



Borderstep Institut

ZEW



Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos?

CliDiTrans Endbericht

Jens Clausen | Thomas Niebel | Ralph Hintemann | Stefanie Schramm | Janna Axenbeck | Stefan Iffländer

Impressum

Autoren / Autorinnen

Jens Clausen (Borderstep Institut), Thomas Niebel (ZEW Mannheim), Ralph Hintemann (Borderstep Institut), Stefanie Schramm (Borderstep Institut), Janna Axenbeck (ZEW Mannheim), Stefan Iffländer (KDO)

Projekt

Klimaschutzpotenziale der Digitalen Transformation: Mikro- und Makroökonomische Evidenz zur Rolle von Nachfrageeffekten und Produktionsverlagerungen beim Einsatz von IKT (CliDiTrans)

Konsortialführung

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Clayallee 323 | 14169 Berlin

Projektpartner

ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim

Zweckverband Kommunale Datenverarbeitung Oldenburg (KDO) GmbH

Zitiervorschlag

Clausen, J., Niebel, T., Hintemann, R., Schramm, S., Axenbeck, J. & Iffländer, S. (2022). Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos? CliDiTrans Endbericht. Berlin: Borderstep Institut.

Titelbild

Green Cube Darmstadt © Clausen 2016

Zuwendungsgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderschwerpunkt „Ökonomie des Klimawandels“

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Einleitung	9
3	Zielsetzung des Vorhabens	9
4	Stand der Forschung	10
4.1	Einführung in die Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung	10
4.2	Digitalisierung und Klimaschutz: die Wirkungsmechanismen	13
4.3	Politikansätze zur Erschließung von Klimaschutzpotenzialen der Digitalisierung	15
5	Die Erschließung von Klimaschutzpotenziale durch digitale Lösungen in fünf Anwendungsfeldern	19
5.1	Videokonferenzen und Homeoffice	19
5.1.1	Zielsetzung und Fragestellungen	19
5.1.2	Vorgehen/Methodik	20
5.1.3	Ergebnisse zu Videokonferenzen	20
5.1.4	Ergebnisse zum Homeoffice	23
5.2	Virtualisierung und Cloud-Computing	26
5.2.1	Zielsetzungen und Fragestellungen	26
5.2.2	Vorgehen/Methodik	27
5.2.3	Ergebnisse zu Virtualisierung und Cloud Computing	27
5.3	Private Mediennutzung	32
5.3.1	Zielsetzungen und Fragestellungen	32
5.3.2	Vorgehen/Methodik	33
5.3.3	Ergebnisse	33
5.4	Automatisierung und Digitalisierung der Produktion	38
5.4.1	Zielsetzung und Fragestellungen	38
5.4.2	Methodik	39
5.4.3	Ergebnisse	39
6	Eine volkswirtschaftliche Perspektive auf Klimaschutzwirkungen der Digitalisierung der Produktion	43
6.1	Einleitung und Methodik	43

6.2	Klimaschutzpotenziale der digitalen Transformation - die Rolle der Produktionsverlagerung	44
	6.2.1 Zielsetzung und Fragestellungen	44
	6.2.2 Ergebnisse zu Untersuchungen auf Branchenebene.....	45
6.3	Klimaschutzpotenziale von digitalisierten Produktionsprozessen: Mikroökonometrische Evidenz	46
	6.3.1 Zielsetzung und Fragestellungen	46
	6.3.2 Ergebnisse zu Untersuchungen auf Unternehmensebene.....	47
7	3-Säulen-Politik einer klimafreundlichen Digitalisierung.....	50
8	Quellen.....	56

1 Zusammenfassung

Die Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft ist ein maßgeblicher Treiber für die Veränderung der Lebens- und Arbeitswelt. Aber welchen Beitrag kann die Digitalisierung zum Klimaschutz leisten? Zwar werden regelmäßig sehr hohe Klimaschutzpotenziale durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) ermittelt, einige Untersuchungen errechnen Potenziale zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen durch IKT um bis zu 20% bis 2030. Zwei wesentliche Aspekte des IKT-Einsatzes wurden aber in den Untersuchungen bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Zum einen lösen IKT-Produkte Nachfrageveränderungen aus, Produkte und Dienstleistungen werden z.B. qualitativ besser und gleichzeitig preiswerter, sodass sie stärker nachgefragt werden. Zum anderen sind mit dem Einsatz von IKT-Lösungen nationale und internationale Verschiebungen in den Wertschöpfungsprozessen verbunden. Das Vorhaben setzte genau hier an.

Durch das ZEW wurden mit Hilfe von makroökonomischen Analysen die Zusammenhänge zwischen zunehmender Digitalisierung und dem Energiebedarf der Wirtschaft untersucht. Die Ergebnisse hier wurden mittels mikroökonomischer Evidenz auf nationaler Ebene überprüft. Zusätzlich wurden insbesondere nationale und internationale Produktionsverlagerungen und Änderungen in der Nachfrage zum Gegenstand der Analysen gemacht.

Die Arbeiten des Borderstep Instituts konzentrierten sich auf Impact Assessments in den Bereichen Virtualisierung und Cloud Computing, Videokonferenzsysteme und Online-Zusammenarbeit in Unternehmen, Internet- und Mediennutzung in privaten Haushalten sowie Industrie 4.0. Der direkte Praxisbezug des Vorhabens wurde zum einen durch den Praxispartner Zweckverband Kommunale Datenverarbeitung Oldenburg (KDO), und zum anderen durch die Einrichtung eines Projektbegleitkreises aus Praxispartnern gewährleistet.

Das Projekt liefert eine Reihe von Erkenntnissen, mit denen der Optimismus in der Beurteilung des Klimaschutzpotenzials der digitalen Transformation gedämpft wird:

Die **empirische Analyse der Zusammenhänge zwischen zunehmender Digitalisierung und dem Energiebedarf der Wirtschaft** bestätigt, dass der negative Zusammenhang zwischen IKT und Energienachfrage von Schulte et al. (2016) auch für den jüngeren Zeitraum 2000-2014 gilt. Dabei ist der Effekt deutlich geringer und die Ergebnisse sind weniger robust als in früheren Studien. In den Spezifikationen, die den Energiebedarf der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigen, findet sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen IKT und Energienachfrage mehr. Dies kann als Hinweis dafür gedeutet werden, dass ein Teil der positiven Effekte von IKT auf die Energienachfrage auf die Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen in Länder mit geringeren Energiekosten und nicht auf Effizienzsteigerungen durch IKT zurückzuführen sind. Letztere Ergebnisse für die Einbeziehung des Energiebedarfs der gesamten Wertschöpfungskette sollten jedoch vorsichtig interpretiert werden, da nicht auszuschließen ist, dass die insignifikanten Ergebnisse auf die mangelnde Datenqualität hinsichtlich der Energiepreise und Energiemengen entlang der Wertschöpfungskette zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der **Analyse der mikroökonomischen Evidenz der Klimaschutzpotenziale von digitalisierten Produktionsprozessen** bestätigen einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen einem Anstieg der Softwarekapitalintensität und einer Verbesserung der Energieeffizienz auf Unternehmensebene. Die Zusammenhänge sind jedoch viel schwächer als in Schätzungen, die aggregierte Daten verwenden. Digitale Technologien können zwar auch auf Unternehmensebene im Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland mit einer statistisch signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz in Verbindung gebracht werden, jedoch ist die Effektgröße so gering, dass nicht davon auszugehen ist, dass die Klimaschutzpotenziale von digitalen Technologien, falls vorhanden, im betrachteten Zeitraum genutzt wurden. Weiterhin zeigen die Ergebnisse Effektunterschiede auf, die ein wenig Hoffnung geben: Effizienzverbesserungen stehen vor allem mit nicht-elektrischer Energie, die meist auf fossilen Brennstoffen basiert, sowie mit Unternehmen und Branchen, die besonders viel Energie verbrauchen, im Zusammenhang. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes sind für politische Entscheidungsträger, Berater und Unternehmen relevant, die eine Verbesserung der Energieeffizienz innerhalb von Unternehmen anstreben und Synergien zwischen digitalen Technologien und Energieeffizienzverbesserungen auf Unternehmensebene anhand von bisherigen Studien überschätzen.

Die Arbeiten des Borderstep Instituts führen zu Ergebnissen in verschiedenen Impact Assessments:

Das Beispiel **Videokonferenzen** zeigt idealtypisch, dass eine entschlossene Politik notwendig ist, um die Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung im Klimaschutz auch wirksam zu machen. Während in der Zeit zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2019 die Qualität und Verfügbarkeit von Telefon- und Videokonferenztechnik kontinuierlich zunahm, stieg parallel die Zahl der Dienstreisen kontinuierlich an. Zudem erwies sich die gelebte Routine der Dienstreise als ausgesprochen stabil, obwohl u.U. selbstreferenziell. Erst durch den harten Lockdown während der Corona Pandemie wurde die Routine des Reisens durchbrochen und die faktische Vorteilhaftigkeit der Reisevermeidung durch Videokonferenzen und die damit verbundene Zeit- und Geldeinsparung wurden erlebt. Schon acht Monate später (und nach 16 Monaten noch immer) hält eine repräsentative Gruppe von Geschäftsreisenden etwa jede dritte Geschäftsreise für vermeidbar. Deutlicher kann es kaum werden, dass erst ein klarer Anstoß durch Regelungen Win-Win Situationen erkennbar macht und ihre ökologischen wie ökonomischen Potenziale erschließt. Letztlich führt die Argumentation 25 Jahre zurück zu einem Beitrag von Michael Porter und Claas von der Linde, die schon damals argumentierten:

„But the belief that companies will pick up on profitable opportunities without a regulatory push makes a false assumption about competitive reality—namely, that all profitable opportunities for innovation have already been discovered, that all managers have perfect information about them, and that organizational incentives are aligned with innovating. In fact, in the real world, managers often have highly incomplete information and limited time and attention” (Porter & van der Linde, 1995).

Das **Homeoffice** ist eine neue technisch-soziale Möglichkeit, deren verstärkte Nutzung tief in die täglichen Routinen eingreift. Waren im November 2020 nur ca. 23% der Beschäftigten im Homeoffice zufrieden, steigt dieser Wert im Juni 2021 auf ca. 43%. Regelmäßige Arbeit im Homeoffice verändert das Mobilitätsverhalten im Alltag, wirkt sich auf die Ansprüche an die Wohnung aus und schafft unter

Umständen sogar die Möglichkeit, dass noch deutlich mehr Menschen als ohnehin schon ihren Wohnort weit entfernt vom Arbeitsort wählen. Eine Flut von Reboundeffekten könnte also einer vermehrten Arbeit im Homeoffice folgen. So wünschenswert mehr Homeoffice für eine gute Work-Life-Balance auch sein mag, die Auswirkungen dieser vielfältigen Veränderungen auf den Klimaschutz lassen sich in Summe kaum beziffern. Und während sich ein Recht auf Homeoffice juristisch verankern ließe, umfassen die möglichen Folge- und Reboundeffekte zahlreiche Felder des privaten, selbstbestimmten Lebens und sind einer die Wirkung des Rebounds begrenzenden Regulierung kaum zugänglich. Da knapp 70% der Beschäftigten sich zwei bis fünf Tage Homeoffice pro Woche wünschen, ist es von hoher Bedeutung, die Effekte auf den Klimaschutz realistisch zu beurteilen.

Das Nebeneinander beider Fallstudien zu **Klimaschutzeffekten durch Industrie 4.0** (Produktion von Elektroautos sowie serielles Sanieren) zeigt, dass die innovativen Kräfte der Wirtschaft nicht allein durch die technischen Möglichkeiten freigesetzt wurden, sondern dass es hierzu eines klaren regulativen Anreizes bedurfte. Die seit 2015 immer deutlichere Wirkung der Politik auf die Entwicklung schadstoffarmer und energieeffizienter Fahrzeuge basiert auf starken ordnungsrechtlichen Vorschriften der Europäischen Union wie auch in letzter Zeit auf den zahlreichen Ankündigungen von Nationalstaaten, die einen Verkaufsstopp von Verbrenner-Fahrzeugen meist im Jahr 2030 betreffen. Die Fallstudien zeigen nicht, dass die Möglichkeiten der Digitalisierung eigendynamisch zu mehr Klimaschutz führen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur **privaten Internet- und Medien-Nutzung** konnte gezeigt werden, dass zwar durch energieeffizientere Geräte ein Rückgang der CO₂ Emissionen im Betrieb der einzelnen Geräte erfolgt. Haushalte die über einen hohen Neuanschaffungszyklus verfügen, verlagern allerdings die Einsparungen während der Gerätenutzung in die Herstellphase der Geräte. Die ermittelten Reduzierungen der Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase werden zudem stark durch die Entwicklungen im deutschen Strommix getrieben. Aufgrund des kontinuierlichen Anstiegs der Nutzungsintensität digitaler Medien und Anwendungen kommt es außerdem zu einem stetigen Zuwachs des Datenvolumens in der IKT-Infrastruktur, was hier wiederum zu einem erhöhten Energiebedarf und zunehmenden THG-Emissionen führt. Insbesondere in den Rechenzentren sind die THG-Emissionen hoch.

Die Analyse der Fallstudien zu **Cloud Computing und Virtualisierung** in Unternehmen zeigte, dass mit Hilfe solcher Lösungen die Energie- und Ressourceneffizienz deutlich gesteigert werden kann. Gleichzeitig ist in den untersuchten Fallbeispielen aber auch die Nutzungsintensität der Lösungen angestiegen. Digitale Innovationen erhöhen hier also deutlich die Effizienz, die Energie- und Ressourceneinsparungen werden aber auf Ebene eines einzelnen Anwenders teilweise durch eine intensivere Nutzung wieder ausgeglichen. Einzelwirtschaftlich ist dennoch aufgrund der möglichen Energie- und Treibhausgas (THG)-Einsparungen eine verstärkte Nutzung von Virtualisierung und Cloud Computing zu empfehlen. Die neuen Dienste und Nutzungsmöglichkeiten, die Cloud Computing bietet, führen in Summe aber zu einer Ausweitung der IKT-Nutzung. Für Deutschland sind daher insgesamt keine Reduktionen von Energiebedarfen und THG-Emissionen durch Cloud Computing festzustellen.

Insgesamt weisen sowohl die mikro- und makroökonomischen Analysen des ZEW wie auch die Impact-Assessments des Borderstep Instituts gleichermaßen darauf hin, dass von einer eigendynamischen Erschließung von Klimaschutzpotenzialen durch die Digitalisierung nicht ausgegangen werden kann. Vielmehr ist die Festlegung von Leitplanken für eine Ausrichtung der Digitalisierung an Zielen des Klimaschutzes unvermeidlich.

2 Einleitung

Die Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft ist ein maßgeblicher Treiber für die Veränderung der Lebens- und Arbeitswelt. Die zunehmend dezentrale Verfügbarkeit und sich rasch fortentwickelnde Leistungsfähigkeit von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie der Internetinfrastruktur ermöglichen stetig neuartige Anwendungen, z.B. Technologien und Anwendungskonzepte wie Cloud Computing, 3D-Printing, Big Data oder Industrie 4.0. So verändern sich Konsum-, Arbeits- und Produktionsprozesse und sogar ganze Industriestrukturen.

Aber kann die Digitalisierung auch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten? Dies ist die zentrale Fragestellung des Vorhabens „Klimaschutzpotenziale der Digitalen Transformation (CliDiTrans)“.

Zwar werden regelmäßig sehr hohe Klimaschutzpotenziale der IKT vorhergesagt und einige Untersuchungen errechnen Potenziale zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen durch IKT um bis zu 20% bis 2030, aber zwei wesentliche Aspekte des IKT-Einsatzes werden in den Untersuchungen bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.

- Zum einen führen neue digitale Lösungen und Angebote oft zu einer veränderten Nachfrage, da sie neue Bedarfe bedienen oder Anreize zu neuen, digitalen unterstützten Verhaltensweisen bieten.
- Zum anderen können mit dem Einsatz von IKT-Lösungen nationale und internationale Verschiebungen in den Wertschöpfungsprozessen verbunden sein.

Das geplante Vorhaben setzt genau hier an. Das ZEW hat die Auswirkungen von sektoralen IKT-Investitionen auf die Produktionsstruktur von kompletten Wertschöpfungsketten untersucht. Zusätzlich überprüfte das ZEW makroökonomische Erkenntnisse auf Mikro-Ebene. Die Arbeiten des Borderstep Instituts konzentrierten sich auf Impact Assessments in den Bereichen Virtualisierung und Cloud Computing, Videokonferenzsysteme und Homeoffice in Unternehmen, Internet- und Mediennutzung in privaten Haushalten sowie Industrie 4.0.

Der hier vorgelegte CliDiTrans Endbericht gibt einen Überblick über die erzielten Ergebnisse, setzt sie in Beziehung zum Stand der Forschung und interpretiert die Ergebnisse mit Blick auf eine wirksame Digitalpolitik zur Förderung des Klimaschutzes.

3 Zielsetzung des Vorhabens

Vieles deutet darauf hin, dass die digitale Transformation einen wichtigen Beitrag gleichzeitig zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes und zu wirtschaftlichem Wachstum und Wohlstand und somit zum Ziel nachhaltigen Wachstums leisten kann. Die bisherigen Potenzialanalysen und ökonometrischen Studien greifen aber zu kurz, indem sie zentrale Wirkungsmechanismen der digitalen Transformation auf den Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß vernachlässigen. Sie beschränken sich meist auf die Analyse der Angebotsseite und theoretisch abgeleitete Prognosen einer quasi idealen Klimaschutz-Wirksamkeit, ohne die von der Digitalisierung ausgelösten Verhaltensänderungen, Reboundeffekte und

Effekte einer erhöhten Nachfrage einzubeziehen und vernachlässigen darüber hinaus mögliche nationale und internationale Produktionsverlagerungen.

Das Vorhaben „Klimaschutzpotenziale der Digitalen Transformation“ setzt hier mit einer doppelten Analysestrategie an.

- Anhand einer Reihe von Anwendungsfeldern wird der Klimaschutz-Beitrag der IKT bestimmt und die Wirkungsketten vom erstmaligen Angebot bis zum letztendlichen Eintritt einer Klimaschutzwirkung analysiert.
- Durch eine Kombination von ökonometrischen Analysen auf Makro und Mikro-Ebene sowie Impact Assessment in ausgewählten Technologie- und Anwendungsbereichen auf Mikro-Ebene wird geprüft, ob sich die anhand der Anwendungsfelder zu erwartenden Klimaschutzeffekte in volkswirtschaftlichen Daten wiederfinden lassen.

4 Stand der Forschung

4.1 Einführung in die Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung

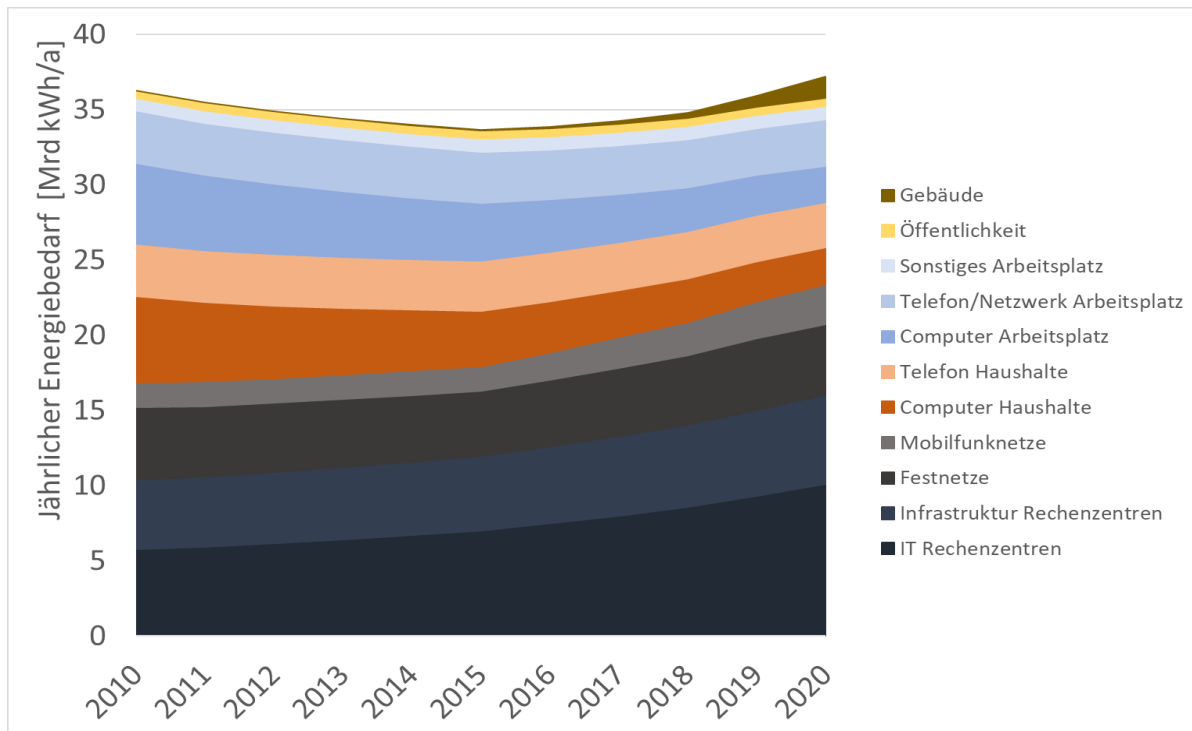
Die Frage, welchen konkreten Beitrag die Digitalisierung zum Klimaschutz leisten kann, ist bislang ungeklärt. Die Untersuchungen der Global eSustainability Initiative (GeSI) berechnen seit Jahren hohe Potenziale zur Reduktion des weltweiten Ausstoßes an Klimagasen. Bis 2030 soll eine Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen um 20% durch den Einsatz von IKT möglich sein (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Für Deutschland ermittelt eine aktuelle Untersuchung des Bitkom, dass durch Digitalisierung die Hälfte der bis 2030 notwendige Reduktion der Klimagase erreicht werden kann (Bitkom & Accenture, 2021). Auch andere nationale und internationale Studien ermitteln sehr hohe Einsparpotenziale von Klimagasen durch Digitalisierung. Der CO₂-Footprint der digitalen Produkte und Infrastrukturen könnte um ein Vielfaches durch die Einsparungen überkompensiert werden (Bieser, Hintemann, Beucker, Schramm & Hilty, 2020; GeSI & Deloitte, 2019; Hilty & Bieser, 2017).

Der jährliche Energiebedarf der IKT selbst ist in Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2015 um etwa 15% gesunken. Dieser Rückgang ist zu einem großen Teil durch die Umstellung auf energieeffizientere Fernsehgeräte im Bereich Unterhaltungselektronik zurückzuführen. Noch 2015 wurde erwartet, dass sich dieser abnehmende Trend mittelfristig bis zum Jahr 2020 weiterhin fortsetzen und dann erst bis 2025 wieder leicht ansteigen würde. Es zeichnete sich damals eine vorübergehend positive Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs ab (Stobbe et al., 2015, S. 23).

Aus der Perspektive des Jahres 2021 stellt sich diese Situation jedoch schon anders dar. Klammert man die Unterhaltungselektronik aus, so ist im vergangenen Jahrzehnt rückblickend insgesamt kein Rückgang des Energiebedarfs der IKT in Deutschland festzustellen. Zwar sind bei den Endgeräten leichte Energieeinsparungen zu verzeichnen, doch wurden diese durch den höheren Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen wieder aufgezehrt. Der zwischen 2010 und 2015 realisierte leichte Rückgang des Energiebedarfs um etwa 3 Mrd. kWh/a wurde aber durch einen Anstieg des Energiebedarfs

der Rechenzentren von 12 Mrd. kWh/a im Jahr 2015 auf 16 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 wieder ausgeglichen. Im Jahr 2020 liegt der Energiebedarf der IKT so letztlich um etwa 1 Mrd. kWh/a höher als im Jahr 2010 (Hintemann, Clausen, Beucker & Hinterholzer, 2021, S. 16).

Abbildung 1: Energiebedarf der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: Hintemann, Clausen, Beucker & Hinterholzer (2021, S. 16)

Strukturell wird dabei deutlich, dass eine Verschiebung des Stromverbrauchs von den Endgeräten hin zu Netzen und Rechenzentren stattfindet. Die Endgeräte werden immer effizienter, führen aber zu wachsendem Verbrauch in Netzwerk und Cloud.

