

Hessische Staatskanzlei

Hessische Ministerin für
Digitale Strategie und Entwicklung

HESSEN



Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen

Dr. Ralph Hintemann | Dr. Jens Clausen | Dr. Severin Beucker | Simon Hinterholzer



digitales.hessen



Liebe Leserin, lieber Leser,

die Digitalisierung hilft uns, Strom und Energie zu sparen. Eine intelligente Straßenbeleuchtung schaltet sich zum Beispiel nur dann an, wenn sich Fußgänger, Autos oder Fahrräder nähern. Digitale Anwendungen sind aber nicht von sich aus nachhaltig. Im Durchschnitt hat eine Stunde Videostreaming im Mobilfunknetz ähnlich hohe Kohlendioxid-Emissionen wie ein Kleinwagen bei einem Kilometer Autofahrt. Das liegt an den großen Rechenzentren, die das Internet betreiben und den Telekommunikationsnetzen, die die Datenmengen übertragen. Dafür ist die Produktion einer DVD wiederum überflüssig.



Die Beispiele zeigen: Die Digitalisierung bietet zum einen eine einzigartige Chance auf mehr Nachhaltigkeit, zu der wir uns aus guten Gründen mit den Pariser Klimazielen verpflichtet haben. Und sie ist zum anderen selbst ein großer Ressourcenverbraucher.

Unsere Aufgabe besteht darin, Digitalisierung möglichst effizient einzusetzen, und ihre Möglichkeiten, Energie und Ressourcen zu sparen, viel stärker zu nutzen.

In der Corona-Pandemie sind wir auf diesem Weg einen großen Schritt vorangekommen. Wirtschaft, Gesellschaft, Verwaltung und Politik haben neue Möglichkeiten der Digitalisierung umfassend eingesetzt und Veränderungsprozesse beschleunigt. Diesen Schwung müssen wir nutzen. Ein zentraler Baustein für den Wandel ist die Transformation der Wirtschaft, die ein passgenaues Verwenden von Materialien und ein deutliches Erhöhen der Energieeffizienz ermöglicht. Klimaneutralität kann zum Wettbewerbsvorteil werden. Auch das Planen und Umsetzen klimaneutraler smarter Quartiere ist ein wichtiger Beitrag und erhöht die Lebensqualität.

Als weltweiter Top-Standort für Rechenzentren hat Hessen großes Potenzial, Nachhaltigkeit in und durch Digitalisierung möglich zu machen. Wir haben uns daher früh mit diesem Thema auseinandergesetzt und beispielhafte Projekte umgesetzt. Dazu gehören unter anderem das Beheizen von Wohnungen und Gewerbeimmobilien mit der Abwärme von Rechenzentren, Vorhaben der Green IT und der Einsatz smarter Technik zur Reduktion von Emissionen in Unternehmen.

Für weitere Maßnahmen brauchen wir eine verlässliche Bestandsaufnahme: Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen? Welche Potenziale hat Digitalisierung? Und wie können wir sie nutzen? Die vorliegende Studie bietet dazu einen aktuellen Überblick.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre.

Prof. Dr. Kristina Sinemus

Hessische Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	4
1.1	Einleitung	4
1.2	Zielsetzung	6
1.3	Wesentliche Ergebnisse	6
2	Digitalisierung als Chance zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele	10
3	Der Digitalstandort Hessen: Netzwerkknoten im Herzen Europas	12
3.1	Hohe Bedeutung von Rechenzentren in Hessen	12
3.2	Hessische Initiativen im Bereich Rechenzentren	15
3.3	Hessische Akteure im Rechenzentrumsmarkt	16
4	Aktueller Energiebedarf durch die Digitalisierung in Hessen und daraus resultierende Treibhausgasemissionen	18
4.1	Überblick und Methodik	18
4.2	Entwicklung des Energiebedarfs	20
4.2.1	Energiebedarf der IKT in Deutschland	20
4.2.2	Energiebedarf der IKT in Hessen	22
4.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	25
4.3.1	Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland	25
4.3.2	Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen	27
4.3.3	Implikationen von ausgewählten Technologietrends auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen	29
4.4	Basisszenario zur weiteren Entwicklung von Energiebedarf und THG-Emissionen	32
4.4.1	Basisszenario für Deutschland	32
4.4.2	Basisszenario für Hessen	34
5	Klimaschutzpotenziale bei digitalen Infrastrukturen und Endgeräten in Hessen	36
5.1	Rechenzentren	36
5.2	Telekommunikationsnetze	39
5.3	Endgeräte	40
6	Klimaschutzpotenziale und Lösungen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch Digitalisierung in Hessen	42
6.1	Überblick über Klimaschutzpotenziale durch Digitalisierung in Hessen	42
6.1.1	Nationale und internationale Studien zu den Potenzialen der Digitalisierung zur Reduktion von Treibhausgasen	42

6.1.2	Risiken für den Klimaschutz durch verstärkte Digitalisierung	45
6.1.3	Handlungsmöglichkeiten zur Hebung der Nachhaltigkeitspotenziale durch Digitalisierung	46
6.2	Industrie 4.0	47
6.3	Mobiles Arbeiten mit Videokonferenzen und Home-Office	51
6.3.1	Mobiles Arbeiten als Trend in der modernen Arbeitswelt	51
6.3.2	Mobiles Arbeiten vor der Corona-Krise	51
6.3.3	Mobiles Arbeiten seit dem Beginn der Corona-Krise	53
6.3.4	Abschätzung der Klimaschutzwirkung des mobilen Arbeitens	56
6.3.4.1	Methode	56
6.3.4.2	Klimaschutzwirkung des mobilen Arbeitens	56
6.3.5	Mobiles Arbeiten als Klimaschutzpotenzial entwickeln	62
6.3.5.1	Fazit	62
6.3.5.2	Politische Handlungsmöglichkeiten	64
6.4	Smart Buildings und Smart Neighborhoods	65
6.4.1	Bedeutung des Gebäudesektors in Hessen	65
6.4.2	Intelligente Vernetzung von Gebäuden: Smart Homes, Smart Buildings und Smart Neighborhoods	67
6.4.3	Abschätzung der Klimaschutzwirkung von Smart Buildings und Smart Neighborhoods	70
6.4.3.1	Ermittlung von Klimaschutzpotenzialen intelligenter Gebäudetechnik in zwei Szenarien	70
6.4.3.2	Höhe des Klimaschutzpotenzials für Hessen	71
6.4.3.3	Bedeutung des Themenfelds für Hessen	74
6.4.3.3.1	Nachhaltigkeitspotenziale für Hessen	74
6.4.3.3.2	Bestehende Vorhaben und Initiativen in Hessen	75
6.4.4	Handlungsmöglichkeiten für Hessen	77
7	Zusammenfassende Darstellung der Handlungsmöglichkeiten	79
8	Literatur	83
9	Anhang: Modelldaten Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen	91
	Abbildungsverzeichnis	100
	Tabellenverzeichnis	102
	Impressum	U3

1 Executive Summary

1.1 Einleitung

Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind zwei Megatrends, die sich sowohl auf regionaler, nationaler als auch auf globaler Ebene massiv auf die künftige Entwicklung von Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft auswirken. Vernetzung und Digitalisierung bieten große Chancen für Innovationen und führen zu disruptiven Veränderungen. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen kommt in seinem Gutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ zu dem Schluss, dass durch die Digitalisierung eine Transformation der gesellschaftlichen Normen- und Wertesysteme stattfinden wird. Dieser Wandel ist mit den Folgen der Entwicklung der menschlichen Sprache, Aufkommen produzierender Wirtschaftsweisen wie Ackerbau und Viehzucht, der Entstehung der Städte, der Erfindung der Druckerpresse und der industriellen Revolution vergleichbar. Die Wirkung der Digitalisierung auf die 17 globalen Nachhaltigkeitsziele der UN wird in dem Gutachten als sehr ambivalent bewertet. Digitalisierung birgt sowohl hohe Potenziale zur Erreichung dieser Ziele als auch deutliche Risiken (WBGU, 2019).

Die vorliegende Untersuchung fokussiert auf die Klimaschutzpotenziale der Digitalisierung. Mehrere 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 kann (GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & Deloitte, 2019; Hilty & Bieser, 2017). Allerdings ist die Realisierung dieser Potenziale bisher kaum gelungen. Zwar nimmt der Einsatz digitaler Technologien in Wirtschaft und Gesellschaft massiv zu, jedoch werden nicht-nachhaltige Verhaltensweisen dadurch bislang nur in unzureichendem Maße substituiert. Die Digitalisierung führt teilweise durch Wachstums- und Rebound-Effekte sogar zu einem Anstieg der Klimagasemissionen. Hinzu kommt, dass der weltweite CO₂-Footprint der Digitalisierung - wie mehrere Studien errechnet haben - in den kommenden Jahren massiv ansteigen könnte (Andrae, 2019a; Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeligi, 2018; Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2017; The Shift Project, 2019). Ob in der Herstellung von Hardware (bspw. Server oder Endgeräte), durch digitale Infrastrukturen, die Nutzung von Software und Streamingdiensten: Die Digitalisierung trägt erheblich zum Energie- und Rohstoffverbrauch bei. Aktuell ist davon auszugehen, dass der Anteil der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) an den weltweiten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zwischen 1,8 bis 3,2 Prozent liegt (Bieser, Hintemann, Beucker, Schramm & Hilty, 2020).

Die aktuelle Corona-Pandemie hat sehr deutlich aufgezeigt, wie wichtig funktionierende und leistungsfähige digitale Infrastrukturen für Gesellschaft und Wirtschaft sind. Digitale Lösungen haben es ermöglicht, auch in Krisenzeiten die Kommunikation und weitere wichtige Funktionen des Gemeinwesens aufrechtzuerhalten. In der Krise wurden in vielen Fällen umwelt- und klimaschädliche Verhaltensweisen - insbesondere im Bereich des Verkehrs - durch digitale Lösungen

ersetzt. Gleichzeitig macht die aktuelle Situation aber auch klar, dass die Verringerung von Verkehr und Reisen zu massiven Herausforderungen in Branchen wie Hotel und Gaststätten, Verkehrsdienstleistungen und Veranstaltungsmanagement führt.

Es lässt sich festhalten, dass Potenziale bestehen, eine auf Klimaschutz ausgerichtete Entwicklung durch digitale Technologien zu unterstützen. Diese Potenziale werden jedoch nicht von alleine erschlossen. Die Digitalisierung muss durch geeignete Maßnahmen so gestaltet werden, dass sie in Zukunft zu mehr Klimaschutz beitragen kann. Bei der Ausgestaltung solcher Maßnahmen ist es wichtig, alle Nachhaltigkeitsdimensionen ausgewogen zu berücksichtigen.

Im Bundesland Hessen hat die Verknüpfung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit eine besondere Bedeutung. In Hessen existiert mit dem DE-CIX der – gemessen am Datenvolumen – weltweit größte Internetknoten. In Deutschland ist Hessen der Top-Standort für Rechenzentren, ca. ein Viertel der deutschen Rechenzentrumskapazitäten befinden sich in Hessen. Bei Colocation-Rechenzentren und bei Groß-Rechenzentren liegt Hessens Anteil sogar bei 40% (Clausen, Beucker & Hintemann, 2013; Hintemann & Clausen, 2018a, 2018b). Diese hohe Konzentration von Rechenzentren führt auch dazu, dass der Energiebedarf der Rechenzentren in Hessen gemäß den Berechnungen in der vorliegenden Untersuchung deutlich zunimmt¹. Betrug ihr Energiebedarf in Hessen im Jahr 2010 noch ca. 2,7 TWh/a, so wird er im Jahr 2020 bei 4,3 TWh/a liegen.

Bereits die im Jahr 2016 entwickelte Strategie Digitales Hessen setzte einen klaren Fokus auf das Thema Nachhaltigkeit und unterschied sich dadurch deutlich von vielen anderen nationalen und regionalen Digitalstrategien. Mit der Verabschiedung der aktuellen Fortschreibung der Digitalstrategie der Hessischen Landesregierung „Digitales Hessen – Wo Zukunft zuhause ist“ am 21.05.2021 verstärkt Hessen seine Anstrengungen (Hessisches Ministerium für Digitale Strategie und Entwicklung, 2021). Zur Bewältigung der Herausforderungen und Nutzung der Potenziale durch die Digitalisierung hat das Land Hessen die Förderung und Stärkung des Einsatzes von digitalen Technologien zum Wohl des Bürgers, bspw. dem Ausbau von digitalen Bürgerservices, der Entwicklung des ländlichen Raums, die Entwicklung von Smart Citys und smarten Regionen in den Fokus seiner Aktivitäten gerückt. In die Digitalisierung werden große Erwartungen gesetzt. So wird z.B. erwartet, dass mit ihr deutliche Beiträge zur Ressourceneffizienz, in der Produktion, in der Energiewende und in der Mobilität erzielt werden können. Inwieweit eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs durch digitale Anwendungen in Hessen erreicht werden kann, die nicht – wie bislang – durch Rebound- und Wachstumseffekte wieder kompensiert werden, hängt von der Umsetzung konkreter Maßnahmen ab. Solche Maßnahmen müssen zum einen neue digitale energiesparende Innovationen in ihrer Entwicklung und Anwendung fördern. Zum anderen muss aber auch die Attraktivität nicht-nachhaltiger konventioneller Produkte, Dienstleistungen und Verhaltensweisen durch Maßnahmen der Exnovationspolitik² konsequent reduziert werden.

¹ Zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Hessen, Deutschland oder auf internationaler Ebene gibt es keine belastbaren Statistiken. Die vorliegenden Berechnungen beruhen auf Berechnungsmodellen, die zu teilweise unterschiedlichen Ergebnissen kommen. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Berechnungsmodell verwendet (siehe Abschnitt 3.1), dass auf einer sehr detaillierten Erhebung der in Hessen vorhandenen Geräte und Anlagen beruht.

² Mit Exnovation ist die Zurücknahme, Beendigung bzw. Abschaffung von (nicht-nachhaltigen) Praktiken, Technologien oder Nutzungssystemen gemeint. Beispiele für eine Exnovationspolitik sind der Beschluss der Bundesregierung zum Atomausstieg oder das EU-Glühbirnenverbot.

1.2 Zielsetzung

Im Koalitionsvertrag des Landes Hessen hat sich die Regierung zu einer verantwortungsbewussten Digitalisierung bekannt und schreibt fest, dass die Chancen verantwortungsvoll genutzt werden sollen. Die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsfaktoren ist dabei eine elementare Grundlage.

Vor dem Hintergrund der hohen wirtschaftlichen Relevanz der Digitalisierung und der besonderen Wechselwirkungen mit der Nachhaltigkeit verfolgt die hier angebotene Studie im Einzelnen folgende Ziele:

- Ermittlung des aktuellen Energiebedarfs der IKT in Hessen und der daraus resultierenden CO₂-Emissionen.
- Darstellung von Potenzialen und Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen der IKT in Hessen.
- Überblick über Klimaschutzpotenziale durch den verstärkten Einsatz von Digitalisierung in Hessen und vertiefende Darstellung von ausgewählten Anwendungsfeldern wie „Mobiles Arbeiten“ oder ausgewählten Themenfeldern aus dem Handlungsfeld „Smarte Regionen“.
- Überblick über hessische Akteure im Bereich Rechenzentren, insbesondere aus der Herstellung (auch von Komponenten).
- Ableitung von Handlungsmöglichkeiten für Hessen unter Berücksichtigung der Schwerpunkte wohnortnahes digitales Arbeiten, Smart Region und Labelling (z. B. Blauer Engel).

1.3 Wesentliche Ergebnisse

Die vorliegende Studie befasst sich mit den Nachhaltigkeitspotenzialen der Digitalisierung in Hessen. Dabei fokussiert die Studie auf die Klimawirkungen durch Verwendung von IKT-Produkten sowie die Einsparpotenziale durch den Einsatz von digitalen Lösungen in anderen Bereichen. Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse im Überblick dargestellt. Die im Rahmen dieser zusammenfassenden Darstellung genannten Zahlen beziehen sich jeweils auf die IKT ohne Unterhaltungselektronik³.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass **Hessen beim Thema Digitalisierung gut aufgestellt** ist. Mit zahlreichen Initiativen und Aktivitäten wird die Digitalisierung in Hessen unterstützt. Die hessische Forschungslandschaft und eine Vielzahl von Vernetzungsinitiativen wie das House of Digital Transformation, das House of Energy oder der Digital Hub FrankfurtRheinMain bilden gemeinsam mit der Digitalstrategie eine gute Basis für einen weiteren Ausbau der digitalen Infrastrukturen. Insbesondere bei den Rechenzentren ist Hessen bereits heute ein Top-Standort in Deutschland und Europa. Auch dem Thema Nachhaltigkeit wird in den meisten Initiativen und Aktivitäten schon eine hohe Bedeutung beigemessen.

³ Die moderne Unterhaltungselektronik wird in den vorhandenen Studien zur Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs teilweise der IKT zugehörig betrachtet. Die vorliegende Studie berechnet daher den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik.

Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung und insbesondere der hohen räumlichen Konzentration der Rechenzentrumsbranche auf das Land Hessen ist der **Energiebedarf der IKT in Hessen** im vergangenen Jahrzehnt um 25 % **von 4,8 Mrd. kWh/a auf 6 Mrd. kWh/a** angestiegen. Während im vergangenen Jahrzehnt der Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren zum Teil noch durch eine Absenkung des Energiebedarfs der Endgeräte in den Haushalten und Unternehmen ausgeglichen werden konnte, ist **bis zum Jahr 2030** mit einem noch deutlicheren Anstieg des Energiebedarfs der IKT in Hessen auf **7,9 Mrd. kWh/a** zu rechnen.

Die **Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der IKT in Hessen** sind im vergangenen Jahrzehnt leicht von 3,4 Mio. t/a auf 3,2 Mio. t/a gesunken. Der Rückgang ist vor allem bedingt durch die Effizienzgewinne bei den Endgeräten und die deutlich weniger CO₂-intensive Strombereitstellung. Bis zum Jahr 2030 ist wieder mit einem Anstieg der THG-Emissionen auf das Niveau von 2010 zu rechnen. Dieser Anstieg ist insbesondere durch THG-Emissionen in der Herstellung der zunehmenden Zahl der IKT-Endgeräte begründet. Auch der zunehmende Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen führt zu einem leichten Anstieg der THG-Emissionen.

Aufgrund des hohen Anteils der **Rechenzentren** von etwa 70 % am Energiebedarf der IKT und von 55 % an den THG-Emissionen der IKT in Hessen, kommt diesem Segment eine besondere Bedeutung für Maßnahmen zur Reduktion von Energiebedarf und THG-Emissionen zu. Es existiert für Rechenzentren eine Vielzahl von neuen Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Verbesserung der Klimabilanz. Ansatzpunkte liegen hier vor allem in der Verwendung möglichst regenerativ erzeugten Stroms sowie in der Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren. Auch durch den weitergehenden Einsatz der verfügbaren Effizienztechnologien im Bereich der Kühlung, Stromversorgung und im Betrieb der IT-Hardware bestehen deutliche Einsparpotenziale.

Eine leistungsfähige und zuverlässige Breitbandinfrastruktur ist die Basis für die weitere Digitalisierung in Hessen. Mit der Gigabitstrategie und dem Mobilfunkpakt hat das Land Grundlagen geschaffen, um die **Telekommunikationsnetze** in Zukunft weiter auszubauen. Durch diesen Ausbau wird der Energiebedarf in Mobilfunk- und Festnetzen voraussichtlich von 0,59 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 auf 0,83 Mrd. kWh/a im Jahr 2030 ansteigen (+ 40 %). Der Anteil am Energiebedarf der IKT in Hessen insgesamt erhöht sich leicht von 9,8 % in 2020 auf 10,5 % in 2030.

Die THG-Emissionen durch die Netze werden nur geringfügig von 0,24 Mio. t/a in 2020 auf 0,25 Mio. t/a in 2030 ansteigen.

Bei den **Endgeräten in Haushalten und Unternehmen** sind in der Vergangenheit deutliche Verschiebungen der Ressourcenbedarfe festzustellen. So sind die Geräte im Betrieb wesentlich energieeffizienter geworden, sodass sich der Energiebedarf aller Endgeräte in Hessen im vergangenen Jahrzehnt fast halbiert hat. Die THG-Emissionen durch den Betrieb der Geräte konnten sogar noch deutlicher reduziert werden. Insgesamt sind die Endgeräte mit 1,05 Mio. t/a immer noch für ca. 1/3 der THG-Emissionen der IKT in Hessen verantwortlich. Durch die steigende Zahl der Geräte sind die THG-Emissionen durch die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der Geräte sogar deutlich angestiegen. Diese Entwicklung wird sich auch in Zukunft fortsetzen. Während im Jahr 2010 noch 57 % der THG-Emissionen der Endgeräte (ohne Unterhaltungselektronik) durch den Betrieb der Geräte verursacht wurden, werden dies im Jahr 2030 voraussichtlich nur noch 22 % sein. Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen sollten also in Zukunft vor allem bei der Herstellung ansetzen und z.B. eine längere Nutzungsdauer der Geräte im Fokus haben.

Hessen ist wie oben schon dargestellt ein bedeutender Standort für Rechenzentren. Das macht sich auch in der Unternehmensstruktur bemerkbar. In Hessen gibt es eine Vielzahl von **Zulieferern und Dienstleistern für Rechenzentren**, sowohl im Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen als auch bei den Großunternehmen.

Die **Potenziale, durch Digitalisierung in Hessen THG-Emissionen einzusparen**, sind sehr groß. In Summe können durch den smarten Einsatz von digitalen Technologien in allen Wirtschaftsbereichen mit bis zu **13 Mio. t CO_{2eq}/a** deutlich mehr THG-Emissionen eingespart werden, als die IKT selbst verursacht. Allerdings heben sich diese Potenziale nicht von selbst. Die Digitalisierung ist mit Risiken wie Rebound-Effekten verbunden und führt zu Veränderungen in Konsumgewohnheiten. Daher sind auch Entwicklungen denkbar, dass die potenziellen Einsparungen durch einen Mehrbedarf an Energie und höhere THG-Emissionen nicht erreicht werden können. Eine nachhaltige Digitalisierung erfordert erhebliche gemeinsame Anstrengungen von Wissenschaft, Unternehmen, Gesellschaft und Politik.

Insbesondere im **Bereich der Fertigung** bestehen in Deutschland und in Hessen hohe Potenziale zur Verringerung der THG-Emissionen. In Hessen könnten THG-Emissionen von bis zu 4,2 Mio. t CO_{2eq}/a in diesem Bereich eingespart werden. Mit einer Vielzahl von Projekten und Initiativen zur Hebung der Nachhaltigkeitspotenziale von Industrie-4.0-Technologien ist Hessen hier bereits gut aufgestellt. Für die Zukunft gilt es, diese Position zu festigen und weiter auszubauen.

Die Corona-Pandemie hat zu einer erheblichen Erhöhung der Nutzung von **Home-Office und Videokonferenzen** geführt. Damit konnten im Jahr 2020 große Mengen an THG-Emissionen im Verkehr eingespart werden. Ein Teil dieser THG-Reduktionspotenziale kann auch dauerhaft gehoben werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein dauerhaft zu erwartendes jährliches THG-Einsparpotenzial von 240.000 t CO_{2eq}/a durch Videokonferenzen identifiziert. Das sind mehr als 7 % der THG-Emissionen der IKT in Hessen. Ob die theoretischen Einsparpotenziale durch reduziertes Pendeln sich langfristig auswirken oder durch verschiedene Rebound-Effekte wieder aufgezehrt werden, ist allerdings noch offen.

Im Bereich **Smart Building/Smarte Quartiere** bestehen noch deutlich höhere Einsparpotenziale. Durch Digitalisierung könnten bis zum Jahr 2030 THG-Emissionen von bis zu 1,5 Mio. t CO_{2eq}/a eingespart werden. Das wären fast 45 % der THG-Emissionen der IKT im Jahr 2030.

Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind globale Phänomene. **Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch Digitalisierung** können daher vor allem auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene ansetzen. Aber auch auf Ebene des Landes Hessen sind Maßnahmen möglich, die eine nachhaltige Digitalisierung fördern. Das Land Hessen hat hierzu bereits eine Vielzahl von Initiativen gestartet. Die vorliegende Studie zeigt einige weitere Handlungsmöglichkeiten auf, wie mit Hilfe der Digitalisierung Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele auf Landesebene noch besser erreicht werden können. Diese Möglichkeiten betreffen insbesondere die weitere Vernetzung der relevanten Akteure, eine gezielte Forschungsförderung und Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz. Auch die öffentliche Beschaffung kann einen Beitrag zu einer nachhaltigen Digitalisierung leisten.

In Tabelle 1 ist die in dieser Studie berechnete Entwicklung der THG-Emissionen der IKT in Hessen im Überblick dargestellt. Die Tabelle veranschaulicht insbesondere den hohen Anteil

der Rechenzentren an den Treibhausgasemissionen in Hessen. Die Rechenzentren in Hessen sind für mehr als die Hälfte der IKT-bedingten Treibhausgasemissionen in Hessen verantwortlich. Zum Vergleich: Für das gesamte Bundesgebiet kommt diese Untersuchung zu dem Ergebnis, dass Rechenzentren für etwa ein Viertel der THG-Emissionen der IKT verantwortlich sind.

