0,00	0,07 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CA2020	Vermeidung von Pendelfahrten durch mobiles Arbeiten	Nein	2,6	7,24 %
Transport (virtuelle Mobilität)	CA2020	Vermeidung von Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings	Nein	1,60	4,45 %

Tabelle 8 – Vergleich der Studienergebnisse nach Sektor, Anwendungsfällen, berücksichtigten Rebound- und Induktionseffekten, absoluten und anteiligem THG-Reduktionspotenzial

Bitkom vertritt mehr als 2.700 Unternehmen der digitalen Wirtschaft, davon gut 1.900 Direktmitglieder. Sie erzielen allein mit IT- und Telekommunikationsleistungen jährlich Umsätze von 190 Milliarden Euro, darunter Exporte in Höhe von 50 Milliarden Euro. Die Bitkom-Mitglieder beschäftigen in Deutschland mehr als 2 Millionen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Zu den Mitgliedern zählen mehr als 1.000 Mittelständler, über 500 Startups und nahezu alle Global Player. Sie bieten Software, IT-Services, Telekommunikations- oder Internetdienste an, stellen Geräte und Bauteile her, sind im Bereich der digitalen Medien tätig oder in anderer Weise Teil der digitalen Wirtschaft. 80 Prozent der Unternehmen haben ihren Hauptsitz in Deutschland, jeweils 8 Prozent kommen aus Europa und den USA, 4 Prozent aus anderen Regionen. Bitkom fördert und treibt die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft und setzt sich für eine breite gesellschaftliche Teilhabe an den digitalen Entwicklungen ein. Ziel ist es, Deutschland zu einem weltweit führenden Digitalstandort zu machen.

**Bundesverband Informationswirtschaft,
Telekommunikation und neue Medien e.V.**

Albrechtstraße 10
10117 Berlin
T 030 27576-0
F 030 27576-400
bitkom@bitkom.org
www.bitkom.org

bitkom