Das CO₂-Einsparpotenzial durch IKT wurde im Rahmen einer Studie für das Land Hessen vorsichtig abgeschätzt (Clausen, Beucker & Hintemann, 2013). In Hessen leben 7,45% der Bundesbevölkerung, von den damals bundesweit ca. 800 Mio. t CO₂-Emissionen entfielen ca. 60 Mio. t CO₂ auf Hessen.¹ Die Einsparpotenziale durch IT-Einsatz schätzten Clausen et al. (2013, S. 102) durch Gebäudeheizung mit dezentralem Energiemanagement auf 0,94 Mio. t, durch Smart Motors auf 0,76 Mio. t, je nach Technologie durch Smart Metering auf 0,44 bis 1 Mio. t, durch elektronisch geregelte Heizkörperthermostate auf 0,18 bis 0,36 Mio. t, durch die IT gestützte Städttemaut in einer Großstadt auf ca. 0,22

¹ Die von der hessischen Statistik ausgewiesenen landesbezogenen Emissionen sind deutlich niedriger, wobei Hessen von einer Konzentration von Schwerindustrie u.a. in Nordrhein-Westfalen statistisch profitiert.

Mio. t und durch Telearbeit und Homeoffice auf ca. 0,18 Mio. t. Insgesamt errechnet sich ein Einsparpotenzial von ca. 3 Mio. t CO₂, was etwa 5% des hessischen Anteils an den bundesweiten CO₂-Emissionen entspricht. Dies liegt weit unter den von GESI pauschal für Mobilität, Produktion, Gebäude und Energie veranschlagten 17% (GeSI & Accenture Strategy, 2015, S. 9).

Auch andere Analysen lassen die Versprechungen der IKT zum Klimaschutz in einem kritischen Licht erscheinen.

Aus Nachhaltigkeitsperspektive werden z.B. die oft auf Apps und Plattformen basierenden Angebote der Sharing-Economy mit der Annahme verbunden, dass die kollektive Nutzung von Produkten und Dienstleistungen einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der Klimawirkung des Konsums leisten kann. Die effizientere Produktnutzung ist aber häufig mit mehr Mobilität oder Transport verbunden. Das Tauschgut muss abgeholt werden, das geliehene Werkzeug zurückgebracht und zur Couchsurfing-Unterkunft muss gereist werden (Leismann, Schmitt, Rohn & Baecker, 2012). Gerade im Kontext der IT-basierten Sharing-Angebote lassen sich vielfältige Verhaltensänderungen identifizieren, die mit der Nutzung des Sharing-Angebots oft verbunden sind und die dessen ursprüngliche Effizienzvorteile konterkarieren (Clausen, Bienge, Bowry & Schmitt, 2017). Nur für fünf der 20 untersuchten Angebotsformen konnten letztlich positive Umweltwirkungen ermittelt werden (Schmitt et al., 2017).

Gesamtwirtschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die Nutzung digitaler Technologien in Produktions- und Dienstleistungsprozessen mit einer Steigerung der Energie- und CO₂-Effizienz einhergehen kann (Bernstein & Madlener, 2010; Collard, Fève & Portier, 2005; Schulte, Welsch & Rexhäuser, 2016): Trotz des mit der Nutzung digitaler Technologien verbundenen direkten Elektrizitätsverbrauchs ermöglichen sie es, über Substitutions- und Effizienzeffekte, insgesamt die Energie- und CO₂-Intensität von Produktionsprozessen zu senken. Neben der Steigerung der Energieeffizienz zeigen Schulte, Welsch & Rexhäuser, 2016, dass durch den Einsatz von IKT in Produktionsprozessen sich deren Energiemix ändert: die Nutzung von fossilen Energieträgern, welche tendenziell einen höheren CO₂-Ausstoß verursacht als die Nutzung elektrischer Energie, verliert gegenüber der Nutzung elektrischer Energie an Bedeutung. Hierdurch ergeben sich zusätzliche Klimaschutzpotenziale durch die Digitalisierung.

Gleichzeitig greifen die beschriebenen Studien in ihrer Analyse der IKT-Effekte zu kurz, da sie wichtige mögliche Wirkungskanäle der Digitalisierung auf den Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß vernachlässigen. Wie zuvor beschrieben, werden insbesondere auf gesamtwirtschaftlicher Ebene die durch die Digitalisierung verursachten Nachfrageeffekte und Produktionsverlagerungen hin zu anderen Standorten (teils im Ausland) bislang kaum berücksichtigt. Zusätzlich existiert bisher kaum mikroökonomische, repräsentative Evidenz für die auf makroökonomischer Ebene gefundenen Ergebnisse.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es bislang nicht gelungen ist, die der Digitalisierung zugeschriebenen Potenziale zur Reduktion von Klimagasen zu realisieren. Zwar werden digitale Technologien, Lösungen und Angebote in Wirtschaft und Gesellschaft oft eingesetzt, jedoch führt dies meist nicht zwangsläufig dazu, dass nicht-nachhaltige Verhaltensweisen dadurch substituiert werden. Bei-

spielsweise können digitale Dienstleistungen auch nur On-Top zum materiellen Konsum genutzt werden, also etwas Zusätzliches darstellen (Berkhout & Hertin, 2004). Die Digitalisierung kann dementsprechend zu vielgestaltigen Wachstums- und Reboundeffekten führend und hierdurch einen Anstieg von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bedingen (Lange, Pohl & Santarius, 2020). Das mögliche Ausbleiben effektiver Klimaschutzeffekte durch die IKT-Lösungen ist umso bedenklicher, da der weltweite CO₂-Footprint der Digitalisierung - wie mehrere Studien errechnet haben - in den kommenden Jahren massiv ansteigen könnte und somit der Nettoeffekt von digitalen Technologien auf den CO₂-Ausstoß ein Anstieg dessen darstellen würde (Andrae, 2019; Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeligi, 2018; Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2017; The Shift Project, 2019). Sowohl durch die Herstellung von Hardware (bspw. Server oder Endgeräte), als auch durch den Ausbau der digitalen Infrastrukturen sowie die Nutzung von Software und Streamingdiensten trägt die Digitalisierung maßgeblich zum Anwachsen des Energie- und Rohstoffverbrauchs bei. Aktuell wird errechnet, dass der Anteil der IKT an den weltweiten CO₂-Emissionen zwischen 1,8 bis 3,2% liegt und in Zukunft weiter ansteigen könnte (Bieser et al., 2020).

4.2 Digitalisierung und Klimaschutz: die Wirkungsmechanismen

Digitale Technologien beeinflussen unseren Energie- und Ressourcenverbrauch durch unterschiedliche Wirkungskanäle, die sowohl zu positiven wie auch zu negativen Umweltauswirkungen führen können. Die Betrachtung dieser einzelnen Wirkungszusammenhänge erlaubt eine differenziertere Bestimmung der Klimaschutzpotenziale von digitalen Technologien.

Bekannte Taxonomien von Wirkungsmechanismen wurden beispielsweise von Berkhout & Hertin (2004), Hilty et al. (2006), Horner et al. (2016) sowie von Lange et al. (2020) entwickelt. Laut Berkhout & Hertin (2004) und Hilty et al. (2006) gehen von digitalen Technologien drei unterschiedliche Effektarten aus. In der Taxonomie von Berkhout & Hertin (2004) werden diese (I) direkte, (II) indirekte als auch (III) strukturelle und verhaltensbezogene Effekte genannt. Bei Hilty et al. (2006) heißen diese Effekte erster, zweiter und dritter Ordnung. Horner et al. (2006) definieren zusätzliche Untereffekte für jede Effektgruppe und die Taxonomie von Lange et al. (2020) besteht insgesamt aus vier Effekten und unterscheidet sich vor allem in zwei Punkten zu vorherigen Einordnungen. (II) werden als Effizienzsteigerungen bezeichnet und (III) werden konkretisiert, indem sie in zwei unterschiedliche Haupteffekte aufgeteilt werden.

- (I) Direkte Effekte/ Effekte erster Ordnung beschreiben den Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Herstellung, Nutzung und Beseitigung von IKT und besitzen, isoliert betrachtet, eine negative Auswirkung auf die Umwelt: Digitale Hardware hat oft nur eine kurze Lebensdauer, verbraucht Strom und besteht aus Materialien, die schädlich für die Umwelt sein können (Berkhout & Hertin 2004). Der Eigenverbrauch von digitalen Technologien hängt von der Nutzungshäufigkeit und -art sowie von der jeweiligen Energie- und Ressourceneffizienz ab (Lange et al. 2020).
- (II) Indirekte Effekte/ Effekte zweiter Ordnung/ Effizienzsteigerungen beziehen sich auf Verbrauchsänderungen, die durch die Anwendung von digitalen Technologien entstehen. Durch

indirekte Effekte können digitale Technologien insgesamt positive Umweltauswirkungen besitzen. Zum Beispiel erlaubt ein verbessertes Monitoring von Produktionsprozessen eine energie- und ressourceneffizientere Produktion. Klimaschutzpotenziale sind vor allem möglich, wenn digitale Technologien zu erheblichen Effizienzverbesserungen führen (Effizienzeffekte) oder vormals physische Prozesse, Produkte und Dienstleistungen durch virtuelle Lösungen ersetzen (Substitutionseffekte) (Horner et al 2016). Zu einer negativen Umweltbilanz kann es aber kommen, wenn digitale Technologien bestehende Anwendungen nur teilweise ersetzen oder etwas Zusätzliches darstellen (Berkhout & Hertin 2004). Außerdem gibt es keine Garantie, dass bei der Substitution durch digitale Technologien tatsächlich weniger Energie verbraucht wird. Beispielsweise zeigen Court & Sorrell (2020), dass geschätzte Umweltschutzpotenziale sehr stark vom angenommenen Nutzungsverhalten abhängen. Zudem weisen Lange et al. (2020) auf direkte Reboundeffekte hin. Etwa können Energieeffizienzsteigerungen dazu führen, dass Energie als Produktionsfaktor lukrativer wird, da sich nun mit derselben Energiemenge eine größere Menge Output generieren lässt. Auch könnten digitale Produkte günstiger sein und deswegen häufiger konsumiert werden als das analoge Äquivalent.

- (III) Strukturelle und verhaltensbezogene Effekte/ Effekte dritter Ordnung beschreiben grundlegendere Änderungen und besitzen, wie indirekte Effekte, keine eindeutige Wirkungsrichtung. Ein Beispiel für einen verhaltensbezogenen Effekt ist eine Verlagerung des Konsums hin zu umweltfreundlicheren Produkten durch eine IKT-bedingte transparentere Informationsbereitstellung. Ein weiteres Beispiel wäre, wenn durch die Möglichkeit des Homeoffice die Strecke zur Arbeit mit dem Auto zwar seltener zurückgelegt werden würde, aber durch die neue Möglichkeit ein Wohnort in größerer Entfernung von Arbeitsort gewählt wird. Lange et al. (2020) fokussieren sich bei dieser Art von Effekten auf zwei Hauptmechanismen mit eindeutigen Wirkungsrichtungen: Wirtschaftswachstum und sektorale Verlagerungen. Zum einen können durch digitale Technologien hervorgerufene Verlagerungen vom produzierenden Gewerbe hin zum Dienstleistungssektor theoretisch zu einer Verbesserung der Umweltbilanz beitragen. Dies wird angenommen, da Dienstleistungen im Schnitt weniger Energie- und Ressourcen verbrauchen als die Produktion von Gütern. Zum anderen stimulieren Effizienzsteigerungen beispielsweise Wirtschaftswachstum und erhöhen somit das Einkommen. Ein hieraus resultierender zusätzlicher Konsum kann wiederum zu einem gesteigerten Energie- und Ressourcenverbrauch führen. Hier existiert also eine mögliche negative Wirkungsrichtung. Dies ist aber nur der Fall, wenn das zusätzliche Einkommen für etwas, relativ gesehen, Umweltschädlicheres ausgegeben wird und muss nicht zwangsläufig geschehen.

Die verschiedenen Effekte lassen sich etwa für das Beispiel Videokonferenzen durchdeklinieren. Durch den Informationsaustausch und die Verwendung von Hardware verbraucht eine Videokonferenz zunächst Energie und Ressourcen (direkter Effekt). Wird durch eine Videokonferenz aber eine Dienstreise ersetzt, kann die absolute Umweltbilanz positiv sein (indirekte Effekte). Finden Substitutionen von Dienstreisen durch Videokonferenzen in vielen Unternehmen statt und werden zur Gewohnheit, kommt es so zu Umbrüchen auf Sektor-Ebene. Transportmittel werden eventuell weniger genutzt und hergestellt, dafür profitieren IT-Dienstleister, die Videokonferenzsysteme anbieten. Von

den eingesparten finanziellen Mitteln könnten eventuell aber nun Teambuildingreisen finanziert werden, was wiederum eine negative Umweltbelastung darstellen würde.

4.3 Politikansätze zur Erschließung von Klimaschutzpotenzialen der Digitalisierung

Laut Lange, Pohl und Santarius (2020) wirken die direkten Effekte im Zusammenhang mit der Nutzung von IKT und die Auswirkungen von IKT auf das Wirtschaftswachstum stärker als Energieeffizienzverbesserungen und Tertiärisierung. Die Autoren gehen vor allem davon aus, dass die beiden ersten Effekte überwiegen und Digitalisierung insgesamt den Energieverbrauch erhöht, sofern es nicht gelingt, Reboundeffekte deutlich zu reduzieren. Wie dies gelingen kann sei aber noch offen. Lange et al. (2020) resümieren: *“A central question for future research is therefore to investigate, how digitalization can be steered into such a more sustainable direction.”*

Auch bei einer Untersuchung mit dem Fokus auf die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch stellt dasselbe Autorenteam fest, dass die empirische Evidenz bezüglich der Auswirkungen von digitalen Technologien auf eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch bisher unzureichend ist und dass eine aktivere politische und gesellschaftliche Gestaltung des Digitalisierungsprozesses notwendig ist, um IKT für die globale ökologische Nachhaltigkeit wirksam zu machen (Santarius, Pohl & Lange, 2020). Santarius et al. fassen hierzu zusammen: *„Fourth, and with regard to conclusions relevant for policy-makers and other practitioners, our paper suggests that believing in the assumption that digitalization by itself will lead to sufficient absolute decoupling may be short-sighted. However, if political measures and instruments, business initiatives, and user behavior focus on realizing the saving potentials of ICT while countervailing energy- and resource-intensive hardware production as well as energy- and data-intensive applications, this can strongly improve ICT’s contributions to achieving sustainable development goals.”*

Ähnlich allgemein äußert sich mit Blick auf die nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung auch der Deutsche Bundestag (2019, S. 2). *„Hier müssen klare Rahmenbedingungen dafür sorgen, dass nachhaltige Innovation gefördert und Reboundeffekte vermieden werden.“* Welcher Natur diese Rahmenbedingungen sein sollen wird allerdings nicht weiter ausgeführt.

Auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen beklagt in seinem Hauptgutachten *„Unsere gemeinsame digitale Zukunft“* eine mangelnde Informationsbasis zu den ökologischen Wirkungen der Digitalisierung (WBGU, 2019, S. 315). Auch ist eine Ausrichtung und Zielführung der Digitalisierung auf die Transformation zur Nachhaltigkeit aus Sicht des WBGU allenfalls in Ansätzen zu erkennen, sie bedarf vielmehr der gezielten Gestaltung (WBGU, 2019, S. 315):

Die derzeit zu beobachtende Geschwindigkeit der technischen Entwicklungen läuft nicht von selbst in Richtung Nachhaltigkeit. So muss z. B. der drohenden Vervielfachung der Energie- und Ressourcennachfrage durch die zahlreicher werdenden digitalen Geräte und Anwendungen und stark wachsenden Infrastrukturen dringend entgegengewirkt werden. Ebenso sollte

national wie multilateral daran gearbeitet werden, die digitale Kluft (digital divide) zu vermindern und allen Menschen einen Zugang zu digitalen Diensten zu ermöglichen. Um die Digitalisierung für die Transformation zur Nachhaltigkeit fruchtbar zu machen, ist eine gesellschaftliche Gestaltung der Digitalisierung für die Nachhaltigkeit notwendig. Dazu sollte die Politik die nachhaltigkeitspolitischen Rahmenbedingungen konsequent weiterentwickeln bzw. neu entwickeln. Für eine Fortschreibung der Agenda 2030 unter Einbezug des Megatrends Digitalisierung sollten rechtzeitig die Weichen gestellt werden.

Weitgehend allgemein bleiben auch Hilty und Bieser (2017, S. 53) mit ihrer Empfehlung, die Politik möge die Entwicklung offener technischer Standards fördern und Anreize für die Einführung von IKT-basierten kohlenstoffarmen Lösungen schaffen, insbesondere in Bereichen mit hohem THG-Potenzial (Verkehr, intelligente Gebäude, intelligente Energie), wobei die Natur der Anreize völlig offen bleibt.

Eine Möglichkeit, die Dynamik der Erschließung von Energieeffizienzeffekten der Digitalisierung zu beschleunigen, könnte in höheren Energiepreisen liegen. Bertscheck et al. (2020) zeigen mit Daten einer ZEW-Unternehmensbefragung, dass Energieeinsparungen sowohl für Unternehmen im verarbeitendem Gewerbe mit 30% der Unternehmen als auch in der Informationswirtschaft mit 21% der Unternehmen der am seltensten genannte Grund für Digitalisierungsprojekte sind. Kosteneinsparungen sind dagegen im verarbeitenden Gewerbe für 58% der Unternehmen und in der Informationswirtschaft für 47% der Unternehmen ein Grund, Digitalisierungsprojekte zu beginnen. Von noch höherer Bedeutung sind nur Kundenanforderungen und der letztlich anonyme „Innovationsdruck“.

Damit digitale Technologien vermehrt zur Verringerung des Energieverbrauchs eingesetzt werden, sollte aus Sicht der internationalen Energieagentur ein ganzes System politischer Maßnahmen den Abbau von Barrieren unterstützen (IEA, 2019, S. 93). Hier hat die IEA ein „framework of policy principles“ entwickelt, welches von Aspekten der IT-Sicherheit und den Aufbau von Vertrauen in digitale Technologien über Zugang zu IKT bis hin zu Innovation und Entrepreneurship reicht. Zentral dürfte aber sein, dass die Märkte den Einspareffekt der IKT-Lösungen honorieren, also dass nicht nur Energie, sondern damit auch Kosten eingespart werden.

Auch der WBGU betont die Bedeutung des Steuer- und Abgabensystems für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung (WBGU, 2019, S. 394):

Steuern und Abgaben entfalten (...) eine starke Lenkungswirkung, die aus Sicht des WBGU gezielt zur Förderung nachhaltiger Entwicklung und zur Gestaltung eines nachhaltigen Digitalen Zeitalters eingesetzt werden sollte. Leitgedanke der zukünftigen Ausgestaltung von Steuer und Abgabensystemen sollte es daher sein, Produktionsweisen und Verbrauchsverhalten, die diesen Zielen entgegenlaufen, zu belasten und umgekehrt heutige steuerliche Belastungen zu korrigieren, die nicht im Einklang mit den Zielen nachhaltiger Entwicklung stehen.

Es verwirrt, dass der WBGU die Neuausrichtung von Steuern und Abgaben insbesondere mit dem Ziel verbindet, den Energie- und Ressourcenverbrauch von digitalen Anwendungen und Geräten zu be-

grenzen (WBGU, 2019, S. 395). Dass eine stärkere Besteuerung des Energie- und Ressourcenverbrauchs auch die Verbreitung sämtlicher digitaler Systeme befördern würde, die der Effizienz dienen, wird in dem Gutachten nicht explizit hervorgehoben.

Einen anderen Weg schlägt Friedrichsen (2017, S. 15) vor. Sie weist auf die insgesamt dürftige Datenlage zu Wirkungen der Digitalisierung hin und betont den Widerspruch zwischen der häufigen Betonung der Potenziale und der mangelnden Empirie. Friedrichsen (2017, S. 16) weist auch auf die Chance der Beeinflussung des Nutzerverhaltens hin: *„Da der Effekt der IKT maßgeblich durch das Nutzerverhalten bestimmt wird, besteht hier die Möglichkeit, Einfluss zu nehmen, und zwar am besten so, dass der Nutzer den Anreiz hat, die CO₂-sparende Variante zu realisieren (nudging).“* Auch für diesen Ansatz der Erhöhung der Wirksamkeit der IKT im Klimaschutz liegen aber bisher keine Belege vor.

In ihrer Untersuchung zur Eindämmung von Reboundeffekten kommen Lange et al. (2019, S. 23) letztlich zu dem Schluss, dass exakt das gleiche Instrumentarium zur Verfügung steht, mit dem die Umweltpolitik grundsätzlich arbeitet. Dies sind zunächst die sogenannten „weichen Instrumente“ wie Information, Kommunikation, Nudging sowie freiwillige Vereinbarungen, für die Clausen und Fichter allerdings nur eine geringe Wirkung auf die Diffusion von Umweltinnovationen finden (Clausen & Fichter, 2019). Des Weiteren stehen ökonomische Instrumente sowie Instrumente des Ordnungsrechts zur Verfügung, bei denen mit einer deutlich höheren Wirksamkeit zu rechnen ist.

Letztlich kann geschlussfolgert werden, dass die Verbreitung von digitalen Diensten und Anwendungen, die dem Energiesparen oder der Ressourcenschonung dienen, durch angemessene Besteuerung des Umweltverbrauchs fördern ließe. Auch mögliche Reboundeffekte der Digitalisierung lassen sich vermutlich durch ein solches System von Steuern und Abgaben wirksam begrenzen (Lange et al., 2019).

Die Entwicklung eines Politikansatzes zur Erschließung von Klimaschutzpotenzialen der Digitalisierung stellt sich damit auf den ersten Blick vergleichsweise einfach dar. Solange der generelle Wirkmechanismus der „nachhaltigen Digitalisierung“ die Energie- und Ressourceneffizienz ist, stellt eine adäquate Besteuerung von Energie und Ressourcen das zentrale Instrument dar, um die Erschließung dieser Potenziale ökonomisch attraktiv zu machen. Wo zu befürchten ist, dass eine auf Wirtschaftlichkeit zielende ökonomische Logik nicht wirkt, z.B. im Kontext von Entscheidungen von KonsumentInnen (Albrecht et al., 2010, S. 11), sind darüber hinaus ordnungsrechtliche Instrumentarien anzudenken.

Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass auch der Umkehrschluss zulässig sein dürfte. Solange der Energie- und Ressourcenverbrauch so gering besteuert wird, dass Effizienzmaßnahmen sich weder kurz- noch langfristig für den jeweils handelnden Akteur auszahlen, dürfte der Energieverbrauch des IKT-Sektors selbst weiter kontinuierlich steigen. Parallel dazu werden die Effizienzpotenziale der immer wieder dargestellten „Green durch IKT Lösungen“ sich hartnäckig dagegen wehren, in der Realität eine wahrnehmbare Umsetzung zu erfahren.

Vor dem Hintergrund einer vernetzten Weltwirtschaft wird eine Umsetzung des skizzierten Politikansatzes jedoch deutlich erschwert. Werden Energie- und Ressourcenbedarfe weltweit mit deutlich

unterschiedlichen Preisen belegt, so sind Umgehungs- und Verlagerungseffekte zu erwarten. Der Ansatz zur Besteuerung von Energie- und Ressourcen muss daher durch einen Instrumentenmix aus Leitplanken, Anreizen und der Schaffung von Transparenz ergänzt werden.

Die in den folgenden Kapiteln zu belegenden These wäre damit:

Ohne klare politische Instrumente wie eine wirksame Besteuerung von Energie- und Ressourcenverbrauch oder ordnungsrechtliche Vorschriften werden die seit 20 Jahren immer wieder beschworenen Klimaschutzpotenziale der digitalen Transformation weitgehend unerschlossen bleiben.