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen in 1.000 t CO_{2eq}/a der IKT in Hessen in den Jahren 2010 bis 2030 (ab 2025: Prognose)

		2010	2015	2020	Prognose	
					2025	2030
Rechenzentren	Betrieb	1.622	1.760	1.560	1.632	1.663
	Herstellung, Transport, Entsorgung	180	196	173	181	185
	Rechenzentren gesamt	1.802	1.956	1.733	1.813	1.848
Netze	Betrieb	310	268	213	218	223
	Herstellung, Transport, Entsorgung	34	30	24	24	25
	Netze gesamt	344	297	237	242	248
Endgeräte Haushalte	Betrieb	178	230	153	135	120
	Herstellung, Transport, Entsorgung	297	410	422	433	444
	Endgeräte Haushalte gesamt	475	640	575	568	563
Endgeräte Arbeit	Betrieb	494	386	197	143	105
	Herstellung, Transport, Entsorgung	213	252	278	303	331
	Endgeräte Arbeit gesamt	707	638	474	445	436
Sonstiges	Betrieb	24	26	57	61	68
	Herstellung, Transport, Entsorgung	10	17	80	130	214
	Sonstiges gesamt	34	43	136	192	282
IKT Gesamt (ohne Unterhaltungselektronik)		3.363	3.575	3.156	3.260	3.377

2 Digitalisierung als Chance zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele

Durch digitale Lösungen bestehen enorme Potenziale zur nachhaltigen Gestaltung unserer Zukunft. Diese Potenziale werden unter anderem im umfangreichen Gutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) aufgezeigt (WBGU, 2019). Die Digitalisierung wird gemäß WBGU zu einer gesellschaftlichen Transformation führen, die mit den großen Transformationen der Menschheitsgeschichte vergleichbar ist. Der WBGU zählt als vergleichbare Entwicklungen die Entstehung der menschlichen Sprache, die neolithische Revolution, die Entstehung der Städte, die Erfindung der Druckerpresse und die industrielle Revolution auf.

Die möglichen Wirkungen der Digitalisierung auf die gesellschaftliche Entwicklung werden im WBGU-Gutachten unter anderem anhand der Sustainable Development Goals (SDGs) aufgezeigt. Die Vereinten Nationen haben in der Agenda 2030 diese 17 nachhaltigen Entwicklungsziele verabschiedet. Die Ziele berücksichtigen die verschiedenen Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung. In Abbildung 1 sind die SDGs im Überblick dargestellt. Die Ziele reichen von der Bekämpfung der Armut, über eine saubere und bezahlbare Energieversorgung bis hin zum Frieden. Außerdem macht die Zielmatrix der Vereinten Nationen deutlich, dass die ausgegerufenen Ziele nur durch Partnerschaften zwischen einzelnen Staaten erreicht werden können. Deshalb ist die Bildung von Partnerschaften ebenso als ein Ziel für nachhaltige Entwicklung formuliert worden.

Abbildung 1: 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen



Quelle: Vereinte Nationen, CC-BY-SA 3.0

Das WBGU-Gutachten zeigt sehr umfangreiche Potenziale für die Erreichung aller dieser Nachhaltigkeitsziele auf. Gleichzeitig werden aber auch für jedes der Ziele Risiken identifiziert, wie die Digitalisierung die Nachhaltigkeit gefährden kann.

Gemäß WBGU-Gutachten ist es noch offen, ob es gelingen wird, die Digitalisierung für eine global nachhaltige Entwicklung nutzbar zu machen. Daher wird als zentrale Gestaltungsaufgabe der Zukunft formuliert: „Wie können digitale Technologien in den Dienst der globalen Nachhaltigkeit gestellt werden?“ (WBGU, 2019, S. 27)

3 Der Digitalstandort Hessen: Netzwerkknoten im Herzen Europas

3.1 Hohe Bedeutung von Rechenzentren in Hessen

Wie die Ausführungen in der Einleitung gezeigt haben, hat die Rechenzentrumsbranche für Hessen eine besondere Bedeutung. Hessen bietet mit seiner zentralen Lage in Europa und seiner sehr gut ausgebauten Infrastruktur sehr gute Voraussetzungen für die Ansiedlung von internationalen Anbietern aus dem Bereichen Rechenzentren und Internet. In Frankfurt a.M. existiert mit dem DE-CIX der am Datendurchsatz gemessen größte Internetknoten der Welt (Tabelle 2). Frankfurt gehört zu den vier bedeutendsten Rechenzentrums-Hotspots in der europäischen Union, den sogenannten FLAP-Märkten (FLAP: Frankfurt, London, Amsterdam, Paris). Der Digital Hub FrankfurtRheinMain bezeichnet die Region als den weltweit führenden Digital Hub. Aktuell werden hier jährlich mehr als 400 Mio. € in den Ausbau der Rechenzentren investiert. Für die nächsten Jahre sind bereits 1,2 Mrd. € als Investitionen im Vorlauf. (Zachmann, 2020).

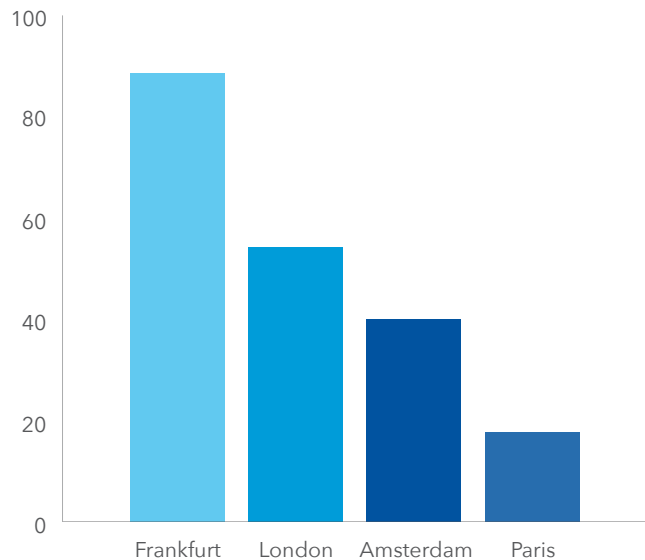
Tabelle 2: Datendurchsatz in den Internetknoten in Frankfurt, London, Amsterdam und Paris (Stand 2021)

Internetknoten	Datendurchsatz Peak (Allzeit-Hoch)	Datendurchsatz im Durchschnitt
DE-CIX (Frankfurt a.M.)	10.385 Gbit/s	6.285 Gbit/s
AMS-IX (Amsterdam)	9.263 Gbit/s	5.623 Gbit/s
LINX (London)	5.730 Gbit/s	4.080 Gbit/s
FRANCE-IX (Paris)	1.420 Gbit/s	1.210 Gbit/s

Quelle: Ball & Kluft (2021)

Auch gemessen an den vorhandenen Kapazitäten der Colocation-Rechenzentren ist die Region Frankfurt a.M. europaweit – gemeinsam mit London – führend (CBRE, 2021). Und die Region baut ihre Position weiter aus. Im Jahr 2019 wurde mit Neuverträgen in einer Höhe von 90 MW IT-Leistung ein neuer Rekord im Wachstum aufgestellt (Abbildung 2).

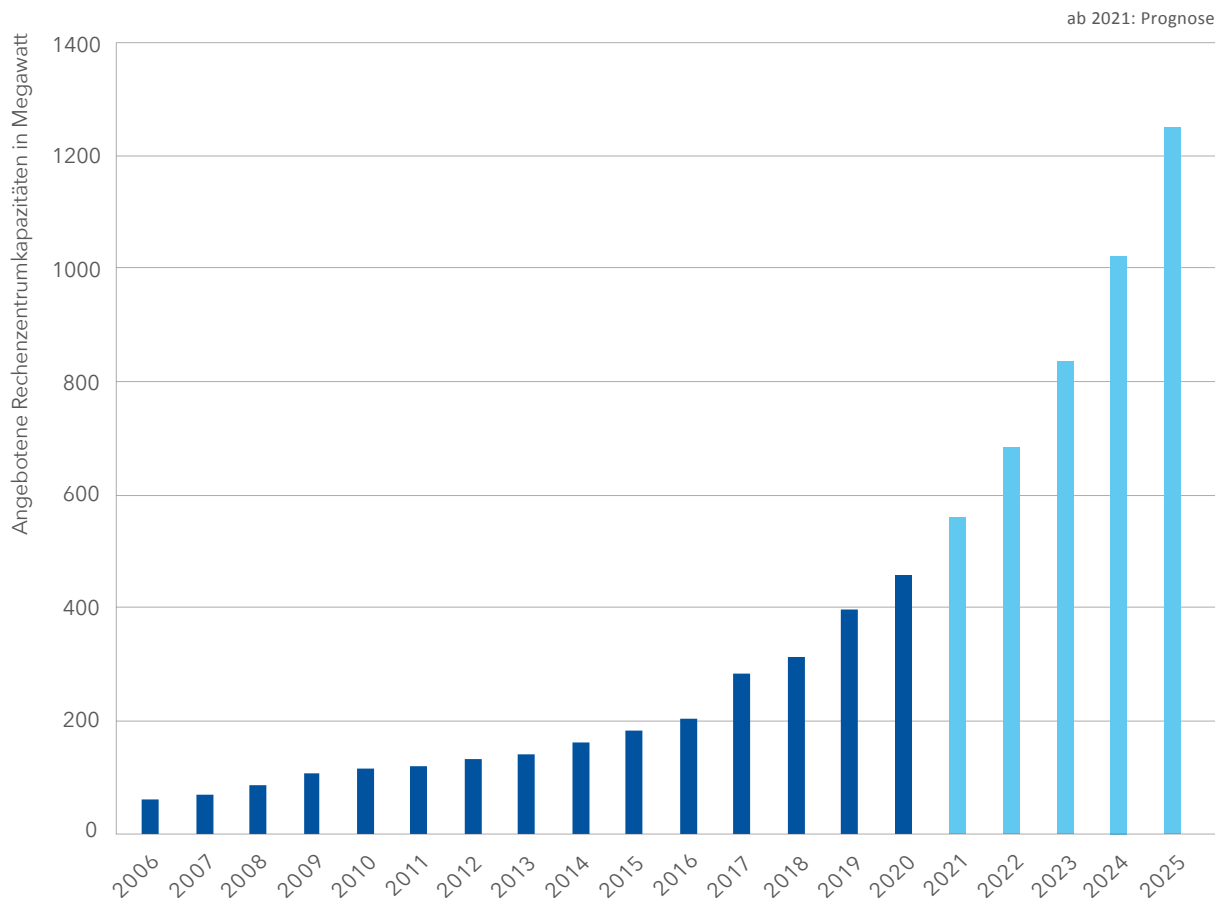
Abbildung 2: Neuverträge von Colocation-Rechenzentren in den FLAP-Märkten im Jahr 2019 gemessen an der verkauften IT-Leistung in MW



Quelle: CBRE (2020a)

Für das Jahr 2020 wurde sogar noch ein höheres Wachstum der Colocation-Kapazitäten in Frankfurt a.M. erwartet. Bedingt durch die Corona-Krise konnte dieses Wachstum allerdings nicht realisiert werden (CBRE, 2020b). Dennoch scheint der langfristige Wachstumstrend ungebrochen. Im Zeitraum 2016 bis 2020 haben sich die angebotenen Rechenzentrumskapazitäten in der Region mehr als verdoppelt. Für die kommenden Jahre gibt es im Raum Frankfurt eine Reihe von sehr großen neuen Rechenzentrumsprojekten (siehe dazu auch Abschnitt 5.1). Werden diese alle realisiert, so werden sich die Rechenzentrumskapazitäten in der Region bis 2024 noch einmal verdoppeln (Abbildung 3). Das dynamische Wachstum hat erhebliche Auswirkungen auf die Region, die über die reinen Investitionen hinausgehen. Der Digital Hub FrankfurtRheinMain bezieht den Anteil der digitalen Infrastrukturen am Wachstum des Bruttoinlandsprodukts mit größer als 1%. Die Transformationsrate bei den Arbeitsplätzen liegt bei 2,4. D.h. dass pro neu geschaffenen Arbeitsplatz in einem Rechenzentrum insgesamt 2,4 Arbeitsplätze geschaffen werden. Diese Analysen decken sich weitgehend mit anderen internationalen Studien, die die wirtschaftliche Bedeutung des Aufbaus von Rechenzentrumskapazitäten auf die jeweiligen Regionen ermitteln (Basalisco, 2018; Copenhagen Economics, 2017, 2018a, 2018b, 2018c; Hintemann & Clausen, 2018b; Ostler, 2018a). Allein in Hessen sichern die Rechenzentren ca. 35.000 Arbeitsplätze, in Deutschland liegt die Zahl bei 215.000, davon 120.000 direkt in Rechenzentren (Hintemann & Clausen, 2018a). Für EMEA (Europe, Middle East, Africa) wird mit ca. 600.000 Arbeitsplätzen in Rechenzentren gerechnet, weltweit sind es über 2 Millionen (Uptime Institute Intelligence, 2021).

Abbildung 3: Entwicklung der angebotenen Rechenzentrumskapazitäten in der Region Frankfurt a. M. zwischen 2006 und 2025 (ab 2021: Prognose)



Quelle: Hintemann (2021)

Neben den erheblichen wirtschaftlichen Chancen durch Rechenzentren entstehen durch die hohe Konzentration der Rechenzentren in Hessen und insbesondere im Großraum Frankfurt auch zunehmende Herausforderungen hinsichtlich Stadt- und Raumplanung sowie für die ökologische Nachhaltigkeit. Auch die Energienetze müssen an das erhebliche Wachstum der Rechenzentrumsbranche angepasst werden. Im Rhein/Main-Gebiet sollen im Zeitraum bis 2027 rund 750 Mio. € in den Ausbau der Stromnetze investiert werden (Lange, 2020). Die Dynamik der Entwicklung wird an der Tatsache deutlich, dass allein im Stadtgebiet Frankfurt nach Angaben des Energiereferats im Zeitraum von 2017 bis 2020 der Stromverbrauch die Colocation-Rechenzentren um 60% auf 1,6 Mrd. kWh angestiegen ist.

Mit seiner Digitalstrategie und einer Reihe von Initiativen zu Rechenzentren ist Hessen bereits gut aufgestellt, um den genannten Entwicklungen und Herausforderungen zu begegnen. Im Folgenden wird hierzu ein kurzer Überblick gegeben.

3.2 Hessische Initiativen im Bereich Rechenzentren

Im Bundesland Hessen gibt es eine Reihe von Initiativen, die sich mit der weiteren Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes und auch mit der Entwicklung von Energiebedarf und THG-Emissionen befassen. Zu nennen sind hier insbesondere der Digital Hub FrankfurtRheinMain, das House of Digital Transformation, das House of Energy, die Innovationsallianz Rechenzentren und das Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren sowie die Digitalstrategie Digitales Hessen.

Der **Digital Hub FrankfurtRheinMain** und seine Mitglieder hat zum Ziel, dass Frankfurt a. M. die Spitzenposition, die es im Bereich der digitalen Infrastrukturen in Europa einnimmt, auch in Zukunft festigen kann. Die Mitglieder des Vereins analysieren aktuelle und künftige Innovationsfelder der digitalen Wirtschaft und setzen sich für stabile und gesicherte Rahmenbedingungen in der Wirtschaftsmetropole FrankfurtRheinMain ein (eco, 2020).

Das **House of Digital Transformation (früher: House of IT)** und das **House of Energy** sind Teil der „Houses of“-Innovationsstrategie des Landes Hessen. Mitglieder des House of Digital Transformation sind neben dem Land Hessen namhafte IT-Unternehmen, Forschungseinrichtungen, öffentliche Körperschaften, Hochschulen und KMUs. Ziel ist es, gemeinsam die Attraktivität des Standorts Hessen weiter zu erhöhen und branchenübergreifende Projekte voranzutreiben (House of IT, 2020). Das House of Energy hat zum Ziel, Innovationen im Bereich der regenerativen und nachhaltigen Energieversorgung durch Vernetzung von Wirtschaftsunternehmen, Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Universitäten sowie Politik zu fördern. Damit soll die Energiewende in Hessen effektiv und effizient gestaltet werden (House of Energy, 2020). Insbesondere die Themen Abwärmennutzung aus Rechenzentren und die Nutzung von Brennstoffzellen in Rechenzentren wurden bisher in Veranstaltungen und anderen Aktivitäten vom House of Energy in den Fokus gestellt.

Das **Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren (NeRZ)** hat sich aus dem Projekt **Innovationsallianz Rechenzentren** der hessischen Landesregierung entwickelt. NeRZ ist ein Zusammenschluss mittelständischer Technologieunternehmen, die sich zum Ziel gesetzt haben, die Energieeffizienz der Rechenzentren zu verbessern und Deutschland als Standort für die energieeffizientesten und sichersten Rechenzentren weltweit zu positionieren (NeRZ, 2020). Aktuell engagiert sich NeRZ gemeinsam mit der Initiative Digitales Hessen, der Stadt Frankfurt und weiteren Partnern aus Industrie und Forschung in einem vom Bundesumweltministerium geförderten Leuchtturmprojekt zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz im Bereich der Abwärmennutzung von Rechenzentren.

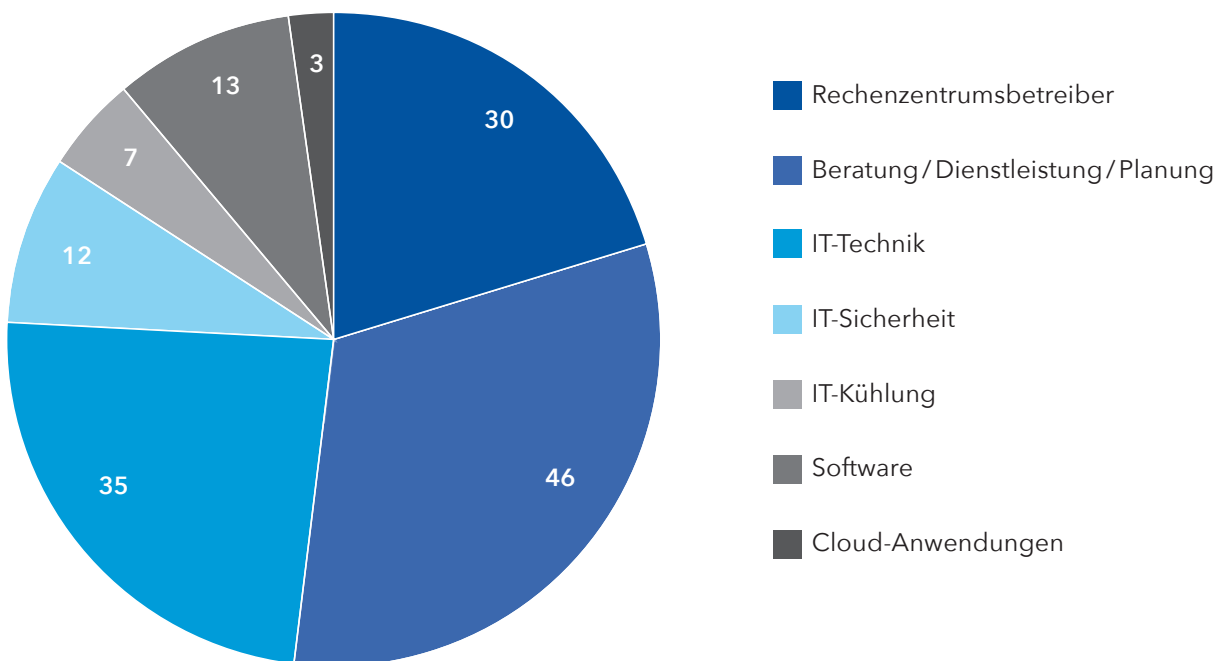
Mit der **Strategie „Digitales Hessen“** hat die hessische Landesregierung bereits im Jahr 2016 in einem breiten Dialogprozess mit Fachleuten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft Ziele für die digitale Weiterentwicklung im Bundesland formuliert. Anders als viele andere Digitalstrategien berücksichtigt die hessische Digitalstrategie integrativ auch die Aspekte der nachhaltigen Entwicklung. In der am 21. Mai 2021 verabschiedeten Fortschreibung der Strategie unter dem Titel „Digitales Hessen – wo Zukunft zuhause ist“ (Hessisches Ministerium für Digitale Strategie und Entwicklung, 2021) kommt der Nachhaltigkeit von Rechenzentren eine besondere Bedeutung zu.

Mit dem Rechenzentrum des Internationalen Beschleunigerzentrums FAIR am GSI Helmholtz-zentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt - dem **GreenIT Cube** - hat Hessen ein Leuchtturmprojekt für energieeffizientes und nachhaltiges Supercomputing. Die patentierte Technologie wird weltweit nachgefragt. Der GreenIT Cube ist eines der wenigen Rechenzentren in Deutschland, das mit dem Blauen Engel ausgezeichnet ist (GSI, 2020).

3.3 Hessische Akteure im Rechenzentrumsmarkt

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Daten von hessischen Unternehmen, die im Bereich Rechenzentren aktiv sind, recherchiert. Insgesamt wurden 146 Unternehmen recherchiert (Abbildung 4)⁴. Die ermittelten Unternehmen umfassen sowohl Großunternehmen als auch kleine und mittlere Unternehmen, die beim Bau, bei der Ausstattung und beim Betrieb von Rechenzentren direkt mitwirken. So wurden z.B. Softwareunternehmen berücksichtigt, die Software direkt für den Rechenzentrumsbetrieb anbieten, nicht aber jedoch allgemein alle Anbieter von Anwendungssoftware. Zur Recherche wurden verschiedene Firmen- und Anbieterdatenbanken genutzt, insbesondere die Verzeichnisse IT in Germany (www.it-in-germany.de/) und die Gelben Seiten (www.gelbeseiten.de).

Abbildung 4: Unternehmen in der Rechenzentrumsbranche in Hessen



Quelle: eigene Erhebung

⁴ Bei einer Reihe von Unternehmen war keine eindeutige Zuordnung zu den einzelnen in der Abbildung genannten Unternehmenskategorien möglich. Die Zuordnung wurde anhand der jeweiligen Unternehmensbeschreibung in die naheliegendste Kategorie vorgenommen.

Die hohe wirtschaftliche Bedeutung der Unternehmen in Hessen für die Rechenzentrumsbranche in Deutschland wird auch durch eine Analyse der aktuellen Stellenausschreibungen auf Jobportalen deutlich, die Borderstep im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführt hat (Stand Dezember 2020). Der hessische Anteil der angebotenen Jobs im Bereich Rechenzentren und Cloudlösungen liegt in den verschiedenen Jobportalen (Stepstone, Indeed, xing Jobs) mit 15 % bis 20 % an allen bundesweit angebotenen Stellen sehr hoch. Zum Vergleich: Der Anteil Hessens am BIP in Deutschland liegt bei 8,6 %, der Anteil Hessens an den Beschäftigten liegt bei etwa 7,5 %.

4 Aktueller Energiebedarf durch die Digitalisierung in Hessen und daraus resultierende Treibhausgasemissionen

4.1 Überblick und Methodik

Ein Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Höhe des aktuellen Energiebedarfs durch die Digitalisierung und der durch die Digitalisierung verursachten THG-Emissionen in Hessen zu ermitteln. Hierzu wird im Folgenden zunächst der Energiebedarf für den Betrieb der Geräte und Anlagen der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) ermittelt. Diese Berechnung baut methodisch auf einer Studie auf, die das Borderstep Institut gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM im Jahr 2015 für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) erstellt hat (Stobbe et al., 2015). In dieser Studie werden für Deutschland detailliert die Bestände der verschiedenen IKT-Geräte im Jahr 2015 ermittelt und für die Jahre 2020 und 2025 prognostiziert. Die Studie unterscheidet zwischen Rechenzentren, Telekommunikationsnetzen, Endgeräten in Privathaushalten, Endgeräten am Arbeitsplatz sowie IKT in der Öffentlichkeit (öffentliche WLAN-Hotspots, Bankautomaten, Werbedisplays etc.) und IKT in der Gebäudeautomatisierung und -vernetzung. Diese Betrachtung fokussiert auf die Geräte und Anlagen, die originär der IKT zuzuordnen sind. IKT-Elemente in anderen Produkten wie Haushaltsgeräten, Industrieanlagen (Industrie 4.0), Militärtechnik, Fahrzeugtechnik oder Verkehrsleittechnik werden nicht betrachtet. Für die verschiedenen Gerätetypen wurden energierelevante Technik- und Nutzungsparameter ermittelt, sodass damit die resultierende elektrische Leistungsaufnahme als Endenergiebedarf berechnet werden konnte. Für die vorliegende Studie wurden auf Basis aktueller Studien und Marktberichte die Bestandszahlen für die verschiedenen Gerätetypen für das Jahr 2020 abgeschätzt und eine aktualisierte Prognose für 2025 vorgenommen. Die im Jahr 2015 ermittelten energierelevanten Technik- und Nutzungsparameter wurden für die Berechnung übernommen. Die Aktualisierungen führten bei den digitalen Infrastrukturen (Rechenzentren und Netzen) zu merklichen Abweichungen in den Ergebnissen von den Prognosen der BMWi-Studie.

Für eine ganzheitliche Betrachtung wäre es notwendig, neben dem Energiebedarf bei der Nutzung der IKT auch die Energiebedarfe zu berücksichtigen, die in den anderen Produktlebensphasen entstehen. D.h. es müsste auch die sogenannte „graue Energie“ ermittelt werden. Mit grauer Energie eines Produktes wird diejenige Energie bezeichnet, die für Herstellung, Transport und Entsorgung benötigt wird. Leider existieren nur wenige Untersuchungen mit aktuellen Informationen zur grauen Energie der verschiedenen IKT-Geräte. Bei den THG-Emissionen ist die Datenlage deutlich besser. Es existieren mehrere Untersuchungen, die die THG-Emissionen in Herstellung, Transport und Entsorgung der verschiedenen Geräte bestimmen (Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeligi, 2018; Malmodin & Lundén, 2016, 2018; Prakash, Antony, Köhler & Liu, 2016). Bei IKT-Produkten dominieren oft die THG-Emissionen in der Herstellung. So ermittelt eine Studie des Umweltbundesamtes zu ökologischen Aspekten von Arbeitsplatzcomputern einen Anteil der Herstellung bei verschiedenen Arbeitsplatz-Computer-

systemen von 64 % bis 82 %. Transport und Entsorgung liegen zusammen nur bei 3 % bis 4 % (Prakash et al., 2016). Die vorliegende Studie fokussiert daher in Abstimmung mit dem Auftraggeber bei der ganzheitlichen Betrachtung aller Lebensphasen der Produkte und Anlagen der IKT auf die Treibhausgasemissionen.