5 Die Erschließung von Klimaschutzpotenziale durch digitale Lösungen in fünf Anwendungsfeldern

5.1 Videokonferenzen und Homeoffice

Die Idee der Nutzung von Telefon- und Videokonferenzen wie auch Homeoffice in Unternehmen wurde seit Jahren mit der Vorstellung verbunden, dass Verkehr eingespart werden kann. Untersuchungen zeigen aber, dass die erwünschte Reduktion von Geschäftsreisen durch IKT lange nicht eintrat (Hintemann & Clausen, 2016; Mokhtarian, 2009). Zwar war bis zum Jahr 2019 eine deutliche Zunahme in der Nutzung von elektronischen Konferenzen festzustellen – fast alle deutschen Unternehmen nutzten 2019 Telefonkonferenzen und knapp die Hälfte setzten Videokonferenzen ein (VDR, 2018). Aber die Zahl der Geschäftsreisen sank nicht – im Gegenteil – zwischen 2004 und 2019 ist die Anzahl der Geschäftsreisen in Deutschland nach Angaben des Verbandes Deutsches Reisemanagement um ca. 30% angestiegen (VDR, 2009, 2020). Die Gründe hierfür könnten vielfältig sein. Oft lassen sich persönliche Meetings nicht gleichwertig durch elektronische Treffen ersetzen, weil die sozialen Kontakte besonders wichtig sind (Schneider, 2009, S. 51). Und auch die Digitalisierung selbst induziert neue Dienstreisen. So steigt durch die bessere Effizienz und mögliche zusätzliche Kontakte, die über elektronische Konferenzen erfolgen, die Arbeitsleistung und teilweise auch die Notwendigkeit, weitere Dienstreisen durchzuführen (Mokhtarian, 2009). Die Möglichkeit, auch unterwegs cloudbasiert zu arbeiten, macht Dienstreisen oft arbeitsorganisatorisch effizienter und senkt so die Hemmschwelle, aufgrund von zeitlichen Engpässen nicht zu reisen. Des Weiteren führt der deutlich niedrigere Zeit- und Mittelaufwand für elektronische Konferenzen dazu, dass die frei gewordenen Ressourcen für zusätzliche Projekte verwendet werden können, die ggf. wieder reale Reiseaktivitäten nach sich ziehen.

Auch die Technologie für Arbeit im Homeoffice ist grundsätzlich seit 20 Jahren verfügbar. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes nutzten aber vor Corona nur 5,5% aller Erwerbstätigen täglich oder mindestens die Hälfte der Arbeitszeit das Homeoffice (Destatis, 2020). Die Zahlen lassen den Schluss zu, dass vor Corona an nur ca. 4,8% aller Arbeitstage das Homeoffice genutzt wurde.

Auf Basis dieser Einschätzungen begann 2019 die Arbeit an diesem Arbeitspaket, welches ab März 2020 eine unerwartete Dynamik erfuhr.

5.1.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Ziel der Analyse war es herauszufinden, welche Veränderungen des Arbeits-, Reise- und Mobilitätsverhaltens durch cloudbasierte Onlinezusammenarbeit im Homeoffice sowie durch Telefon- und Videokonferenzen induziert werden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Zusammenhänge komplex sind und deutlich über die funktionale Substitution z.B. einer Dienstreise durch eine Telefonkonferenz hinausgehen. Im Frühjahr 2020 wurden die geplanten Arbeiten mit Förderung des BMBF auf weitere Fragen ausgeweitet.

- Wie verändert sich im Verlauf der Corona-Krise die Nutzung von Videokonferenzen bei Berufstätigen in privaten und öffentlichen Unternehmen in Deutschland?

- Welche Erfahrungen machen Berufstätige in der Zeit der Krise mit Videokonferenzen und wie wird sich dies auf zukünftige Arbeits- und Mobilitätsroutinen auswirken?
- Wie wirken sich diese Veränderungen auf die Treibhausgasemissionen aus und welche dauerhaften oder vorübergehenden Effekte sind zu erwarten?
- Welche Handlungsoptionen ergeben sich, um durch leistungsfähige Videokonferenzen dauerhaft Treibhausgasemissionen in Deutschland zu senken?

5.1.2 Vorgehen/Methodik

Im Rahmen des Arbeitspaketes fanden umfangreiche empirische Untersuchungen statt. Nach einer Literatur-Vorstudie in 2019 wurden zwischen Oktober 2019 und Mitte März 2020 – also vor der Corona-Pandemie - in drei Unternehmen leitfadengestützte Interviews zur Frage der Nutzung von Homeoffice sowie Videokonferenzen und ihrer Möglichkeit, Geschäftsreisen zu ersetzen, durchgeführt. Nachdem im Lockdown in Frühjahr 2020 deutlich wurde, dass sich der Rahmen für Videokonferenzen entscheidend geändert hatte, wurden die Arbeiten mit Förderung des BMBF aufgestockt. Zusätzlich wurden zunächst eine Auswertung der im Frühjahr und Sommer 2020 publizierten Literatur und auf dieser Basis im November 2020 und im Juni 2021 repräsentative Befragungen von Geschäftsreisenden durchgeführt. Zwischen den beiden Repräsentativbefragungen fanden kurze Fokusgruppen mit drei Unternehmen statt und darüber hinaus eine weitere Reihe leitfadengestützter Interviews.

5.1.3 Ergebnisse zu Videokonferenzen

Telefonkonferenzen waren deutlich stärker als Videokonferenzen schon im Jahr 2019 in den Unternehmen weit verbreitet. Bereits 2019 fanden zwar schon mehr Meetings am Telefon oder online als real statt. Aber der Fokus von Onlinemeetings lag deutlich auf wenig komplexen Fragen, oft wurden z.B. regelmäßige Teammeetings so organisiert:

Also ich glaube [...] um sich auf einen Stand zu bringen, um sich zu informieren, was gerade läuft, an welchen Themen gerade gearbeitet wird, dafür wird so ein Basic-Informationsaustausch, den finde ich sehr geeignet, Absprachen zu treffen und sich mal wieder auf den gleichen Stand zu bringen. (Interview U1/4)

[...] für den allgemeinen Informationsaustausch und für die Kontakt- und Beziehungspflege sind die elektronischen Tools halt eine wunderbare Ergänzung. (Interview U2/7)

Gespräche mit komplexeren Inhalten und thematischer Tiefe, wie z. B. Entscheidungsgespräche, strategische Planungen oder Mitarbeitergespräche, waren für die 2019 befragten Personen eher nicht im Rahmen eines virtuellen Meetings vorstellbar. Dabei spielten vor allem intrinsische Kommunikationsmotive eine entscheidende Rolle. Sich auf eine Reise zu begeben, um eine persönliche Beziehung aufzubauen, zu stärken oder zu vertiefen, wurde als Wertschätzung interpretiert. Im Umkehrschluss

wurde das Angebot eines telefonischen oder virtuellen Meetings als weniger wertschätzend eingestuft, besonders in der älteren Generation. Aber auch die Frage der Aufmerksamkeitsspanne spielte eine Rolle. Denn innerhalb von durchschnittlich einer Stunde lassen sich komplexere Themen oft nicht erschöpfend und detailliert durchsprechen, zumal hier die Ausdrucksform eingeschränkt sei und somit Verständigungsprobleme keine Seltenheit wären.

Videokonferenzen schienen dabei im Vergleich zu Telefonkonferenzen zur Substitution realer Treffen das größere Potenzial zu haben. Es konnte gezeigt werden, dass Videokonferenzen im Vergleich zu realen Meetings deutlich weniger „Funktionsdefizite“ hatten als Telefonkonferenzen. Sie waren realen Treffen ähnlicher und konnten den Bedarf nach Sichtbarkeit, einer Wahrnehmung mit mehreren Sinnen, Interaktion und sowohl verbaler als auch nonverbaler Kommunikation am ehesten erfüllen. Auch die Funktion des „Bildschirmteilens“ sei für einen guten Informationsfluss essentiell. Doch technische Einschränkungen waren 2019 noch ein starkes Argument gegen die Anwendung.

Aufgrund flächendeckender Reisebeschränkungen während des Corona-Lockdowns im Frühjahr 2020 und der zwingenden Notwendigkeit zur physischen Distanzierung mussten dann aber viele geschäftliche Termine konsequent abgesagt werden. Mitte März 2020 waren viele Organisationen gezwungen, sich alternative Konzepte zur Zusammenarbeit auf Distanz zu überlegen und auch im Winter 2020/2021 dominieren Videokonferenzen die geschäftlichen Treffen.

Videokonferenzen wurden zumindest für Angestellte im Management in dieser Zeit zur Normalität. Hatten bis Anfang 2020 noch 68% der Befragten keine oder nur geringe Anwendungserfahrung mit Videokonferenzen, ist dieser Wert im November 2020 auf 27% und im Juni 2021 auf 12% gesunken. Knapp 80% der Befragten führten im Juni 2021 an mindestens zwei Tagen der Woche Videokonferenzen durch.

Die Ergebnisse zeigen, dass es für Videokonferenzen eine Gruppe von Nutzenden gibt, die ausgesprochen zufrieden ist. Die Zufriedenen sehen erhebliche zukünftige Nutzungsmöglichkeiten für Videokonferenzen und erleben die nachteiligen Aspekte als weit weniger störend als die in manchen Aspekten noch eher unzufriedene Mehrheit. Das Cluster der zufriedenen Nutzenden von Videokonferenzen wuchs zwischen November 2020 und Juni 2021 von 14% auf 32% der Befragten.

Ein zentraler Vorteil von Videokonferenzen (statt Dienstreisen) liegt für die allermeisten Befragten in Zeitgewinnen. Diese führen sowohl zu deutlich mehr Freizeit als auch zu einem Gewinn an disponibler Arbeitszeit. Der Kontakt zu Kolleginnen und Kollegen wie auch das Teamgefühl wird besonders von der Gruppe der Unzufriedenen als schlechter oder gar viel schlechter erlebt. Im Außenkontakt zu Kundinnen und Kunden oder anderen Externen weisen 43% der Befragten auf einen schlechteren Kontakt hin und 32% derjenigen im Verkauf beklagen einen schlechteren Verkaufserfolg. Diesen stehen aber 16% gegenüber, die auf einen online sogar besseren Verkaufserfolg hinweisen.

Wenn das geänderte Dienstreiseverhalten, wie von den Befragten im November 2020 wie auch sehr ähnlich im Juni 2021 erwartet, im Anschluss an die Pandemie anteilig beibehalten wird und keine wesentlichen klimawirksamen Reboundeffekte auftreten, könnten Bahnverkehr, Autoverkehr und Flug-

verkehr zusammen um ca. 25% dauerhaft zurückgehen. Es ist dann eine Reduktion der Treibhausgasemissionen durch den Geschäftsreiseverkehr von ca. 3 Mio. t CO₂/Jahr zu erwarten. Etwa ein Drittel der Geschäftsreisen würde wegfallen und durch virtuelle Formate ersetzt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Impuls durch die Corona-Pandemie zu einer deutlich beschleunigten Diffusion von Videokonferenzen geführt hat. Dies wird mittelfristig zu einem reduzierten Bedarf an Dienstwagen und Kurzstreckenflügen führen. Videokonferenzen werden damit zum Gegenstand einer Politik des Klimaschutzes durch Verkehrsvermeidung. Aus der Befragung lassen sich Ansätze zur klimapolitischen Nutzung der veränderten Situation ableiten.

Mit Blick auf die Substitution von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen ist von einem starken Stabilisierungseffekt auszugehen, der mit Blick auf die Geschäftsreisenden durch die erhebliche eingesparte Zeit getrieben wird, mit Blick auf die Unternehmen durch die ebenso erheblichen eingesparten Kosten der Dienstreisen. Reboundeffekte könnten in zusätzlichen Videokonferenzen bestehen, deren Klimawirkung aber im Vergleich zu realen Reisen eher gering ist. Klimapolitisch kann die Situation genutzt werden, um die ohnehin umstrittenen steuerlichen Regelungen zu Dienstwagen ein weiteres Mal in Frage zu stellen. Darüber hinaus wird im Anschluss an die Pandemie u.U. eine Kampagne erforderlich sein, um das Vertrauen in die gesundheitliche Sicherheit der Nutzung von ÖPNV und Bahn wiederherzustellen. Die weitere Entwicklung der Zufriedenheit mit Videokonferenzen, der Vor- und Nachteile wie auch der kostensenkenden Effekte und neuer positiver Erfahrungen und Lösungen sollte wissenschaftlich begleitet, dokumentiert und den Unternehmen zugänglich gemacht werden. Ziel der Politik sollte sein, die durch Corona erzwungene Änderung der Routinen, soweit sie Unternehmen und Umwelt nützt, zu stabilisieren und aufrechtzuerhalten. Im Bundesreisekostenrecht könnte verankert werden, dass die Notwendigkeit „realer Reisen“ begründet werden muss. Die Geltendmachung der Kosten für Videokonferenztechnik sollte alternativ zu Reisekosten ermöglicht werden.

Fazit: Das Beispiel Videokonferenzen zeigt idealtypisch, dass eine entschlossene Politik notwendig ist, um die Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung im Klimaschutz auch wirksam zu machen. Während in der Zeit zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2019 die Qualität und Verfügbarkeit von Telefon- und Videokonferenztechnik kontinuierlich zunahm, stieg parallel die Zahl der Dienstreisen kontinuierlich an. Zudem erwies sich die gelebte Routine der Dienstreise als ausgesprochen stabil, obwohl u.U. selbstreferenziell. Erst durch den harten Lockdown wurde die Routine des Reisens durchbrochen und die faktische Vorteilhaftigkeit der Reisevermeidung durch Videokonferenzen und die damit verbundene Zeit- und Geldeinsparung wurden erlebt. Schon acht Monate später (und nach 16 Monaten noch immer) hält eine repräsentative Gruppe von Geschäftsreisenden etwa jede dritte Geschäftsreise für vermeidbar. Deutlicher kann es kaum werden, dass erst ein klarer Anstoß durch Regelungen Win-Win Situationen erkennbar macht und ihre ökologischen wie ökonomischen Potenziale erschließt. Letztlich führt die Argumentation 25 Jahre zurück zu einem Beitrag von Michael Porter und Claas von der Linde, die schon damals argumentierten: *„But the belief that companies will pick up on profitable opportunities without a regulatory push makes a false assumption about competitive reality—namely, that all profitable opportunities for innovation have already been discovered, that all managers have perfect information about them, and that organizational incentives are aligned with*

innovating. In fact, in the real world, managers often have highly incomplete information and limited time and attention” (Porter & van der Linde, 1995).

5.1.4 Ergebnisse zum Homeoffice

Anfang 2020 hatten noch 57% der im Herbst 2020 befragten 500 Personen keine oder nur geringe Arbeitserfahrung im Homeoffice, im November 2020 ist dieser Wert auf 27% gesunken, im Juni 2021 auf 17%. Knapp 78% der Befragten waren im Juni 2021 mindestens zwei Tage pro Woche im Homeoffice.

Die Ergebnisse zeigen, dass es für das Homeoffice jeweils eine Gruppe von Nutzenden gibt, die ausgesprochen zufrieden ist. Die Zufriedenen sehen erhebliche zukünftige Nutzungsmöglichkeiten für das Homeoffice und erleben die nachteiligen Aspekte als weit weniger störend als die in manchen Aspekten noch eher unzufriedene Mehrheit. Der Anteil der im Homeoffice zufriedenen Menschen stieg zwischen November 2020 und Juni 2021 von 23% auf 43%.

Homeoffice wird in verschiedenen Studien aufgrund des reduzierten Pendlerverkehrs als hilfreich für den Klimaschutz beschreiben (Carbon Trust, 2021; Greenpeace, 2020). Es ist auch unzweifelhaft, dass eine Person, die im Homeoffice arbeitet nicht zum Arbeitsplatz fahren muss. Es ist aber unterkomplex zu erwarten, dass eine Fahrt immer nur einem Zweck dient. Mit der Fahrt zur Arbeit wird es verbunden, die Kinder in die Schule zu bringen, einzukaufen oder bei den pflegebedürftigen Eltern vorbeizuschauen. Auf unsere Frage hierzu antworten 226 der 500 von uns im Juni 2021 Befragten (45%), dass sich an ihrer täglichen Fahrstrecke nicht viel ändern wird. 120 Personen (24%) erwarten dauerhaft durch die vermehrte Nutzung von Homeoffice weniger fahren zu müssen, im Schnitt ca. 45 km pro Tag. Und weitere 91 Personen (18%) erwarten sogar, mehr fahren zu müssen, im Schnitt ca. 44 km pro Tag². 63 Personen machten keine Angaben. Unsere Befragung lässt also den Schluss, dass die gefahrenen Strecken aufgrund von Homeoffice zurückgehen werden, explizit nicht zu.

Dagegen könnte Homeoffice sich ganz erheblich auf den Wohnungs- und Büroflächenmarkt auswirken. 34,6% der im Juni 2021 Befragten erklären, sie würden nunmehr einen bisher wenig genutzten Raum intensiver für das Homeoffice nutzen. 23,4% planen, sich eine größere Wohnung zu kaufen oder zu mieten, um Platz für ein komfortables Homeoffice zu haben. Und gar 28,8% der Befragten überlegen sich, eine neue Wohnung zu suchen, die weit draußen im Grünen, in einer schöneren Stadt oder in der Nähe von Familie oder Freundeskreis liegen soll. Für diejenigen, die sich eine häufige oder fast ständige Arbeit im Homeoffice vorstellen können oder wünschen, liegen diese Anteile noch etwas höher (ähnlich auch Dolls & Mehles (2021)). Im Ausgleich fänden es sogar 56,6% der Befragten o.k., wenn ihr Arbeitgeber ihnen dann nur noch einen Arbeitsplatz im Desksharing zur Verfügung stellen würde. Ein fester, eigener Arbeitsplatz wird damit für mehr als die Hälfte der Befragten verzichtbar, bei den im Homeoffice Zufriedenen sind es sogar über 70%.

² Da wir mit einer hohen Zahl von Antworten hier nicht gerechnet hatten, haben wir die Befragten nicht nach einem Grund für längere Strecken gefragt. Hier deutet sich weiterer Forschungsbedarf an.

Während sich also eine Reduktion des Verkehrs und besonderes des Autoverkehrs durch Homeoffice als Wunschtraum erweisen könnte und bestenfalls der morgendliche und abendliche Stau ein wenig abnimmt, weil der Verkehr andere Routen nehmen und zu anderen Zeiten stattfinden könnte, sind der Wohnungs- und Büroflächenmarkt wie auch die Raumplanung gefordert. Denn wenn die zunehmende Nachfrage nach größeren Wohnungen primär auf den Stadtrand und kleinere Großstädte fokussiert (Dolls & Mehles, 2021), fällt die zusätzliche Nachfrage nach größeren Wohnungen in urbanen Ballungsgebieten großer Städte vielleicht etwas geringer aus. Die Pendelstrecken, wenn man dann aber doch mal ins Büro muss, wachsen aber ggf. erheblich. Und es wäre wenig überraschend, wenn eine sich fortschreibende Tendenz zu Homeoffice sich in einer mittelfristig deutlich niedrigeren Nachfrage nach Büroflächen äußert, zumal mit einer steigenden Akzeptanz von Desksharing gerechnet werden kann. Eine Studie des IW (Stettes & Voigtländer, 2021) lässt erkennen, dass ein Anteil von knapp 10% der großen Unternehmen schon Ende 2020 konkret die Reduktion von Büroflächen ins Auge fasst und über 40% Umgestaltungen plant, also z. B. die Umwidmung von Gruppen- oder Großraumbüros in kleinere Büroeinheiten. Zur Zukunft von Desk Sharing-Absichten macht die Studie von Stettes und Voigtländer (2021) keine Aussagen.

Durch eine Reihe zusätzlicher Fragen können jetzt auch die Gruppen der mit dem Homeoffice und mit Videokonferenzen zufriedenen Personen besser charakterisiert werden als nach der Befragung im November 2020. Tendenziell zufriedener mit Videokonferenzen und Homeoffice scheinen Menschen zu sein:

- deren Arbeit nicht so viel Kontakt mit Kolleginnen und Kollegen erfordert und die auch gern allein arbeiten, aber auch 70% der im Homeoffice Zufriedenen sagen, dass sie in ihrem Job viel mit anderen Menschen zu tun haben,
- deren Home-Office gut ausgestattet ist und für das ein eigener Raum zur Verfügung steht
- die in Digitalisierung und Internet Chancen für die Gesellschaft sehen,
- die zumindest in der Gruppe der Videokonferenz-Nutzenden oft zu den ersten gehören, die etwas Neues ausprobieren,
- die grundsätzlich positiv an die Dinge heran gehen und
- die, mit aller Vorsicht, etwas selbstbewusster kommunizieren als die Vergleichsgruppe.

Die Umwelteinstellungen wie auch demografische Merkmale wie Geschlecht, Alter und Kinderzahl scheinen dagegen keine Rolle zu spielen.

Für die Personalabteilungen ergibt sich so kaum ein Ansatzpunkt für gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Zufriedenheit mit Homeoffice und Videokonferenz. Natürlich ist eine gute Ausstattung der Homeoffices von Bedeutung, aber die überwiegende Mehrheit hält diese schon heute für ausreichend. Auf Werthaltungen und Charaktereigenschaften wiederum kann kaum eingewirkt werden. Ein Ansatzpunkt für Personalpolitik und Management ergibt sich an ganz anderer Stelle. Der überwiegende Teil der an Videokonferenzen Teilnehmenden befürchtet einen schlechteren Kontakt zu Kolleginnen und Kollegen bis hin zum Verlust der persönlichen Beziehungen. Nicht nur die Unzufriedenen befürchten im Juni 2021 eine solche Entwicklung, sie wird auch von der Mehrheit der Zufriedenen

geteilt. Ganz ähnlich die Beurteilung von Homeoffice. Auch hier wird von der Mehrheit der Unzufriedenen wie Zufriedenen ein schlechterer Kontakt zu Kolleginnen und Kollegen wie auch ein schlechteres Teamgefühl und eine schlechtere Zusammenarbeit im Team befürchtet.

Auf der positiven Seite stehen deutliche Zeiteinsparungen und eine bessere Work-Life-Balance beim Homeoffice wie auch massive Vorteile bei den Anreisezeiten und den Reisekosten im Feld der Substitution von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen als Anreize zur Verstärkung des neuen Verhaltens.

Bei der Gestaltung der Zukunft der Arbeit wird es darum gehen, ein ausgewogenes Verhältnis von persönlichen Kontakten im Kollegenkreis und mit Geschäftspartnern zu ermöglichen. Wenn aber persönliche Termine stattfinden oder wirklich wieder gereist wird, dann sollte mehr als früher Gelegenheit für persönliche Kontakte geschaffen werden. Reichlich Zeit für Mittagspausen könnten genauso ein Ansatz sein wie bewusst auf zwei Tage geplante Meetings, bei denen ein Abendessen in der Gruppe Zeit zum Austausch schafft. Vielleicht gehört zu großen Bürohäusern mit Desksharing in Zukunft auch eine Etage mit Kleinwohnungen, so dass auch Kolleginnen und Kollegen mit großen Pendelstrecken unkompliziert an mehrtägigen Veranstaltungen teilnehmen können.

Fazit: Das Homeoffice ist eine neue technisch-soziale Möglichkeit, deren verstärkte Nutzung tief in die täglichen Routinen eingreift. Regelmäßige Arbeit im Homeoffice verändert das Mobilitätsverhalten im Alltag, wirkt sich auf die Ansprüche an die Wohnung aus und schafft unter Umständen sogar die Möglichkeit, dass noch deutlich mehr Menschen als ohnehin schon ihren Wohnort weit entfernt vom Arbeitsort wählen. Eine Flut von Reboundeffekten könnte also einer vermehrten Arbeit im Homeoffice folgen. So wünschenswert mehr Homeoffice für eine gute Work-Life-Balance auch sein mag, die Auswirkungen dieser vielfältigen Veränderungen auf den Klimaschutz lassen sich in Summe kaum beziffern. Und während sich ein Recht auf Homeoffice juristisch verankern ließe, die Diskussion dazu hat ja bereits begonnen, umfassen die möglichen Folge- und Reboundeffekte zahlreiche Felder des privaten, selbstbestimmten Lebens und sind einer die Wirkung des Rebounds begrenzenden Regulierung kaum zugänglich.

Publikationen

Clausen, J., Schramm, S. & Hintemann, R. (2019). Virtuelle Konferenzen und Online-Zusammenarbeit in Unternehmen: Effektiver Klimaschutz oder Mythos? CliDiTrans Werkstattbericht 3-2. Berlin: Borderstep Institut.

Clausen, J. & Schramm, S. (2019). Wege zu einer neuen Konferenzkultur. Reisen erschweren - Teleconferencing entwickeln. CliDiTrans Werkstattbericht 3-2. Berlin: Borderstep Institut.

Clausen, J. & Schramm, S. (2020). Persönliche Treffen und virtuelle Konferenzen: Gelebte Praktiken und Erfahrungen in Unternehmen. Auswertung einer Prä-Corona Interviewreihe. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.

Schramm, S. (2020). Effekte der COVID-19-Pandemie auf berufsbedingten Verkehr, geschäftliche Meetings, Home-Office und Klimabilanz. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.

Clausen, J. & Schramm, S. (2021). Klimaschutzpotenziale der Nutzung von Videokonferenzen und Homeoffice. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.

Clausen, J. & Schramm, S. (2021). Climate protection potentials of the use of video conferences and when working from home. Results of a representative survey of business travellers. CliDiTrans Workshop Report. Berlin: Borderstep Institute.

5.2 Virtualisierung und Cloud-Computing

Die Einführung von Virtualisierung und Cloud Computing unterstützt Unternehmen darin, IT-Ressourcen flexibel und effizient bereitzustellen. Damit können die Auslastung der genutzten Systeme erhöht und Ressourcen beim Anwender reduziert werden. So ermöglicht die Servervirtualisierung beispielsweise eine deutliche Reduktion der eingesetzten Hardware, indem auf einem einzigen physikalischen Server eine Vielzahl von virtuellen Servern installiert werden. Virtualisierung ist auch ein wesentliches Element der Bereitstellung von IT-Diensten aus der Cloud. Cloud Computing bezeichnet die flexible Bereitstellung von IKT-Ressourcen über das Internet. Dies bietet den Vorteil, dass bei Anwendenden selbst keine zentralen IKT-Strukturen betrieben werden müssen und „schlankere“ Endgeräte eingesetzt werden können. Große Rechenzentren können die IT-Dienste deutlicher effizienter anbieten als kleine zentrale IKT-Strukturen bei den einzelnen Unternehmen (Bizo, 2019). Damit können Energie und Ressourcen eingespart werden. Eine Studie aus den USA ermittelte im Jahr 2014 ein Reduktionspotenzial von 87% durch den Einsatz Cloud-basierter Business-Software im Vergleich zum Eigenbetrieb der Systeme durch die einzelnen Unternehmen (Masanet et al., 2014). Die Vorteile von Cloud-Computing Nutzung führen dazu, dass die Nutzung von Cloud-Diensten in Unternehmen kontinuierlich zunimmt (KPMG & Bitkom, 2021). Gemäß Eurostat wuchs der Anteil der Unternehmen in Deutschland, die Cloud-Dienste nutzen, von 22% im Jahr 2018 auf 33% im Jahr 2020. Im europäischen Vergleich ist die Cloud-Nutzung in Deutschland relativ gering, europaweit nutzen 36% der Unternehmen im Jahr 2020 Cloud-Dienste. In Finnland liegt der Anteil der Cloud-Nutzenden bei den Unternehmen sogar schon bei 75%. Das Wachstum der Nachfrage im Cloud-Markt führt dazu, dass aktuell weltweit immer mehr Cloud-Rechenzentren aufgebaut werden. In Deutschland gibt es zur Zeit einen regelrechten Boom beim Aufbau von Cloud-Rechenzentren (Hintemann, 2021). Das führt dazu, dass trotz der deutlichen Effizienzvorteile von Virtualisierung und Cloud Computing die Zahl der Server und deren Energieverbrauch sowohl in Deutschland als auch weltweit kontinuierlich ansteigt. Im Jahr 2020 gab es in Deutschland gemäß der im Vorhaben CliDiTrans durchgeführten Modellrechnungen mit 2,4 Mio. Servern trotz massivem Einsatz von Virtualisierung 35% mehr Server als im Jahr 2010. Der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland stieg im gleichen Zeitraum ebenfalls um fast 60% auf 16 Mrd. kWh im Jahr (Hintemann, 2021).

5.2.1 Zielsetzungen und Fragestellungen

Die Zielsetzung der CliDiTrans-Analysen im Bereich Virtualisierung und Cloud-Computing ist es, auf Basis von konkreten Fallbeispielen der Umstellung auf Cloud-Lösungen die Klimaschutzpotenziale von

Cloud-Computing zu ermitteln. Hierzu werden die Daten von Kunden des Projektpartners KDO ausgewertet und mit Hilfe des Borderstep-Modells der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland repräsentative Hochrechnungen vorgenommen. Das Vorgehen ermöglicht einerseits die Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Einsatz von Virtualisierung und Cloud Computing und dem Ausstoß von Treibhausgasen sowie andererseits die Abschätzung von Nachfrageeffekten und Produktionsverlagerungen beim IKT-Einsatz.

5.2.2 Vorgehen/Methodik

Für sechs konkrete Fallstudien von Kommunen, die als KDO-Kunden in den Jahren 2016 bis 2019 ihre Computerarbeitsplätze vollständig auf KDO-Cloud-Arbeitsplätze umgestellt haben, konnten der durch die Arbeitsplätze bedingte Energiebedarf und die THG-Emissionen in einer Vorher-/Nachher-Analyse bestimmt werden (Hintemann & Iffländer, 2021). Bei den Kunden handelt es sich jeweils um öffentliche Einrichtungen mit ca. 25 bis 100 Computerarbeitsplätzen. Sie haben die vorher genutzten PCs und Notebooks weitgehend durch ressourceneffiziente Thin Clients ersetzt und nutzen statt der vorher vorhandenen eigenen zentralen IT-Systeme (Server, Speicher) jetzt die auf virtuellen Systemen bei KDO bereitgestellten Cloud-Dienste.

In den Fallbeispielen wurde jeweils der Jahres-Energiebedarf der Nutzung der Endgeräte (PC, Notebook, Monitor, Tastatur, Maus), der verwendeten zentralen IT (Server, Speichersysteme, Netzwerktechnik) sowie der unterstützenden Systeme wie unterbrechungsfreier Stromversorgung und Klimatisierung berücksichtigt. Auch der im Falle der Cloud-Lösungen zusätzliche Energiebedarf durch die Nutzung der öffentlichen Telekommunikationsnetze ging in die Berechnung ein.

Die Berechnung der jährlichen THG-Emissionen erfolgte auf Basis der ermittelten Energiebedarfe und Zugrundelegung der durchschnittlichen CO₂-Intensität der Stromerzeugung in den Analysejahren. Zusätzlich wurden die THG-Emissionen in der Herstellung, Transport, Entsorgung der Endgeräte bestimmt. Hierzu konnte auf vorhandene Literaturdaten (Hintemann et al., 2021) zurückgegriffen werden. Die für die Berechnung notwendigen Nutzungsdauern der Geräte wurden von KDO bereitgestellt.

Die anonymisierte Auswertung KDO-Kundendaten wurde durch Expertenbefragungen als semistrukturierte Interviews ergänzt, um Wirkungsmechanismen zu identifizieren. Zur Berechnung des ganzheitlichen Energiebedarfs und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen wird auf das am Borderstep Institut seit 2009 existierende und laufend weiter entwickelte Modell der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland zurückgegriffen.

5.2.3 Ergebnisse zu Virtualisierung und Cloud Computing

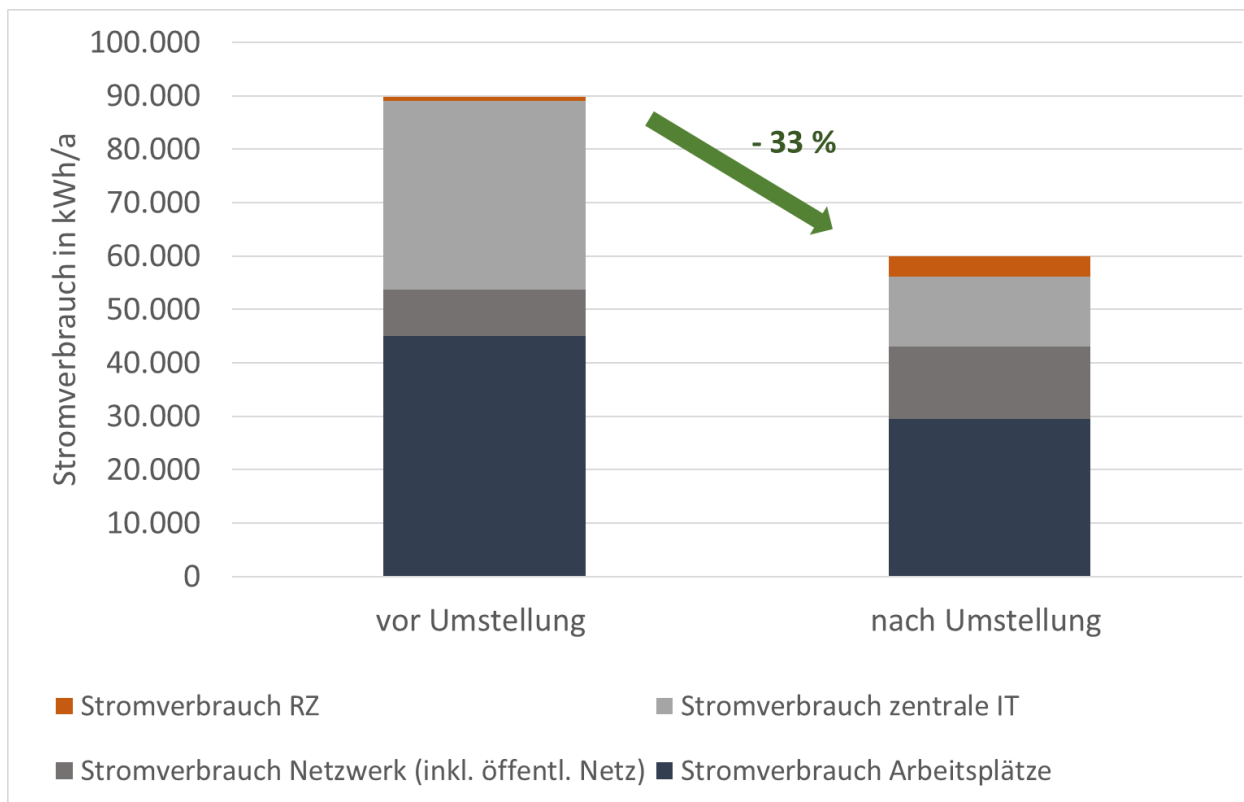
Die Untersuchung der Fallstudien kommt zu dem klaren Ergebnis, dass eine Umstellung auf Cloud-Arbeitsplätze bei den betrachteten Kommunen zu deutlichen Einsparungen von Energie- und THG-Emissionen geführt hat. Im Durchschnitt der Fallstudien konnte der jährliche Stromverbrauch pro Arbeitsplatz um 42% von 240 kWh/a auf 140 kWh/a abgesenkt werden. Die jährlich pro Arbeitsplatz

verursachten THG-Emissionen (inklusive Herstellung, Transport, Entsorgung) reduzierten sich im Durchschnitt um 35% von 180 kg CO_{2eq}/a auf 116 kg CO_{2eq}/a.

Der Stromverbrauch aller Computerarbeitsplätze der betrachteten Kommunen konnte um insgesamt 33% reduziert werden (Abbildung 2). Dass diese Reduktionen etwas geringer ausfallen als die Reduktion an den Arbeitsplätzen, liegt daran, dass die Gesamtzahl der Computerarbeitsplätze zugenommen hat. In Summe stieg sie bei allen sechs Kommunen um 14% von 374 auf 427.

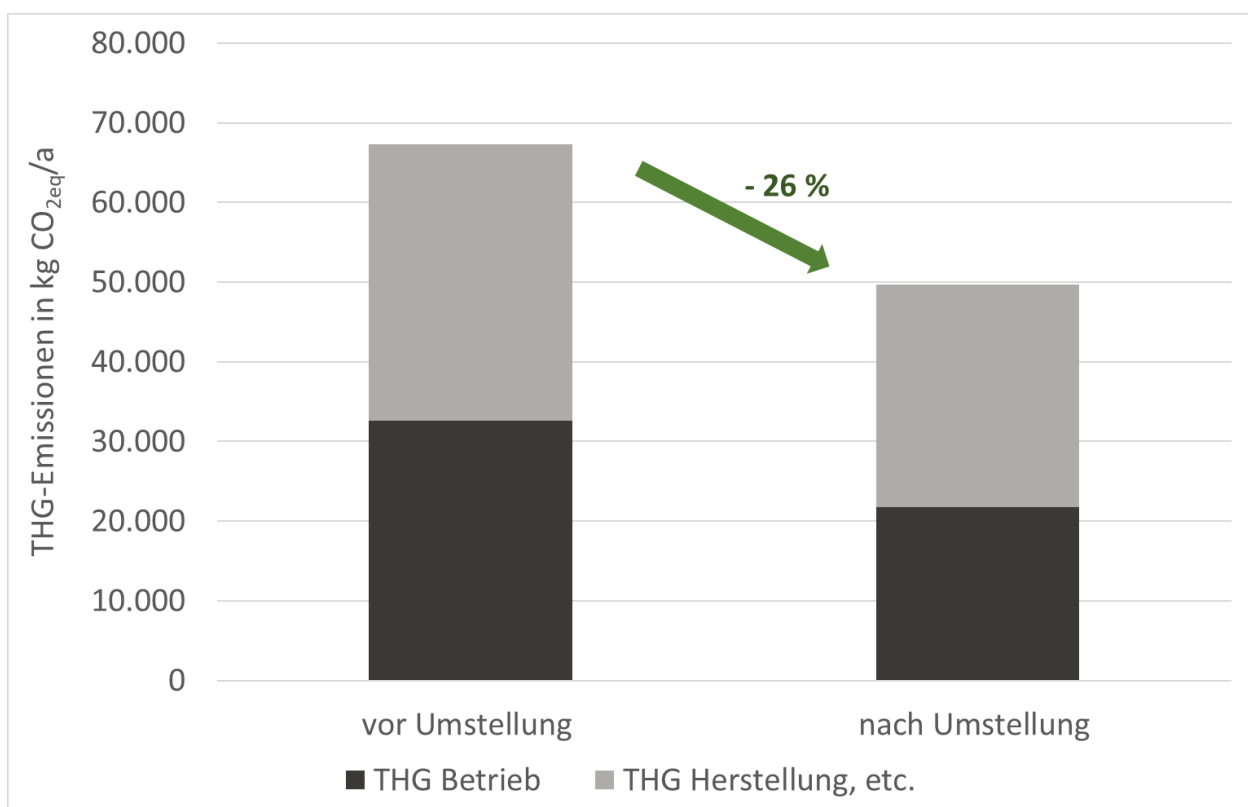
Die Spannweite der Energieeinsparungen an den Computerarbeitsplätzen lag zwischen 7% und 47%, abhängig von den vor der Umstellung betriebenen Systemen und von der Entwicklung der Zahl der Arbeitsplätze. Die Reduktion des Stromverbrauchs ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass bei den Kunden deutlich weniger zentrale IT-Ressourcen (Server, Speichersysteme) betrieben werden mussten. Die gleiche Leistung konnte im KDO-Rechenzentrum mit einem aufgrund der Nutzung von Virtualisierung und Cloud-Technologien deutlich geringeren Energieaufwand bereitgestellt werden. Durch den Einsatz von Thin Clients statt PCs konnte auch am Arbeitsplatz der Energiebedarf sehr deutlich reduziert werden. Die Erhöhungen des Energiebedarfs durch die zusätzliche Datenübertragung zwischen Kunden und KDO und durch das Rechenzentrum von KDO sind im Vergleich zu den Einsparungen im Bereich zentraler IT und Arbeitsplätze sehr gering.

Abbildung 2: In den sechs Fallstudien durch Umstellung auf Cloud-Arbeitsplätze erreichte Reduktion des Stromverbrauchs in der Nutzung



In Summe wurden die durch die Computerarbeitsplätze der sechs Kommunen verursachten THG-Emissionen durch die Umstellung auf Cloud-Arbeitsplätze um 26% reduziert (Abbildung 3). Es konnten sowohl die durch den Stromverbrauch bedingten THG-Emissionen abgesenkt werden, als auch die THG-Emissionen, die durch die Herstellung, Transport und Entsorgung der Geräte und Anlagen entstehen. Da die THG-Emissionen durch den Strombedarf die Geräte und Anlagen stärker abnehmen, nimmt der Anteil der THG-Emissionen durch Herstellung, Transport und Entsorgung an den Gesamtemissionen von 51% auf 56% zu. Künftige Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen sollten also verstärkt auf diesen Sachverhalt Rücksicht nehmen. So könnten durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Geräte diese Treibhausgasemissionen deutlich reduziert werden. Dies wäre insbesondere bei den Thin Clients angebracht. Aktuell werden Thin Clients nur fünf Jahre genutzt, auch wenn sie von der Ausstattung und Leistung deutlich länger genutzt werden könnten. Grund für die Beschränkung der Nutzungsdauer sind die Gewährleistungs- und Wartungskonditionen der Hersteller.

Abbildung 3: In den sechs Fallstudien durch Umstellung auf Cloud-Arbeitsplätze erreichte Reduktion der THG-Emissionen



Zusammenfassend lassen sich auf der Analyse der Fallstudien folgende Ergebnisse festhalten:

- Bei allen Kunden konnte eine deutliche Absenkung des Energiebedarfs und Reduktion der THG-Emissionen pro Arbeitsplatz erreicht werden.

- Die Interviews mit den Kunden haben gezeigt, dass die Reduktion von Energiebedarf und THG-Emissionen kein bedeutendes Kriterium bei der Einführung der Cloud Lösungen waren. Die Umstellung auf Cloud-Lösungen erfolgte insbesondere aufgrund der Vorteile im IT-Management.
- Wie stark Energiebedarf und THG-Emissionen bei den Kunden insgesamt abnehmen, ist deutlich abhängig von den individuellen Voraussetzungen, z.B. welche Systeme vor der Umstellung genutzt wurden und wie sich die Zahl der Computerarbeitsplätze entwickelt hatte.
- Die Bedeutung der Herstellung für THG-Emissionen wird größer – künftige Klimaschutzmaßnahmen müssen diesen Aspekt stärker berücksichtigen.
- Die Nutzungsdauer der Geräte und Anlagen könnte weiter erhöht werden (Hemmnisse z.B. Support/Wartung der Hersteller)

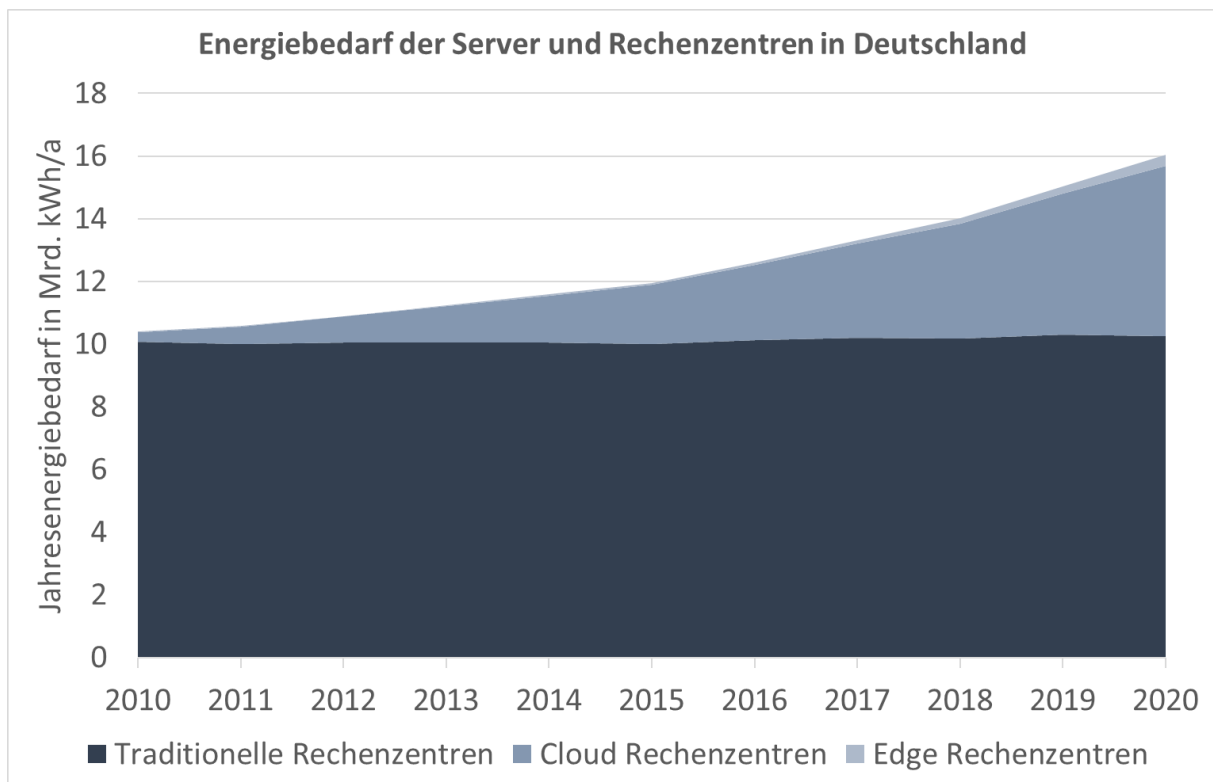
Neben der Betrachtung einzelner Fallbeispiele wurde im Rahmen von CliDiTrans auch untersucht, welche Klimaschutzpotenziale durch die verstärkte Nutzung von Cloud-Arbeitsplätzen in Deutschland bestehen. Aktuell gibt es noch verhältnismäßig wenige Cloud-Arbeitsplätze (auch als „Virtual Desktops“ bezeichnet) in Deutschland. Die meisten Arbeitsplätze sind klassisch mit PCs oder Notebooks ausgestattet und viele Unternehmen betreiben eigene Server z.B. für E-Mail und zentrale Dateiablage. Leider sind keine belastbaren Marktzahlen zur Nutzung von Cloud-Arbeitsplätzen verfügbar. Als Anhaltspunkt für den Energie- und Ressourcenbedarf durch Computerarbeitsplätze können die in der Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ (Stobbe et al., 2015) sowie darauf aufbauenden Studie „Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen“ (Hintemann et al., 2021) ermittelten Geräteausstattungen von Computerarbeitsplätzen herangezogen werden. Danach beträgt der Anteil von Thin Clients an den etwa 30 Mio. Computerarbeitsgeräten im Jahr 2020 etwa 12%.

Aus Expertenschätzung und Prognosen zum Wachstum der Marktes für Cloud-Arbeitsplätze (Fior Market Research, 2021; Inkwood Research, 2020; MarketsandMarkets, 2017; Mordor Intelligence, 2020; Orion Market Research Private Limited, 2020; Technavio, 2020) lässt sich grob abschätzen, dass sich der Anteil von Virtual Desktop Arbeitsplätzen an allen Computerarbeitsplätzen bis 2030 etwa verdreifachen könnte. Unterstellt man die in den Fallstudien realisierten Energieeinsparpotenziale von 33%, so lässt sich bei diesem Marktwachstum der durch Computerarbeitsplätze verursachte jährliche Energiebedarf bis zum Jahr 2030 um etwas mehr als 400 GWh/a reduzieren. Für die Reduktion der THG-Emissionen lässt sich eine Größenordnung von 350.000 t CO_{2eq}/a abschätzen.

Für den konkreten Anwendungsfall des Cloud-Arbeitsplatzes sind also deutliche Einsparungen von Energie- und THG-Emissionen möglich. Betrachtet man jedoch die Entwicklung des Energiebedarfs von Rechenzentren im Zeitraum von 2010 und 2020 (Abbildung 4), so muss festgestellt werden, dass es durch Cloud-Computing hier nicht zu einer Reduktion des Energiebedarfs gekommen ist. Der Energiebedarf der Rechenzentren stieg im genannten Zeitraum um etwa 5.500 GWh/a an. Cloud-Angebote haben den Energiebedarf traditioneller Rechenzentren nicht deutlich reduzieren können, sie haben allenfalls das Wachstum etwas geringer ausfallen lassen. Ein Grund für das weitere Wachstum des Energiebedarfs der Rechenzentren ist auch, dass Cloud-Computing dazu beiträgt, Rechenleistung

auch für zusätzliche Anwendungen wie Videodienste, Künstliche Intelligenz u.a. flexibel bereitzustellen (Hintemann, 2020, 2021). Verglichen mit den oben dargestellten Energieeinsparpotenzialen durch Cloud-Arbeitsplätze sind die durch Cloud-Computing insgesamt bedingten Mehrbedarfe deutlich höher. Hinsichtlich der Entwicklung der THG-Emissionen ist festzustellen, dass durch die voranschreitende Dekarbonisierung der Stromerzeugung der höhere Energiebedarf durch Cloud-Dienste ausgeglichen wird und die THG-Emissionen der IKT in Zukunft in Summe voraussichtlich weitgehend konstant bleiben werden (Hintemann et al., 2021).

Abbildung 4: Entwicklung des Energiebedarfs der Server und Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Edge- und Cloud-Rechenzentren



Quelle: Hintemann (2021)

Fazit: Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus der Analyse im Themenfeld „Virtualisierung und Cloud-Computing“ ziehen:

- Cloud-Computing weist deutliche Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale auf. In den untersuchten Fallbeispielen sind Energiebedarf, THG und auch der Materialaufwand deutlich reduziert worden.
- Im konkreten Anwendungsfall der Bereitstellung von Computerarbeitsplätzen aus der Cloud sind in Deutschland deutliche absolute Reduktionen von Energie- und THG-Emissionen möglich.