Da der Energiebedarf für den Betrieb der IKT praktisch ausschließlich in Form von elektrischer Energie gedeckt wird, können die THG-Emissionen in der Nutzungsphase mit Hilfe der spezifischen THG-Emissionen des Strominlandsverbrauchs⁵ der Geräte und Anlagen bestimmt werden. Für die anderen Phasen der Produktlebenszyklen der Geräte und Anlagen (Herstellung, Transport, Entsorgung) wurde auf verfügbare Werte aus der wissenschaftlichen Literatur zurückgegriffen. Damit konnten die ganzheitlichen THG-Emissionen der IKT in Deutschland ermittelt werden.

In Anhang A sind zusammengefasst die detaillierten Annahmen zu einzelnen Gerätebeständen dargestellt.

Die Berechnung des Anteils Hessens am Energiebedarf und an den THG-Emissionen der Digitalisierung in Deutschland erfolgt auf Basis von für Hessen verfügbaren Daten. In die Berechnung gehen insbesondere ein:

- Daten zur Breitbandversorgung in Hessen (BMVI, 2020)
- Daten zur Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes in Hessen (Digital HUB, 2017; Hintemann & Clausen, 2018a; Simon, 2016, 2020)
- Daten vom Statistischen Bundesamt (Destatis, 2020a) zu den Anteilen Hessens an:
 - den Haushalten, Wohnungen und Einwohnern,
 - der Zahl der Erwerbstätigen in verschiedenen Branchen,
 - der Zahl der Unternehmen in verschiedenen Branchen
 - und dem Bruttoinlandsprodukt in Deutschland

Die national und international vorliegenden Untersuchungen zum Energiebedarf und den THG-Emissionen der IKT grenzen die zur IKT zählenden Geräte unterschiedlich ab. Während die BMWi-Studie aus dem Jahr 2015 auch die Geräte der Unterhaltungselektronik wie Fernseher und Audiosysteme miteinbezieht, unterscheiden andere Untersuchungen deutlich zwischen IKT und Unterhaltungselektronik (Belkhir & Elmeligi, 2018; GeSI & Accenture Strategy, 2015; Malmodin & Lundén, 2018). In der vorliegenden Untersuchung werden die Ergebnisse jeweils zum einen unter Einbeziehung der Unterhaltungselektronik und zum anderen ohne Unterhaltungselektronik dargestellt.

⁵ Für die Berechnung werden die vom Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH (IINAS) ermittelten Werte für die CO_2_{eq} -Emissionsfaktoren der Strombereitstellung in Deutschland zugrunde gelegt (Fritsche & Greß, 2019). Die vom IINAS berechneten CO_2 -Emissionsfaktoren sind in der Höhe und Entwicklung den vom Umweltbundesamt ermittelten Daten (UBA, 2020a) sehr ähnlich. Das IINAS gibt aber im Vergleich zum Umweltbundesamt auch die Werte für die CO_2 -Äquivalente an und macht Prognosen für die Jahre 2020 und 2030. Die IINAS-Daten bieten daher eine sehr gut geeignete Basis für die vorliegende Untersuchung. Für die Berechnungen der Treibhausgasemissionen durch die Stromverwendung in Hessen werden die gleichen Daten wie für Deutschland zugrunde gelegt.

In Abschnitt 4.4 wird unter Fortschreibung von aktuellen Trends der bisherigen Entwicklungen und auf Basis der Ergebnisse von Studien zur künftigen Entwicklung von Energiebedarf und THG-Emissionen der IKT (z. B. Andrae, 2019a; GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & Deloitte, 2019; Hintemann & Hinterholzer, 2020; Stobbe et al., 2015) ein Basisszenario zur Entwicklung von Energiebedarf und CO₂-Emissionen der IKT in Hessen bis zum Jahr 2030 erstellt.

Im Vergleich zu der Studie, die vom Borderstep Institut im Jahr 2013 zu den THG-Einsparpotenzialen in Hessen durchgeführt wurde (Clausen et al., 2013), unterscheidet sich die vorliegende Untersuchung insbesondere durch folgende Punkte:

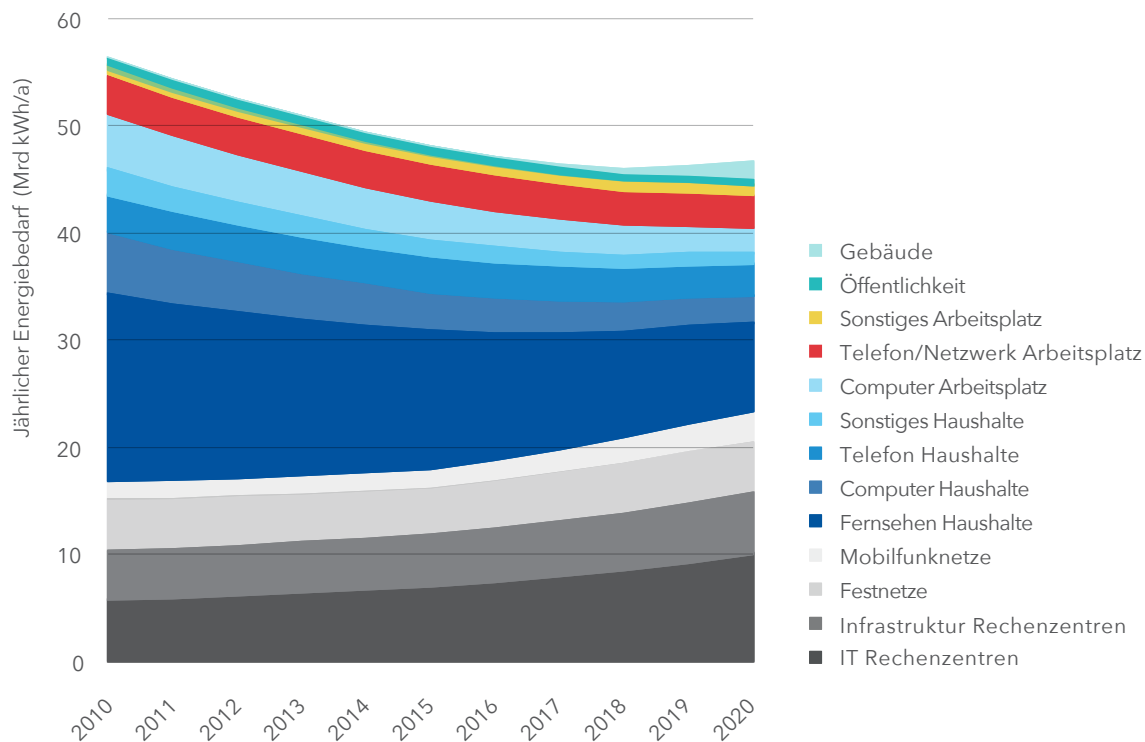
- Die zugrundeliegende Datenbasis ist aufgrund zwischenzeitlich durchgeführter nationaler und internationaler Studien deutlich detaillierter und umfassender.
- In der Studie aus dem Jahr 2013 wurden nur die THG-Emissionen in der Nutzung der IKT in Hessen berechnet, die THG-Emissionen durch Herstellung, Transport und Entsorgung wurden nicht berechnet.
- Die Geräte der Unterhaltungselektronik wurden in der Studie im Jahr 2013 nicht mit betrachtet.

4.2 Entwicklung des Energiebedarfs

4.2.1 Energiebedarf der IKT in Deutschland

Der Energiebedarf der IKT in Deutschland ist im vergangenen Jahrzehnt deutlich zurückgegangen. Gemäß den im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Berechnungen sank der jährliche Energiebedarf von etwa 56 Mrd. kWh/a im Jahr 2010 um 18% auf 46,2 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 (Abbildung 5). Damit hat sich die Prognose der BMWi-Studie aus dem Jahr 2015 weitgehend bestätigt. Diese ging von einem noch etwas geringeren Energiebedarf von 45,2 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 aus (Stobbe et al., 2015). Der Unterschied in den Berechnungen liegt insbesondere in dem stärker als prognostiziert angestiegenen Energiebedarf der Rechenzentren begründet.

Abbildung 5: Energiebedarf der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)

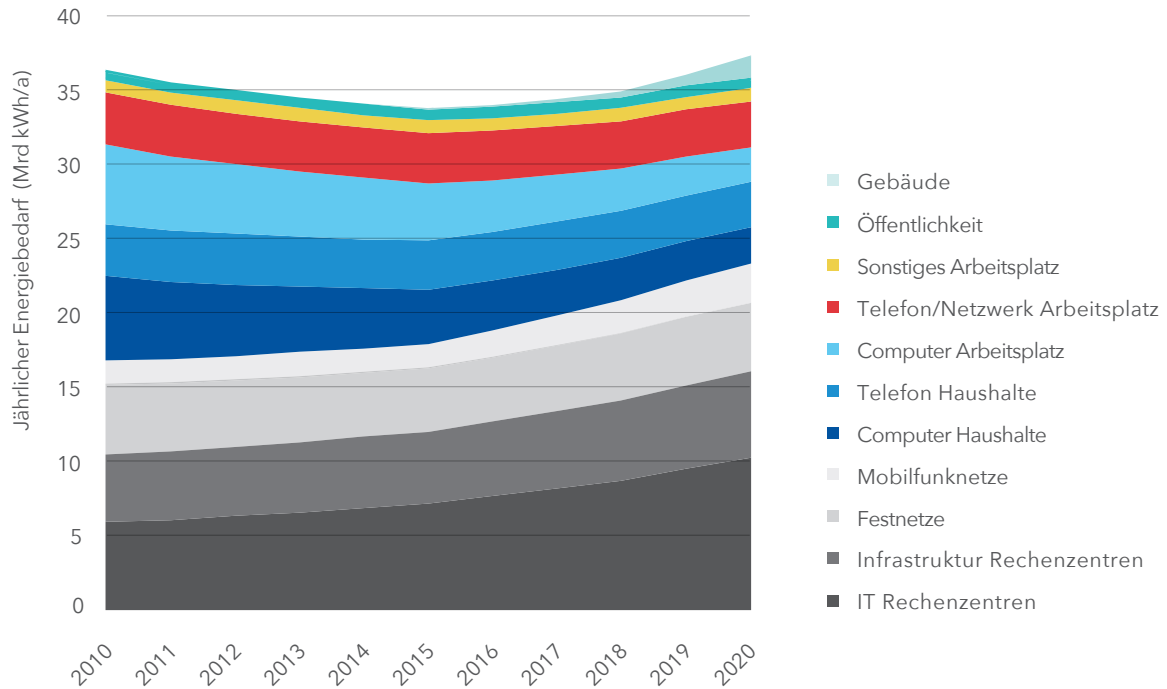


Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Im Zeitraum von 2010 bis 2020 hat sich der Anteil der Endgeräte am Energiebedarf der IKT sehr deutlich von etwa 38,8 Mrd. kWh/a auf 21,1 Mrd. kWh/a verringert. Dies ist insbesondere auf den Rückgang des Energiebedarfs im Bereich der Fernsehgeräte zurückzuführen. Dieser hat sich von 17,8 Mrd. kWh/a auf 8,3 Mrd. kWh/a verringert. Der Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen (Rechenzentren und Netze) hat sich dagegen deutlich von 16,9 Mrd. kWh/a auf 23,4 Mrd. kWh/a erhöht.

Werden die Geräte der Unterhaltungselektronik nicht zur IKT gezählt, so ist im vergangenen Jahrzehnt kein Rückgang des Energiebedarfs festzustellen (Abbildung 6). Die bei den Endgeräten erreichten Energieeinsparungen wurden durch den höheren Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen kompensiert. Zwischen 2010 und 2015 gab es einen leichten Rückgang des Energiebedarfs um etwa 3 Mrd. kWh/a. Dieser Rückgang wurde aber insbesondere durch den 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 ohne Unterhaltungselektronik mit 37,2 Mrd. kWh/a um etwa 1 Mrd. kWh/a höher als im Jahr 2010.

Abbildung 6: Energiebedarf der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)

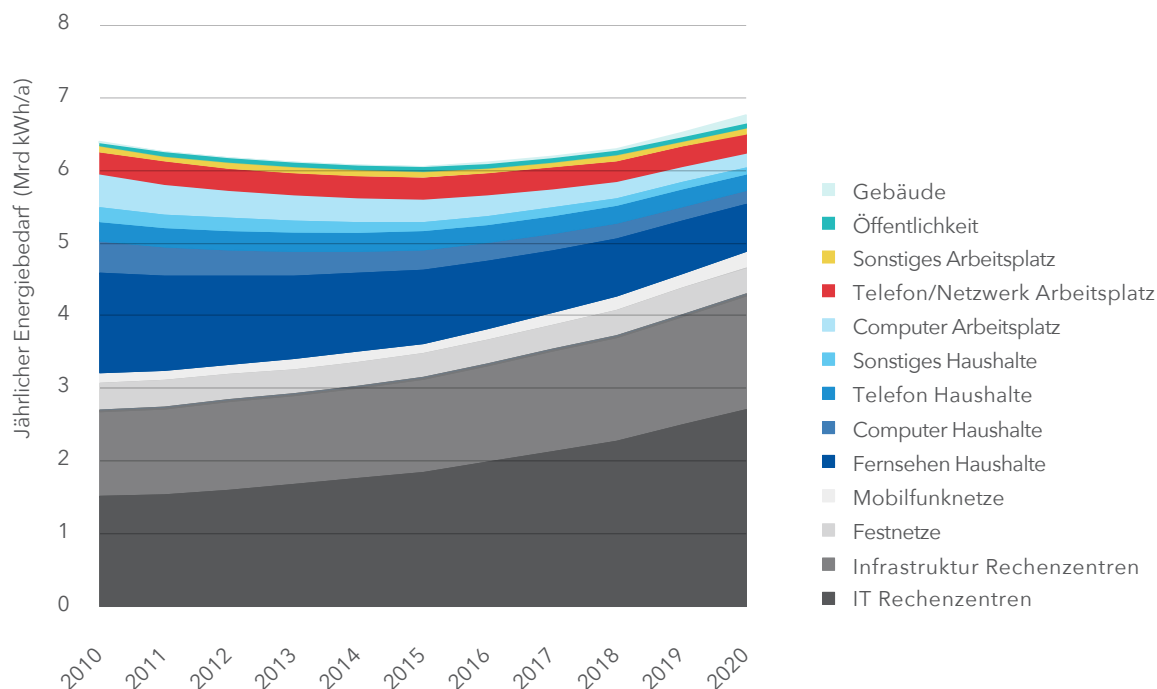


Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

4.2.2 Energiebedarf der IKT in Hessen

Im Bundesland Hessen ist der Energiebedarf der IKT inklusive Unterhaltungselektronik im Zeitraum 2010 bis 2020 leicht von **6,4 Mrd. kWh/a auf 6,7 Mrd. kWh/a** angestiegen (Abbildung 7). Dies ist vor allem durch den starken Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren von 2,7 Mrd. kWh/a auf 4,3 Mrd. kWh/a begründet. Die hohe Konzentration der Rechenzentrumsbranche in Hessen und das starke Marktwachstum der Branche insbesondere im Raum Frankfurt führen dazu, dass der Anteil der Rechenzentren auf fast zwei Drittel am gesamten Energiebedarf der IKT in Hessen angestiegen ist. Zum Vergleich: In Deutschland sind die Rechenzentren für ca. 1/3 des Energiebedarfs der IKT (inkl. Unterhaltungselektronik) verantwortlich. Auch der deutliche Rückgang des Energiebedarfs der Endgeräte konnte diese Zunahme im Energiebedarf in Hessen nicht ausgleichen.

Abbildung 7: Energiebedarf der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Klammert man die Unterhaltungselektronik aus und zählt ihren Energiebedarf nicht als zur IKT zugehörig, liegt der Anteil der Rechenzentren in Hessen sogar bei über 70 %. Bei dieser Sichtweise ist der Energiebedarf der IKT zwischen 2010 und 2020 von 4,8 Mrd. kWh/a um 25 % auf 6 Mrd. kWh/a angestiegen (Abbildung 8).

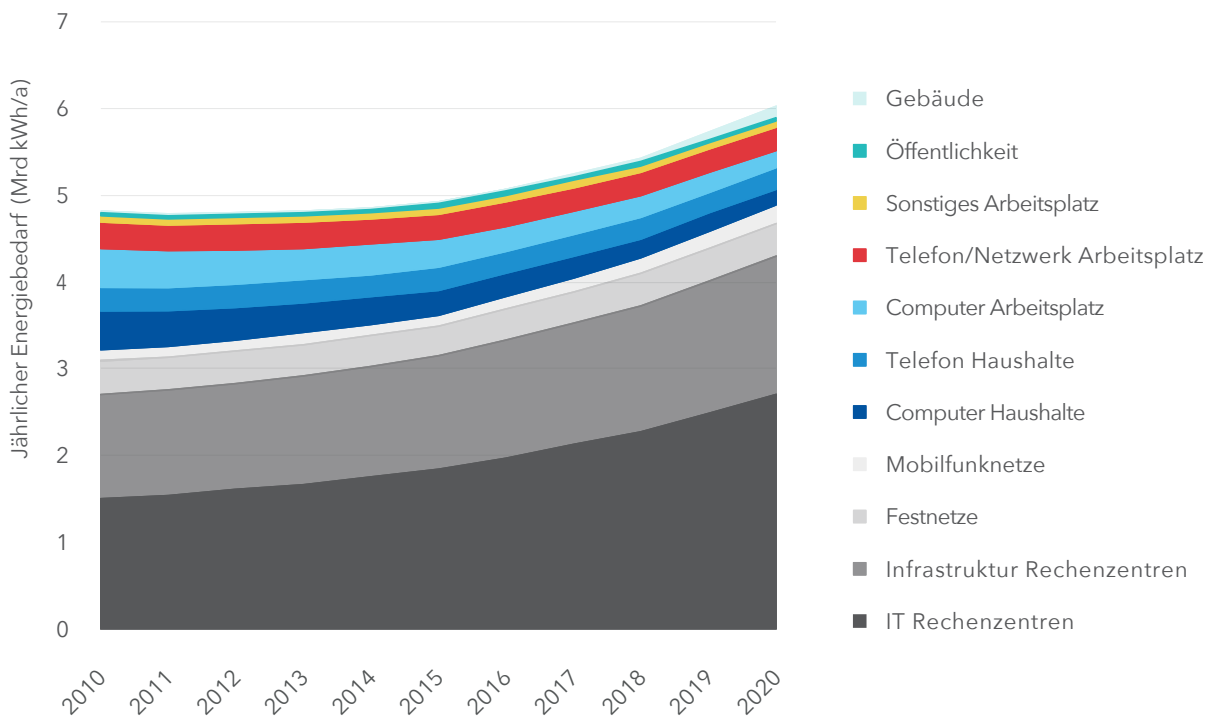
Im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie aus dem Jahr 2013 zu den Potenzialen zur Einsparung von THG-Emissionen in Hessen durch IKT (Clausen et al., 2013) ist festzustellen, dass in der vorliegenden Studie für das Jahr 2010 ein um etwa 0,8 Mrd. kWh/a höherer Energiebedarf ermittelt wurde. Diese Diskrepanz ist im Wesentlichen auf die Daten zu den Rechenzentren zurückzuführen. Während in der Studie aus dem Jahr 2013 für Rechenzentren im Jahr 2010 ein Energiebedarf von 1,75 Mrd. kWh/a ermittelt wurde, kommt die aktuelle Untersuchung zu dem Ergebnis, dass die Rechenzentren in Hessen im Jahr 2010 einen Energiebedarf von 2,7 Mrd. kWh/a hatten. Diese Diskrepanz in den Ergebnissen ist auf die deutlich verbesserte Datenlage zurückzuführen. Für die Abschätzungen im Jahr 2013 standen noch kaum Marktanalysen und andere Untersuchungen zur Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes in Hessen zur Verfügung.

Während die 2013er-Studie einen Anstieg des Energiebedarfs der IKT zwischen 2010 und 2020 im Trendfall um 20 % vorhergesagt hat (Clausen et al., 2013), ermittelt die aktuelle Studie einen Anstieg von 25 % in diesem Zeitraum. Die Potenziale, die im Jahr 2013 im GreenIT-Szenario gesehen wurden, konnten nicht realisiert werden. Im Jahr 2013 wurde von einem weitgehend gleichbleibenden Energiebedarf der Rechenzentren ausgegangen und ein deutlicher Anstieg

des Energiebedarfs der Endgeräte und Telekommunikationsnetze vorhergesagt. Tatsächlich war die Entwicklung fast genau anders herum. Während sich der Energiebedarf der Rechenzentren in Hessen um 60% erhöht hat, ging der Energiebedarf der Endgeräte um 45% zurück. Der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Hessen stieg um 13%.

Dass die tatsächliche Entwicklung im vergangenen Jahrzehnt deutlich von den ursprünglichen Prognosen abweicht, wurde schon in der BMWi-Studie zur Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland festgestellt. Die Verbesserungen der Energieeffizienz der Endgeräte waren in Deutschland deutlich höher als in der vergangenen Dekade erwartet. Dagegen stieg der Energiebedarf für die zentrale Bereitstellung von Rechenleistung in Rechenzentren stärker als ursprünglich prognostiziert (Stobbe et al., 2015).

Abbildung 8: Energiebedarf der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

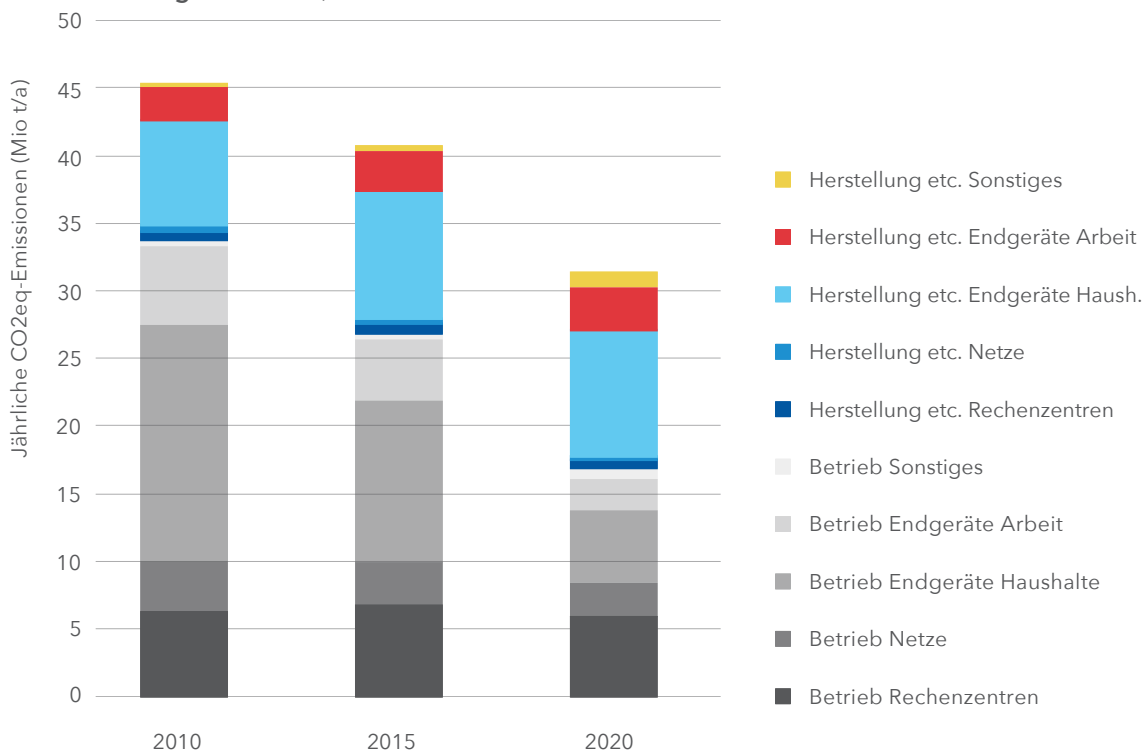
4.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

4.3.1 Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland

Betrachtet man die Entwicklung der THG-Emissionen der IKT in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020, so ist festzustellen, dass diese noch deutlicher als der Energiebedarf um 31 % von 45 Mio. t CO_{2eq}/a auf 31,1 Mio. t CO_{2eq}/a zurückgegangen sind (Abbildung 9). Dieser Rückgang ist insbesondere durch die deutlich niedrigeren CO₂-Emissionen in der Stromerzeugung zurückzuführen, die im betrachteten Zeitraum um 40 % von 600 g CO_{2eq}/kWh auf 363 g CO_{2eq}/kWh gesunken sind (Fritsche & Greß, 2019). Damit sanken die THG-Emissionen der Nutzung der IKT-Geräte und -Anlagen um 50 % von 33,7 Mio. t CO_{2eq}/a auf 16,9 Mio. t CO_{2eq}/a. Die Verringerung der THG-Emissionen durch den höheren Anteil von regenerativen Energieträgern in

der Stromerzeugung hat sogar dazu geführt, dass die THG-Emissionen der Rechenzentren im betrachteten Zeitraum leicht um 6,7 % von 6,9 Mio. t CO_{2eq}/a auf 6,5 Mio. t CO_{2eq}/a gesunken sind - trotz des oben festgestellten sehr deutlichen Anstiegs des Energiebedarfs der Rechenzentren. Die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der IKT-Geräte und -Anlagen bedingt sind, stiegen zwischen 2010 und 2020 dagegen um 26 % von 11,3 Mio. t CO_{2eq}/a auf 14,2 Mio. t CO_{2eq}/a an. Diese Entwicklungen zeigen den hohen Einfluss einer klimaschonenden Stromproduktion auf die THG-Emissionen der IKT. Außerdem steigt die Bedeutung der Herstellungsphase bei der Betrachtung der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der Geräte und Anlagen deutlich an.

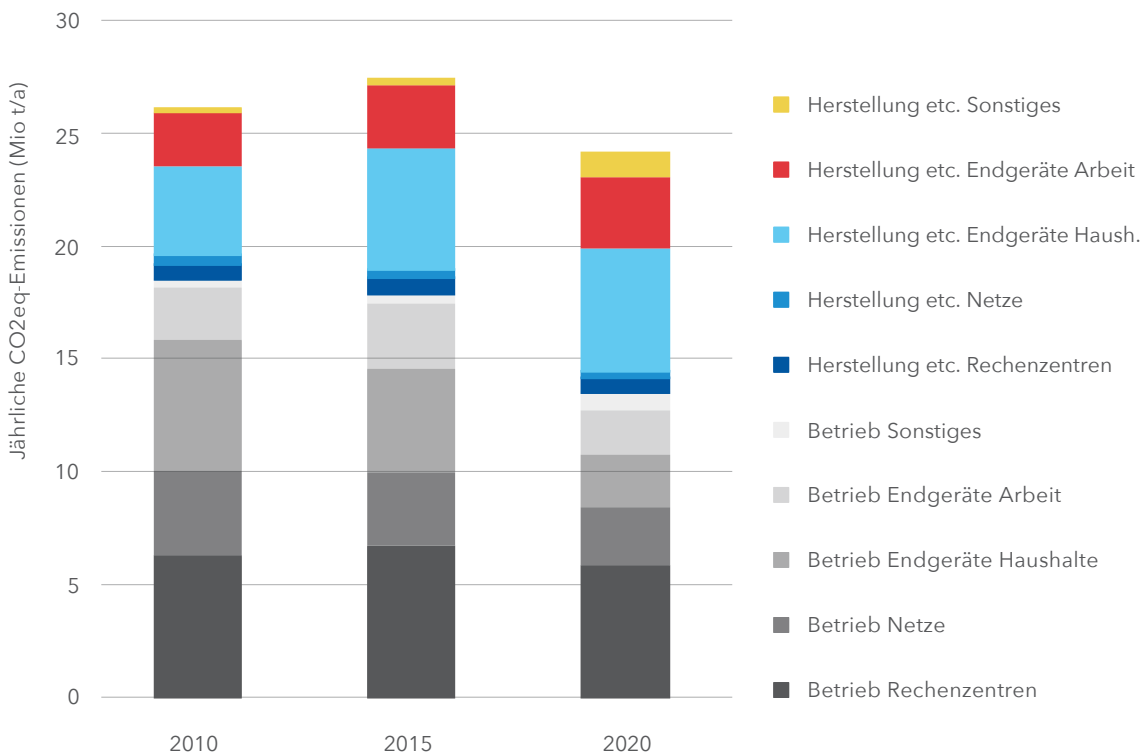
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Auch wenn die Unterhaltungselektronik nicht mit zu den IKT-Geräten gezählt wird, ist ein Rückgang der THG-Emissionen um etwa 7,5 % von 26,1 Mio. t CO_{2eq}/a auf 24,1 Mio. t CO_{2eq}/a zwischen 2010 und 2020 festzustellen (Abbildung 10). Bei dieser Betrachtungsweise wird der stark gesunkene Anteil der Nutzungsphase an den gesamten THG-Emissionen besonders deutlich. War der Betrieb der Geräte und Anlagen im Jahr 2010 noch für 71 % der THG-Emissionen verantwortlich, so waren es im Jahr 2020 nur noch etwa 56 %. Die Herstellung, der Transport und die Entsorgung sind also aktuell für fast die Hälfte der THG-Emissionen der IKT in Deutschland verantwortlich.

Abbildung 10: Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)



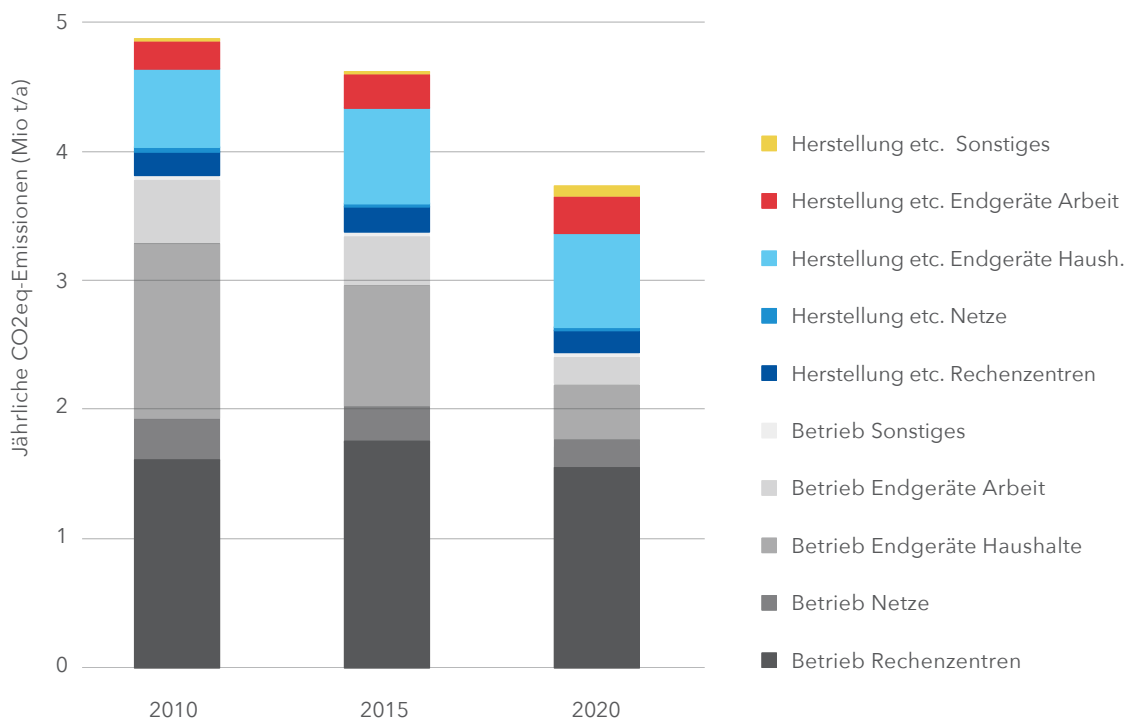
Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

4.3.2 Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen

Auch in Hessen konnten die THG-Emissionen der IKT (inklusive Unterhaltungselektronik) deutlich reduziert werden. Wurden im Jahr 2010 noch THG-Emissionen in Höhe von 4,8 Mio. t CO_{2eq}/a emittiert, waren es im Jahr 2020 mit 3,7 Mio. t CO_{2eq}/a etwa 24% weniger (Abbildung 11)⁶. Mit 1,7 Mio. t CO_{2eq}/a waren die THG-Emissionen der Rechenzentren im Jahr 2020 um etwa 0,1 Mio. t CO_{2eq}/a niedriger als im Jahr 2010. Der relative Anteil der Rechenzentren an den THG-Emissionen der IKT in Hessen (inklusive der Unterhaltungselektronik) stieg auf 47% an. Die Telekommunikationsnetze waren im Jahr 2020 für 6,4% der IKT-bedingten THG-Emissionen in Hessen verantwortlich.

Wie auf Bundesebene ist die Reduktion der THG-Emissionen auf den veränderten Strommix mit einem höheren Anteil regenerativer Energieträger zurückzuführen. Dadurch konnten die THG-Emissionen im Betrieb der Geräte und Anlagen um 36% von 3,81 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2010 auf 2,44 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 reduziert werden. Die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der Geräte verursacht werden, stiegen dagegen von 1,03 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2010 auf 1,25 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 an.

Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)



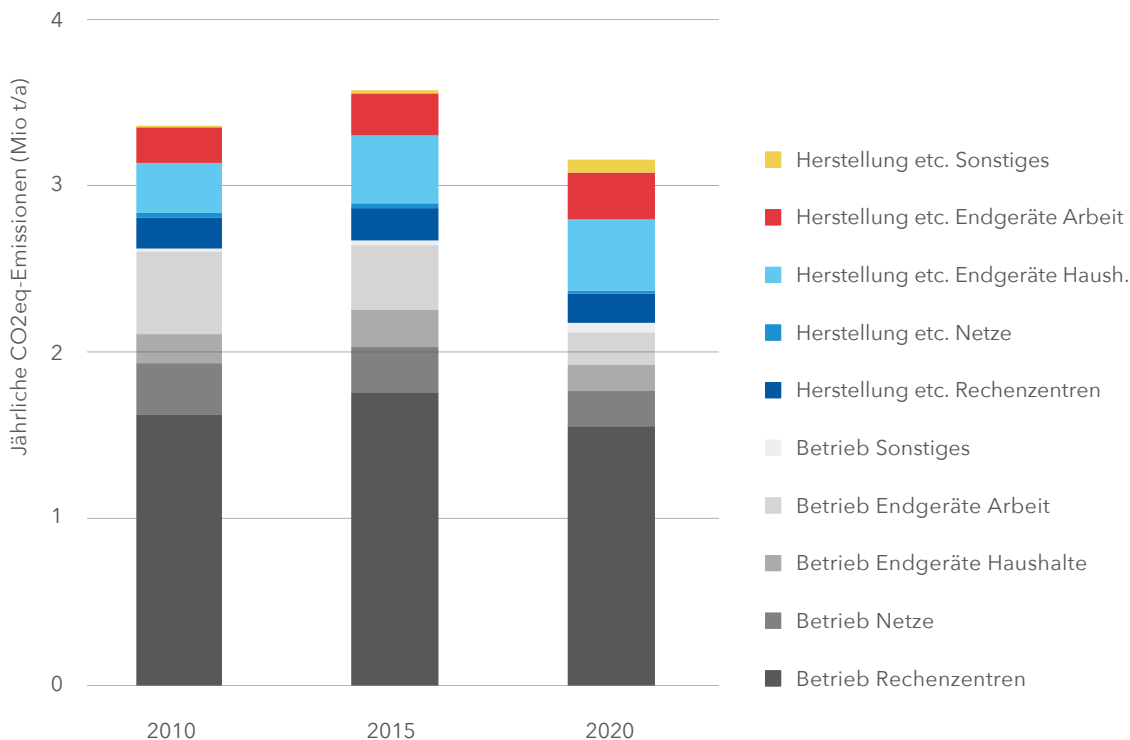
Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

⁶ Die in der vorliegenden Studie für Hessen ermittelten THG-Emissionen der IKT weichen deutlich von den in der von Borderstep im Jahr 2013 (Clausen, Beucker & Hintemann, 2013) ermittelten Werten ab. Dies ist dadurch begründet, dass in der vorliegenden Studie auch die Herstellung, der Transport und die Entsorgung der IKT-Produkte und -Anlagen mit berücksichtigt wird. Außerdem werden auch die Geräte der Unterhaltungselektronik in die Betrachtung miteinbezogen.

Werden die Geräte der Unterhaltungselektronik nicht in die Betrachtung einbezogen, so liegen die THG-Emissionen der IKT in Hessen im Jahr 2020 mit 3,2 Mio. t CO_{2eq}/a etwas unter dem Niveau des Jahres 2010 (3,4 Mio. t CO_{2eq}/a) (Abbildung 12). Bei dieser Betrachtungsweise erhöht sich der Anteil der Rechenzentren an den THG-Emissionen der IKT in Hessen auf 55 %. Durch die im Vergleich zu 2010 mehr auf regenerativen Energieträgern basierende Stromproduktion konnten die **THG-Emissionen im Betrieb der Geräte und Anlagen von etwa 2,63 Mio. t CO_{2eq}/a auf 2,18 Mio. t CO_{2eq}/a gesenkt** werden. Die von 0,74 Mio. t CO_{2eq}/a auf 0,98 Mio. t CO_{2eq}/a erhöhten THG-Emissionen in den anderen Lebensphasen der Geräte und Anlagen haben diese Reduktion aber fast ausgeglichen.

Die berechnete Entwicklung der THG-Emissionen weicht teilweise sehr deutlich von den Prognosen der Borderstep-Studie aus dem Jahr 2013 ab. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Stromproduktion im Jahr 2020 nicht so klimafreundlich ist, wie im Jahr 2013 angenommen. Die optimistischen Annahmen zur Entwicklung des Strommix haben im Jahr 2013 zu der Prognose geführt, dass sich die THG-Emissionen im Trendfall um mehr als 40% absenken lassen. Diese Erwartungen haben sich bei weitem nicht bewahrheitet⁷. Da sich auch der methodische Bezugsrahmen durch die Einbeziehung aller Produktlebensphasen deutlich verändert hat, sind die damaligen Prognosen nicht mit den hier dargestellten Abschätzungen der tatsächlichen Entwicklungen vergleichbar. Auf die von den damaligen Prognosen abweichende Entwicklung der Energiebedarfe wurde bereits oben hingewiesen.

Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

⁷ Im Jahr 2013 wurde im optimistischen Fall (BMU Langfristszenario) mit THG-Emissionen 270 g CO_{2eq}/kWh in der Strombereitstellung im Jahr 2020 ausgegangen (Clausen et al., 2013). In der vorliegenden Untersuchung wird mit THG-Emissionen von 363 g CO_{2eq}/kWh im Jahr 2020 gerechnet, also einem um 35% höheren Wert als im Jahr 2013 angenommen.

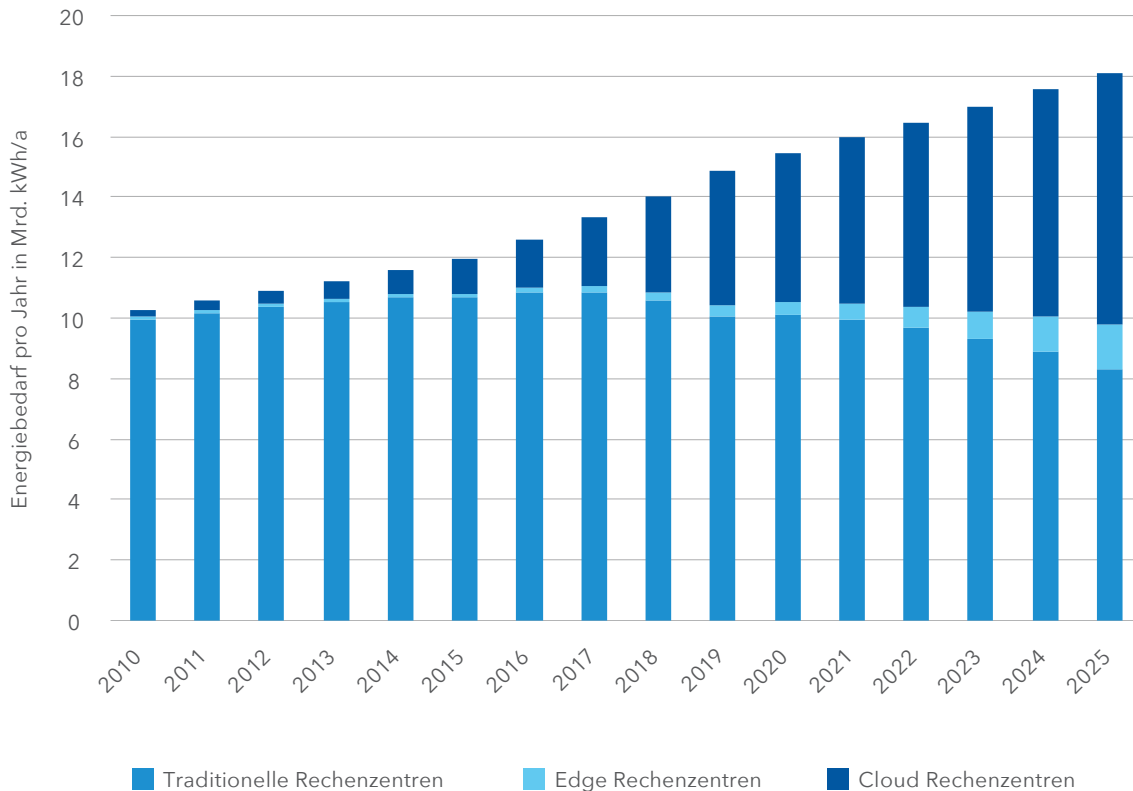
4.3.3 Implikationen von ausgewählten Technologietrends auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Im Folgenden werden anhand der Beispiele „Cloud Computing“ und Video-Streaming beispielhaft die Implikationen von Technologietrends auf die Entwicklung der THG-Emissionen in Hessen dargestellt.

Der Boom beim Bau von Rechenzentren wird insbesondere durch die zunehmende Nutzung von **Cloud Computing** getrieben (Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi & Stickler, 2020). Cloud-Angebote ersetzen zunehmend traditionelle Rechenzentren und lassen die Gesamtnachfrage nach Rechenleistung weiter ansteigen (Cisco, 2018a). Obwohl Cloud-Rechenzentren aufgrund von Größenvorteilen, besonders effizienten Rechenzentrumsinfrastrukturen und typischerweise hohen Serverauslastungen oft deutlich effizienter als traditionelle Rechenzentren sind (Bizo, 2019; Shehabi, Smith, Masanet & Koomey, 2018), konnte durch den Trend zum Cloud Computing bislang der Energiebedarf der Rechenzentren nicht abgesenkt werden. Im Gegenteil – die Zunahme an Cloud-Rechenleistung führte zu einem Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren, da nicht im gleichen Maße Kapazitäten in traditionellen Rechenzentren abgebaut wurden (Abbildung 13). Trotz der höheren Effizienz von Cloud-Computing-Lösungen steigt also der Energiebedarf – hier liegen demzufolge Rebound-Effekte vor. Der Trend zu Cloud Computing ist für das Bundesland Hessen und den Großraum Frankfurt a.M. von hoher Bedeutung, da die internationalen Cloud Computing-Anbieter vor allem in dieser Region ihre Rechenzentrumskapazitäten sehr stark ausgebaut haben und voraussichtlich auch in Zukunft weiter ausbauen werden. Der Trend zu Cloud Computing führt also auch zu einer regionalen Umverteilung des Energiebedarfs der Rechenzentren in den Großraum Frankfurt.

Für die Zukunft ist neben einer weiteren Zunahme von Cloud-Rechenzentren auch mit zunehmend mehr Edge-Rechenzentren bzw. sogenannten Edge-Cloud-Rechenzentren zu rechnen. Nach Berechnungen im Projekt TEMPRO werden die Edge-Rechenzentren im Jahr 2025 in Deutschland voraussichtlich 1,5 Mrd. kWh/a an elektrischer Energie benötigen. Bis zum Jahr 2030 kann der Energiebedarf der Edge-Rechenzentren mit dem weiteren Ausbau von 5G-Mobilfunknetzen und Edge-Computing-Anwendungen in Bereichen wie Industrie 4.0, Autonomes Fahren und Smart City auf etwa 4,5 Mrd. kWh/a ansteigen (Hintemann, 2020). Bezogen auf Hessen bedeutet dies, dass der Energiebedarf von Edge-Rechenzentren im Jahr 2030 bei etwa 0,5 Mrd. kWh/a liegen könnte.

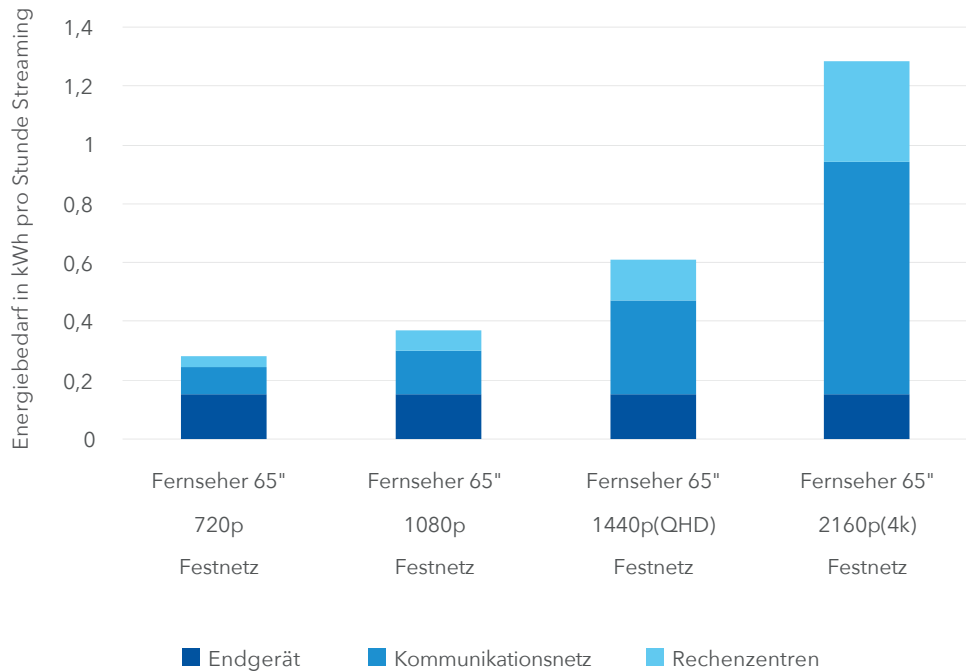
Abbildung 13: Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Cloud-Rechenzentren in den Jahren 2010 bis 2018 und Prognose bis 2025



Quelle: Hintemann (2020)

Durch zunehmend verfügbare Bandbreiten in den Telekommunikationsnetzen hat das **Video-Streaming** in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. So nutzen in Deutschland bereits mehr als 24 Millionen Menschen kostenpflichtige Streaming-Angebote. Diese Nutzer verbringen pro Quartal in Summe weit mehr als eine Milliarde Stunden auf den Videoportalen (GfK, 2020). Der Trend zu Video-Streaming hat dazu geführt, dass der Anteil der Videodaten am weltweiten Internetverkehr heute schon zwischen 70 % und 80 % liegt (Cisco, 2018b).

Wie hoch der Energiebedarf und die THG-Emissionen des Video-Streamings genau sind, kann nur grob abgeschätzt werden. Die weltweit verfügbaren Untersuchungen kommen zu teilweise deutlich unterschiedlichen Ergebnissen (Hintemann & Hinterholzer, 2020b). Dies liegt zum einen darin begründet, dass Video-Streaming über unterschiedlichste Geräte (TV, PC, Laptop, Tablet, Smartphone) und Netze (Festnetz, Mobilfunknetz) erfolgen kann. Zum anderen schreitet insbesondere die Entwicklung der Energieeffizienz in den Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren sehr schnell voran. So kann grob geschätzt werden, dass sich der Energiebedarf in den Kommunikationsnetzen und Rechenzentren pro Stunde Streaming in Full-HD zwischen 2018 und 2020 um etwa 25 % reduziert hat (Hintemann & Hinterholzer, 2020b). Dieser Effizienztrend wird allerdings durch den Trend zur Verwendung immer höherer Auflösungen wieder ausgeglichen. In Abbildung 14 ist die Abhängigkeit des Energiebedarfs beim Video-Streaming über ein TV-Gerät bei unterschiedlichen Auflösungen dargestellt. Beim Streaming in 4k-Qualität liegt der Energiebedarf um mehr als den Faktor vier über dem Energiebedarf beim Streaming in einfacher HD-Qualität (720p).

Abbildung 14: Energiebedarf durch Video-Streaming am TV mit verschiedenen Auflösungen

Quelle: Hintemann & Hinterholzer (2020b)

Im Durchschnitt verursacht eine Stunde Video-Streaming in Full-HD-Auflösung etwa 100 bis 175 Gramm Kohlendioxid für den Betrieb der Geräte und Anlagen. Das entspricht in etwa den THG-Emissionen einer Fahrt von einem Kilometer mit einem Kleinwagen (Hintemann & Hinterholzer, 2020b). Da Video-Streaming aber deutlich zunimmt und mittlerweile alle Bevölkerungsschichten erreicht hat, ist die Summe der THG-Emissionen durch Video-Streaming durchaus erheblich. Mit Hilfe aktueller Nutzungsdaten von Video-Streaming-Diensten im Internet lassen sich die THG-Emissionen durch Video-Streaming in Hessen abschätzen. Gemäß Media Activity Guide streamt ein Erwachsener (14 bis 69 Jahre) in Deutschland im Durchschnitt täglich 26 Minuten kostenlose Videos und 22 Minuten bezahlte Videos (Seven One Media, 2020). Geht man von etwa 5,3 Mio. Hessen in dieser Altersgruppe aus und nimmt THG-Emissionen von 130 g/Stunde für bezahlte Videos und 80 g/Stunde für kostenlose Videos⁸ an, so errechnen sich insgesamt THG-Emissionen von etwa 160.000 t CO_{2eq}/a durch Video-Streaming in Hessen. Hierbei sind noch nicht die THG-Emissionen in der Herstellung, beim Transport und bei der Entsorgung der Geräte und Anlagen berücksichtigt. Dennoch sind das bereits ca. 5 % der THG-Emissionen durch IKT in Hessen.

⁸ Die Zahl der Hessen in dieser Altersgruppe wird geschätzt, da die offiziellen Zahlen des Statistischen Landesamtes nicht genau in diese Altersgruppe unterscheiden. Bei den THG-Emissionen des Streamings wird davon ausgegangen, dass kostenlose Videos eher in geringerer Auflösung und auf kleineren Displays angeschaut werden.

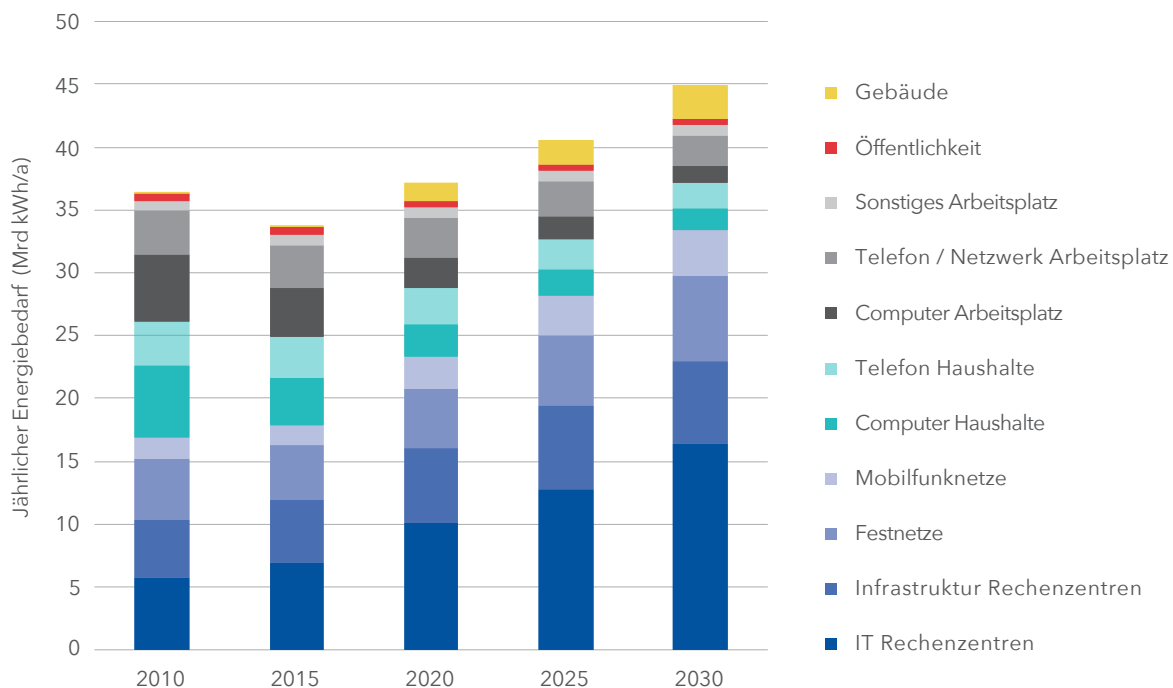
4.4 Basisszenario zur weiteren Entwicklung von Energiebedarf und THG-Emissionen

4.4.1 Basisszenario für Deutschland

Setzen sich die aktuellen Entwicklungen weiter fort, so wird sich der Energiebedarf der IKT in Deutschland im kommenden Jahrzehnt weiter erhöhen. Ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik ist ein Anstieg des Energiebedarfs von 37,2 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 auf 45,0 Mrd. kWh/a zu erwarten (Abbildung 15). Während der Energiebedarf der Endgeräte weiter abnimmt, ist bei den digitalen Infrastrukturen weiterhin mit einem deutlichen Anstieg des Energiebedarfs zu rechnen, im Vergleich zum Jahr 2010 könnte sich der Energiebedarf von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen fast verdoppeln.