- Cloud-Computing ermöglicht insbesondere durch die flexible Bereitstellung aber auch eine Ausweitung der Nutzung von IT-Ressourcen.
- In Summe führt die Ausweitung aller Cloud-Anwendungen künftig voraussichtlich zu einer Erhöhung des Energiebedarfs der IKT in Deutschland, die THG-Emissionen der IKT werden sich aufgrund der Dekarbonisierung der Stromerzeugung vermutlich auf konstantem Niveau bewegen.

Publikationen

Hintemann, R. (2021). Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf

Hintemann, R. & Iffländer, S. (2021). CliDiTrans Werkstattbericht 3-1: Virtualisierung und Cloud Computing - Chance für mehr Klimaschutz? Berlin, Oldenburg: Borderstep Institut.

5.3 Private Mediennutzung

Private Konsumentinnen und Konsumenten nutzen immer mehr Streaming-Angebote für Musik und Videos aus der Cloud und spielen zunehmend online Computerspiele. Weltweit wurden schon 2015 allein über soziale Medien täglich mehr als 3,5 Mrd. Fotos geteilt und 20 Mrd. Videos angeschaut (KPCB, 2016) – Tendenz stark steigend. Zwar werden die Endgeräte wie Smartphones, Tablets und Laptops selbst immer energieeffizienter, die Verlagerung der Rechenleistung in das Internet führt aber dazu, dass im Gegenzug der Energiebedarf der Rechenzentren und der Übertragungsnetze sehr stark ansteigt (CEET, 2013; Hintemann & Fichter, 2015). So benötigt ein Tablet zehnmal mehr Energie in Rechenzentren und Netzen als am Endgerät selbst. Außerdem sind heutzutage der Energiebedarf und der Product Carbon Footprint in der Nutzungsphase moderner Endgeräte nur noch sehr gering. Ca. 80 bis 90% des Product Carbon Footprints von Smartphones, Tablets und Laptops sind auf die Herstellungsphase zurückzuführen. Die Treibhausgasemissionen sowohl aus der Herstellungsphase wie auch aus dem Rechenzentrumsbetrieb der Medienanbieter (z.B. Apple, Amazon, Spotify etc.) fallen dabei häufig nicht in Deutschland an.

5.3.1 Zielsetzungen und Fragestellungen

Im Rahmen des Projektes CliDiTrans wurde am Beispiel von sechs typischen Haushalten die Entwicklung der durch Internet- und Mediennutzung verursachten Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008 bis 2018 ermittelt. Im Jahr 2008 waren Smartphones und Tablets praktisch noch nicht vorhanden und auch die Mediennutzung über das Internet - wie das Teilen von Fotos oder Videostreaming - kaum verbreitet. Bei der Untersuchung wurde ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der sowohl die Treibhausgase in der Herstellungsphase als auch die Treibhausgase berücksichtigt, die durch die Gerätenutzung sowie in den Netzen und Rechenzentren anfallen. Im Zentrum der Untersuchung standen vier Fragestellungen:

- Welche Treibhausgasemissionen sind mit der Mediennutzung in typischen Haushalten insgesamt verbunden?
- Wie haben sich diese Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008 bis 2018 verändert?
- Welche Anteile haben die Geräteherstellung, die Gerätenutzung und die digitalen Infrastrukturen an den Treibhausgasemissionen?
- Welche Handlungsoptionen des Staates und der Wirtschaft sind geeignet, ein weiteres schrankenloses Wachstum der Emissionen zu verhindern?

5.3.2 Vorgehen/Methodik

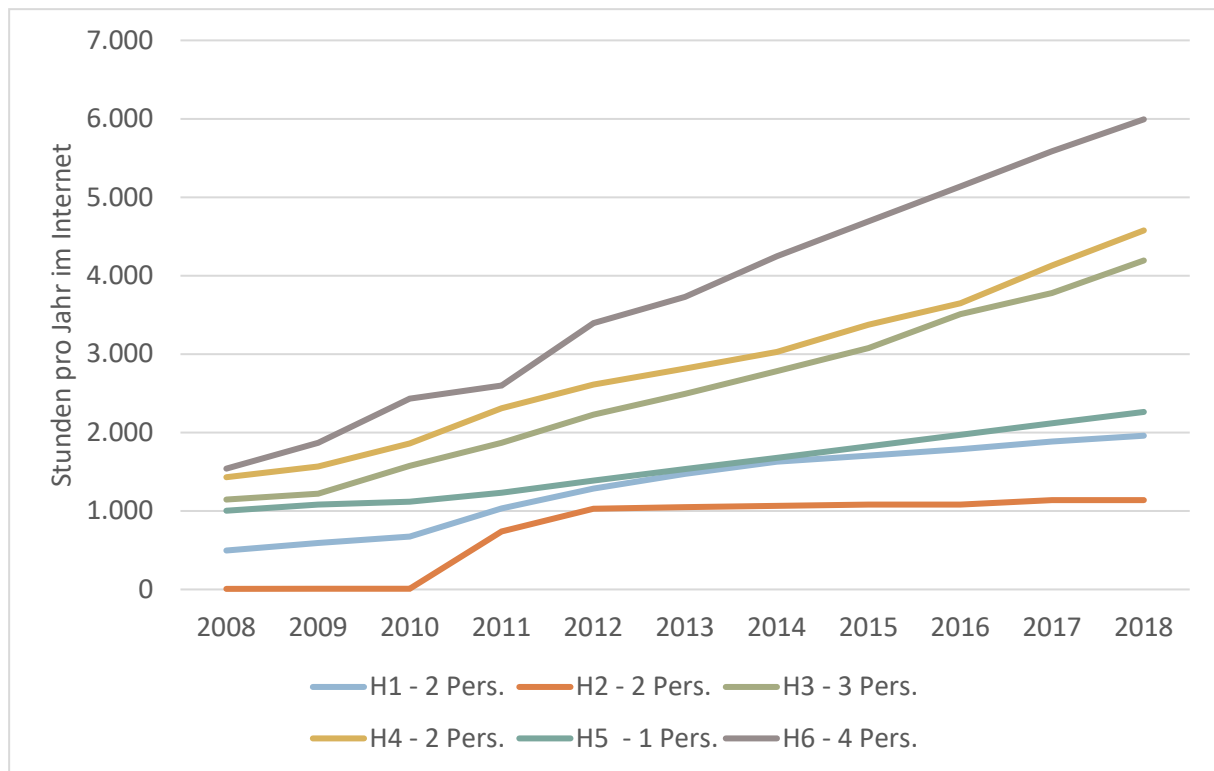
Es wurden zunächst Modellhaushalte entsprechend von Daten des statistischen Bundesamtes, den SINUS Milieus und der ARD/ ZDF Mediennutzungstypologie konstruiert, welche unterschiedliche Lebenswelten in Deutschland repräsentieren. Der Anspruch war hierbei nicht, ein allgemeingültiges Bild des Medienkonsums in Deutschland zu ermitteln. Es sollte vielmehr gezeigt werden, welche Auswirkungen unterschiedliche sozioökonomische und soziopsychologische Charakteristika der Haushalte auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen haben. Dies soll Lesenden die Möglichkeit geben, sich mit einem spezifischen Haushaltsmodell zu identifizieren und ihnen somit eine Orientierung für ihren eigenen Medienkonsum und den daraus resultierenden Treibhausgasemissionen ermöglichen.

Die Ermittlung der Treibhausgasemissionen für die private Internet- und Mediennutzung in den sechs Modellhaushalten erfolgte in zwei Schritten. In Schritt eins wurden die THG für die Geräteherstellung und -nutzung ermittelt. In Schritt zwei für den Betrieb des Festnetzes, des Mobilfunknetzes sowie für die Rechenzentren.

5.3.3 Ergebnisse

Die Nutzungsintensität des privaten Internet- und Medienkonsums nimmt seit Jahren zu. Während bisherige Offliner zunehmend das Smartphone für sich entdecken, sind die digital natives auf allen Online-Kanälen vertreten und nutzen das gesamte Spektrum von Online-Angeboten intensiv. Eine Sättigung scheint bisher nicht erreicht zu sein (vergleiche Abbildung 5). Denn immer neue Möglichkeiten der Freizeitgestaltung über das Internet und der Zerstreung durch Apps, soziale Medien, usw. scheinen derzeit zu entstehen. Insbesondere die Corona-Pandemie hat gezeigt, das Chorproben, Yoga-Stunden oder der regelmäßige Stammtisch auch per Videokonferenz oder Live-Stream dauerhaft möglich sind.

Abbildung 5: Nutzungszeiten des Internet pro Modellhaushalt im Zeitraum 2008 bis 2018



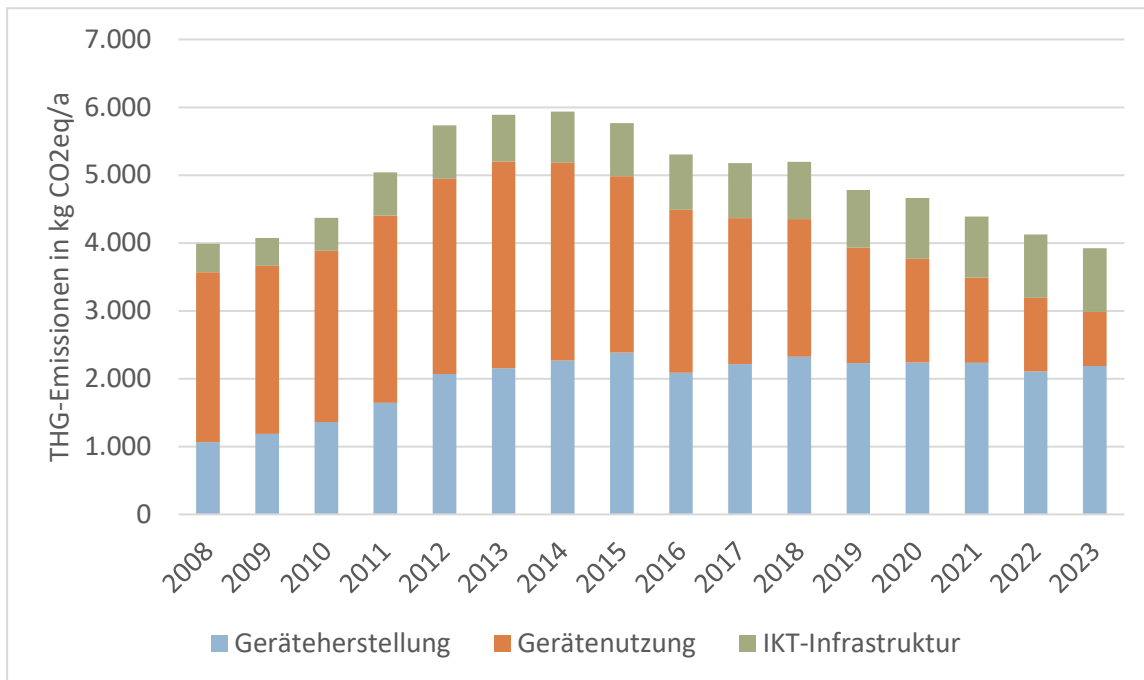
Quelle: Borderstep Institut

Die immer längere Nutzungszeit bedingt längere Zeiten der Gerätenutzung wie auch ein immer höheres Datenvolumen in den Netzen. Hinzu kommt die Anschaffung neuer und oft effizienterer Endgeräte. Die Tatsache, dass die durch energieeffizientere Geräte eingesparten THG-Emissionen durch einen erhöhten Ausstoß an THG-Emissionen im Rahmen der Geräteherstellung deutlich übertroffen werden, lässt sich in jedem Haushalt erkennen.

Obwohl die THG-Emissionen 2018 höher sind als 2008, ist insgesamt über alle Modellhaushalte hinweg seit 2014 ein rückläufiger Trend zu erkennen, welcher zum einen durch energieeffizientere Geräte hervorgerufen wird (vgl. Abbildung 6). Zu berücksichtigen ist allerdings zum anderen die Veränderung des Strommix (vgl. Icha, 2020) mit einem wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien, welche wiederum den CO₂-Emissionsfaktor stark beeinflussen und sich somit auf die Höhe der Treibhausgasemissionen auswirken.

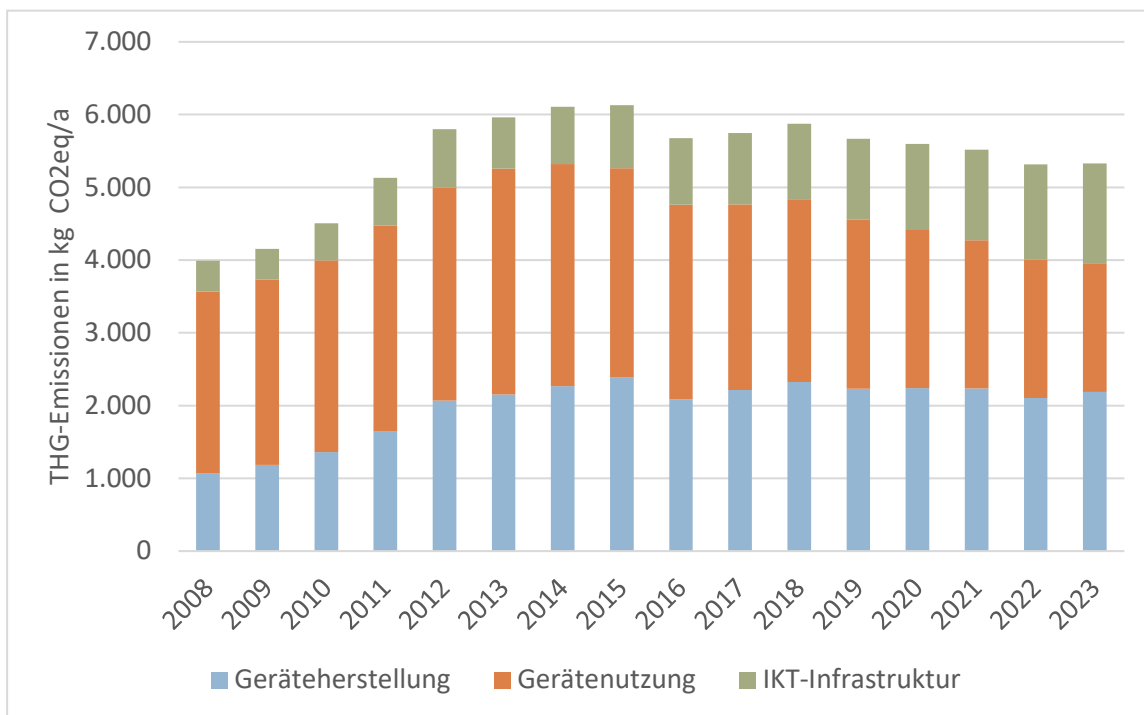
Wäre im Strommix der Anteil erneuerbarer Energien geringer, würde sich die Entwicklung der THG-Emissionen in den Modellhaushalten anders gestalten. Zum Vergleich ist daher in Abbildung 7 dargestellt, wie sich die Emissionen seit 2008 entwickelt hätten, wenn der Strommix seitdem gleichgeblieben wäre. Abbildung 7 macht deutlich, dass die Ursache der geringeren Treibhausgasemissionen überwiegend in einem „grüneren“ Strommix liegt und die Geräte- und Mediennutzung nur einen kleinen Beitrag leistet.

Abbildung 6: Entwicklung der gesamten THG-Emissionen aller Modellhaushalten von 2008 bis 2018 (Prognose bis 2023) → Mit verändertem „grünere“ Strommix



Quelle: Borderstep Institut

Abbildung 7: Entwicklung der gesamten THG-Emissionen aller Modellhaushalten von 2008 bis 2018 (Prognose bis 2023) → Ohne veränderten Strommix



Quelle: Borderstep Institut

Um die dadurch entstehenden THG-Emissionen auf einem niedrigen Niveau zu halten, besteht ein dringender Handlungsbedarf. Die Studie macht zwar deutlich, dass die Emissionen für die Gerätenutzung in allen Modellhaushalten nach unten gehen, sie dafür aber gleichzeitig bei der Geräteherstellung und in der IKT-Infrastruktur ansteigen. Auf allen drei Ebenen sind Maßnahmen erforderlich.

Auf Geräteebene ist eine Suffizienzstrategie zu empfehlen, in der Konsumenten ihre Geräte so lange wie möglich nutzen und ggf. vor Neukauf prüfen, ob einzelne Komponenten auch repariert werden können. Sind die Geräte noch funktionsfähig, können sie auch weiterverkauft werden. Auch kann überlegt werden, ob das Gerät sogar durch ein energieeffizienteres Alternativgerät substituiert werden kann (z.B. Fernsehgerät durch Tablet ersetzen) oder ob ein vollständiger Verzicht eventuell auch möglich ist. Werden neue Geräte gekauft, ist es ratsam auf eine hohe Energieeffizienzklasse zu achten.

Auf Geräteebene seitens der Hersteller ist die Umsetzung der circular economy Strategie zu empfehlen. Maßnahmen, die innerhalb dieser Strategie eingesetzt werden können, reichen von einer langlebigen Konstruktion der Geräte über Reparaturangebote bis hin zum Recycling und der anschließenden Wiederverwendung eingesetzter Rohstoffe. Auch Angebote im Bereich Refurbishing³ sind direkt über die Hersteller oder über Drittanbieter eine gute Möglichkeit, um Abfälle zu vermeiden und Primärressourcen zu schonen. Im Bereich der Gerätekonstruktion ist außerdem die Softwarepolitik zu überdenken. Sicherheits- und Kompatibilitätsupdates sollten für einen möglichst langen Zeitraum bereitgestellt werden. Zudem muss darauf geachtet werden, dass diese notwendigen Softwareaktualisierungen die bestehende Hardware nicht überfordern und somit ein bestmögliches Nutzungserlebnis für einen langen Zeitraum gewährleistet ist.

Auf gesetzlicher Ebene bieten sich zudem strengere Öko-Design Richtlinien (u. a. mit einem Recht zur Reparatur), Importrestriktionen für Geräte, die in der Herstellung zuvor definierte Emissionswerte übersteigen, und Vorschriften für energieeffiziente Netze und Rechenzentren an.

Auf der Ebene digitaler Anwendungen und Angebote wie z. B. Streamingportalen ist es zu empfehlen, den zur Verfügung gestellten Content in der energieeffizientesten und möglichst gering aufgelösten Variante zur Verfügung zu stellen. Der Datentransfer ist in den Netzen oft unnötig hoch, denn viele Endgeräte sind gar nicht fähig, den übertragenen Inhalt in der höchst möglichen Auflösung abzuspielen (z.B. 4k auf dem Smartphone). Und auch das menschliche Auge ist oft nicht in der Lage den Unterschied überhaupt wahrzunehmen.

Schon bei einer Bildauflösung von 2160 Zeilen (UHD bzw. 4k) können vom menschlichen Auge nicht einmal mehr die Hälfte der vorhandenen Punkte unterschieden werden, weil der wahrgenommene Kontrast zu klein ist (Bautsch, 2017). Bautsch (2017) errechnet für den Fall einer normalen Betrachtung des Bildes aus einem Abstand von ca. 2,5 m für eine Auflösung von 4k eine optimale Bilddiagonale von drei Metern, für 8 k von sechs Metern. Viele im Internet verfügbare Medien werden damit heute schon in Auflösungen angeboten, die sowohl gemessen an den verfügbaren Bildschirmen (z.B.

³ Die qualitätsgesicherte Überholung und Instandsetzung von Produkten zum Zweck der Wiederverwendung.

Notebook oder Smartphone) wie auch gemessen an den Fähigkeiten des menschlichen Auges unnötig sind. Wieloch (2021) bringt es auf den Punkt:

Möchte man entspannt in einer Entfernung von drei Metern auf seinem Sofa lümmeln, so muss ein 8K-TV mindestens 100 Zoll groß sein, um eine Bildverbesserung gegenüber der 4K-Auflösung wahrzunehmen. In den meisten deutschen Wohnzimmern fehlt für so einen XXL-Boliden jedoch schlichtweg der Platz.

Man sollte meinen, dass die Kundschaft kritisch bleibt, aber der Technology-Push treibt die Pixelrate und damit die Gerätepreise kontinuierlich nach oben. Doch die „Deutschen glauben an das falsche Fernseher-Versprechen“ (Heuzeroth, 2018):

Deutsche Verbraucher greifen zunehmend zu Fernsehern, die die vierfache HD-Auflösung darstellen können. Dabei gibt es kaum Inhalte für die Geräte. Und die Hersteller treiben den Irrsinn jetzt noch eine Stufe weiter.

Auch im Bereich der Mediennutzung deutet damit vieles darauf hin, dass ein rechtlicher Rahmen zur Begrenzung des Energieverbrauchs der aus der Mediennutzung folgenden Mengen an energieintensivem Internettraffic erforderlich ist, da Effizienz als Ergebnis von absatzorientiertem Marktverhalten der Anbieter und ihrer Kunden nicht zu erwarten ist. Schon heute werden zahlreiche Streamingangebote in Auflösungen angeboten und verkauft, die letztlich weder angezeigt noch vom menschlichen Auge aufgelöst werden können.

Während sowohl Dietzel (2020) als auch Feldmann et al. (2020) betonen, dass sich das Internet gerade aufgrund seiner dezentralen Struktur in der Corona-Pandemie als sicher und belastbar erwies, wirft die Episode der Reduzierung des Traffic durch Mediennutzung und Gaming im Frühjahr 2020 die Frage auf, wieso die Aufforderung der EU, das Internet so effizient wie möglich zu nutzen, eigentlich erfolgen muss? Effiziente Nutzung von großen Infrastrukturen mit immensem Energieverbrauch sollte die selbstverständliche Regel und nicht die Ausnahme sein. Die Reaktion der Branche zeigt deutlich, dass ihr Effizienz weniger wichtig ist als Kundenansprüche, auch wenn sich diese im Bereich kaum noch wahrnehmbarer Qualitätsunterschiede bewegen.

Um den Verbraucher besser über Energie- und Klimakosten des medialen Konsums aufzuklären, wären zudem verpflichtende und öffentlich zugängliche Unternehmensberichte mit standardisierten Kennzahlen empfehlenswert. Auch Labels auf den Geräten hinsichtlich erzeugter Emissionen oder einem Reparierbarkeits-Index, wie seit Januar 2021 in Frankreich eingeführt (Heinz & Meyer, 2020), sind geeignete Maßnahmen zur Verbraucheraufklärung.

Fazit: Im Rahmen der Untersuchungen zur **privaten Internet- und Medien-Nutzung** konnte gezeigt werden, dass zwar durch energieeffizientere Geräte ein Rückgang der CO₂ Emissionen im Betrieb der einzelnen Geräte erfolgt. Haushalte, die über einen hohen Neuanschaffungszyklus verfügen, verlagern allerdings die Einsparungen während der Gerätenutzung in die Herstellphase der Geräte. Die ermittelten Reduzierungen der Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase werden zudem

stark durch die Entwicklungen im deutschen Strommix getrieben. Aufgrund des kontinuierlichen Anstiegs der Nutzungsintensität digitaler Medien und Anwendungen kommt es außerdem zu einem stetigen Zuwachs des Datenvolumens in der IKT-Infrastruktur, was hier wiederum zu einem erhöhten Energiebedarf und zunehmenden THG-Emissionen führt. Insbesondere in den Rechenzentren sind die THG-Emissionen hoch.

Publikation

Schramm, S. (2021). Klimawirkung des privaten Internet- und Medienkonsums – Exemplarisch dargestellt an sechs Modellhaushalten unterschiedlicher Lebenswelten. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.

5.4 Automatisierung und Digitalisierung der Produktion

5.4.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Die Untersuchung von „Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen“ im Rahmen von CliDiTrans untersucht den Einsatz von Industrie 4.0 und Digitalisierung zur Beschleunigung der Diffusion von Umweltinnovationen durch Effekte der Kostensenkung wie auch der Qualitätssteigerung.

Um diese Ziele zu erreichen, werden Fallstudien zu drei unterschiedlichen Produktkomplexen aus verschiedenen Branchen erarbeitet: Elektroautos, das serielle Sanieren und die kommunale Wärmeplanung. Zwei der Fallstudien zu Elektroautos und dem seriellen Sanieren fokussieren auf die Wirkung von Industrie 4.0 (Clausen, 2021), die Untersuchung zur kommunalen Wärmeplanung fragt nach dem Potenzial zur Beschleunigung der Verbreitung einer digitalen Dienstleistung durch die gezielte Entwicklung einer Software- und Cloudplattform (Clausen, Benne & Hinterholzer, 2021).

Die Fallstudien bauen dabei auf der Annahme auf, dass real klimaentlastende Innovationen untersucht werden. Insoweit sind für jede Fallstudie drei Teilanalysen erforderlich.