Zählt man die Unterhaltungselektronik zur IKT, ist ebenfalls ein deutlicher Anstieg des Energiebedarfs der IKT zu verzeichnen. Von 46,5 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 steigt der Energiebedarf bei dieser Betrachtungsweise auf 53,1 Mrd. kWh/a im Jahr 2030. Damit läge der Energiebedarf aber auch in zehn Jahren noch deutlich unterhalb des Energiebedarfs im Jahr 2010, der bei etwa 56 Mrd. kWh/a lag.

Abbildung 15: Basisprognose zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)

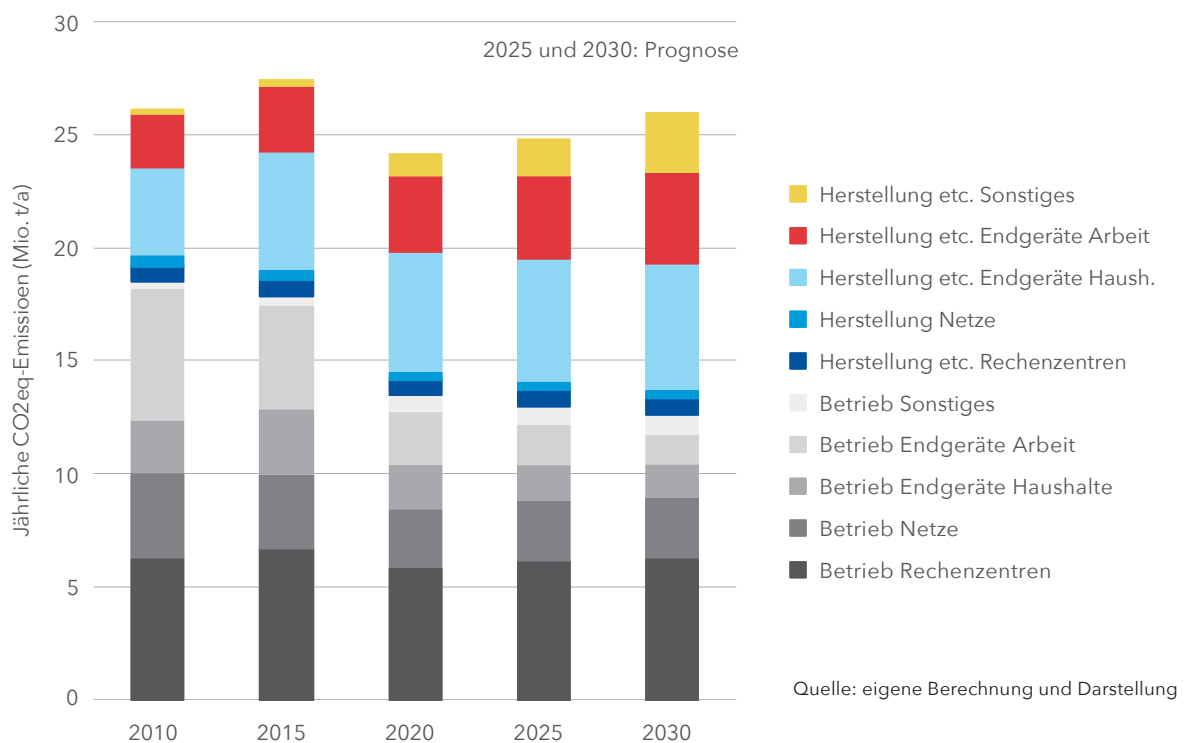


Auch bei den THG-Emissionen der IKT ist bis zum Jahr 2030 mit einem – wenn auch nur leichten – Anstieg zu rechnen (Abbildung 16). Ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik können die THG-Emissionen von 24,1 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 auf 26 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2030 steigen. Während die THG-Emissionen im Betrieb aufgrund des höheren Anteils regenerativer Energien im Strommix voraussichtlich weiter sinken werden, ist davon auszugehen, dass die THG-Emissionen in den anderen Lebensphasen der Geräte und Anlagen von 10,6 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 auf 13,3 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2030 zunehmen werden. Damit läge der Anteil von Herstellung, Transport und Entsorgung der Geräte und Anlagen der IKT an den gesamten THG-Emissionen im Jahr 2030 bei 51,3%.

Zählt man die Unterhaltungselektronik zur IKT hinzu, so steigen die THG der IKT zwischen 2020 und 2030 leicht von 31,1 Mio. t CO_{2eq}/a auf 32,2 Mio. t CO_{2eq}/a. Bei dieser Betrachtung läge der Anteil von Herstellung, Transport und Entsorgung der Geräte und Anlagen der IKT an den gesamten THG-Emissionen im Jahr 2030 bei 55,5%. Im Jahr 2010 lag dieser Anteil noch bei 29%.

Vergleicht man die Prognosen der vorliegenden Untersuchung mit einer Studie von Accenture im Auftrag des Bitkom (Bitkom, 2021a), so kann festgestellt werden, dass die Analysten von Accenture zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Die Accenture-Untersuchung berücksichtigt nicht den gesamten Lebenszyklus bei Rechenzentren und Netzen und macht auch leider keinerlei Angaben zu Annahmen und Detaildaten. Dennoch kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse insbesondere in den Bereichen Rechenzentren und Netze sehr ähnlich sind. Für Endgeräte gehen die Analysten von Accenture allerdings anscheinend von deutlich optimistischeren Annahmen aus, die aber leider nicht überprüft werden können. Sie prognostizieren für Endgeräte im Jahr 2030 nur THG-Emissionen von 7 bis 11 Mio. t CO_{2eq}/a statt 12 bis 19 Mio. t CO_{2eq}/a wie in der vorliegenden Studie.

Abbildung 16: Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)

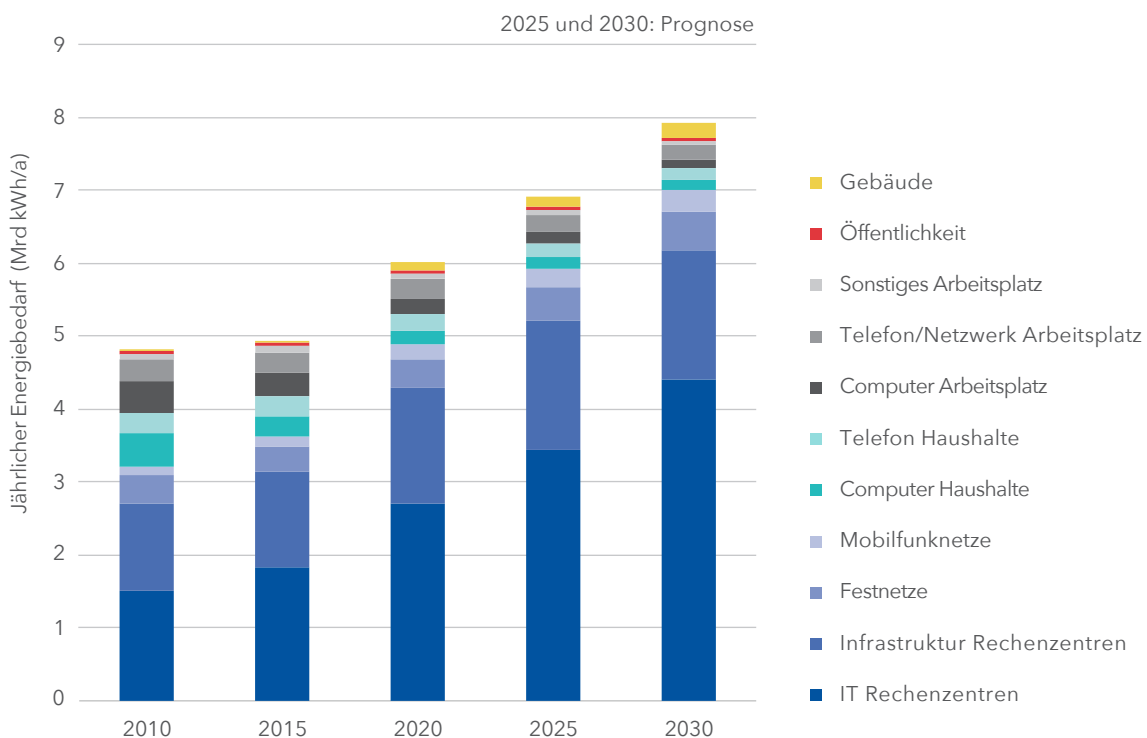


4.4.2 Basisszenario für Hessen

Vor allem bedingt durch den prognostizierten Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren in Hessen wird auch der gesamte Energiebedarf der IKT in Hessen voraussichtlich in Zukunft weiter ansteigen. Ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik wird prognostiziert, dass der Energiebedarf der IKT in Hessen von 6,0 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 auf 7,9 Mrd. kWh/a im Jahr 2030 ansteigt (Abbildung 17). Allein für die Rechenzentren wird ein Anstieg von 4,3 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 auf 6,2 Mrd. kWh/a im Jahr 2030 prognostiziert. Tritt die Entwicklung so ein, so wären die Rechenzentren im Jahr 2030 für 78 % des Energiebedarfs der IKT in Hessen (ohne Unterhaltungselektronik) verantwortlich.

Wird die Unterhaltungselektronik der IKT zugerechnet, so steigt der Energiebedarf der IKT in Hessen von 6,7 Mrd. kWh/a auf 8,6 Mrd. kWh/a.

Abbildung 17: Basisprognose zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Hessen bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)



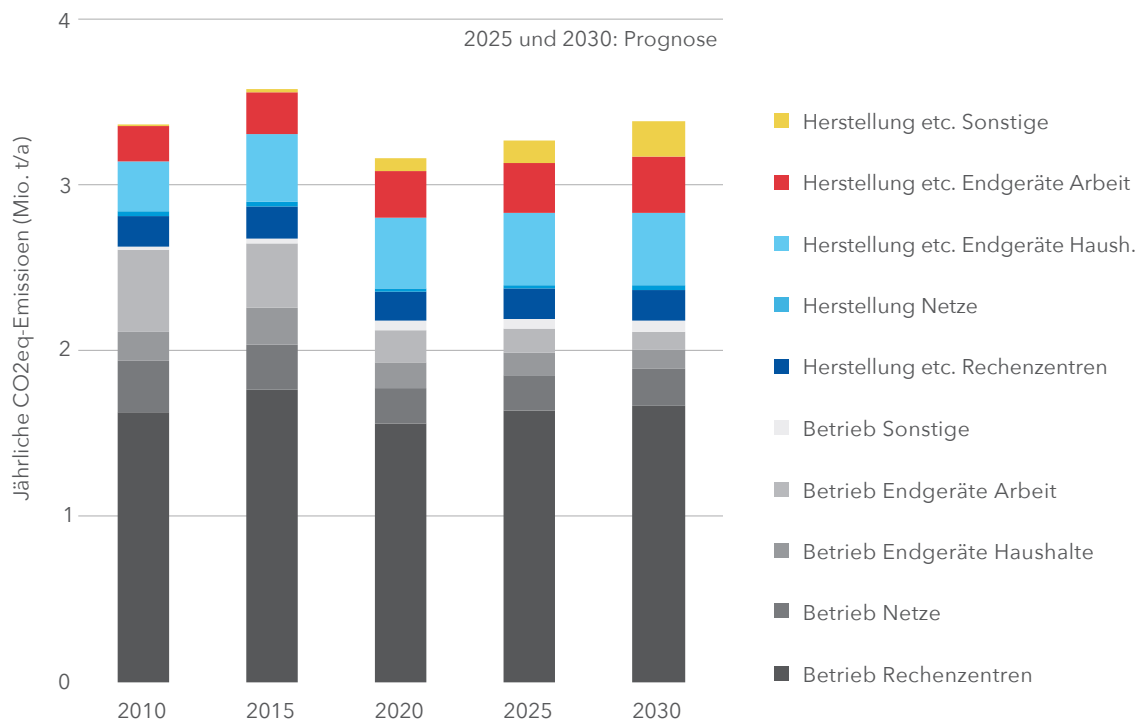
Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Die THG-Emissionen der IKT in Hessen steigen im kommenden Jahrzehnt voraussichtlich leicht an. Ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik ist ein Anstieg von 3,2 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 auf 3,4 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2030 zu erwarten (Abbildung 18). Während die THG-Emissionen durch den Betrieb der IKT mit 2,2 Mio. t CO_{2eq}/a in dem betrachteten Zeitraum konstant bleiben, steigen die THG-Emissionen in den anderen Lebensphasen von 1 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 auf 1,2 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2030 an. Der prognostizierte Anteil der

THG-Emissionen in der Nutzungsphase liegt mit 65% im Jahr 2030 in Hessen deutlich höher als in Deutschland insgesamt. Dies ist vor allem auf den sehr hohen Anteil der Rechenzentren am Energiebedarf der IKT in Hessen zurückzuführen.

Bezieht man die Unterhaltungselektronik in die IKT mit ein, so steigen die THG-Emissionen der IKT in Hessen zwischen 2020 und 2030 voraussichtlich von 3,7 Mio. t CO_{2eq}/a auf 3,9 Mio. t CO_{2eq}/a.

Abbildung 18: Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

5 Klimaschutzpotenziale bei digitalen Infrastrukturen und Endgeräten in Hessen

5.1 Rechenzentren

Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, sind die IKT-bedingten Energiebedarfe und THG-Emissionen in Hessen zu einem sehr großen Anteil durch die Rechenzentren verursacht. Mit 4,3 Mrd. kWh/a im Jahr 2020 sind die Rechenzentren für 2/3 des Energiebedarfs der IKT inklusive der Unterhaltungselektronik in Hessen verantwortlich. Bei den THG-Emissionen beträgt der Anteil der Rechenzentren in Hessen 47%. Wird die Unterhaltungselektronik nicht mit zur IKT gezählt steigt der Anteil der Rechenzentren sogar auf über 70% am Energiebedarf und 55% an den THG-Emissionen.

Auch für die Zukunft ist zu erwarten, dass der europaweit führende Rechenzentrumshotspot Frankfurt a. M. und der weltweit größte Internetknoten DE-CIX weiter ausgebaut werden und damit die Energiebedarfe der Rechenzentren vermutlich weiter deutlich zunehmen werden. Setzen sich die aktuellen Trends fort, so ist mit einem Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren in Hessen bis auf 6,2 Mrd. kWh/a im Jahr 2030 zu rechnen. Die THG-Emissionen der Rechenzentren in Hessen steigen aufgrund des höheren Anteils regenerativen Stroms dagegen nur geringfügig an.

Aktuell ist eine Reihe von Großprojekten für neue Rechenzentren im Raum Frankfurt geplant, deren Anschlussleistung zwischen 100 und 200 Megawatt (MW) liegt. So plant das Unternehmen P3 Logistic Parks Germany auf dem Gelände einer ehemaligen Kaserne in Hanau den „Daten Campus Center“. Auf einer knapp 40 Hektar großen Fläche soll ein aus fünf Gebäudekörpern bestehendes Rechenzentrum gebaut werden. In den zweigeschossigen Gebäuden sollen Server betrieben werden, die im Endausbau etwa **180 MW Stromleistung aufnehmen**. Das entspricht in etwa dem Doppelten der heutigen Stromleistungsaufnahme von ganz Hanau (Iding, 2019). Interxion plant auf dem ehemaligen Neckermann-Gelände in Frankfurt den „Digital Park Fechenheim“. Im Zeitraum von 2021 bis 2028 sollen auf dem Gelände Rechenzentren entstehen, die ebenfalls bis zu 180 Megawatt Stromleistung aufnehmen (Heunemann, 2020). In Offenbach baut das Unternehmen CloudHQ auf einer Fläche von 14,5 Hektar zwei jeweils zweistöckige Rechenzentren, die zusammen eine IT-Last von 115 MW haben sollen. Der Bau der Rechenzentren soll von Ende 2020 bis Mitte 2022 erfolgen (CloudHQ, 2020; Schlegl, 2020; Stadt Offenbach, 2020).

Auch Studien zur künftigen Entwicklung der Stromnachfrage gehen von einem deutlich wachsenden Energiebedarf der Rechenzentren aus:

- Im Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035 (Nahmmacher et al., 2020) wird von zusätzlichen Stromgroßverbrauchern in Hessen bis zum Jahr 2035 von 12 Mrd. kWh im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) ausgegangen. Eine herausragende Rolle für diese Entwicklung wird den Rechenzentren zugeschrieben.
- Die Verteilnetzstudie Hessen 2024 – 2034 (BearingPoint & Fraunhofer IEE, 2018) geht von einem Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren in der Metropolregion um 1,232 Mrd. kWh bis 2024 bzw. 1,820 Mrd. kWh bis 2034 (jeweils gegenüber 2014) aus.

Als wesentliche Komponente der digitalen Infrastrukturen kommt den Rechenzentren eine hohe Bedeutung für die künftige Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft zu (Hintemann & Clausen, 2018b, 2018a). Eine Beschränkung des Ausbaus von Rechenzentrumskapazitäten könnte sich daher negativ auf die Region und auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen auswirken. In einer aktuellen Untersuchung des Borderstep Instituts im Auftrag des eco - Verband der Internetwirtschaft e.V. (Hintemann & Hinterholzer, 2020a; Hintemann, Hinterholzer & Clausen, 2020) wurden Vertreter der Rechenzentrumsbranche zu den politischen, regulatorischen und sonstigen Rahmenbedingungen für Rechenzentren in Deutschland und Europa befragt. Ein politischer Handlungsbedarf wurde insbesondere in den Themenfeldern Abwärmenutzung, Sektorkopplung und Verwendung natürlicher Kältemittel in Rechenzentren gesehen. Um Abwärmenutzung und Sektorkopplung in Deutschland voranzubringen, müssten die ökonomischen Rahmenbedingungen verbessert werden. Aufgrund der hohen Strompreise in Deutschland ist z. B. der Betrieb von Wärmepumpen, mit denen das Temperaturniveau der Abwärme angehoben werden kann, kaum wirtschaftlich möglich (Clausen, Hintemann & Hinterholzer, 2020).

Eine Erhöhung der Transparenz z. B. durch die Erstellung eines Rechenzentrumskatasters und einheitliche Effizienzstandards in der Branche wird prinzipiell begrüßt (Hintemann, Hinterholzer & Clausen, 2020). Allerdings wurde eine Fokussierung der deutschen Politik auf das nationale Umweltlabel „Blauer Engel“ für Rechenzentren kritisiert. Ein international anerkanntes Energie-label könnte eher akzeptiert werden. Auch seien die konkreten Anforderungen des Blauen Engels für Rechenzentren in der freien Wirtschaft kaum zu erfüllen⁹. Befürchtungen hinsichtlich der internationalen Wettbewerbsfähigkeit äußerten die Rechenzentrumsbetreibenden im Wesentlichen aufgrund der deutlich unterschiedlich hohen Abgaben auf den Strompreis (Hintemann, Hinterholzer & Clausen, 2020). Hohe Strompreise sind insbesondere für Betreiber von Colocation-Rechenzentren ein wesentlicher Standortfaktor. Weitere insbesondere von Colocation-Betreibern als besonders relevant angesehene Standortfaktoren sind zügige Genehmigungsprozesse und eine zuverlässige Stromversorgung (Hintemann & Clausen, 2018a).

Um die Ziele einer nachhaltigen Entwicklung des Rechenzentrumsstandortes Hessen zu erreichen, ist es erforderlich, den weiteren Ausbau der Rechenzentren so zu lenken, dass sie möglichst energieeffizient und klimaschonend betrieben werden.

⁹ Siehe zu dieser Thematik auch ein aktuelles Positionspapier des Digitalverbandes Bitkom (Bitkom, 2021b)

Ein Treiber für den kontinuierlichen Ausbau der Rechenzentrumskapazitäten ist der Trend zu mehr Cloud Computing, wie oben bereits ausgeführt. Die Nachfrage nach Rechenleistung wird auch durch die Entwicklungen im Bereich Künstlicher Intelligenz und Maschinellem Lernen vergrößert, da die hier notwendige Verarbeitung großer Datenmengen große Rechenkapazitäten erfordert. Industrie 4.0-Technologien und die zunehmende Vernetzung im Internet of Things (siehe Abschnitt 6.2) sorgen ebenso für die weitere Auslastung der Dateninfrastruktur und führen zu einem Anstieg der Energiebedarfe in den Telekommunikationsnetzen und in Rechenzentren.

Aber auch die private Nutzung treibt den Energiebedarf der Rechenzentren weiter in die Höhe. Hier findet eine Verlagerung des Energiebedarfs von den immer kleineren und effizienteren Endgeräten auf den (für Verbraucher nicht offensichtlichen) Energiebedarf in den Netzen und Rechenzentren statt (Hintemann & Hinterholzer, 2020b; Stobbe et al., 2015). Beschleunigt wird dieser Prozess dadurch, dass immer mehr Endgeräte internetfähig werden.

Für Rechenzentren existiert eine Vielzahl von neuen Technologien, die es ermöglichen, ihren Betrieb in Zukunft noch energieeffizienter und klimafreundlicher zu gestalten. Im Rahmen von mehreren Untersuchungen konnten am Borderstep Institut mehr als 70 solcher Technologien identifiziert werden (Hintemann & Hinterholzer, 2018a, 2018b; Hintemann, Hinterholzer & Clausen, 2020; Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi, et al., 2020; Pehlken et al., 2020).

Ansatzpunkte für eine Verringerung der THG-Emissionen aus Rechenzentren liegen vor allem in den Bereichen IT-Hardware und -Management, in der Klimatisierung und in der klimafreundlichen Stromversorgung. So kann beispielsweise durch das intelligente IT-Management und die Nutzung von Cloud-Technologien die Effizienz deutlich erhöht werden (Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi, et al., 2020; Masanet, Shehabi, Lei, Smith & Koomey, 2020). Der verstärkten Berücksichtigung von Energieeffizienzaspekten bei der Softwareentwicklung werden ebenfalls hohe Potenziale zugesprochen (Hilty et al., 2015; Hintemann, Hinterholzer & Clausen, 2020). Die Heißwasserkühlung von Serversystemen stellt eine weitere aussichtsreiche Technologie dar (Ostler, 2018b). Außerdem besteht die Möglichkeit, die Abwärme aus Rechenzentren zu nutzen. Anreize zum energie- und klimafreundlichen Betrieb von Rechenzentren können auch durch eine Erhöhung der Transparenz z. B. durch ein allgemein akzeptiertes Label gesetzt werden.

Aus Sicht des Landes Hessen bietet es sich an, die verschiedenen **Rechenzentrums-Initiativen in Hessen weiter zu bündeln und Synergien in der Zusammenarbeit zu nutzen**. Aufgrund der hohen Bedeutung der Rechenzentren im Land Hessen für die wirtschaftliche Entwicklung und auch in Hinsicht auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen ist eine gemeinsame Förderung und Weiterentwicklung des Standortes anzustreben. Hier kann das Land Hessen seine besondere Kompetenz auch auf Bundes- und EU-Ebene einbringen. Gemeinsam können die Rahmenbedingungen für Rechenzentren so gestaltet werden, dass der Standort Hessen attraktiv bleibt und der Einsatz von Technologien zur Reduktion von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen gefördert wird. Als nationaler und internationaler Rechenzentrums-Hotspot bietet sich Frankfurt a. M. an, die verschiedenen Akteure in Wissenschaft, Politik, Unternehmen und Gesellschaft zusammenzubringen und beispielsweise regelmäßig einen „**Rechenzentrums-Gipfel**“ durchzuführen. Auf einem solchen Gipfel könnte das Thema Nachhaltigkeit von Rechenzentren eine zentrale Rolle spielen. Der Gipfel könnte Initiator und Förderer von Aktivitäten zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene werden.

Weitere Handlungsmöglichkeiten im Bereich der Rechenzentren sind z.B. Förderprogramme zur Nutzung von **Abwärme aus Rechenzentren**. Diese könnten sich z.B. an Strukturen in Stockholm orientieren. Dort bieten Wirtschaftsförderung, Stadtverwaltung, Energieversorger und IT-Unternehmen gemeinsam sogenannte Dataparks an, in denen die Abwärme der dort ansässigen Rechenzentren genutzt wird (Rylander, 2020).

5.2 Telekommunikationsnetze

Der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Hessen ist in den vergangenen Jahren angestiegen. Mit **0,59 Mrd. kWh/a** benötigten die Telekommunikationsnetze in Hessen im Jahr 2020 etwa **13 % mehr Energie als im Jahr 2010**. Während der Energiebedarf der Festnetze durch die Abschaltung der analogen Systeme im vergangenen Jahrzehnt geringfügig gesenkt werden konnte, stieg der Energiebedarf der Mobilfunknetze kontinuierlich an. In Zukunft ist aufgrund des weiteren Ausbaus der Telekommunikationsnetze in Richtung Gigabit-Internet (Glasfaser und 5G Mobilfunk) mit einem Anstieg des Energiebedarfs im Festnetz und im Mobilfunknetz zu rechnen. Die Effizienzgewinne in den Telekommunikationsnetzen werden zwar deutlich höhere Datenraten ermöglichen, aber dennoch nicht zum Absinken des Energiebedarfs der Netze führen. Die durch die schnelleren Netze verursachten Wachstums- und Rebound-Effekte werden dazu führen, dass in Summe ein weiteres Ansteigen des Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze zu verzeichnen sein wird (Andrae, 2019b; Stobbe et al., 2015). Setzen sich die aktuellen Nutzungstrends und technischen Entwicklungen fort, so liegt der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze im Jahr 2030 mit 0,83 Mrd. kWh/a um 60 % über dem Energiebedarf der Netze im Jahr 2010. Dabei läge der Energiebedarf in den Festnetzen mit 0,54 Mrd. kWh/a um 40 % über dem Energiebedarf im Jahr 2010. Der Energiebedarf der Mobilfunknetze wäre gegenüber 2010 um 123 % auf 0,29 Mrd. kWh/a angestiegen.

Betrachtet man die Entwicklung der THG-Emissionen der Telekommunikationsnetze in Hessen, so ist festzustellen, dass diese mit knapp 0,24 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2020 um etwa 30 % niedriger liegen als im Jahr 2010. Für das Jahr 2030 prognostiziert die vorliegende Studie mit 0,25 Mio. t CO_{2eq}/a trotz der Entwicklung zum Gigabit-Internet nur geringfügig höhere THG-Emissionen als im Jahr 2020. Die verringerten THG-Emissionen in der Stromproduktion gleichen den Anstieg des Energiebedarfs der Netze damit fast aus. Es wird also voraussichtlich gelingen, die erhebliche Leistungssteigerung der Netze und das weiter deutlich ansteigenden Datenvolumen in den Netzen ohne einen Anstieg bei den THG-Emissionen zu realisieren. Ein Grund hierfür ist die auch in Zukunft zu erwartende deutliche Steigerung der Effizienz der Netze (in GB/kWh). Eine aktuelle Studie des Umweltbundesamtes zeigt, dass Glasfaser und 5G deutlich energieeffizienter sind als die VDSL-Technologie oder die dritte und vierte Generation des Mobilfunks (Umweltbundesamt, 2020).

Leistungsfähige und zuverlässige Breitbandnetze sind eine Grundvoraussetzung für die weitere Digitalisierung. Die Corona-Pandemie hat sehr anschaulich gezeigt, dass eine Reduktion von Verkehr durch die Nutzung von digitalen Technologien wie Videokonferenzen und Home-Office-Lösungen nur möglich ist, wenn eine ausreichende Breitbandverfügbarkeit vorhanden ist. Mit dem **Mobilfunkpakt und der Gigabitstrategie** ist Hessen in diesem Bereich bereits gut aufgestellt.

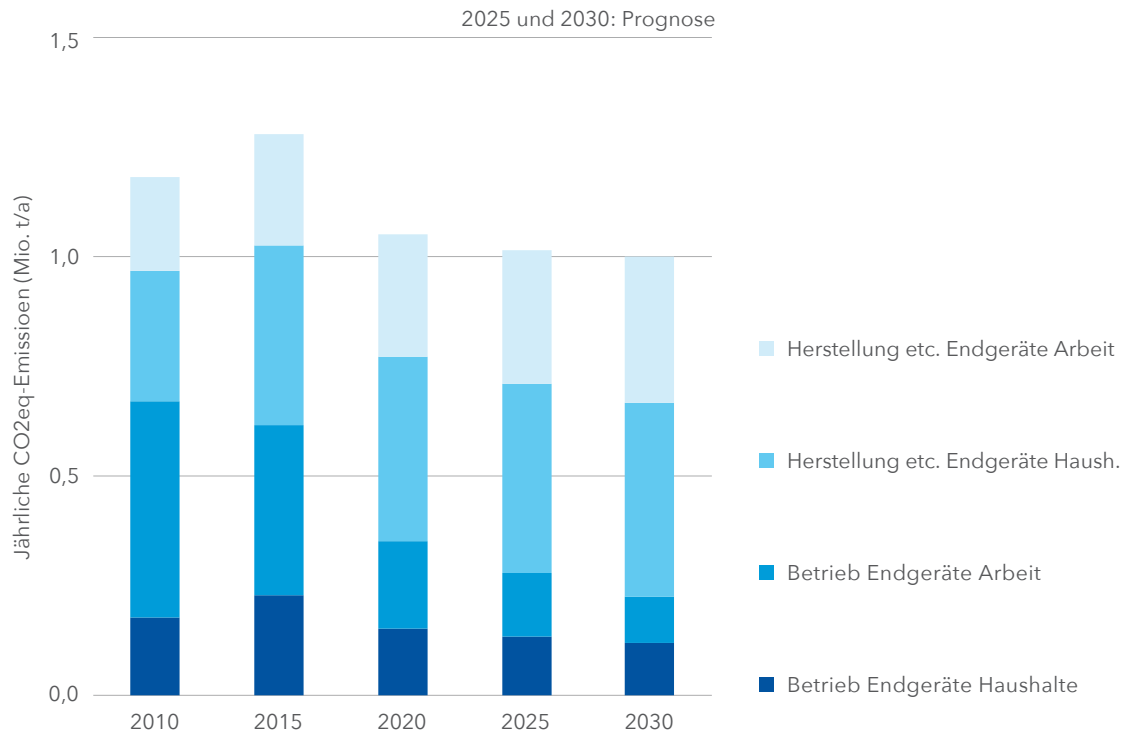
Ansatzpunkte, die THG-Emissionen der Telekommunikationsnetze zu reduzieren liegen z. B. in der weiteren **Förderung des Ausbaus energieeffizienter Lösungen im Bereich Glasfaser und 5G** und in der weiteren **Forschung zur Nachhaltigkeit von 5G Mobilfunk und Edge Computing**. Die weiteren Aktivitäten im Rahmen **des Mobilfunkpaktes und der Gigabitstrategie** könnten außerdem noch expliziter als bisher auch Nachhaltigkeitsziele beinhalten. So könnte z. B. die Förderung des Mobilfunkausbaus an Energieeffizienz- und Klimaschutzkriterien gekoppelt werden.

5.3 Endgeräte

Die THG-Emissionen der IKT-Endgeräte (ohne Unterhaltungselektronik) in Haushalten und an Arbeitsplätzen in Hessen sind zwischen 2010 und 2020 um knapp 10 % von 1,15 Mio. t CO_{2eq}/a auf 1,05 Mio. t CO_{2eq}/a gesunken (Abbildung 19). Der Rückgang ist auf die verbesserte Energieeffizienz der Geräte und die Verringerung der THG-Intensität in der Strombereitstellung zurückzuführen. Die THG-Emissionen, die bei der Herstellung, beim Transport und bei der Entsorgung der Geräte entstehen, sind in dem betrachteten Zeitraum um fast 40 % von 0,51 Mio. t CO_{2eq}/a auf 0,7 Mio. t CO_{2eq}/a angestiegen. Damit entstehen im Jahr 2020 etwa 2/3 der gesamten THG-Emissionen der Geräte in diesen Produktlebensphasen – im Jahr 2010 waren Herstellung, Transport und Entsorgung der Geräte noch für ca. 45 % der THG-Emissionen der Geräte verantwortlich.

Setzt sich die Entwicklung wie bisher fort, so werden die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 insgesamt weiter leicht sinken, auf 1,0 Mio. t CO_{2eq}/a im Jahr 2030. Dabei steigt der Anteil von Herstellung, Transport und Entsorgung weiter an, auf 78 % im Jahr 2030. Insgesamt wären die Endgeräte im Jahr 2030 für 30 % der THG-Emissionen der IKT in Hessen verantwortlich, wenn die Unterhaltungselektronik nicht berücksichtigt wird. Damit wäre der Anteil der Endgeräte von 35 % im Jahr 2010 etwas gesunken. Mit Berücksichtigung der Geräte der Unterhaltungselektronik werden THG-Emissionen der Endgeräte im Jahr 2030 von 1,49 Mio. t CO_{2eq}/a prognostiziert. Das wäre ein Anteil von 38 % an den THG-Emissionen der IKT. Im Jahr 2010 hatten die Endgeräte inkl. Unterhaltungselektronik noch einen Anteil von 55 % an den THG-Emissionen der IKT in Hessen.

Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der IKT-Endgeräte in Hessen 2010 bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Endgeräte in Haushalten und Unternehmen mit einem Anteil von etwa 1/3 an den THG-Emissionen der IKT in Hessen noch immer eine bedeutende Rolle spielen, wenn es um die Reduktion der Klimawirkungen der IKT geht. Während in der Vergangenheit der Fokus vor allem auf der Reduktion des Energiebedarfs der Geräte lag, rückt für die Zukunft mehr und mehr die Herstellung, der Transport und die Entsorgung der Geräte in den Vordergrund.

Ansatzmöglichkeiten zur Reduktion der THG-Emissionen der Endgeräte liegen daher vor allem in einer auf **Nachhaltigkeit ausgerichteten Beschaffung** und in der **möglichst langen Nutzung von Endgeräten** bzw. in der Weiterverwendung der Geräte. Dies könnte z. B. durch die Sicherstellung der Versorgung mit Softwareupdates und eine Abwärtskompatibilität von Hard- und Software erreicht werden. Im Land Hessen könnten über entsprechende Initiativen zur Information und über die öffentliche Beschaffung hier deutliche Impulse gesetzt werden.

6

Klimaschutzpotenziale und Lösungen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch Digitalisierung in Hessen

6.1 Überblick über Klimaschutzpotenziale durch Digitalisierung in Hessen

6.1.1 Nationale und internationale Studien zu den Potenzialen der Digitalisierung zur Reduktion von Treibhausgasen

Eine Reihe von nationalen und internationalen Studien (Bieser et al., 2020; Bitkom, 2020, 2021a; GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & Boston Consulting Group, 2009; GeSI & Deloitte, 2019; GeSI & The Boston Consulting Group, 2012; Hilty & Bieser, 2017) zeigt deutliche Potenziale, durch Digitalisierung zu einer Reduktion der THG-Emissionen in vielen Lebens- und Arbeitsbereichen beitragen zu können. Die in den Studien ermittelten Einsparungen in anderen Wirtschaftssektoren (indirekte Effekte) liegen teilweise um eine Größenordnung über den THG-Emissionen der Geräte und Anlagen der IKT (direkte Effekte) selbst. In einer Auswertung der verschiedenen vorliegenden Studien im Frühjahr 2020 wurde allerdings auch festgestellt, dass unter pessimistischen Annahmen die indirekten Einsparpotenziale unterhalb der direkten Effekte liegen können (Bieser et al., 2020). Damit würde die Digitalisierung netto zu einer Erhöhung der THG-Emissionen führen.

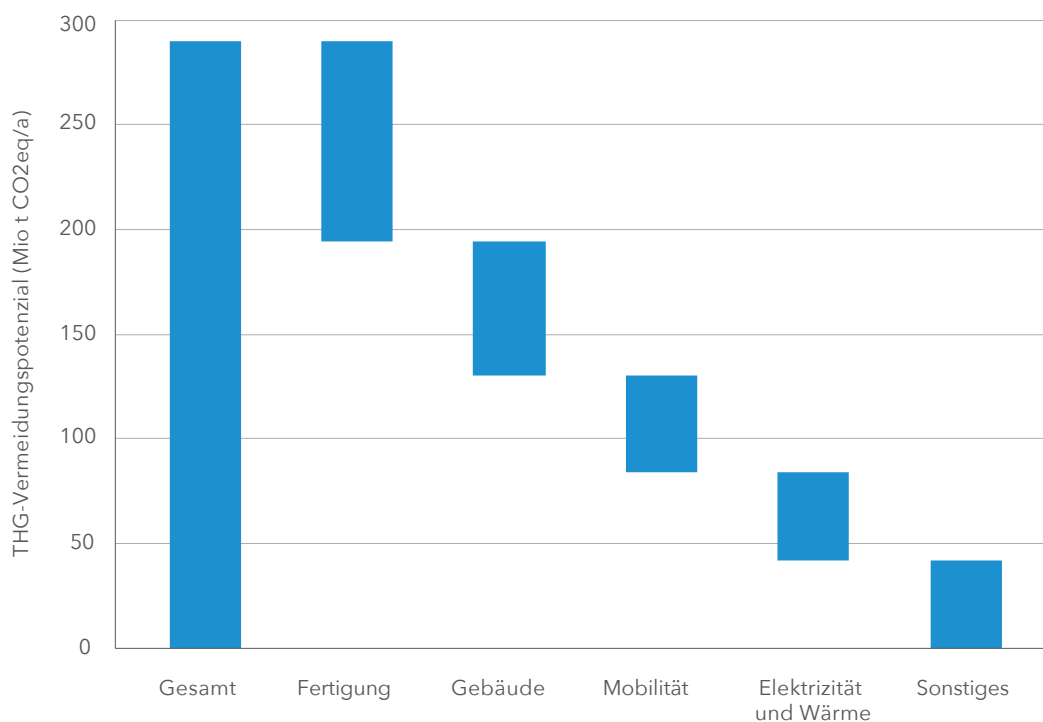
Die vorliegenden Studien identifizieren insbesondere in den folgenden Sektoren deutliche Potenziale, mit Digitalisierung zur Senkung der THG-Emissionen beizutragen:

- Elektrizität und Wärme
- Transport: Virtuelle Mobilität (Videokonferenzen, mobiles Arbeiten)
- Transport: Intelligenter Transport
- Transport: Logistik
- Gebäude
- Industrieproduktion
- Landwirtschaft

Generell ist festzustellen, dass die Erschließung der Reduktionspotenziale nur bei zielgerichteten Maßnahmen und einer koordinierten Umsetzung durch Gesetzgeber, Unternehmen und Privathaushalte möglich ist (Bieser et al., 2020). Andernfalls besteht die Gefahr, dass Rebound-Effekte oder andere ressourcenverbrauchssteigernde Wirkungen der Digitalisierung die Reduktion der THG-Emissionen durch die Digitalisierung aufwiegen (siehe Kapitel 6.1.2).

Für Deutschland ermittelte Accenture im Auftrag der Global e-Sustainability Initiative (GeSI) in der „#Smarter2030“ (GeSI & Accenture Strategy, 2015) im Jahr 2015 die in Abbildung 20 dargestellten Potenziale zur Vermeidung von THG-Emissionen bis zum Jahr 2030. Könnten diese Potenziale realisiert werden, so wäre eine Reduktion der THG-Emissionen in Deutschland um 290 Mio. t CO_{2eq}/a möglich. Mit fast 100 Mio. t CO_{2eq}/a sind die Einsparpotenziale in der Industrieproduktion am höchsten. Das zweithöchste Einsparpotenzial wird im Bereich Smart Buildings mit etwa 60 Mio. t CO_{2eq}/a prognostiziert.

Abbildung 20: Treibhausgas-Vermeidungspotenziale durch den Einsatz von IKT in Deutschland bis zum Jahr 2030



Quelle: GeSI & Accenture Strategy (2015), eigene Darstellung

Aktuellere Abschätzungen zu den THG-Einsparpotenzialen in Deutschland als die in Abbildung 20 dargestellten Werte liefert eine neue Studie von Accenture im Auftrag des Bitkom, die im Frühjahr 2021 veröffentlicht wurde (Bitkom 2021a). In der Studie werden die THG-Einsparpotenziale in den Sektoren Fertigung, Mobilität, Energie, Gebäude, Arbeit & Business, Landwirtschaft und Gesundheit bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 bestimmt. Abbildung 21 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse dieser Studie.

In der Bitkom-Studie werden zwei Szenarien unterschieden, das Szenario „Moderate Digitalisierung“ und das Szenario „Beschleunigte Digitalisierung“. Das moderate Szenario unterstellt eine Marktdurchdringung digitaler Technologien in Deutschland in dem Ausmaß wie bisher bzw. wie bis zum Jahr 2030 geplant. Für das beschleunigte Szenario wird angenommen, dass die Marktdurchdringung digitaler Technologien so erfolgt wie in vergleichbaren Ländern, die beim Einsatz einer oder mehrerer Technologien führend sind. In Summe liegen die in den betrachteten Sektoren ermittelten THG-Reduktionspotenziale zwischen 102 Mio. t CO_{2eq}/a (Moderate Digitalisierung) und 151 Mio. t CO_{2eq}/a (Beschleunigte Digitalisierung). Damit

werden deutlich geringere Potenziale als in der GeSI-Studie aus dem Jahr 2015 ermittelt. Diese Abweichungen sind insbesondere dadurch bedingt, dass zur Realisierung der Potenziale bis zum Jahr 2030 nur noch elf Jahre statt 15 Jahre zur Verfügung stehen und ggf. auch schon Einsparungen realisiert wurden. Welche weiteren Gründe für die insgesamt deutlich geringeren Potenziale ausschlaggebend sind, kann leider nicht beurteilt werden, da die gemachten Annahmen insbesondere im Jahr 2015 nicht transparent sind. Im Bereich der Fertigung werden auch in der Bitkom-Studie die höchsten Einsparpotenziale erwartet. Hier liegt das maximale THG-Reduktionspotenzial bei 61 Mio. t CO_{2eq}/a. Im Szenario „Moderate Digitalisierung“ liegt das THG-Reduktionspotenzial in der Fertigung bei 35 Mio. t CO_{2eq}/a.

Überträgt man die ermittelten Potenziale der Bitkom-Studie auf Hessen, so könnten im Szenario „Beschleunigte Digitalisierung“ die THG-Emissionen um 13 Mio. t CO_{2eq}/a reduziert werden¹⁰. Zur Berechnung dieses Potenzials wurde der Anteil Hessens am Bruttoinlandsprodukt in Deutschland von 8,6 % zugrunde gelegt (Statistikportal, 2020). Für das Szenario „Moderate Digitalisierung“ lägen die Potenziale zur Einsparung von THG-Emissionen in Hessen bei 8,8 Mio. t CO_{2eq}/a.

Berücksichtigt man den Anteil Hessens an den Beschäftigten im Bereich des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland von 6,9 % (Destatis, 2020b), so kann für Hessen im Bereich der Fertigung ein Reduktionspotenzial zwischen 2,4 Mio. t CO_{2eq}/a (Moderate Digitalisierung) und 4,2 Mio. t CO_{2eq}/a (Beschleunigte Digitalisierung) geschätzt werden.

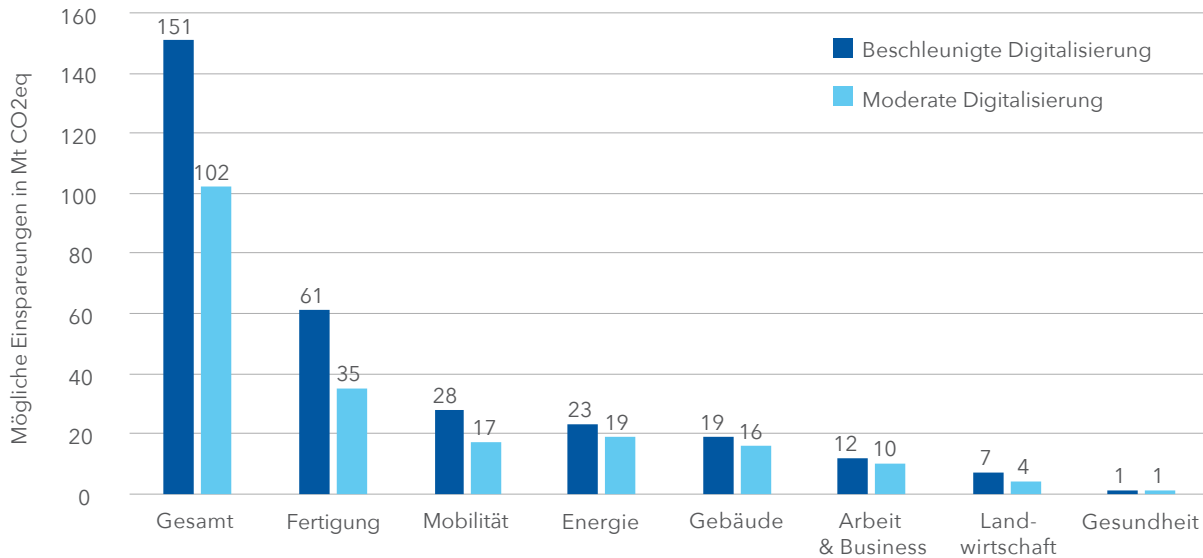
Im Gebäudesektor lassen sich auf Basis der Bitkom-Studie für Hessen THG-Einsparpotenziale von 1,2 Mio. t CO_{2eq}/a (Moderate Digitalisierung) bis 1,4 Mio. t CO_{2eq}/a (Beschleunigte Digitalisierung) errechnen. Hier wird der Anteil Hessens von 7,3 % am Gebäudebestand in Deutschland (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2019) zu Grunde gelegt. Die vorliegende Studie ermittelt THG-Einsparpotenziale durch Digitalisierung im Gebäudebereich in der gleichen Größenordnung. Die berechneten möglichen THG-Einsparungen liegen mit 1,5 Mio. t CO_{2eq}/a sogar noch geringfügig höher (siehe Abschnitt 6.4).

Im Bereich Arbeit & Business ermittelt die Bitkom-Studie bis zum Jahr 2030 THG-Einsparpotenziale von 12 Mio. t CO_{2eq}/a im Szenario „Beschleunigte Digitalisierung“ und 10 Mio. t CO_{2eq}/a im Szenario „Moderate Digitalisierung“. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 15-17 % der Verkehrs- und Primärenergieemissionen im Kontext Arbeit & Business durch Digitalisierung eingespart werden können. Legt man einen Anteil Hessens von 7,5 % an den Erwerbspersonen in Deutschland zugrunde, so errechnen sich damit Potenziale von 0,75 Mio. t CO_{2eq}/a bis 0,9 Mio. t CO_{2eq}/a. Diese Potenziale sind deutlich optimistischer als die in der vorliegenden Studie errechneten Einsparungen (siehe Abschnitt 6.3).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Potenziale, durch Digitalisierung in Hessen THG-Emissionen einzusparen, deutlich höher liegen als die THG-Emissionen der IKT in Hessen. Diese wurden in der vorliegenden Untersuchung mit von 3,4 Mio. t CO_{2eq}/a (ohne Unterhaltungselektronik) bzw. 3,9 Mio. t CO_{2eq}/a (mit Unterhaltungselektronik) bestimmt. Die Herausforderung besteht darin, die Einsparpotenziale auch zu realisieren.

¹⁰ Die aktuelle Bitkom-Studie (Bitkom, 2021a) ist neben der GeSI-Studie aus dem Jahr 2015 (GeSI & Accenture Strategy, 2015) und einer noch deutlich älteren GeSI-Studie aus dem Jahr 2009 (GeSI & Boston Consulting Group, 2009) die einzige den Verfassern bekannte Untersuchung, in der die THG-Einsparpotenziale durch Digitalisierung für Deutschland ermittelt werden. Aus diesem Grunde werden diese aktuell ermittelten Potenziale in der vorliegenden Studie zur groben Abschätzung der maximalen THG-Einsparpotenziale durch Digitalisierung in Hessen verwendet. Es sei aber darauf hingewiesen, dass in der Bitkom-Studie die Annahmen und Berechnungsmethoden zu Ermittlung der Potenziale nicht nachvollziehbar dokumentiert werden.

Abbildung 21: Ergebnisse zu Treibhausgas-Einsparpotenzialen der Digitalisierung in Deutschland im Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 (Accenture-Studie im Auftrag des Bitkom)



Quelle: Bitkom (2021a), eigene Darstellung

6.1.2 Risiken für den Klimaschutz durch verstärkte Digitalisierung

Wie die Entwicklungen der Vergangenheit gezeigt haben, führt die zunehmende Digitalisierung **nicht automatisch zu einem Absinken von Energie- und Ressourcenbedarfen**. Im Gegenteil – die Digitalisierung ist mit einer Reihe von Risiken für Umwelt- und Klimaschutz verbunden. Die oben genannten Studien, die sich mit den Chancen der Digitalisierung zur Reduktion der THG-Emissionen befassen, blenden zumeist die Wirkungen der Digitalisierung, die zu einer Erhöhung der Emissionen führen können, aus (Bieser et al., 2020). Im Folgenden werden die bedeutenden Risiken der Digitalisierung für den Klimaschutz kurz im Überblick dargestellt.

Ein wesentlicher Grund dafür, dass trotz Digitalisierung bislang nicht die mit ihr verbundenen Potenziale zur Senkung von Energie- und Ressourcenbedarfen realisiert wurden, liegt in **Rebound- und Wachstumseffekten** begründet. Mit digitalen Lösungen sind oft deutliche Effizienzverbesserungen verbunden. Produkte werden leistungsfähiger und können kostengünstiger produziert werden, der Transport der Güter wird günstiger oder smarte Geräte helfen den Haushalten, Stromkosten zu sparen. Mit diesen Effizienzverbesserungen ist zumeist aber eine Intensivierung des Gebrauchs der Güter verbunden, es liegen sogenannte Rebound-Effekte vor. Es ist leicht nachvollziehbar, dass leistungsfähigere und kostengünstigere Produkte mehr gekauft werden. Geringere Transportkosten führen dazu, dass mehr Güter transportiert werden und die eingesparten Stromkosten der Haushalte werden für andere Produkte ausgegeben. Die Ursachen und Ausprägungen solcher Rebound-Effekte, die gerade bei digitalen Lösungen häufig vorkommen, sind vielfältig (Fichter, Hintemann, Beucker & Behrendt, 2012). Rebound-Effekte sind aus Sicht der Anbieter von Effizienz-Lösungen meist gewünscht, bedeuten sie doch höhere Umsätze und Gewinne. Häufig ist es schwierig, Rebound-Effekte von Wachstumseffekten der Digitalisierung inhaltlich abzugrenzen. Eine wesentliche Motivation der

Anstrengungen zur Digitalisierung ist ja die Hoffnung, damit weiteres Wirtschaftswachstum zu erzielen. Wie Rebound-Effekte führt auch Wirtschaftswachstum häufig zu einer Erhöhung des Energie- und Ressourcenbedarfs.