- (1) Es ist zunächst erforderlich, den Nachweis einer zu erwartenden Klimaentlastung durch die untersuchten Produkte zu führen.
- (2) Es sind die durch Industrie 4.0 erschließbaren Potenziale für die Kostensenkung und zur Nutzensteigerung und qualitativ abzuschätzen.
- (3) Und es ist die Wirkung der digital optimierten Angebote auf die Diffusion des jeweiligen Produktes zu beschreiben und zu bewerten.

Abschließend sind die Fallstudien mit Blick auf ihren Erfolg zur Beschleunigung der Diffusion und auch mit Blick auf die eingesetzten Förderstrategien zu bewerten. Die Analyse verfolgt dabei das Ziel, beispielhaft und plausibel den Beitrag der Digitalisierung zu Kostensenkung sowie zur Nutzensteigerung und zum Umwelt- und Klimaschutz herauszuarbeiten und damit für Außenstehende verständlich zu machen. Sie verfolgt nicht das Ziel, diese Effekte abschließend quantitativ zu bewerten.

5.4.2 Methodik

Um eine Grundlage für die Bearbeitung des Themas zu schaffen, wurde zunächst eine Vorstudie angefertigt, in der am Beispiel von Elektromobilität und dem seriellen Sanieren die Wirkung der Digitalisierung im Kontext von Umweltinnovationen exemplarisch dargestellt wurde (Clausen, 2019a). In der Projektplanung war danach vorgesehen, eine Liste von wesentlichen Schlüsselinnovationen der Transformation zur Nachhaltigkeit zusammenzustellen und für drei beispielhafte Innovationen die theoretischen Potenziale des Beitrags von Industrie 4.0 zu durchleuchten. Dies Vorgehen wurde verworfen, da schon die Vorstudie deutlich gemacht hatte, dass die verschiedenen Ansätze des Industrie-4.0-Konzeptes von der Produktentwicklung über Produktionsplanung und Produktion bis zu Logistik und Service die im Rahmen des Arbeitspaketes möglichen Aufwände weit überschritten hätten. Zudem wäre dieses Vorgehen für die Erreichung der Ziele des Arbeitspaketes nur bedingt geeignet gewesen, da zur Bewertung von theoretischen Potenzialanalysen weiterhin nur theoretische Überlegungen zur Verfügung gestanden hätten. Es fiel daher die Entscheidung, durch eine umfangreiche Literaturanalyse und begleitende Interviews die Rolle der Digitalisierung in den Produktionssystemen der Elektromobilität und des seriellen Sanierens nachzuzeichnen und soweit möglich nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ zu bewerten.

5.4.3 Ergebnisse

Es gelingt in beiden Fallstudien sowohl zu Elektroautos wie auch zum seriellen Sanieren zu zeigen, dass die beiden neuen Technologien einen erheblichen Beitrag zu einer nachhaltigen Energiezukunft leisten und auch, dass die Digitalisierung neue Produktqualitäten ermöglicht und dass die automatisierte Produktion unter Nutzung von Industrie 4.0 einen erheblichen Beitrag dazu leistet, eine flexible Produktion zu ermöglichen.

Das Elektroauto

Die Rolle der Digitalisierung in der Entwicklung der Elektromobilität erstreckt sich zunächst auf die Produktqualität des modernen Automobils mit zahlreichen Fahrerassistenzsystemen wie auch mit zahlreichen Funktionen der digitalen Motor- und Batteriesteuerung. Unabhängig vom Automobil und seinen Funktionen ist der Wechsel vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb aber so einschneidend, dass sich nicht nur der Antrieb des Fahrzeugs ändert, sondern Hersteller wie Volkswagen grundsätzliche neue Plattformen für die Konstruktion zahlreicher Modelle entwickelt haben, im Falle von Volkswagen den sogenannten modularen Elektrobaukasten (MEB). Die Produktion dieser von Grund auf neu konstruierten Fahrzeuge findet in genauso von Grund auf neu geplanten Fabriken statt. Diese Fabriken sind hoch automatisiert und, da Automatisierung eine digitale Steuerung erfordert, auch stark digitalisiert.

Auf Basis des seit dem Jahr 2020 stark gewachsenen Angebots an elektrischen Automodellen zahlreicher Hersteller skaliert die Elektromobilität gegenwärtig schnell und erfolgreich. Dieses kann auf zwei Faktoren zurückgeführt werden:

Zum einen wird zumindest in Europa gegenwärtig eine **Politik** praktiziert, die in letzter Konsequenz zum Verschwinden des Verbrennungsmotors führen muss. Weder die CO₂-Emissionsgrenzwerte noch die geplanten Vorschriften von „Euro 7“ werden sich zu wettbewerbsfähigen Preisen mit einem Verbrennungsmotor erfüllen lassen. Auch die chinesische Politik priorisiert seit Jahren den Elektroantrieb, wenn auch hier eher Gründe der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen Automobilbranche eine Rolle spielen (Beigang & Clausen, 2017). Die Politik treibt so in verschiedenen Regionen der Welt die Synchronisation von Innovation (Elektroantrieb) und Exnovation (Verbrenner) planmäßig voran.

Zum anderen ist, u.a. getrieben durch die europäische und chinesische Politik, die kapitalstarke deutsche Automobilbranche gegenwärtig dabei, **Investitionen** in dreistelliger Milliardenhöhe in die Transformation des Antriebskonzeptes für PKW zu pumpen. Als unterstützender Faktor wirken hohe staatliche Förderungen, die lange Zeit in China und auch heute noch in Norwegen, den Niederlanden, den USA und seit 2020 auch in Deutschland den Kauf von Elektrofahrzeugen attraktiver machen (Beigang & Clausen, 2017; Clausen, 2017, 2019b; Perleberg & Clausen, 2017). Neben der Entwicklung der neuen Elektromodelle, die aufgrund einer vergleichsweise niedrigen Zahl an Komponenten perspektivisch preiswert gefertigt werden können, fließen die hohen Summen auch in den Aufbau einer von Grund auf neuen Fertigungs-Infrastruktur. Beide Faktoren zusammen führen zu deutlich sinkenden Herstellkosten.

Das serielle Sanieren

Der Prozess des seriellen Sanierens umfasst eine Reihe von Ablaufschritten (Energiesprung, TNO & RIGO, 2015; Schmelcher, 2019, S. 18):

- Ein elektronisches Aufmaß durch einen 3D-Scan vermisst jedes zu sanierende Gebäude auf den Millimeter genau und dokumentiert dabei neben der Lage von Fenstern und Türen z.B. auch einen in der Dicke um wenige Millimeter schwankenden Putz.
- Die Daten werden in ein System des Building Information Management (BIM) übertragen. Mit Hilfe von Computer Aided Design werden die Einzelteile für jedes Gebäude effizient und schnell konstruiert und deren Kosten berechnet. In der Gruppe der für das Verfahren gut geeigneten Gebäude ist es so möglich, Aufmaß und Erstellung eines Angebotes innerhalb weniger Tage zu realisieren.
- Die Daten der Einzelteile werden nach Auftragserteilung in die vernetzte Fertigung übertragen und dort je nach Ausstattung der produzierenden Firmen teilweise unter Einsatz von automatischen Maschinen (CAM) von Produktionsrobotern hergestellt. In die Wandelemente werden Fenster, Türen und technische Teile wie z.B. Leitungen bereits in der Fabrik und unter optimalen Bedingungen passgerecht eingebaut. Die Dachelemente werden mit fertig montierten PV-Elementen geliefert.
- Die industriell vorgefertigten Teile werden auf der Baustelle innerhalb weniger Tage montiert. Ziel ist ein Abschluss der Vor-Ort-Arbeiten innerhalb von zwei Wochen.

Das auf Industrie 4.0 basierende Sanierungskonzept des seriellen Sanierens soll perspektivisch zu günstigen Kosten und hoher energetischer Qualität sowie aufgrund industrieller Vorfertigung kurzen Bauzeiten von nur ca. zehn Tagen führen (Energiesprung et al., 2015). Nur in den Niederlanden aber sind bisher eine größere Anzahl Gebäude dieser Art fertiggestellt und primär in den Niederlanden macht das serielle Sanieren im Laufe der Zeit günstigere Baukosten möglich.

In Bezug auf die Förderung des **seriellen Sanierens** durch politische Maßnahmen wie auch auf Investitionen durch die Industrie sieht es in Deutschland aber deutlich anders aus als im Feld der Elektromobilität.

Eine **Politik**, die schlechtere Sanierungsmethoden aus dem Markt drängt oder auch nur generell die Unterhaltung sanierter Wohngebäude finanziell oder ordnungsrechtlich attraktiver macht als die Unterhaltung unsanierter Gebäude, existiert bestenfalls in Ansätzen. Eine Politik, die die Synchronisation von Innovation und Exnovation vorantreibt, fehlt komplett.

Aber auch wesentliche **Investitionen** der Unternehmen bleiben aus. Da es der Baubranche seit Jahren gut geht und sie auch nur wenig unter Krisen leidet sowie auch angesichts vollständig fehlender energiepolitischer Anreize, steigt in diesem Sektor weder die Produktivität noch treibt sie die für eine Transformation zur Klimaneutralität zentralen Investitionen voran. Stattdessen gelingt es der Branche immer wieder erfolgreich, die Förderung von Wohnungsbau als notwendig erscheinen zu lassen, obwohl die für jede Person verfügbare Wohnfläche in 2019 mit 47 m² einen historischen Maximalwert erreicht hat und die Frage der Verfügbarkeit von Wohnraum damit relativ eindeutig als Verteilungs- und nicht als Mengenproblem identifiziert werden kann.

Mit Blick auf die zentrale Forschungsfrage, ob sich Auswirkungen der Digitalisierung durch Industrie 4.0 auf den Ausstoß von Treibhausgasen plausibel zeigen lassen, ist die Antwort vergleichsweise klar: Die Digitalisierung durch Industrie 4.0 schafft hierzu Möglichkeiten, reicht aber als Technology Push allein nicht aus. Das Beispiel der Automobilantriebe zeigt, welche Wirkungen von neuen Produkten und einem hohen Automatisierungsgrad durch eine einschlägige Rechtssetzung entfesselt werden können. Hier kann auch gezeigt werden, dass die Digitalisierung eng mit dem hohen Automatisierungsgrad verwoben ist und unzweifelhaft neue Qualitäten des Produktes ermöglicht, wie beispielsweise eine intelligente Batteriesteuerung oder das autonome Fahren. Die gegenwärtig zu beobachtenden sinkenden Herstellkosten der Elektroautos sind aber primär auf neue, einfacher konstruierte Produkte wie auch den hohen Automatisierungsgrad neuer Fabriken zurückzuführen. Zwar ist beides ohne Digitalisierung nicht zu erzielen, aber eine singuläre, Kosten senkende Wirkung der Digitalisierung lässt sich nicht erkennen.

Das Beispiel des seriellen Sanierens dagegen zeigt, dass eine durch den Staat nicht geforderte (und auch nur wenig geförderte) Baubranche sämtliche Möglichkeiten, an der dringend notwendigen digitalen Transformation der Baubranche zu arbeiten und den durch sie verursachten Energieverbrauch zu senken, verschlafen kann. Das Vertrauen auf Technologieoffenheit und Fortschritte durch Technology Push erweist sich auch hier wieder als vergeblich.

Insgesamt verspricht Industrie 4.0 Beschleunigung, Flexibilisierung, Ressourceneffizienz und Kostensenkung wie auch bessere Arbeitsbedingungen. Ein Beitrag zu Flexibilisierung und Beschleunigung

von Prozessen kann dabei plausibel dargelegt werden (Hohwieler, 2017). Ob aber die Vielfalt an Maßnahmen von Industrie 4.0 wirklich menschliche Arbeitszeit spart und diese nicht nur in andere Bereiche verlagert (z.B. Softwareentwicklung) oder ob durch Industrie 4.0 wirklich ein wesentlicher Beitrag zu sinkenden Produktionskosten geleistet wird, wäre noch nachzuweisen. Das Projekt Intelligente Werkstattproduktion dämpft die Erwartungen (Kuhrke & Kühnapfel, 2017, S. 7): *„Industrie 4.0 verspricht neben mehr Vernetzung, Transparenz und Intelligenz vor allem eine hohe Flexibilität in der Produktion. Zukünftig soll es möglich sein, bei stabilen Kosten auf verschiedene Produkt- und Prozessvarianten schnell und reibungsarm umzustellen. Im Idealfall sollen selbst Klein- und Kleinstaufträge, bis hin zur Losgröße eins, realisierbar werden, ohne dass die Produktionskosten und -zeiten stark ansteigen.“* Sollte durch Industrie 4.0 die Wettbewerbsfähigkeit durch Erhöhung der Qualität oder Senkung der Kosten der jeweiligen Produkte erfolgreich verbessert werden und dies dazu führen, dass ggf. umweltentlastende Produkte Marktanteile gewinnen und umweltbelastende Produkte Marktanteile verlieren, hätte dies im Kontext der Transformation zur Nachhaltigkeit erhebliche Bedeutung. Die beiden Fallstudien konnten aber eine eindeutige Wirkung der Digitalisierung allein nur auf den Faktor Produktqualität hin nachweisen. Eine eindeutige und direkte Wirkung der Digitalisierung auf die Kosten ließ sich nicht nachweisen.

Fazit: Das Nebeneinander beider Fallstudien zeigt, dass die innovativen Kräfte der Wirtschaft nicht allein durch die technischen Möglichkeiten freigesetzt wurden, sondern dass es hierzu eines klaren regulativen Anreizes bedurfte. Die seit 2015 immer deutlichere Wirkung der Politik auf die Entwicklung schadstoffarmer und energieeffizienter Fahrzeuge basiert auf starken ordnungsrechtlichen Vorschriften der Europäischen Union wie auch in letzter Zeit auf den zahlreichen Ankündigungen von Nationalstaaten, die einen Verkaufsstopp von Verbrenner-Fahrzeugen meist im Jahr 2030 betreffen. Die Fallstudien zeigen nicht, dass die Möglichkeiten der Digitalisierung eigendynamisch zu mehr Klimaschutz führen.

Publikationen

Clausen, J. (2019). Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen. CliDiTrans Werkstattbericht 3-4. Berlin: Borderstep Institut.

Clausen, J. (2021). Digitalisierung der Produktion. Elektroautos und serielles Sanieren – CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.

6 Eine volkswirtschaftliche Perspektive auf Klimaschutzwirkungen der Digitalisierung der Produktion

6.1 Einleitung und Methodik

Bisherige wissenschaftliche Studien zeigen anhand von Analysen auf Branchenebene, also mit aggregierten Daten, dass digitale Technologien tatsächlich mit einer Verbesserung der Energieeffizienz einhergehen können (Bernstein & Madlener, 2010; Collard et al., 2005; Schulte et al., 2016).

Allerdings weisen die Studien auch einige Schwächen auf. Die jüngsten Daten, die in diesen Studien verwendet wurden, stammen aus dem Jahr 2007 und ignorieren daher das schnelle Tempo der Digitalisierung in den 2010er Jahren. Außerdem ist es mit der fortschreitenden Digitalisierung einfacher, energieintensive Produktionsprozesse ins Ausland zu verlagern. Die gemessenen positiven Auswirkungen der Digitalisierung sind also möglicherweise nur auf die IKT-induzierte Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen ins Ausland zurückzuführen und nicht auf tatsächliche Energieeinsparungen. Die in Kapitel 6.2 dargestellten Analysen nehmen sich dieser Probleme an, indem sie aktuellere Daten für den Zeitraum 2000-2014 verwenden und unter Zuhilfenahme von World Input Output Tables, den Energieverbrauch der gesamten Wertschöpfungskette einbeziehen, um die Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen ins Ausland zu kontrollieren.

Ein weiterer Nachteil der bestehenden Studien liegt darin begründet, dass aggregierte Daten keine Berücksichtigung von Dynamiken innerhalb von Branchen erlauben. Aus diesem Grund bleibt es in bisherigen Untersuchungen unbeobachtet, ob digitale Technologien wirklich zu Verbesserungen innerhalb von Unternehmen führen, oder ob einfach energieineffiziente Unternehmen aus dem Markt austreten und neue, IKT-intensive Unternehmen hinzukommen. Auch lassen sich mit aggregierten Daten firmenspezifische Unterschiede zum Beispiel innerhalb von Sektoren nur schwer untersuchen. Beides lässt sich jedoch mit mikroökonomischen Daten analysieren. Die Ergebnisse davon sind in Kapitel 6.3 dargestellt.

Grundlage für die ökonometrischen Analysen in beiden Kapiteln ist folgendes Modell:

$$\Delta S_{Eit} = \beta_{EE} \Delta \ln \left(\frac{P_E}{P_L} \right)_{it} + \beta_{EK_{SW}} \Delta \ln \left(\frac{K_{IKT}}{Y} \right)_{it} + \beta_{EK_N} \Delta \ln \left(\frac{K_N}{Y} \right)_{it} + \beta_{EY}^* \Delta \ln Y_{it} + \delta_{Eti} t_{it} + \Delta u_{it}$$

Hierbei handelt es sich um eine Translog-Kostenfunktion, die erstmals in dieser Art von Schulte et al. (2016) verwendet wurde. Die abhängige Variable in dem Modell ist der Anteil der Energiekosten an den variablen Kosten (S_{Eit}) für ein Unternehmen bzw. eine Branche i zum Zeitpunkt t . Dieser ist abhängig von folgenden Variablen: dem Energiepreis relativ zum Preis für Arbeit ($P_E/P_{L_{it}}$), der IKT-Kapitalintensität⁴ (K_{IKT}/Y_{it}), der materiellen Kapitalintensität (K_N/Y_{it}), sowie des Outputs (Y) eines

⁴ Für die Analyse auf Branchenebene werden Daten für das gesamte IKT-Kapital (Software, Hardware, Kommunikationsausrüstung) herangezogen, auf Unternehmensebene aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Software-Kapital.

Unternehmens bzw. einer Branche. Für die ökonometrische Schätzung des Modells wird ein First-Difference-Ansatz verwendet.

$$\epsilon_{EK_{IKT}} = \frac{\partial \ln (E/Y)}{\partial \ln K_{IKT}} = \frac{\beta_{EK}}{S_E} - S_{K_{IKT}}$$

Um den relativen Zusammenhang zwischen IKT-Kapital und Energieeffizienz zu bestimmen, die Elastizität ($\epsilon_{EK_{IKT}}$), wird die relative Veränderung der Energiekosten innerhalb der variablen Kosten ermittelt. Hierzu wird der geschätzte Koeffizient für die IKT-Kapitalintensität ($\beta_{EK_{IKT}}$) durch den Anteil der Energiekosten an den variablen Kosten geteilt. Dieser Wert wird korrigiert durch die Veränderung der absoluten variablen Kosten durch IKT-Kapital ($S_{K_{IKT}}$).

6.2 Klimaschutzpotenziale der digitalen Transformation - die Rolle der Produktionsverlagerung⁵

6.2.1 Zielsetzung und Fragestellungen

„Digitale Technologien sind eine entscheidende Voraussetzung für die Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele des Grünen Deals in vielen verschiedenen Sektoren (Europäischer Green Deal; European Commission, 2019). Dieser Satz aus dem European Green Deal zeigt die großen Hoffnungen, die die Politik in die Digitalisierung setzt, um die Klimaziele zu erreichen. Einerseits scheinen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) oder allgemeiner die Digitalisierung eine potenzielle Quelle für Energieeffizienzverbesserungen zu sein (siehe z.B. GeSI & Accenture Strategy, 2015), da IKT die Quantität und Qualität von Informationen verbessern könnte, was zu einer Verringerung des relativen Energieverbrauchs führen würde (z. B. intelligente Fertigung). Andererseits benötigt die IKT selbst Energie, und Verbesserungen der Leistung pro Watt könnten den höheren Bedarf an Rechenleistung in einer zunehmend digitalisierten Welt nicht ausgleichen. A priori ist der Nettoeffekt der Digitalisierung daher unklar.

Wie bereits zuvor erwähnt, deuten Ergebnisse zu Untersuchungen auf Branchenebene darauf hin, dass digitale Technologien tatsächlich mit einer Verbesserung der Energieeffizienz im Verarbeitenden Gewerbe einhergehen können. Die bisherigen Studien nutzen jedoch nur Daten bis maximal zum Jahr 2007. Die digitalen Technologien und damit ihr möglicher Einfluss auf die Energienachfrage haben sich seither grundlegend verändert. Zudem besteht die Möglichkeit, dass die Digitalisierung die Verlagerung energieintensiver Prozesse ins Ausland erleichtert und der gemessene Zusammenhang zwischen IKT und Energienachfrage eventuell dadurch getrieben wird.

Mit unserem selbst erstellten länder- und branchenübergreifenden Paneldatensatz für neun OECD-Länder und 28 Branchen für den Zeitraum 2000 bis 2014, welcher auch Daten zur Energienachfrage

⁵ Dieses Kapitel ist eine Zusammenfassung von (Niebel, Böning & Axenbeck, 2021), Climate Protection Potential of Digital Transformation - the Role of Production Relocation. Mimeo“.

entlang der globalen Wertschöpfungskette enthält, können wir nun zwei Fragestellungen untersuchen:

- (1) Gehen digitale Technologien auch in neuerer Zeit mit einer Verbesserung der Energieeffizienz einher?
- (2) Gibt es Anzeichen, dass der gefundene Zusammenhang zwischen Digitalisierung und Energieverbrauch in Teilen tatsächlich eher eine Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen ins Ausland ist, welche durch IKT erleichtert wird?

6.2.2 Ergebnisse zu Untersuchungen auf Branchenebene

In der bevorzugten Spezifikation mit länderspezifischen Branchen-Dummies zeigt sich, wie in früheren Untersuchungen auf Branchenebene, ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen einem Anstieg der IKT-Kapitalintensität und der Energienachfrage. Ein stärkerer Einsatz digitaler Technologien in einer Branche geht auch in neuerer Zeit mit einer Verbesserung der Energieeffizienz einher. Ein Anstieg des IKT-Kapitals um ein Prozent ist mit einem Rückgang der Energienachfrage um 0,110% verbunden. Die Ergebnisse sind jedoch insgesamt weniger robust als in Studien mit älteren Daten. Zudem unterscheidet sich auch die Größe des Effekts. Der hier gemessene Rückgang des Energiebedarfs, entspricht nur noch etwa der Hälfte des von Schulte et al. (2016) gemessenen Wertes von 0,235%.

Der zweite Teil unserer Untersuchung befasst sich mit der Fragestellung, ob der gemessene positive Effekt der Digitalisierung (im Sinne eines geringen Energiebedarfs) nicht doch nur eine Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen ins Ausland ist. Diese Möglichkeit besteht, da durch IKT Produktionsverlagerungen bzw. weltweit verteilte Produktionsketten leichter realisiert werden können. Wir untersuchen dies, indem wir uns wie zuvor auf neun OECD-Länder konzentrieren, aber den Energieverbrauch der Zwischenprodukte, der für die Herstellung der Endprodukte dieser neun Länder verwendet wird, entlang der Wertschöpfungskette von 43 Ländern plus des synthetischen Landes "Rest der Welt" (ROW) berücksichtigen. Auf diese Weise erhalten wir einen Näherungswert für die Nettoauswirkungen der Digitalisierung in diesen neun OECD-Ländern auf den Energieverbrauch unter Einbeziehung der gesamten Wertschöpfungskette. Mit diesen angepassten Daten weisen unsere ökonometrischen Schätzungen auf Branchenebene jedoch keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen IKT und Energiebedarf mehr auf.

Fazit: Unsere empirische Analyse bestätigt, dass der negative Zusammenhang zwischen IKT und Energienachfrage von Schulte et al. (2016) auch für den jüngeren Zeitraum 2000-2014 gilt. Allerdings ist der Effekt deutlich geringer und die Ergebnisse sind weniger robust als in früheren Studien.

In den Spezifikationen, die den Energiebedarf der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigen, findet sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen IKT und Energienachfrage mehr. Dies kann als Hinweis dafür gedeutet werden, dass ein Teil der positiven Effekte von IKT auf die Energienachfrage auf die Verlagerung von energieintensiven Produktionsprozessen und nicht auf Effizienzsteigerungen durch IKT zurückzuführen sind. Letztere Ergebnisse für die Einbeziehung des Energiebedarfs der gesamten Wertschöpfungskette sollten jedoch vorsichtig interpretiert werden, da

nicht auszuschließen ist, dass die insignifikanten Ergebnisse auf die mangelnde Datenqualität hinsichtlich der Energiepreise und Energiemengen entlang der Wertschöpfungskette zurückzuführen sind.