Ein weiteres mit der Digitalisierung verbundenes Risiko für den Klimaschutz ist die **Induktion zusätzlichen Verbrauchs**. Damit ist gemeint, dass digitale Produkte einen zusätzlichen Konsum motivieren. So ermöglicht digitale Kommunikation, große Distanzen zu überbrücken und Beziehungen auch über große Entfernungen zu pflegen. Dies kann den Wunsch wecken, diese Menschen zu besuchen und damit zu mehr Reisen führen (Mokhtarian, 2009). Ein anderes Beispiel für induzierten Konsum ist die Erhöhung des Papierbedarfs in einem Haushalt, wenn ein individueller Drucker angeschafft wird (Bieser et al., 2020).

Digitale Lösungen ermöglichen häufig ganz neue Verhaltens- und Konsummöglichkeiten, die es in dieser Form bislang nicht gegeben hat. Die durch die Digitalisierung bewirkten **Veränderungen im Konsum und Verhalten** sind jedoch nur schwer zu ermitteln. Dies liegt zum Beispiel daran, dass das Konsumverhalten in der digitalen Welt oft von Netzwerkeffekten oder Lock-in-Effekten bestimmt ist. Außerdem sind Preise oft verhältnismäßig niedrig oder gar null und spielen damit im Kalkül der Nutzenden kaum eine Rolle (Bieser et al., 2020). Auch Flatrates und werbefinanzierte Angebote führen dazu, dass sich Konsumverhalten ändert. So ist die tägliche Bewegtbildnutzung (TV, Online-Videos, DVD etc.) in Deutschland zwischen 2015 und 2019 um 10 % auf fast fünf Stunden am Tag angestiegen, wobei der Anstieg auf die deutlich verstärkte Nutzung von Online-Videos zurückzuführen ist (Seven One Media, 2019).

Weitere Risiken, die in den Studien zu den Chancen der Digitalisierung für mehr Klimaschutz oft nicht berücksichtigt werden, sind die **Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe**, die zur Herstellung der IKT-Produkte benötigt werden und der **Zielkonflikt zwischen IT-Sicherheit und Klima- und Ressourcenschutz** (Bieser et al., 2020). Beispielsweise führt die Verschlüsselung von Daten zu einem erhöhten Energieaufwand. Ebenso bedeuten die zur Gewährleistung der Betriebssicherheit in den digitalen Infrastrukturen aufgebauten Redundanzen einen erhöhten Energie- und Ressourcenbedarf.

6.1.3 Handlungsmöglichkeiten zur Hebung der Nachhaltigkeitspotenziale durch Digitalisierung

Wie die Ausführungen in Abschnitt 6.1.1 zeigen, bestehen sehr hohe Potenziale, durch Digitalisierung Nachhaltigkeit und Klimaschutz in vielen Wirtschafts- und Lebensbereichen zu fördern. Für Deutschland wurden insbesondere in den Bereichen Industrie, Gebäude und in der Mobilität THG-Einsparpotenziale ermittelt, die deutlich über den direkten THG-Emissionen der IKT liegen. Diese Potenziale heben sich allerdings nicht von allein. Die bisherigen Entwicklungen zeigen, dass die Digitalisierung insbesondere aufgrund von Rebound- und Wachstumseffekten häufig sogar zu einer Erhöhung von Umweltbelastung und THG-Emissionen geführt hat. Diese Effekte werden in den bisherigen Studien zu den Klimaschutzpotenzialen der Digitalisierung nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt (Bieser et al., 2020).

Im WBGU-Gutachten wird eine doppelte Kurskorrektur als notwendig erachtet. Zum einen müssten die fundamentalen Dynamiken der Digitalisierung viel mehr als bisher Berücksichtigung in den Diskussionen zur Großen Transformation zu mehr Nachhaltigkeit finden. Zum

anderen müssten aber auch die Pioniere der Digitalisierung und die Digitalisierungsforschung sich viel mehr mit den Nachhaltigkeitsherausforderungen der heutigen Zeit befassen (WBGU, 2019).

Zwar ist die Digitalisierung ein globaler Trend und auch die globalen Nachhaltigkeitsherausforderungen sind im Wesentlichen nur auf der nationalen und internationalen Ebene zu lösen. Dennoch gibt es auch auf regionaler und lokaler Ebene eine Reihe von Ansatzpunkten, um die Nachhaltigkeitspotenziale der Digitalisierung zu heben. Erfolgversprechende Ansätze auf Landesebene liegen insbesondere in der Förderung von Forschung & Entwicklung, in Demonstrations- und Leuchtturmprojekten und in Maßnahmen zur Koordination der verschiedenen lokalen und regionalen Aktivitäten. Von besonderer Bedeutung bei der Ausgestaltung der entsprechenden Maßnahmen ist die ausreichende und adäquate Berücksichtigung der in Abschnitt 6.1.2 dargestellten Risiken.

Wie die folgenden Ausführungen zu den Anwendungsbereichen Industrie 4.0, Home-Office und Videokonferenzen sowie Gebäude zeigen, gibt es in Hessen bereits eine Vielzahl von Aktivitäten und Entwicklungen im Themenfeld der nachhaltigen Digitalisierung, die künftig weiter gefördert und gebündelt werden können. Auch über kommunikative Maßnahmen kann ein verstärktes Bewusstsein für die Nachhaltigkeitspotenziale der Digitalisierung geschaffen und Anstöße gegeben werden, diese in Zukunft verstärkt zu heben.

6.2 Industrie 4.0

Wie die Ausführungen im Abschnitt 6.1 gezeigt haben, existieren in Deutschland insbesondere in der Industrie sehr hohe Potenziale zur Reduktion der Klimawirkungen durch Digitalisierung. Auch wenn das Thema Industrie 4.0 nicht Gegenstand der vorliegenden Studie ist, wird daher im Folgenden ein kurzer exemplarischer Einblick in die Nachhaltigkeitspotenziale durch Industrie 4.0 gegeben.

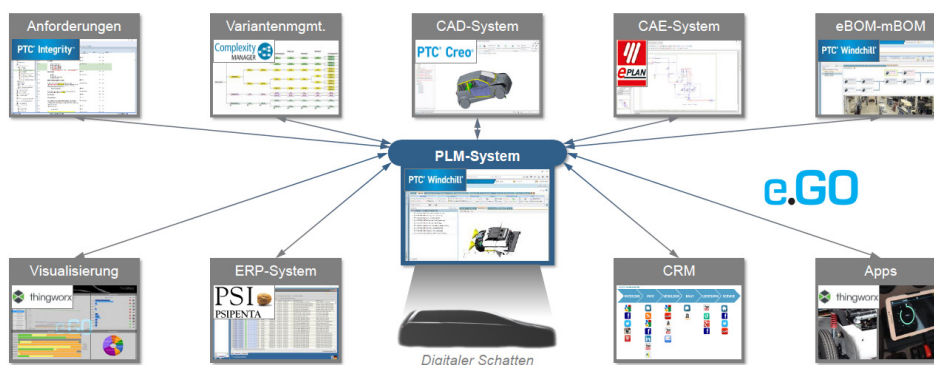
Die hohe Bedeutung der Industrie beim Übergang zu einer klimafreundlichen oder sogar klimaneutralen Lebens- und Arbeitsweise wird auch von der Europäischen Union betont. In der neuen Industriestrategie für Europa setzt die EU darauf, dass die europäische Industrie bei den Themen Digitalisierung und Klimaneutrales Wirtschaften eine Führungsposition einnehmen wird. Die europäische Industrie soll wettbewerbsfähiger werden und es soll eine „strategische Autonomie“ realisiert werden, um die Abhängigkeit der EU von anderen in strategisch wichtigen Bereichen wie kritische Rohstoffe und Technologien, Lebensmittel, Infrastruktur und Sicherheit zu verringern. Die Corona-Krise hat die Wichtigkeit einer solchen Strategie verdeutlicht. Sie hat noch einmal gezeigt, wie abhängig internationale Wertschöpfungsketten voneinander sind und die hohe Bedeutung eines global integrierten und gut funktionierenden Binnenmarktes veranschaulicht (Europäische Kommission, 2020). Daher hat im Oktober 2020 der Europäische Rat noch einmal bekräftigt, dass die europäische Industriepolitik dazu beitragen muss, die Industrie nachhaltiger, grüner, wettbewerbsfähiger und resilienter zu machen (Europäischer Rat, 2021).

Der Begriff Industrie 4.0 bezieht sich auf die vierte industrielle Revolution. Beginnend im 18. Jahrhundert wurde die Produktion im Handwerk durch mechanisierte Produktion abgelöst (Industrie 1.0). Danach verbreitete sich ab dem Jahr 1900 die Massenproduktion mit dem Fließband (Industrie 2.0), die auf die Produktion einer großen Anzahl gleicher oder ähnlicher Produkte zielte. Durch die ersten speicherprogrammierbaren Steuerungen wurde die Produktion wieder flexibler, Umrüstzeiten wurden reduziert und die wirtschaftliche Fertigung kleinerer Losgrößen wurde wieder möglich (Industrie 3.0) (Krüger, 2017, S. 7). Mit Industrie 4.0 wird die Verzahnung moderner Informations- und Kommunikationstechnik auf Basis intelligenter und digital vernetzter Systeme beschrieben. Damit soll eine weitgehend selbstorganisierte Produktion möglich werden.

Die unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefassten Technologien und Verfahren verbreiten sich gegenwärtig in immer mehr Branchen. Mit ihnen wird die industrielle Fertigung von individualisierten Produkten mit der Losgröße Eins wieder möglich, aber Industrie 4.0 bietet auch für Großserien Vorteile. Charakteristisch für die Digitalisierung der Produktion durch Industrie 4.0 ist eine kaum übersehbare Zahl einzelner Produkte der Software und Hardware. Diese wird im folgenden Abschnitt an einigen Beispielen aus der Automobilproduktion beschrieben.

Industrie 4.0 in der Produktentwicklung: Gut dokumentiert ist der Einsatz von Industrie 4.0 durch Produktionstechniker der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) am Beispiel des Elektrofahrzeugs Streetscooter. Die kooperative Entwicklung des Streetscooters durch ein Netzwerk von kleinen und mittleren Unternehmen war nur durch die Anwendung modernster Softwaretools der Konstruktion und Kooperation möglich. Schuh (2017, S. 14) führt die zentralen Komponenten auf: Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE), Product Lifecycle Management (PLM), Engineering Bill of Materials (eBOM), Manufacturing Bill of Materials (mBOM), Enterprise Resource Planning (ERP) und Customer Relationship Management (CRM). Die in Abbildung 22 dargestellte Vernetzung dieser Elemente macht eine schnelle Taktung der Arbeitsschritte möglich und senkt so nicht nur die Entwicklungskosten, sondern macht die kooperative Entwicklung komplexer Produkte durch kleine und mittlere Unternehmen überhaupt erst möglich.

Abbildung 22: Die Durchgängigkeit der IT-Systeme als Voraussetzung für hochfrequente Change Requests



Quelle: Schuh (2017, S. 14)

Die Virtual-Reality-Installation aixCAVE am IT Center der RWTH Aachen University ermöglichte virtuelle Tests und Versuche und beschleunigte so den Entwicklungsprozess erheblich (RWTH Aachen Campus, 2016).

Industrie 4.0 in der Produktion: Ein Beispiel für ein Projekt der Automatisierung der Produktion ist die Karosseriefertigung bei Tesla. Tesla wird große Teile der Fahrzeugkarosserie aus einem Stück mittels Aluminiumdruckguss fertigen (Günnel, 2020), die Teilezahl der Karosserie wird von früher 70 auf zunächst vier und dann nur noch eins reduziert werden (Günnel, 2020). Auch der Schweißvorgang und die Zuführung der benötigten Teile ist bei Tesla seit 2018 fast vollständig (zu 95 %) automatisiert (Donath, 2018). An 1.900 Messpunkten werden zur Qualitätskontrolle 47 Roboter zum Vermessen der Karosserie eingesetzt. Auf Testfahrten messen Sensoren Geräusche und analysieren diese. Die Daten werden zusammen mit der Fahrzeug-Identifikationsnummer (VIN) gespeichert und als „digitaler Zwilling“ archiviert (Donath, 2018).

Industrie 4.0 in der Logistik: Auch die digitale Logistik ist ein zentrales Element von Industrie 4.0. Durch den Einsatz eines fahrerlosen Transportsystems (FTS) verkürzen sich Durchlaufzeiten von Produkten durch die Produktion. Transportroboter fahren die in Produktion befindlichen Produkte einzeln so an jene Stellen, an denen sie bearbeitet werden müssen. Andere Stationen werden dagegen ausgelassen (t3n digital pioneers, 2019). Auch der Transport zwischen verschiedenen Unternehmen oder den einzelnen Werken eines Unternehmens wird mit Hilfe digitaler Lösungen optimiert. So werden z. B. bei Volkswagen die in Braunschweig gefertigten Batterien durch eine vollautomatische Transportlogistik von der Herstellung bis ans Montageband im Werk in Zwickau befördert. Das Umladen erfolgt an allen Umschlagpunkten der Bahn, der Zwischenlager, der LKWs und von der Rampe zur Halle vollautomatisch (Schulze, 2020).

Im Land Hessen gibt es eine Vielzahl von Projekten, die sich mit dem Einsatz von Industrie 4.0-Technologien und ihren Potenzialen für mehr Umwelt- und Klimaschutz befassen. Diese sind im Folgenden kurz im Überblick dargestellt.

Die Forschungsgruppe „**ETA | Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion**“ der TU Darmstadt verfolgt die Vision, die industrielle Produktion der Zukunft energieeffizient, energieflexibel und ressourceneffizient zu gestalten. So soll ein wesentlicher Beitrag zu einer CO₂-neutralen Produktion geleistet werden. Das Team von über 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern hat zum Ziel, exzellente Forschung in den Bereichen Energieeffizienz, Ressourceneffizienz und Energieflexibilität zu betreiben, Best-Practice-Beispiele aufzuzeigen, Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis zu transferieren und sehr gute Studierende in die Projekte einzubinden (ETA-Fabrik, 2020).

Vom Umbau der Produktion hin zu digitalisierten Prozessen für die Herstellung von Elektrofahrzeugen und dem elektrischen Antriebsstrang profitiert auch das **Volkswagen Werk Baunatal in Kassel**, wo unter anderem der Motor sowie Plattformteile für die neuen rein elektrischen Modelle ID.3 und ID.4 gebaut werden (Kühling, 2020).

Bei **Opel Rüsselsheim** arbeitet man an der Vision eines Presswerks 4.0. In diesem Presswerk wird es keine Nacharbeit mehr geben und es fällt nur noch das absolut denkbare Mindestmaß an Schnittabfällen an. Die Pressen werden in der Lage sein, auf sich verändernde Anforderungen selbstständig zu reagieren, sich permanent selbst zu verbessern und auch selbstständig zu melden, wenn Wartungs- oder Reparaturarbeiten notwendig werden (Scherer, 2018).

Im **Rittal Werk Haiger** sind über 100 High-Tech Maschinen zur Fertigung von Schaltschränken im Einsatz. Da vernetzte Prozesse, digitale Workflows und Software-Tools bisher nicht unbedingt zum Tagesgeschäft jedes Rittal Mitarbeiters gehörten, bietet Rittal zahlreiche Seminare, Workshops und Fortbildungen mit dem Schwerpunkt Digitalisierung an (Rittal, 2020).

Die **Sanner GmbH** in Bensheim produziert Kunststoffverpackungen. Um die Verfügbarkeit von Kunden- und Ausstellungsmustern zu beschleunigen und die Kosten für die Werkzeugherstellung für Prototypen einzusparen, hat Sanner 2015 einen 3D-Drucker für den Bereich Produktentwicklung angeschafft. Der 3D-Drucker trägt zur Ressourcen- und Materialeinsparung bei, indem die Werkzeugherstellung für Prototypen entfällt. Außerdem beschleunigt der Einsatz des 3D-Druckers die Auftragsakquise und den Produktentwicklungsprozess (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2017, S. 246ff).

Die **Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG** in Mörfelden-Walldorf ist seit 45 Jahren auf Schaumstoffverarbeitung spezialisiert. Als ersten Schritt in Richtung Industrie 4.0 setzt Wetropa Beamer zur Werker-Unterstützung an Zuschneidemaschinen für Schaumstoffplatten ein, um die Materialausnutzung beim Zuschneiden zu optimieren. Der Beamer projiziert dabei das maschinenoptimierte Schnittmuster auf die Schaumstoffplatten, wodurch genauer zugeschnitten werden kann und der Verschnitt sinkt. Außerdem wird im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung ein selbst entwickelter Foam Creator eingesetzt. Durch den Foam Creator sollen Kosten und Zeit sowohl für den Kunden als auch das Unternehmen eingespart werden (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2017, S. 261ff).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Produktionskonzept Industrie 4.0 aus Sicht der Transformation zur Nachhaltigkeit aus zwei Perspektiven von Bedeutung ist. Zum einen erschließt es über Effizienzgewinne an vielen Stellen Effizienzpotenziale, die in ihrer Summe leider nur schwer bezifferbar sind (Beispiele Wetropa, Sanner und Opel). Zum anderen wird sie z. B. in der Automobilbranche genutzt, um die Produktion eines grundsätzlich neuen, klimafreundlichen Produkttyps, des Elektroautos, völlig neu und hocheffizient aufzubauen und so erhebliche Fortschritte in der Wettbewerbsfähigkeit zu realisieren, die diesem Produkttyp zum Marktdurchbruch verhelfen können (Beispiele Streetscooter, Volkswagen und Tesla). Ähnliches geschieht gerade in der Baubranche beim seriellen Sanieren (Clausen, 2019; Energiesprong, 2018; Energiesprong, TNO & RIGO, 2017). Im Bundesland Hessen gibt es bereits eine Reihe von Projekten und Initiativen, um die Nachhaltigkeitspotenziale durch Industrie-4.0-Technologien zu heben.

6.3 Mobiles Arbeiten mit Videokonferenzen und Home-Office

6.3.1 Mobiles Arbeiten als Trend in der modernen Arbeitswelt

Mobiles Arbeiten und Home-Office bedienen sich einer Reihe digitaler Lösungen, um sowohl das Arbeiten online mit unterschiedlichsten Datenbeständen wie auch die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Orten zu ermöglichen. Neben geeigneten Endgeräten der Datenverarbeitung, also PCs, Notebooks und Smartphones, ist eine leistungsfähige Anbindung an das Internet unerlässlich. Verbreitet sind darüber hinaus Systeme des Cloud Computing, die den dezentralen Zugriff auf die für die Arbeit notwendigen Daten ermöglichen. Hinzu kommt moderne Telekommunikationstechnik, die die Kommunikation der an unterschiedlichen Orten befindlichen Beschäftigten bzw. externen Partner unterstützt. Im Rückblick auf die letzten Jahre sind zwei Technologien von hoher Bedeutung:

- Telefonkonferenzen schaffen die Möglichkeit, dass mehrere Personen aus unterschiedlichen Orten gleichzeitig miteinander sprechen. Telefonkonferenzen erfordern die Nutzung von Festnetz- oder Mobiltelefonen. Sie können durch vorher versandte Bild- oder Textdokumente unterstützt werden.
- Videokonferenzen¹¹ schaffen dieselbe Möglichkeit, wobei zusätzlich ein Bild der Teilnehmer übertragen wird. Durch Desktop-Sharing können über das Videobild der Teilnehmenden hinaus gemeinsam Präsentationen betrachtet oder Texte bearbeitet werden. Eine Chatfunktion ermöglicht parallel zum Gespräch den Austausch einzelner adressierter oder öffentlicher Textnachrichten. Für Videokonferenzen ist die Nutzung eines PCs, Notebooks, eines Smartphones oder eines Videokonferenzraums erforderlich.

Im Jahr 2018 nutzten ca. 90% der kleinen wie großen Unternehmen Telefonkonferenzen, während Videokonferenzen nur in knapp der Hälfte der Unternehmen überhaupt genutzt wurden (VDR, 2018, S. 27). Seit März 2020 haben sich Videokonferenzen sprunghaft verbreitet und Telefonkonferenzen aufgrund ihrer besseren Funktionalität weitgehend verdrängt.

6.3.2 Mobiles Arbeiten vor der Corona-Krise

Im Rahmen des BMBF-Projektes „Klimaschutzpotenziale der digitalen Transformation“ führte Borderstep zwischen Herbst 2019 und Mitte März 2020 19 leitfadengestützte Interviews zur Frage der Nutzung von virtuellen Treffen in drei Unternehmen durch (Schramm & Clausen, 2020). Die Erfahrung der meisten Befragten bezog sich bis Anfang 2020 fast ausschließlich auf die rein akustische Telefonkonferenz. In der Befragung wurde von vielen Befragten die Notwendigkeit realer Treffen deutlich gemacht. Die jeweiligen Präferenzen für ein reales bzw. virtuelles Treffen lässt die folgende Tabelle erkennen:

¹¹ Der Begriff der Webkonferenz (Davis & Wainfan, 2004) ist durch den gewachsenen Funktionsumfang der Videokonferenzsysteme kaum noch sinnvoll von diesen abzugrenzen.

Tabelle 3: Zentrale Einflussgrößen auf die Wahl eines realen oder virtuellen Meetings

Einflussgröße	Reales Meeting ggf. besser	Virtuelles Meeting möglich
Zahl der kommunizierenden Personen	<i>Viele Teilnehmende:</i> Wissenschaftliche Konferenz, Jahrestagung eines Industrieverbandes	<i>Wenige Teilnehmende:</i> Beratung eines Einzelkunden, kleines Teammeeting
Soziale Brisanz	<i>Hohe Brisanz:</i> Kritisches Personalführungsgespräch, Klärung von Differenzen Persönliche Spannungen	<i>Niedrige Brisanz:</i> Wöchentliche Abstimmung der Arbeitsverteilung Gutes persönliches Verhältnis
Ökonomische Bedeutung	<i>Hohe Bedeutung:</i> Großer Auftrag, wichtiger Vertragsabschluss	<i>Niedrige Bedeutung:</i> Follow-up-Meeting, Klärung von Details
Materialität	Hands-on Kursus, der praktische (z. B. handwerkliche) Fähigkeiten vermittelt, Inaugenscheinnahme materieller Objekte	Austausch verbaler oder optischer Informationen
Dauer	Langes Meeting über viele Stunden	Kurzes Meeting von bis zu 2 Stunden
Verhältnis Reisezeit zu Dauer des Meetings	Kurze Reise, langes Meeting	Kurzes Meeting, lange Reise
Vertrautheit	Treffen mit bisher unbekanntem Personen	Treffen mit einem eingespieltem Team
Ausstattung für und Erfahrung mit virtuellen Meetings	Ausstattung nicht vorhanden oder wenig Erfahrung	Ausstattung vorhanden und erprobt, Erfahrung vorhanden

Quelle: Schramm & Clausen (2020, S. 42)

Die Ausprägung der Einflussgrößen bestimmt dabei nicht eindeutig die Form des Meetings. Vielmehr erfolgt die Wahl der Form des Meetings in Abwägung der Bedeutung aller Einflussgrößen. Aus den Interviews wurde darüber hinaus klar, dass das Verhalten vieler Befragter durch kulturelle und mentale Pfadabhängigkeiten bestimmt wurde. Persönliche Besuche wurden als „üblich“ charakterisiert und auch als Höflichkeit wahrgenommen, mit der der Besuchende dem Besuchten quasi Achtung erweist. Parallel dazu war teilweise die Technologie der Videokonferenz nicht verfügbar und Erfahrung mit der Nutzung dieser Kommunikationsform nicht vorhanden. Das Übernehmen der neuen Praxis der Videokonferenz erforderte also noch Anfang 2020 eine deutliche Verhaltensänderung verbunden mit der Überwindung verschiedener Pfadabhängigkeiten.

Ähnlich langsam verlief über Jahre auch die Verbreitung des Arbeitens im Home-Office. Noch im November 2019 wurde festgestellt, „*dass Unternehmenskulturen Barrieren darstellen, die von großer Bedeutung für die Frage sind, ob von zuhause gearbeitet werden kann oder nicht. Demnach standen bisher Anwesenheitskultur, befürchtete Karrierehindernisse und fehlende Familienfreundlichkeit einer Etablierung von Home-Office im Weg. Besonders Frauen befürchteten durch die Verlagerung ihrer Arbeit ins heimische Büro Karriereeinbrüche*“ (Lott & Abendroth, 2019). *In hessischen KMU war bis 2019 nur das gelegentliche mobile Arbeiten in 25,5% der Unternehmen verbreitet, das Home-Office gab es für einzelne Personen in 11,3% der KMU und andere digitale Formen wurden in 11% der KMU eingesetzt* (Beule et al., 2021, S. 21).

Wie bei Videokonferenzen erfordert auch der Weg aus dem Büro ins Home-Office daher die Überwindung von Pfadabhängigkeiten. Neben der Änderung des Arbeits- und Kommunikationsverhaltens, die mit dem Weg vom Büro ins Home-Office verbunden ist, müssen die jeweiligen Personen sich also fallweise auch noch abseits der Unternehmenskultur positionieren.

Clausen und Fichter (2019) beschreiben die Notwendigkeit einer Verhaltensänderung als einen der wichtigsten Faktoren, mit denen die Verbreitung neuer Technologien gebremst wird. Der Ausbruch aus den gewohnten Routinen, der Lock-out, kann oft nur durch einen starken externen Impuls ausgelöst werden.