6.3 Klimaschutzpotenziale von digitalisierten Produktionsprozessen: Mikroökonomische Evidenz⁶

6.3.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Ein Großteil des Energieverbrauchs weltweit und auch in Deutschland geht auf das Verarbeitende Gewerbe zurück. In Deutschland beispielsweise war dieses im Jahr 2019 für ca. 28% des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich. Dieser Wert ist vor allem darauf zurückzuführen, dass viele Produktionsprozesse in zugehörigen Branchen, wie z.B. der Stahl- oder der Zementindustrie, sehr energieintensiv sind.

Gleichzeitig werden der digitalen Transformation vor allem im Verarbeitenden Gewerbe sehr hohe Klimaschutzpotenziale zugeschrieben. Beispielsweise schätzt der Branchenverband der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche, Bitkom e.V., dass sich durch eine schnell voranschreitende Digitalisierung 61 Megatonnen CO₂ im Jahr 2030 einsparen lassen würden. Big Data und Künstliche Intelligenz ermöglichen eine Verringerung der Fehlerquote und eine verbesserte Abschätzung der Produktnachfrage. Auch erlauben Simulationsmethoden und 3D-Druck, den Ressourcen- und Energieverbrauch während der Produktentwicklung drastisch zu senken.

Doch es stellt sich die Frage, ob diese beschriebenen Möglichkeiten auch in der Breite von Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe genutzt werden. In diesem Kapitel wird deshalb untersucht, ob sich die Klimaschutzpotenziale von digitalen Technologien tatsächlich auch in der Anwendung auf Unternehmensebene zeigen.

Mithilfe von administrativen Unternehmensdaten, die im deutschen Verarbeitenden Gewerbe erhoben wurden, wird untersucht:

- (1) Ob digitale Technologien nicht nur auf Branchen, sondern auch auf Unternehmensebene tatsächlich mit einer Verbesserung der Energieeffizienz einhergehen?
- (2) Ob unterschiedliche Klimaschutzpotenziale mit gewissen Unternehmensmerkmalen im Zusammenhang stehen?

Laut aktuellem Kenntnisstand ist dies die erste großzahlige empirische Analyse zu Klimaschutzpotenzialen der digitalen Transformation, die sich auf die mikroökonomische, also auf die Firmenebene, fokussiert. Sie basiert auf administrativen Daten von 28.734 Unternehmen aus dem deutschen Verarbeitenden Gewerbe (AFiD-Daten). Der Datensatz in diesem Arbeitspaket ist von besonders hoher

⁶ Dieses Kapitel ist eine Zusammenfassung von „Axenbeck, J., & Niebel, T. (2021). Climate Protection Potentials of Digitalized Production Processes: Microeconomic Evidence? Energy, COVID, and Climate Change, 1st IAEE Online Conference, June 7-9, 2021. International Association for Energy Economics, 2021.“

Qualität, da für Unternehmen die Meldung an die statistischen Ämter verpflichtend ist und Angaben auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Die Daten liegen als unbalanciertes Panel vor, das zwischen 2009 und 2017 erhoben wurde. In der Analyse wird der Digitalisierungsgrad eines Unternehmens anhand von Softwarekapitalstöcken approximiert, die mithilfe von Investitionsinformationen berechnet wurden.

Um zu überprüfen, ob Ergebnisse auf Unternehmensebene sich von Analysen mit aggregierten Daten unterscheiden, wurde die in Kapitel 6.1 beschriebene Translog-Kostenfunktion mikroökonomisch geschätzt, welche auf Branchenebene bereits etabliert ist.

6.3.2 Ergebnisse zu Untersuchungen auf Unternehmensebene

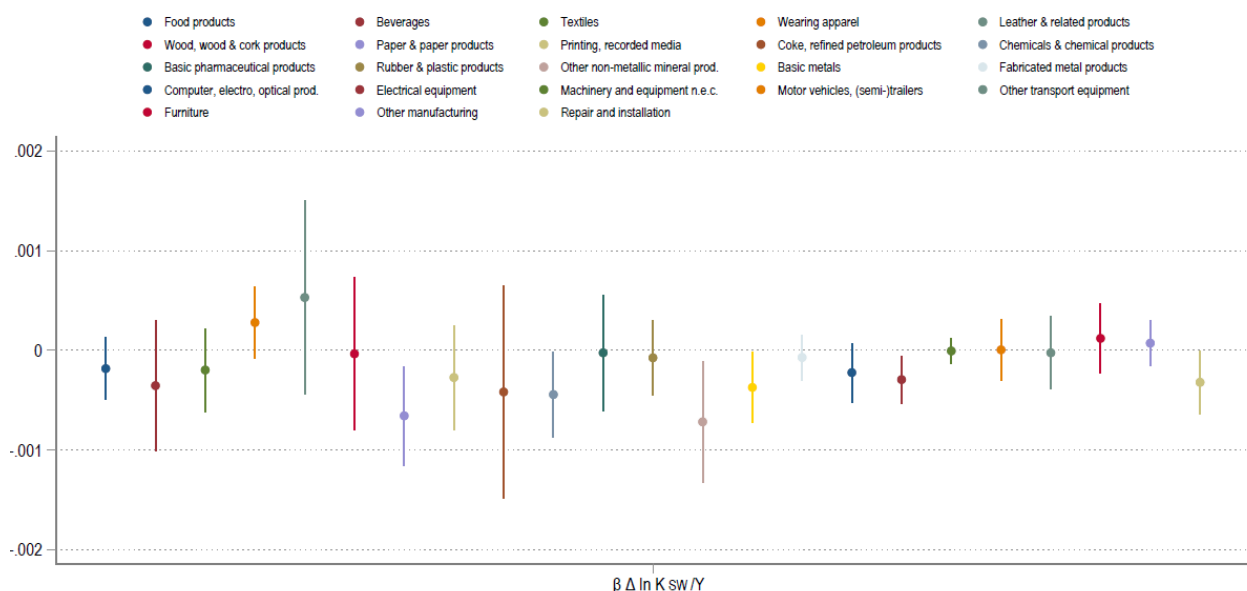
Die Ergebnisse bestätigen einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen einem Anstieg der Softwarekapitalintensität und einer Verbesserung der Energieeffizienz auf Unternehmensebene. Die Zusammenhänge sind jedoch viel geringer als in Schätzungen, die aggregierte Daten verwenden. Laut Translog-Modell geht in der präferierten Schätzung ein Anstieg des Softwarekapitals um 1% bei durchschnittlichen Energiekosten mit einer Verbesserung der Energieeffizienz um 0,007% einher. Auf Sektorebene messen Schulte et al. (2016), wie schon zuvor genannt, 0,235%. Die Elastizität auf Unternehmensebene ist folglich viel geringer. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes sind robust gegenüber verschiedenen Einschränkungen der Stichprobe und Änderungen in der Berechnung des Softwarekapitalstocks. Die prozentualen Veränderungen, die mithilfe des Schulte-Modells berechnet wurden, lassen sich in absolute Veränderungen übersetzen. Hier ergibt sich, dass über den beobachteten Zeitraum hinweg jeder Euro, der in Software investiert wurde, im Schnitt ungefähr 0,03 Euro an Energiekosten eingespart hat – ein Wert, der ein Kalkül bestätigt, das sich auch in Unternehmensbefragungen finden lässt. Es ist zwar ein erfreulicher Nebeneffekt, dass sich durch digitale Technologien im geringen Umfang Energiekosten einsparen lassen, doch Energieeinsparungen sind nur selten Motivation für Digitalisierungsmaßnahmen (Bertscheck et al., 2020).

Hinsichtlich der geringen Effektstärke ist zu betonen, dass digitale Technologien zwar nur mit leichten Verbesserungen der Umweltbilanz im Zusammenhang stehen, es durch sie aber auch nicht zu einer Erhöhung der Energieintensität kommt. Dies wäre durchaus möglich, denn digitale Technologien verbrauchen selbst elektrische Energie (Strom). Da sie dies tun, ist außerdem zu vermuten, dass sie den Energiemix beeinflussen, dass sie also den elektrischen Energieverbrauch weniger verringern als den nicht-elektrischen Energieverbrauch (Schulte et al., 2016). Um dies zu überprüfen, wurde das Modell einzeln jeweils für den elektrischen und für den nicht-elektrischen Energieverbrauch angepasst. Es zeigt sich tatsächlich, dass kein Rückgang des Stromverbrauchs und nur ein Rückgang des nicht-elektrischen Energieverbrauchs zu beobachten ist. Die Reduktion des gesamten Energieverbrauchs scheint durch eine Verbesserung der Effizienz nicht-elektrischer Energie getrieben zu sein.

Um Unterschiede zwischen Unternehmen zu überprüfen, wurde das Modell einzeln für verschiedene Branchen auf 2-Steller Ebene (NACE Klassifikation) angepasst. Die geschätzten Koeffizienten für die Softwarekapitalintensität sind in Abbildung 8 dargestellt. Die farbigen Punkte markieren jeweils den geschätzten Koeffizienten und die dazugehörigen Linien kennzeichnen die Konfidenzintervalle. Es zeigt sich, dass die Schätzkoeffizienten für die meisten Sektoren zwar negativ jedoch nicht signifikant

sind. Nur die Koeffizienten für die Sektoren „Herstellung von Papier und Pappe sowie Waren daraus“ (paper and paper products), „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“ (chemical and chemical products), „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ (other non-metallic mineral products), „Metallerzeugung und -bearbeitung“ (basic metals), „Herstellung von elektrischen Ausrüstungen“ (electrical equipment) sowie für den Sektor „Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen“ (repair and installation) sind signifikant und negativ. Das heißt, zu den Sektoren mit deutlicheren Energieeffizienzverbesserungen gehören die Industrien mit dem höchsten Energieverbrauch (Destatis, 2021). Digitale Technologien scheinen folglich genau dort, wo sich eine hohe Energiemenge einsparen lässt, am stärksten mit Einsparungen im Zusammenhang zu stehen, wenn auch in einem geringen Maße. Diese Vermutung wird in einer weiteren Analyse bestätigt, in der die Unternehmen anhand ihrer Energieintensität in Quartile eingeteilt wurden. Hier zeigt sich, je höher die durchschnittliche Energieintensität in einem Quartil ist, desto stärker ausgeprägt ist auch die relative Energieeffizienzverbesserung. Dennoch sind Einsparungen in den beiden oberen Quartilen immer noch gering.

Abbildung 8: Unterschiede zwischen Unternehmen anhand der Branchenzugehörigkeit auf 2-Steller Ebene (NACE Klassifikation)



Anmerkung: Abgebildet sind die geschätzten Koeffizienten der Softwarekapitalintensität nach Branchenzugehörigkeit.

Fazit: Digitale Technologien können zwar auch auf Unternehmensebene im Verarbeitenden Gewerbe mit einer statistisch signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz in Verbindung gebracht werden, jedoch ist die Effektgröße so gering, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Klimaschutzpotentiale von digitalen Technologien, falls vorhanden, im betrachteten Zeitraum genutzt wurden. Weiterhin zeigen die Ergebnisse Effektunterschiede auf, die ein wenig Hoffnung geben: Effizienzverbesserungen stehen vor allem mit nicht-elektrischer Energie, die meist auf fossilen Brennstoffen basiert, sowie mit Unternehmen und Branchen, die besonders viel Energie verbrauchen, im

Zusammenhang. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes sind für politische Entscheidungstragende, Beratende und Unternehmen relevant, die eine Verbesserung der Energieeffizienz innerhalb von Unternehmen anstreben und Synergien zwischen digitalen Technologien und Energieeffizienzverbesserungen innerhalb von Unternehmen anhand von bisherigen Studien überschätzen.

Publikationen

Axenbeck, Janna und Thomas Niebel (2021), Climate Protection Potentials of Digitalized Production Processes: Microeconomic Evidence?, ZEW Discussion Paper No. 21-105, Mannheim.

Niebel, T., Axenbeck, J. & Böning, J. (2021). Climate Protection Potential of Digital Transformation - the Role of Production Relocation. Mimeo.

7 3-Säulen-Politik einer klimafreundlichen Digitalisierung

Die Ergebnisse des Vorhabens CliDiTrans zeigen deutlich, dass die Digitalisierung bislang nicht von alleine zu mehr Klimaschutz führt. Eine aktive Politik für Klimaschutz durch Digitalisierung ist damit definitiv erforderlich. Der Digitalisierung muss eine Richtung gegeben werden, nämlich hin zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit. Die Hoffnung auf eine eigendynamische Erschließung dieses Potenzials ist trügerisch und konnte in den im Rahmen von CliDiTrans untersuchten Fällen nicht bestätigt werden.

Im Folgenden wird das Konzept einer „3-Säulen-Politik einer klimafreundlichen Digitalisierung“ vorgestellt, die sich an den Befunden des Projektes orientiert. Die drei Säulen

- „Klimaschutzwirkungen transparent machen“,
- „Synchronisation von Diffusion und Exnovation“ und
- „Grundsätzliche Spielregeln“

müssen gemeinsam und konsequent umgesetzt werden, um der Digitalisierung eine neue Richtung zu geben und deutlich mehr Klimaschutz und Nachhaltigkeit mit Digitalisierung zu erreichen.

CliDiTrans-Befund Nr. 1: „Klimaschutzwirkung der Digitalisierung bisher oft unbekannt“

Als wesentliches Ergebnis des Projektes CliDiTrans kann festgehalten werden, dass die Wirkungszusammenhänge zwischen Digitalisierung und Klimaschutz sehr komplex sind und aus diesen Gründen ein Automatismus „Mehr Digitalisierung = Mehr Klimaschutz“ nicht gegeben ist. Die Potenziale, durch Digitalisierung THG-Emissionen einzusparen, werden regelmäßig massiv überschätzt, weil komplexe Systemveränderungen durch die Digitalisierung nicht oder nur unzureichend mit betrachtet werden. Denn neue digitale Lösungen führen häufig zu substantiellen Veränderungen von Akteurslandschaften und Verhaltensmustern. Dynamisches Wachstum, neue Ressourcenbedarfe, Verlagerungs- und Reboundeffekte können die Folge sein. Am Beispiel Homeoffice konnte gezeigt werden, dass vermutete Einsparpotenziale oft durch eine Vielzahl solcher Wirkungen konterkariert werden können. Auch andere Beispiele wie Flatsharing oder das stationsungebundene Carsharing zeigen, dass durch nicht erwartete Veränderungen von Verhaltensmustern und Akteurslandschaften gewünschte bzw. erwartete Nachhaltigkeitswirkungen nicht eintreten.

1. Säule einer Politik für eine klimafreundliche Digitalisierung: „Klimabelastungen und Klimaschutzwirkungen transparent machen“

Nur systematische wissenschaftliche Untersuchungen mit hohem Anspruch sind geeignet, Transparenz in unser Bild von den Wirkungen der Digitalisierung zu bringen. Für die systematische Erschließung der Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung ist es wichtig, die Entwicklung und Verbreitung neuer, digitaler Produkte und Verhaltensweisen wissenschaftlich zu begleiten und über ihre Wirkungen und Nebenwirkungen empirisch abgesicherte Erkenntnisse zu schaffen. Bisherige Untersuchungen zu den Klimawirkungen der Digitalisierung sind häufig aufgrund unterschiedlicher Abgrenzungen und Systematiken wenig vergleichbar (Bieser et al., 2020). Die bisher existierenden Studien zu den Klimaschutzpotenzialen der Digitalisierung ermitteln häufig mit vergleichsweise geringem Aufwand

auf Basis wenig belastbarer Annahmen theoretische Reduktionspotenziale, ohne dabei die komplexen Systemzusammenhänge zu berücksichtigen.

Um eine handlungsleitende Wirkung zu erreichen, ist eine wirksame Kommunikation der Forschungsergebnisse in Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit von hoher Bedeutung.

Konkret werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen, um die Transparenz zu erhöhen:

- Ein kontinuierliches Monitoring der Entwicklung der Klimawirkungen der Digitalisierung und ein regelmäßiges Screening hinsichtlich neuer relevanter Entwicklungen stellt die Grundlage für eine Politik der klimafreundlichen Digitalisierung dar. Hierzu müssen methodische Grundlagen weiterentwickelt und inhaltliche Abgrenzungen harmonisiert werden. Ausgehend von denjenigen Sektoren, von denen die größten Klimaschäden ausgehen, sollten wissenschaftlich die jeweils neuen, digitalen Lösungen identifiziert und priorisiert werden, die versprechen, zur Lösung der Probleme beizutragen. Mit Blick auf das hohe Innovationstempo der IT-Branche ist es notwendig, Monitoring- und Screening-Projekte zur Erhebung mindestens alle zwei bis vier Jahre durchzuführen.
- Die Entwicklung und Verbreitung neuer, digitaler Lösungen, denen eine hohe wirtschaftliche, soziale oder ökologische Relevanz zugeschrieben wird, sollte durch unabhängige, öffentlich finanzierte Forschung zu Klimawirkungen und -nebenwirkungen begleitet werden. Hierbei muss der Fokus auf systemischen Zusammenhängen, möglichen Veränderungen in Verhaltensmustern und Akteurslandschaften wie auch auf Reboundeffekten liegen. Je nach Bedeutung der jeweiligen Probleme und Lösungen ist auch hier eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich, weil sich Wirkungen, Nebenwirkungen und Reboundeffekte im Laufe der Zeit z.B. durch Veränderung der digitalen Lösungen oder durch neue Nutzengruppen verändern können.
- Durch wirksame Aktivitäten der Wissenschaftskommunikation sollten Politik und Wirtschaft, aber auch die Nutzenden über die Klimawirkungen neuer digitaler Lösungen informiert werden. Nur so können realistische und faktenbasierte Einschätzungen der zu erwartenden Veränderungen Grundlage von Entscheidungen über das individuelle oder das kollektive Verhalten werden.
- Auch in Schulen, Universitäten und der Weiterbildung müssen die direkten und indirekten Wirkungen der Digitalisierung auf die Gesellschaft und den Klimaschutz mehr Eingang finden. Öffentlich zugreifbare Studien und Vorträge wie auch kostenlos verfügbare Lehreinheiten können diese Ausbildungsformen unterstützen.

ClidiTrans-Befund Nr. 2: „Langsame Verbreitung nachhaltiger digitaler Lösungen“

Digitale Lösungen ermöglichen an vielen Stellen deutliche Verbesserungen der Energie- und Ressourceneffizienz. Die mikro- und makroökonomischen Analysen des Projekts ClidiTrans zeigen jedoch, dass digitale Technologien in der Vergangenheit nur zu geringfügigen Verbesserungen der Energieintensität in nahezu allen Wirtschaftsbranchen und -sektoren geführt haben. Häufig verhindern tradierte Verhaltensweisen, bestehende Geschäftsmodelle, regulative Rahmenbedingungen u.ä. die Durchsetzung der neuen Lösungen. Die langsame Verbreitung nachhaltiger digitaler Lösungen sowie die mangelnde Ablösung klimaschädlicher Alternativen ist ein Grund dafür, dass die immer wieder

prognostizierten Klimaschutzwirkungen der Digitalisierung (Climate Group & GeSI, 2008; GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & Boston Consulting Group, 2009; GeSI & The Boston Consulting Group, 2012) bisher so nicht realisiert werden konnten.

Im Rahmen des Projektes CliDiTrans konnte mit der Substitution von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen eine IKT-Anwendung identifiziert werden, deren Verbreitung nachweislich ein hohes Potenzial hat, den Verbrauch fossiler Brennstoffe in der Mobilität zu reduzieren und damit zum Klimaschutz beizutragen. Der Stromverbrauch aus der Nutzung von Videokonferenzen ist im Vergleich sehr niedrig und der Klimaschutzbeitrag erheblich.

Durch das Beispiel konnte aber herausgearbeitet werden, dass eine eigendynamische Verbreitung der Anwendung seit der erstmaligen Markteinführung um das Jahr 2000 bis zum Jahr 2019 nicht stattfand. Die Anwenderinnen und Anwender wurden vielmehr durch die Einschränkungen der Corona-Pandemie faktisch dazu gezwungen, das Tool zu nutzen. Dabei stellte sich heraus, dass die Nutzung von Videokonferenzen erhebliche Vorteile bietet und es ist wahrscheinlich, dass Videokonferenzen auch nach Ende der Pandemie in erheblichem Umfang weiter genutzt werden und sowohl die Kommunikation von Teams verbessern, als auch Geschäftsreisen ersetzen. Ohne einen starken ordnungsrechtlichen Impuls (in Form des Lockdowns) wäre ein solcher Effekt jedoch möglicherweise auf kaum absehbare Zeit nicht eingetreten.

Auch im Rahmen der Analyse der Nutzung von Cloud-Lösungen konnte gezeigt werden, dass sich nachhaltige, klimafreundliche Lösungen oft nur langsam verbreiten. Es existieren auch hier vielfältige Pfadabhängigkeiten durch vorhandene Geschäftsmodelle, mangelndes Wissen, geringe Veränderungsbereitschaft bzw. -fähigkeit, u.ä. Ein weiteres Beispiel für eine nur langsame Verbreitung klimafreundlicher digitaler Lösungen zeigt die smarte Gebäudetechnik im Bereich der Heizenergie (Beucker & Hinterholzer, 2019). Gebäudeautomationssysteme können nachweislich die Energieeffizienz der Heizung deutlich erhöhen (Hintemann et al., 2021). Aber auch Gebäudeautomationssysteme verbreiten sich in der wenig innovativen Bau- und Wohnungsbranche langsam und mit einer Erschließung der Klimaschutzpotenziale ist vermutlich nur im Fall einer ihre Verbreitung fördernden ordnungsrechtlichen Regelung zu rechnen.

2. Säule einer Politik für eine klimafreundliche Digitalisierung:

„Diffusionsförderung durch Synchronisation von Innovation und Exnovation“

Die Verbreitung digitaler Technologien, die nachweislich hohe Klimaschutzpotenziale bieten, muss gezielt vorangetrieben werden. Erfolg ist aber hier oft davon abhängig, dass tradierte nicht nachhaltige Verhaltensweisen aus dem Alltag zurückgedrängt werden. So lange die Sichtweise überwog, dass es absolut unhöflich ist, zu einem Geschäftsbesuch nicht anzureisen, sondern nur einen Videotermin anzubieten, so lange konnten solche Reisen nicht durch Videokonferenzen ersetzt werden. Und so lange aus nicht rationalen Gründen am eigenen Betrieb von Servern festgehalten wird oder eine Einführung von smarten Lösungen für Hausbesitzende unattraktiv ist, so lange werden sich auch in diesen Bereichen die nachhaltigen Lösungen nur langsam verbreiten. Eine Politik zur Verbreitung neuer nachhaltiger digitaler Lösungen muss daher immer von zwei Seiten ansetzen: Zurückdrängen alter,

nicht nachhaltiger Produkte und Verhaltensweisen und dadurch Platz schaffen für die Förderung des Neuen. Das Instrumentarium hierzu umfasst:

- Klare Preissignale wie die CO₂-Abgabe, eine Citymaut oder besonders hohe Steuern auf Kerosin, um alte und nicht nachhaltige Produkte und Verhaltensweisen teuer und damit unattraktiv zu machen.
- Die gezielte Forschung, wie die Diffusion umweltfreundlicher digitaler Innovationen gefördert werden kann, sollte unterstützend durchgeführt werden. Hier besteht zum einen weiterer Forschungsbedarf im Rahmen der Förderung umweltfreundlicher digitaler Innovationen im Allgemeinen und zum anderen konkreter Forschungsbedarf zur Identifikation von Förderbedarfen und Abbau von organisatorischen und regulativen Hemmnissen bei als besonders relevant identifizierten Innovationen. Auch die Forschung zu Exnovation umweltschädlicher Produkte und Verhaltensweisen sollte verstärkt werden.
- Eine bedeutende Rolle für die schnellere Verbreitung nachhaltiger Lösungen und für das Zurückdrängen klimaschädlicher Alternativen kann die öffentliche Beschaffung einnehmen. Staatliche Institutionen auf Ebene von Bund, Ländern und Gemeinden sind für einen hohen Anteil der gesamten Nachfrage nach digitalen Leistungen in Deutschland verantwortlich und haben damit einen erheblichen Einfluss auf den Markt.

CLiDiTrans-Befund Nr. 3: „Digitale Lösungen können dem Klimaschutz entgegenwirken“

Eine Dienstleistung ist nicht allein dadurch nachhaltig, dass sie digital erfolgt. Zur Bewertung neuer digitaler Lösungen sollte zunächst einmal der betriebs- wie auch volkswirtschaftliche Nutzeffekt dem materiellen und energetischen Aufwand gegenübergestellt werden. Lösungen, bei denen kein sinnvolles Verhältnis von Aufwand zum erzielten Nutzen vorliegt, sollten möglichst verhindert werden.

So ist z.B. der Nutzen der Kryptowährung Bitcoin umstritten, weil sie durch die Anonymität des Systems grundsätzlich geeignet ist, illegale Geldgeschäfte möglich zu machen und damit das nächste Paradies für Offshore Konten darzustellen (Orosz & Damm, 2021). Demgegenüber verschlingt das sogenannte Mining der Kryptowährung riesige Mengen an Strom. Der zusätzliche Energiebedarf für das Bitcoin Mining wird aktuell weltweit in der Größenordnung von 50 bis 200 TWh pro Jahr geschätzt (CBECI, 2022; Digiconomist, 2022; Kamiya, 2019; Rauchs et al., 2018; Stoll, Klaaßen & Gellersdörfer, 2019). Neben einem u.U. sogar negativen volkswirtschaftlichen Nutzwert steht damit ein riesiger materieller und energetischer Aufwand.

Auch hinsichtlich des Nutzens/Aufwandsverhältnis von ultrahocho aufgelösten Videos in verschiedenen Anwendungsfällen können sicherlich kritische Überlegungen angestellt werden. Diesbezüglich schlägt die umweltpolitische Digitalagenda des BMU (2020, S. 56) die Prüfung von Vorgaben zur Begrenzung des Energieverbrauchs durch Medien-Streaming vor:

Prüfung verpflichtender Vorgaben, um hohe Datenraten beim Streaming von Medien (insbesondere Videos) zu begrenzen; Diskussion mit Plattformbetreibern mit Blick auf mögliche

Ansätze zur Selbstverpflichtung bzw. Regulierung im Rahmen der deutschen EU-Ratspräsidentschaft.

Zu Fragen des schrankenlosen Wachstums und zu Reboundeffekten kann das Projekt CliDiTrans letztlich aber nur wenig Aussagen machen. Zudem ist die Frage der umweltpolitischen Vertretbarkeit einzelner Dienstleistungen letztlich normativ und damit schwer und meist nicht eindeutig zu beantworten. Aber es kann hier deutlich darauf hingewiesen werden, dass die Forschung zu diesem Themenbereich nicht der Digitalwirtschaft und ihren Thinktanks überlassen werden darf. Vielmehr ist es Aufgabe der Politik und der Wissenschaftsverwaltung, die wesentlichen Fragen zu untersuchen und politische Konsequenzen für eine geeignete Rahmensetzung abzuleiten.

3. Säule einer Politik für eine klimafreundliche Digitalisierung: „Grundsätzliche Spielregeln“

Der Verbrauch von Material, Energie und auch die Datennutzung sollten grundsätzlich mit einem sinnvollen Nutzen/Aufwandsverhältnis erfolgen. Nun ist die Diskussion um Nutzen, Bedarf oder gar Bedürfnis ausgesprochen facettenreich und angesichts der Fülle neuer digitaler Angebote im weltweiten Netz kaum sinnvoll zu führen. Auch staatliche Eingriffe, wie die Prüfung verpflichtender Vorgaben zu Datenraten beim Streaming (BMU, 2020, S. 56), dürften umstritten sein und ihre Festlegung ist auch angesichts zu erwartender weiterer technischer Entwicklungen nicht einfach.

Wie kann nun bei allen Unsicherheiten die Klimaschutzpolitik mit dieser Situation umgehen? Sie will weder das von der Digitalisierung getriebene Wachstum zu stark bremsen noch die Innovativität der Branche stoppen. Es geht vielmehr darum, beides in zukunftsfähige, nachhaltige Bahnen zu lenken.

- Als no-regret Maßnahme bietet sich auch hier an, den Verbrauch von Energie und Material gemäß der tatsächlichen sozialen und ökologischen Kosten zu bepreisen. Die innovative und schnelllebige Digitalbranche wird in den meisten Fällen gut in der Lage sein, auf solche Preissignale zügig zu reagieren und besonders effiziente und klimafreundliche Lösungen anzubieten.
- Das Beispiel von Kryptowährungen zeigt eine besondere Herausforderung bei der Setzung von Spielregeln für die Digitalwirtschaft. Die Kombination der hohen Innovationsdynamik und einem globalen Markt macht regulative Eingriffe nur bedingt möglich. Nachdem China im Jahr 2021 Krypto-Mining verboten hat, wurden innerhalb kürzester Zeit die Mining-Kapazitäten in andere Länder – insbesondere nach Kasachstan – verlagert (CBECI, 2021). Spielregeln sollten daher in vielen Fällen auf europäischer oder internationaler Ebene gesetzt werden. Ein sinnvolles Instrument ist hier sicher auch die internationale Normung und Standardisierung. Grundsätzlich sollte sich die Politik nicht scheuen, in klimaschädliche Entwicklungen der Digitalwirtschaft wirksam und ggf. auch ordnungsrechtlich einzugreifen. Letztlich zeigt der Fall aber die enge Verknüpfung von Säule 1 „Klimaschutzwirkungen transparent machen“ mit der Säule 3 „Grundsätzliche Spielregeln“. Denn nur auf Basis fundierter Erkenntnisse lassen sich grundlegende Spielregeln entwickeln und festlegen.

Helfen können hier auch klare und verbindliche Zielsetzungen der Klima- und Digitalpolitik: Nachhaltigkeit und Klimaschutz müssen zum Mainstream der Digitalisierung werden. Sie müssen in die DNA der Digitalbranche und auch der Digitalpolitik hinein. Unsere Gesellschaft sollte mittlerweile aus der

Phase heraus sein, wo sie große Branchen und klimabelastende Massenphänomene unbedacht entstehen lassen kann, ohne auf deren Beitrag zur Wohlfahrt und ihre klimapolitische Verantwortung zu achten.

8 Quellen

- Albrecht, T., Deffner, J., Dunkelberg, E., Hirschl, B., van der Land, V., Stieß, I. et al. (2010). *Zum Sanieren motivieren. Eigenheimbesitzer zielgerichtet für eine energetische Sanierung gewinnen*. Berlin. Zugriff am 20.5.2021. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/268679327_Zum_Sanieren_motivieren_Eigenheimbesitzer_zielgerichtet_fur_eine_energetische_Sanierung_gewinnen
- Andrae, A. S. G. (2019). Predictions on the way to 2030 of internet's electricity use. *ResearchGate*. Zugriff am 11.3.2019. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/331564853_Predictions_on_the_way_to_2030_of_internet's_electricity_use
- Andrae, A. S. G. & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Bautsch, M. (2017). *Digitale bildgebende Verfahren*. Wikibooks. Zugriff am 23.5.2021. Verfügbar unter: https://de.wikibooks.org/wiki/Digitale_bildgebende_Verfahren
- Beigang, A. & Clausen, J. (2017). *Elektromobilität in China. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 23.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-fallstudie_emobilitaet_china_borderstep.pdf
- 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. (2004). De-materialising and re-materialising: digital technologies and the environment. *Futures*, 36(8), 903–920. Elsevier.
- Bernstein, R. & Madlener, R. (2010). Impact of disaggregated ICT capital on electricity intensity in European manufacturing. *Applied Economics Letters*, 17(17), 1691–1695.
- Bertscheck, I., Erdsiek, D., Niebel, T., Schuck, B., Seifried, M., Ewald, J. et al. (2020). *Schwerpunktstudie Digitalisierung und Energieeffizienz - Erkenntnisse aus Forschung und Praxis*. Berlin: BMWi. Zugriff am 19.5.2021. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/schwerpunktstudie-digitalisierung-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=12
- Beucker, S. & Hinterholzer, S. (2019). *CO2-Minderungspotentiale im Wohngebäudesektor durch Gebäudeautomation*. Berlin: Borderstep Institut.
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S. & Hilty, L. (2020). *Klimaschutz durch digitale Technologien*. Berlin, Zürich: Borderstep Institut, Universität Zürich.
- Bitkom & Accenture. (2021). *Klimaeffekte der Digitalisierung*. Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Klimaschutz>
- Bizo, D. (2019). *The Carbon Reduction Opportunity of Moving to Amazon Web Services*. Zugriff am 20.12.2019. Verfügbar unter: <https://d39w7f4ix9f5s9.cloudfront.net/e3/79/42bf75c94c279c67d777f002051f/carbon-reduction-opportunity-of-moving-to-aws.pdf>
- BMU. (2020). *Umweltpolitische Digitalagenda*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff am 25.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/digitalagenda/>

- Carbon Trust. (2021). *Homeworking report*. London. Zugriff am 17.7.2021. Verfügbar unter: https://www.vodafone-institut.de/wp-content/uploads/2021/06/CT_Homeworking-report-June-2021.pdf
- CBECI. (2021, Oktober 13). Geographic shift - News & insight. *Cambridge Judge Business School*. Zugriff am 6.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.jbs.cam.ac.uk/insight/2021/geographic-shift/>
- CBECI. (2022). Methodology - Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Zugriff am 6.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.cbeci.org/methodology/>
- CEET. (2013). *The Power of Wireless Cloud. An Analysis of the Energy Consumption of Wireless Cloud*. Melbourne. Zugriff am 18.9.2014. Verfügbar unter: <http://www.ceet.unimelb.edu.au/publications/downloads/ceet-white-paper-wireless-cloud.pdf>
- Clausen, J. (2017). *Elektromobilität in Kalifornien. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 23.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-fallstudie_emobilitaet_kalifornien_borderstep_0.pdf
- Clausen, J. (2019a). *Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen*. CliDiTrans Werkstattbericht 3-4. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 20.11.2019. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/09/IndustrieVierNull-CliDiTrans20190912.pdf>
- Clausen, J. (2019b). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Elektromobilität Norwegen*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. (2021). *Digitalisierung der Produktion. Elektroautos und serielles Sanieren - CliDiTrans Werkstattbericht*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J., Benne, M. & Hinterholzer, S. (2021). *Wärmeplanung als Instrument der Wärmewende. Digitale Unterstützung als Schlüssel zur Verbreitung in der Verwaltung*. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J., Beucker, S. & Hintemann, R. (2013). *CO₂-Einsparung durch IKT und in der IKT in Hessen Entwicklungspotenziale und Handlungsoptionen Studie im Auftrag der Aktionslinie Hessen-IT*. Berlin. Zugriff am 10.5.2014. Verfügbar unter: www.hessen-it.de/mm/mm001/CO2_Final.pdf
- Clausen, J., Biengen, K., Bowry, J. & Schmitt, M. (2017). The Five Shades of Sharing. Zur Ökonomie des Teilens. *Ökologisches Wirtschaften*, (4), 30–34.
- Clausen, J. & Fichter, K. (2019). The diffusion of environmental product and service innovations: Driving and inhibiting factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 64–95. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.003>
- Climate Group & GeSI. (2008). *SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI). Zugriff am 9.7.2014. Verfügbar unter: <https://www.greenbiz.com/sites/default/files/document/Smart-2020-Report.pdf>
- Collard, F., Fève, P. & Portier, F. (2005). Electricity consumption and ICT in the French service sector. *Energy Economics*, 27(3), 541–550.
- Court, V. & Sorrell, S. (2020). Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption. *Environmental Research Letters*, 15(4), 043001. IOP Publishing.

- Destatis. (2020). *Erwerbstätige, die von zu Hause aus arbeiten*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Destatis. (2021). Energieverwendung in der Industrie 2020. *Statistisches Bundesamt*. Zugriff am 13.10.2021. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/_Grafik/_Interaktiv/energieverwendung-industrie.html
- Deutsche Energie-Agentur GmbH. (2017). Dena-Metastudie: Analyse Der Mit Erhöhtem It-Einsatz Verbundenen Energieverbräuche Infolge Der Zunehmenden Digitalisierung. Verfügbar unter: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9232_dena-Metastudie_Analyse_IT-Einsatz_Energieverbraeuche_Digitalisierung.pdf
- Deutscher Bundestag. (2019). *Digitalisierung und Nachhaltigkeit Positionspapier. Ausschussdrucksache 19(26)39*. Berlin.
- Dietzel, C. (2020). *Warum das Netz hält: Die Internetinfrastruktur in Zeiten von COVID-19*. Frankfurt am Main: DE-CIX. Zugriff am 22.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.de-cix.net/Files/4a22a4ef28f33c3b648cbb99e69e3658a12cab6d/Warum-das-Netz-haelt---Die-Internetinfrastruktur-in-Zeiten-von-COVID-19.pdf>
- Digiconomist. (2022). Bitcoin Energy Consumption Index. *Digiconomist*. Zugriff am 6.1.2022. Verfügbar unter: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Dolls, M. & Mehles, J.-C. (2021). *Wie beeinflusst die Corona-Pandemie die Wohnortpräferenzen? Evidenz aus einer großangelegten Umfrage in Deutschland*. München. Zugriff am 19.7.2021. Verfügbar unter: <https://www.ifo.de/publikationen/2021/aufsatz-zeitschrift/wie-beeinflusst-die-corona-pandemie-die-wohnortpraeferenzen>
- Energiesprong, TNO & RIGO. (2015). *Transition Zero*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://energiesprong.org/wp-content/uploads/2017/04/EnergieSprong_UK-Transition_Zero_document.pdf
- European Commission. (2019). *The European Green Deal*. Nr. COM(2019) 640 final. European Commission COM (2019) 640 final. Zugriff am 11.2.2020. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF
- Feldmann, A., Gasser, O., Lichtblau, F., Pujol, E., Poese, I., Dietzel, C. et al. (2020). The Lockdown Effect: Implications of the COVID-19 Pandemic on Internet Traffic. *Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference* (S. 1–18). Gehalten auf der IMC '20: ACM Internet Measurement Conference, Virtual Event USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/3419394.3423658>
- Fior Market Research. (2021, Mai 2). Global Virtual Desktop Infrastructure Market Is Expected to Reach USD 38.41 billion by 2027 : Fior Markets. *GlobeNewswire News Room*. Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <http://www.globenewswire.com/news-release/2021/02/05/2170486/0/en/Global-Virtual-Desktop-Infrastructure-Market-Is-Expected-to-Rreach-USD-38-41-billion-by-2027-Fior-Markets.html>
- Friedrichsen, N. (2017). *Kurzstudie – Potenziale der Digitalisierung für den Klimaschutz*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Zugriff am 19.5.2021. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2017/WP12-2017_Kurzstudie-Potenziale-der-Digitalisierung-fuer-den-Klimaschutz.pdf
- GeSI & Accenture Strategy. (2015). *#SMARTer 2030: ICT Solutions for the 21st Century Challenges*. Global e-Sustainability Initiative. Zugriff am 25.4.2016. Verfügbar unter: http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report2.pdf

- GeSI & Boston Consulting Group. (2009). *SMART 2020 Addendum Deutschland: Die IKT-Industrie als treibende Kraft auf dem Weg zu nachhaltigem Klimaschutz*. Studie. Bonn: BCG - Boston Consulting Group. Zugriff am 24.6.2014. Verfügbar unter: <http://www.bcg.de/documents/file50237.pdf>
- GeSI & Deloitte. (2019). *Digital with purpose - Delivering a smarter 2030*. Brussels.
- GeSI & The Boston Consulting Group. (2012). *SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future*. Global e-Sustainability Initiative & BCG.
- Greenpeace. (2020, August 20). Presseerklärung: Homeoffice kann über 5 Millionen Tonnen CO2 sparen. *Greenpeace*. Zugriff am 17.7.2021. Verfügbar unter: <https://www.greenpeace.de/presse/presseerklarungen/homeoffice-kann-ueber-5-millionen-tonnen-co2-sparen>
- Heinz, R. & Meyer, K. (2020). DER FRANZÖSISCHE REPARATURINDEX, 9.
- Heuzeroth, T. (2018, September 4). Die Deutschen glauben an das falsche Fernseher-Versprechen. *Welt.de*. Zugriff am 23.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article181414830/4K-und-8K-Immer-mehr-UHD-Fernseher-doch-die-Inhalte-fehlen.html>
- Hilty, L. & Bieser, J. (2017). *Opportunities and risks of digitalization for climate protection in Switzerland*. Zürich.
- Hilty, L. M., Arnfalk, P., Erdmann, L., Goodman, J., Lehmann, M. & Wäger, P. A. (2006). The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability—a prospective simulation study. *Environmental Modelling & Software*, 21(11), 1618–1629. Elsevier.
- Hintemann, R. (2020). *Rechenzentren 2018. Effizienzgewinne reichen nicht aus: Energiebedarf der Rechenzentren steigt weiter deutlich an*. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/03/Borderstep-Rechenzentren-2018-20200324rev.pdf>
- Hintemann, R. (2021). *Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an*. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf
- Hintemann, R. & Clausen, J. (2016). *Materialband 8: Internet und Cloud Computing. Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 2.10.2016. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/09/8_UBA-Materialband-Internet-PUB_final.pdf
- Hintemann, R., Clausen, J., Beucker, S. & Hinterholzer, S. (2021). *Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen*. Studie für Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag der Hessischen Staatskanzlei, Hessische Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung. Wiesbaden.
- Hintemann, R. & Fichter, K. (2015). Energy demand of workplace computer solutions - A comprehensive assessment including both end-user devices and the power consumption they induce in data centers. *EnviroInfo & ICT4S, Conference Proceedings (Part 1)* (S. 165–171). Gehalten auf der Third International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S 2015), Copenhagen. <https://doi.org/10.2991/ict4s-env-15.2015.19>
- Hintemann, R. & Iffländer, S. (2021). *ClDiTrans Werkstattbericht 3-1: Virtualisierung und Cloud Computing - Chance für mehr Klimaschutz?*. Berlin, Oldenburg: Borderstep Institut.

- Hohwieler, E. (2017, September 8). Intelligente Fertigungstechnologien in der Digital Integrierten Produktion. Gehalten auf der Technologietag.
- Horner, N. C., Shehabi, A. & Azevedo, I. L. (2016). Known unknowns: Indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11(10), 103001. IOP Publishing.
- Icha, P. (2020). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 -2019*. Nr. Climate Change 13/2020. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt. Zugriff am 19.11.2020. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf
- IEA. (2019). *Energy Efficiency 2019*. Paris: Internationale Energieagentur. Zugriff am 19.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2019>
- Inkwood Research. (2020). Europe Virtual Desktop Infrastructure Market Trends, Size 2019-2027. Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.inkwoodresearch.com/reports/europe-virtual-desktop-infrastructure-market/>
- Kamiya, G. (2019, Juli 5). Bitcoin energy use: mined the gap. Zugriff am 25.10.2019. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/july/bitcoin-energy-use-mined-the-gap.html>
- KPCB. (2016). *Internet Trends 2016*. Zugriff am 18.10.2016. Verfügbar unter: <http://www.kpcb.com/internet-trends>
- KPMG & Bitkom. (2021). *Cloud-Monitor 2021*. Verfügbar unter: <https://home.kpmg/de/de/home/themen/overview/cloud-computing.html>
- Kuhrke, B. & Kühnapfel, M. (2017). *iWePro. Intelligente sKoooperation und Vernetzung für die Werkstattfertigung*. Berlin: Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK. Zugriff am 16.5.2021. Verfügbar unter: https://www.projekt-iwepro.de/content/dam/ipk/iwepro/de/Dokumente/iWePro-Broschuere_2017_W1.pdf
- Lange, S., Banning, M., Berner, A., Kern, F., Lutz, C., Peuckert, J. et al. (2019). *Economy-Wide Rebound Effects: State of the art, a new taxonomy, policy and research gaps*. Berlin, Osnabrück, Göttingen.
- Lange, S., Pohl, J. & Santarius, T. (2020). Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecological Economics*, 176, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>
- Leismann, K., Schmitt, M., Rohn, H. & Baedeker, C. (2012). *Nutzen statt Besitzen. Auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Konsumkultur*. Berlin. Zugriff am 28.5.2015. Verfügbar unter: https://www.boell.de/sites/default/files/Endf_NutzenStattBesitzen_web.pdf
- MarketsandMarkets. (2017). Desktop Virtualization Market Size, Share and Global Market Forecast to 2022. Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/desktop-virtualization-market-137215705.html>
- Masanet, E., Shehabi, A., Ramakrishnan, L., Liang, J., Ma, X., Walker, B. et al. (2014). *The Energy Efficiency Potential of Cloud-Based Software: A US Case Study*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Mokhtarian, P. (2009). If telecommunication is such a good substitute for travel, why does congestion continue to get worse? *Transportation Letters*, 1(1), 1–17.

- Mordor Intelligence. (2020). Desktop Virtualization Market | Growth, Trends, and Forecast (2020-2025). Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/desktop-virtualization-market-industry>
- Niebel, T., Böning, J. & Axenbeck, J. (2021). *Climate Protection Potential of Digital Transformation - the Role of Production Relocation*. Mimeo.
- Orion Market Research Private Limited. (2020, Februar). Germany Virtual Desktop Infrastructure (VDI) Market 2019-2025. Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5013381/germany-virtual-desktop-infrastructure-vdi>
- Orosz, M. & Damm, C. (2021, Februar 21). Die dunkle Seite des gehypten Bitcoin: Darum droht der Krypto-Markt das nächste Paradies für Offshore-Konten zu werden. *Business Insider*. Zugriff am 30.7.2021. Verfügbar unter: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/finanzen/bitcoin-kriminalitaet-ein-problem-doch-dimension-schwer-zu-greifen-a/>
- Perleberg, S. & Clausen, J. (2017). *Elektromobilität in den Niederlanden. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 23.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-fallstudie_emobilitaet_niederlande_borderstep.pdf
- Porter, M. E. & van der Linde, C. (1995). Green and Competitive: Ending the Stalemate. *Harvard Business Review*, 120–134.
- Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G. C., Recanatini, M. & Zhang, B. Z. (2018). 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Available at SSRN 3306125.
- Santarius, T., Pohl, J. & Lange, S. (2020). Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? *Sustainability*, 12(18), 7496. <https://doi.org/10.3390/su12187496>
- Schmelcher, S. (2019, September 14). Energiesprung Deutschland. Serielles Sanieren Hannover, 14.09.2017. Gehalten auf der Regionales Meeting zum seriellen Sanieren in Hannover, Hannover.
- Schmitt, M., Bienge, K., Clausen, J., Bowry, J., Howell, E. & Rohn, H. (2017). *Nutzen statt Besitzen – eine ressourcenleichte Konsumalternative: Mythos oder Realität? Ergebnisse der Analyse ausgewählter Sharing-Angebote*. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schneider, J. (2009). *Geschäftsreisende 2009. Strukturen, Einstellungen, Verhalten*. Bonn. Zugriff am 2.6.2016. Verfügbar unter: https://www.infas.de/fileadmin//user_upload/PDF/IUBH_infas_Gesch%C3%A4ftsreisende_2009.pdf
- Schulte, P., Welsch, H. & Rexhäuser, S. (2016). ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries. *Environmental and Resource Economics*, 63(1), 119–146.
- Stettes, O. & Voigtländer, M. (2021). *Büroflächenabbau bleibt die Ausnahme, IW Kurzbericht 6/2021*. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft.
- 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*. Berlin: Fraunhofer IZM und Borderstep Institut. Verfügbar unter: <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. & Gellersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*.

- Technavio. (2020). Virtual Desktop Infrastructure Market by Application, End-user, Type, and Geography - Forecast and Analysis 2020-2024. Zugriff am 17.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.technavio.com/report/virtual-desktop-infrastructure-market-industry-analysis>
- The Shift Project. (2019). *LEAN ICT- Towards digital sobriety*. Zugriff am 18.4.2019. Verfügbar unter: <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/>
- VDR. (2009). *VDR-Geschäftsreiseanalyse 2009*. Frankfurt. Zugriff am 2.6.2016. Verfügbar unter: https://www.vdr-service.de/fileadmin/der-verband/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/vdr_gra2009.pdf
- VDR. (2018). *VDR-Geschäftsreiseanalyse 2018*. Frankfurt am Main. Zugriff am 22.1.2019. Verfügbar unter: https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2018_GRA.pdf
- VDR. (2020). *VDR-Geschäftsreiseanalyse 2020*. Frankfurt am Main. Zugriff am 18.1.2021. Verfügbar unter: https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/Veroeffentlichung_VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2019_Webinar.pdf
- WBGU. (2019). *Hauptgutachten: Unsere gemeinsame digitale Zukunft*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Zugriff am 20.1.2020. Verfügbar unter: <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/unsere-gemeinsame-digitale-zukunft>
- Wieloch, J. (2021, März 9). 8K TV ab 1300 Euro: Lohnt ein Fernseher-Upgrade von 4K? *TechStage*. Zugriff am 23.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.techstage.de/ratgeber/8k-tv-ab-1300-euro-lohnt-ein-fernseher-upgrade-von-4k/cf8395v>