6.3.3 Mobiles Arbeiten seit dem Beginn der Corona-Krise

Die Corona-Krise hat seit Mitte März 2020 zu einer Vielzahl von Einschränkungen bei Geschäftsreisen und im Arbeitsleben geführt. Damit liegt ein sehr starker Impuls vor, der zum Ausbruch aus gewohnten Verhaltensroutinen und damit zur Überwindung von Pfadabhängigkeiten geführt hat. Standen die Möglichkeiten der digitalen Kommunikation auch 2019 schon zur Verfügung, so erzwang erst die Pandemie eine abrupte Verhaltensänderung. Von einem Monat auf den anderen wurden viele Beschäftigte mit Arbeit im Home-Office konfrontiert und begannen mit der Nutzung von Videokonferenztechnik.

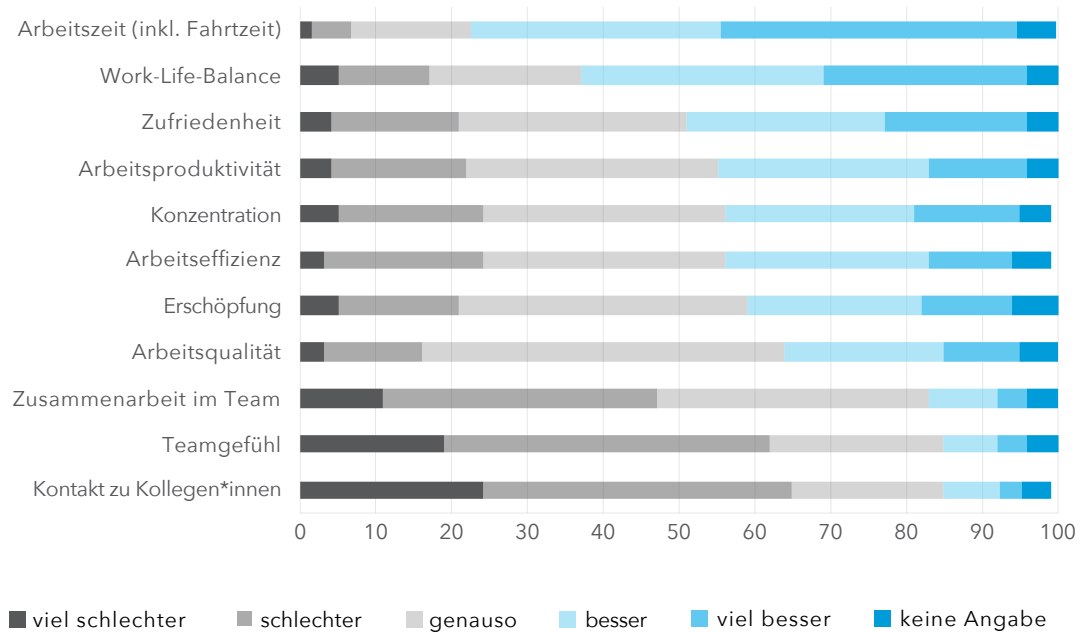
6.3.3.1 Home-Office

Stürz, Stumpf und Mendel (2020) ermittelten, dass während der akuten Phase der Corona-Krise 43 % der Berufstätigen zumindest an einigen Tagen in der Woche von zuhause arbeiteten. 35 % der Befragten gaben an, dass sie auch schon vor Corona ab und zu im Home-Office gearbeitet haben. Ähnliche Zahlen geben auch Bonin et al. (2020) an. Vor der Krise haben also 65 % nie im Home-Office gearbeitet, während der Corona-Pandemie sind dies immer noch 57 %. Der Anteil der Personen, die ab und zu im Home-Office arbeiten, ist durch die Krise also nur um 8 Prozentpunkte gestiegen.

Beule et al. (2021, S. 24) berichten für KMU in Hessen, dass die allgemeine Nutzung aller digitaler Arbeitsformen von etwa 45 % vor der Pandemie auf etwa 60 % während der Pandemie gestiegen ist. Etwa drei Viertel der Unternehmen erwarten, dass das erhöhte Niveau digitaler Arbeitsformen nach der Pandemie beibehalten werden wird oder sich sogar noch ausweiten dürfte, nur etwa ein Viertel erwartet, dass wieder ein Rückgang erfolgen wird (Beule et al., 2021, S. 52).

Einige Unternehmen planen daher aktuell langfristig strategische Anpassungen ihrer Home-Office-Politik. In einer Befragung bei den 30 größten Unternehmen in Deutschland ermittelt der Spiegel, dass sich hybride Arbeitskonzepte, also eine Mischform aus mobilem Arbeiten und Präsenz im Büro, bei vielen Firmen etablieren werden (Hoffmann, 2020). Siemens hat im Juli 2020 beschlossen, dass mehr als die Hälfte der Mitarbeiter zukünftig an zwei bis drei Tagen pro Woche von zuhause oder jedem anderen beliebigen Ort arbeiten können. Eine dauerhafte Präsenz im Unternehmen ist aber auch weiterhin möglich (Brien, 2020; Hoffmann, 2020; Manager Magazin, 2020).

Eine Befragung von 500 Geschäftsreisenden durch Borderstep im November 2020 ergab folgende Einschätzungen individueller Erfahrungen im Home-Office im Vergleich zur Arbeit im Unternehmen (s. Abbildung 23):

Abbildung 23: Erfahrungen mit Home-Office von Geschäftsreisenden im Vergleich zur Arbeit im Unternehmen

Quelle: Clausen und Schramm (2021, S. 29), n = 500, in Prozent

Es ergibt sich ein divergentes Bild, in dem positive Erfahrungen hinsichtlich Arbeitszeit und Work-Life-Balance negativen Erfahrungen mit dem Kontakt zu Kolleginnen und Kollegen und dem Teamgefühl gegenüberstehen.

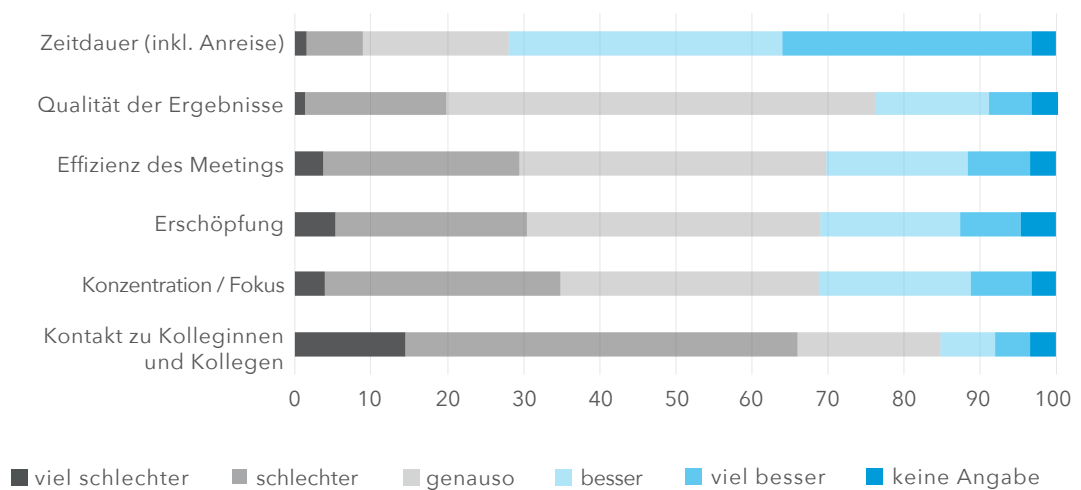
6.3.3.2 Videokonferenzen

Noch stärker als das Home-Office hat sich die Videokonferenz während der Corona-Pandemie verbreitet. Denn Videokonferenzen dienen nicht nur der Aufrechterhaltung der Kommunikation zwischen Büros und Home-Offices, sondern auch der Kommunikation mit Kunden, Lieferanten und Partnern. In einer Befragung des Verbandes Deutsches Reisemanagement (VDR) wird deutlich, dass im Sommer 2020 ein Anteil von 94,3% der Unternehmen Video-/Web- oder Telefonkonferenzen durchführten, um die nicht mehr möglichen Geschäftsreisen zu ersetzen (VDR, 2020a). Beim deutschen Internetknoten DE-CIX hat sich der Datenverkehr von Videokonferenzen schon bis zum 25. März 2020 um 100% gegenüber der Zeit vor der Corona-Pandemie gesteigert (DE-CIX, 2020). Und es ist damit zu rechnen, dass die einmal eingeleitete Verhaltensänderung beibehalten wird. In der (kleinen) Stichprobe des VDR geben bei regelmäßigen Befragungen zwischen Juli und November 2020 ca. 60% der Unternehmen an, dass sie einen dauerhaften Rückgang der Geschäftsreisen um 30% erwarten, jedes achte Unternehmen erwartet sogar einen Rückgang von 50%. Nur bestenfalls 5% der Unternehmen erwarten, dass alles wieder so wird wie früher (VDR, 2020b). 90% der befragten Unternehmen halten es für wahrscheinlich, dass sie die Notwendigkeit von Geschäftsreisen zukünftig stärker hinterfra-

gen werden (VDR, 2020b). In hessischen KMU erwarten 21,1 %, dass sich die in der Pandemie stark erhöhte Nutzung von Videokonferenzen in Zukunft sogar noch ausweiten wird, 54,8 % erwarten, dass das hohe Niveau beibehalten werden wird und 24,1 % erwarten, dass die Nutzung wieder zurückgehen wird (Beule et al., 2021, S. 52).

Die Befragung von 500 Geschäftsreisenden durch Borderstep im November 2020 ergab folgende Einschätzungen individueller Erfahrungen mit Videokonferenzen:

Abbildung 24: Erfahrungen mit unternehmensinternen Video-Meetings im Vergleich zu persönlichen Meetings



Quelle: Clausen & Schramm (2021, S. 12), n = 500, in Prozent, Frage: „Wie sind Ihre Erfahrungen mit Video-Meetings intern im Vergleich zu persönlichen Meetings hinsichtlich folgender Kriterien?“

Die Einschätzungen zu Videokonferenzen zeigen eine ähnliche Divergenz wie die zum Home-Office. Der Verzicht auf das Reisen spart Zeit und wirkt sich auf die Effizienz der Meetings eher positiv aus, aber es wird befürchtet, dass der Kontakt zu Kolleginnen und Kollegen im Team oder zu Kundinnen und Kunden leiden könnte.

Sowohl durch den dauerhaften Anstieg der Nutzung von Home-Office wie auch durch die dauerhafte Substitution von Geschäftsreisen durch virtuelle Konferenzen ist mit einem dauerhaften Rückgang des Verkehrs zu rechnen. Dies wird Auswirkungen auf den Klimaschutz haben.

6.3.4 Abschätzung der Klimaschutzwirkung des mobilen Arbeitens

6.3.4.1 Methode

Um die Potenziale für mehr Klimaschutz durch die verstärkte Nutzung von Home-Office abzuschätzen, wird im Folgenden zunächst ermittelt, wie viele Werktätige in Hessen dauerhaft an wie vielen Tagen ins Home-Office gehen könnten und wie lang die dabei eingesparte Pendelstrecke durchschnittlich ist. Zusätzlich werden mögliche Rebound-Effekte qualitativ betrachtet.

Zur Bestimmung der Potenziale der verstärkten Nutzung von Videokonferenzsystemen als Alternative zu Geschäftsreisen wird von der bisher üblichen durchschnittlichen Fahrstrecke für Geschäftsreisen ausgegangen. Die Ergebnisse einer repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden wird genutzt, um dieser Strecke einem aktuellen Modal Split zuzuordnen und die erwartete Veränderung der Strecke in der Post-Corona Zeit abschätzbar zu machen (Clausen & Schramm, 2021).

Die Errechnung der THG-Emissionen aus der Nutzung der verschiedenen Verkehrsmittel wird auf Basis von Daten des Umweltbundesamtes durchgeführt.

Tabelle 4: Treibhausgas-Emissionsfaktoren je Verkehrsmittel

Verkehrsmittel	Emissionsfaktor
PKW	0,15 Kg CO _{2eq} /Pkm
Linienbusse	0,08 Kg CO _{2eq} /Pkm
Straßen-, S- und U-Bahn	0,058 Kg CO _{2eq} /Pkm
Flüge im Inland	0,23 Kg CO _{2eq} /Pkm
Bahn - Fernverkehr	0,032 Kg CO _{2eq} /Pkm

Quelle: UBA (2020b)

Von der hessischen Bevölkerung von ca. 6,3 Millionen sind ca. 3,3 Mio. Personen erwerbstätig (Destatis, 2019a, S. 64). Die Wohnbevölkerung verteilt sich zu ca. 4,97 Mio. auf Städte mit mindestens 50.000 Einwohnern und zu ca. 1,32 Mio. auf kleinere Orte (Destatis, 2020c). Der Anteil der hessischen Berufstätigen an den bundesweit ca. 45 Mio. Erwerbstätigen (Statistisches Bundesamt, 2020) beträgt ca. 7,5%. Es wird daher davon ausgegangen, dass hessischen Berufstätige 7,5% der bundesweit getätigten Geschäftsreisen durchführen.

6.3.4.2 Klimaschutzwirkung des mobilen Arbeitens

Home-Office

Berufstätige Menschen in Deutschland legen werktäglich für das Pendeln zur Arbeit eine Strecke von 21 km zurück (Nobis, Kuhnimhof & Kuhnimhof, Tobias, 2018, S. 104). Die zurückgelegten Wege sind dabei für Menschen aus dem ländlichen Raum um ca. ein Drittel länger als

für Menschen aus großen Städten (Nobis et al., 2018, S. 105). Auch der Modal Split ist je nach Wohnort unterschiedlich:

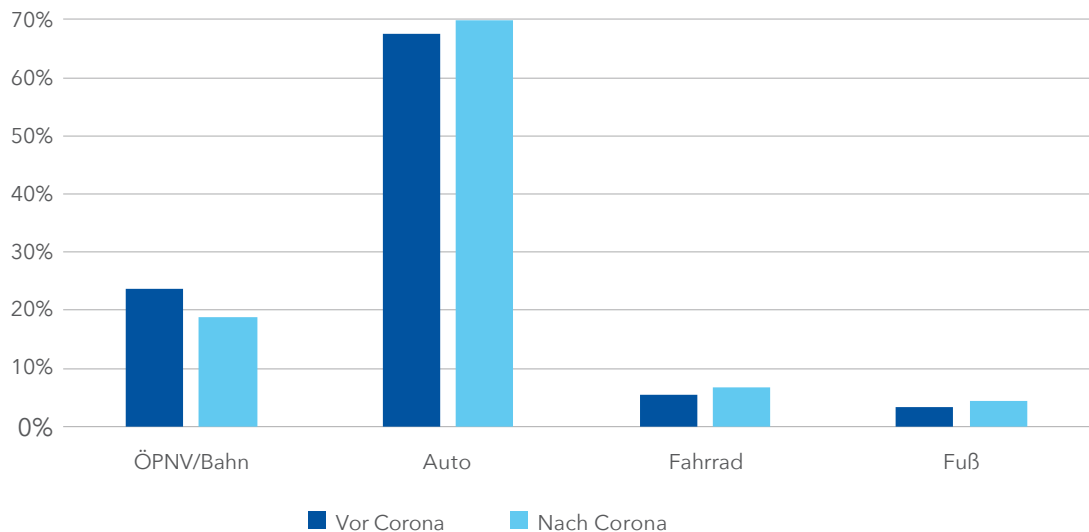
Tabelle 5: Verteilung der Berufspendler in Deutschland nach genutzten Verkehrsmitteln zur Arbeitsstätte im Jahr 2012 nach Wohnort

Verkehrsmittel (Modal Split in %)	Kernstädte im Ballungsraum	Ländliche Kreise mit geringer Dichte
PKW	49,4	72,1
Eisenbahn	7,6	1,9
U-Bahn, Straßenbahn	16,5	0,2
Bus	7,1	2,4
Kraftrad	0,8	1,2
Fahrrad	9,4	11,5
Zu Fuß	8,1	9,2
Sonstige	1,2	1,6
<i>Durchschn. tägl. Pendelstrecke</i>	<i>19 km</i>	<i>28,5 km</i>

Quelle: Soenius (2018, S. 21)

Daten zum Modal Split für das Pendeln vor der Corona-Pandemie und die erwartete Veränderung des Modal-Split in der Post-Corona Zeit wurden auch im Rahmen der Borderstep-Befragung (Clausen & Schramm, 2021, S. 36) erhoben. Zu ihrem Pendelverhalten vor Corona machten 443 Personen vollständige Angaben (Pendelstrecke sowie Modal Split). Die tägliche einfache Pendelstrecke verteilt sich wie in Abbildung 25 gezeigt auf die Verkehrsmittel. Für das erwartete Pendeln in der Zeit nach Corona machten 430 Personen vollständige Angaben. Die tägliche Pendelstrecke bleibt in etwa gleich.

Abbildung 25: Modal Split der Verkehrsleistung beim Pendeln vor und nach Corona



Quelle: Clausen und Schramm (2021, S. 37), n = 443 (vor Corona) und n = 430 (nach Corona)

Die aktuellen Daten zum Modal Split des Pendelns von Clausen und Schramm (2021, S. 37) bestätigen größenordnungsmäßig die Werte von Soenius (2018, S. 21), deren Differenzierung in Stadt und Land aber für die folgenden Überlegungen wichtig ist.

Von den 3,3 Millionen hessischen Erwerbstätigen (Destatis, 2019a, S. 64) wohnen ca. 79 % in Städten und ca. 21 % in ländlichen Gebieten (Destatis, 2020c). Nach Angaben des statistischen Bundesamtes nutzten vor Corona 5,5 % aller Erwerbstätigen täglich oder mindestens die Hälfte der Arbeitszeit das Home-Office. Weitere 7,3 % arbeiteten an weniger als der Hälfte der Arbeitstage von zu Hause aus (Destatis, 2020d). Setzt man für die erste Gruppe 3 Tage Home-Office in der Woche an, für die zweite einen Tag pro Woche, so wäre zu erwarten, dass schon bisher an ca. 4,8 % aller Arbeitstage das Home-Office genutzt wurde. Die mit dem Pendeln zur Arbeit in Hessen verbundenen THG-Emissionen betragen also unter Berücksichtigung der schon bisher üblichen Nutzung von Home-Office ca. 1,42 Mio. t CO_{2eq}/a (Tabelle 6).

Tabelle 6: Nutzung von Verkehrsmitteln für das Pendeln in Hessen

Verkehrsmittel	Millionen km werktäglich	THG-Emissionen bei 220 Arbeitstagen ¹² im Jahr in 1.000 t CO _{2eq} /a	THG-Emissionen bei 220 Arbeitstagen im Jahr in 1.000 t CO _{2eq} /a bei 4,76 % Home-Office
PKW	38,64	1.275	1.214
Eisenbahn	4,13	29	28
U-Bahn etc.	8,20	105	100
Bus	3,98	70	67
Kraftrad	0,75	12	11
Summe	55,7	1.491	1.420

Quelle: eigene

Wie viele Werkstätige in Hessen in Zukunft und dauerhaft an wie vielen Tagen ins Home-Office gehen werden, ist kaum vorherzusehen. Einer sehr hohen Zufriedenheit und einer positiven Auswirkung auf die Work-Life-Balance, nicht zuletzt durch den Wegfall der Pendelzeiten, stehen Sorgen der Vorgesetzten zur Zuverlässigkeit und Produktivität genauso gegenüber wie befürchtete negative Auswirkungen auf das Verhältnis zu den Kolleginnen und Kollegen und die Zusammenarbeit im Team (Schramm, 2020a).

Berücksichtigt man, dass Stürz, Stumpf und Mendel (2020) festgestellt haben, dass während des Corona-Lockdowns maximal 43 % der Erwerbstätigen zumindest teilweise im Home-Office gearbeitet haben, lässt dies die Vermutung zu, dass diese 43 % der Arbeitsplätze dauerhaft das Home-Office zulassen. Würden diese je zwei Tage pro Woche im Home-Office arbeiten, dann würden ca. 17 % der Arbeitstage aller Erwerbstätigen auf das Home-Office entfallen. Gegenüber dem Vor-Corona Stand von 4,8 % würde dies einen Anstieg um 12,2 Prozentpunkte bedeuten, was bezogen auf die Treibhausgasemissionen des Pendelns von ca. 1,491 Millionen t CO_{2eq}/a (vgl. Tabelle 6) eine Reduzierung der Emissionen um ca. 180.000 t CO_{2eq}/a bedeuten würde.

¹² Die Annahme geht von durchschnittlich 250 potenziellen Arbeitstagen pro Jahr aus und zieht 30 Tage Urlaub ab. Krankheits- und Fehltage werden nicht berücksichtigt.

Dem eingesparten Aufwand für das Pendeln stehen allerdings andere Aufwände an Material und Energie gegenüber, die teilweise auf mögliche Rebound-Effekte hinweisen.

Zunächst ist auf einen möglichen zusätzlichen **Aufwand für IKT-Nutzung** hinzuweisen. Für die Nutzung des Home-Office wird zumindest in Bezug auf die Energie zum Betrieb der genutzten Geräte aber davon ausgegangen, dass hier kein zusätzlicher Energieaufwand und damit auch keine zusätzlichen CO₂-Emissionen entstehen. Hierfür spricht die Überlegung, dass die Nutzung eines an das Internet angeschlossenen Endgerätes und ggf. einer Beleuchtung des Arbeitsplatzes sowohl für die Arbeit im Büro wie auch im Home-Office notwendig ist. In Bezug auf die Nutzung von stromverbrauchenden Geräten und des Internetanschlusses besteht also zwischen Büro und Home-Office kein offensichtlicher Unterschied, da die Nutzung des einen Arbeitsplatzes ja die zeitgleiche Nutzung des anderen Arbeitsplatzes ausschließt.

Darüber hinaus ist vorstellbar, dass durch eine zusätzliche oder intensiviere **Beheizung der für Home-Office genutzten Räume** ein Mehrverbrauch von Heizenergie auftreten könnte. Dieser Verbrauch kann mangels Datenbasis gegenwärtig nicht quantifiziert werden.

Zudem ist seit einigen Jahren ein **Trend zu immer längeren Distanzen** zu konstatieren, die Pendler zwischen Wohnung und Arbeitsplatz zurücklegen (DGB Bundesvorstand, 2016). Dieser Trend könnte sich in einer Gruppe von Menschen verschärfen, die das Home-Office intensiv nutzen. Er wurde bereits 2019 von Clausen und Schramm (2019, S. 14f) beschrieben:

Faulconbridge et al. (2009) wie auch Aguilera (2008) sehen eine Dynamik, in der das Ökosystem der Mobilität neue globale Unternehmen hervorbringt. So berichtete eine Teilnehmerin der Veranstaltung „Smart Working: Zeit für kurze Wege“ in Hannover schon 2013 davon, dass sie für eine Münchner Anwaltskanzlei im Homeoffice in Hannover arbeite und es meist ausreiche, einmal im Monat nach München zu fahren. Umgelegt auf 20 Arbeitstage entspricht das einer täglichen Strecke von 65 km, etwa doppelt so viel wie die durchschnittliche Pendlerfahrstrecke. Die Zahl der Fernpendler nimmt gegenwärtig insgesamt stark zu. Schon 2016 berichtet der DGB von 4.000 Hamburgern, 2.200 Münchenern und 1.500 Kölnern, die nach Berlin pendeln, 7.000 Berlinern, die nach Hamburg pendeln sowie 4.500 Berlinern und 2.500 Hamburgern die nach München pendeln (DGB Bundesvorstand, 2016). Die Verfügbarkeit von Home-Office Technologien dürfte hierfür genauso mit ursächlich sein wie die Möglichkeit von virtuellen Meetings und der Bahn-card 100, die die Kosten des Pendelns gegenwärtig bei ca. 400 € pro Monat entfernungsunabhängig deckelt.

Ein Angestellter eines internationalen IT-Unternehmens arbeitet zwar meist im Homeoffice, ist aber ca. dreimal im Jahr eine Woche in den Büros des Unternehmens in London, Nordamerika oder der Karibik. Umgelegt auf ca. 220 Arbeitstage ergibt sich schon durch diese drei Flüge ein Streckenanteil von ca. 140 km pro Arbeitstag.

Auch einige Antworten der Borderstep-Unternehmensbefragung lassen erkennen, dass zumindest ein Teil der im Home-Office Erwerbstätigen erkennt, dass sich neue Freiheiten bei der Wahl des Wohnortes ergeben werden. In einer Studie von Bitkom (2021) wird berichtet, dass unter der Voraussetzung weitgehender Tätigkeit im Home-Office ca. 20% aller Berufstätigen weiter hinaus ins Grüne, in eine attraktivere Stadt oder näher zu Freunden und Familie umziehen würden.

Neben den dargestellten möglichen Rebound-Effekten gibt es aber auch mögliche zusätzliche Einsparpotenziale durch Home-Office. So könnte die Bereitstellung von Büroarbeitsplätzen durch die Unternehmen an die neue Situation angepasst werden. Wenn vor Corona 4,8 % der Arbeitstage im Home-Office verbracht wurden, so war dies bei der Auslastung der Büroarbeitsplätze kaum bemerkbar. Sollte sich dieser Wert in der Gruppe der Büroarbeitenden auf ca. 2 Tage die Woche (40 %) erhöhen, dann würden in den Bürogebäuden jeweils 2 von 5 Arbeitsplätzen unbesetzt bleiben. Darauf könnten die Unternehmen mit der Einführung von **Desk Sharing und einer radikalen Reduktion der Bürofläche** reagieren, wodurch es wiederum zu einer erheblichen, aber ebenfalls gegenwärtig nicht quantifizierbaren Einsparung bei Energie und Ressourcennutzung kommen könnte.

In Hessen kann also das sehr theoretische Potenzial zur THG-Einsparung durch zusätzliche Home-Office-Tage und damit wegfallendes Pendeln auf grob 180.000 t CO_{2eq} pro Jahr abgeschätzt werden. Dies Potenzial wäre aber nur zu erschließen, wenn keine anderen Änderungen eintreten. Denn in welchem Ausmaß diese Einsparungen durch Rebound-Effekte wie Zusatzaufwand für Heizung zusätzlicher Räume, das Mieten größerer Wohnungen und durch größere Pendeldistanzen reduziert werden, ist gegenwärtig nicht quantitativ zu bestimmen. Genauso wenig sind zusätzliche Einsparungen durch Desk Sharing und reduzierte Büroflächen quantifizierbar.

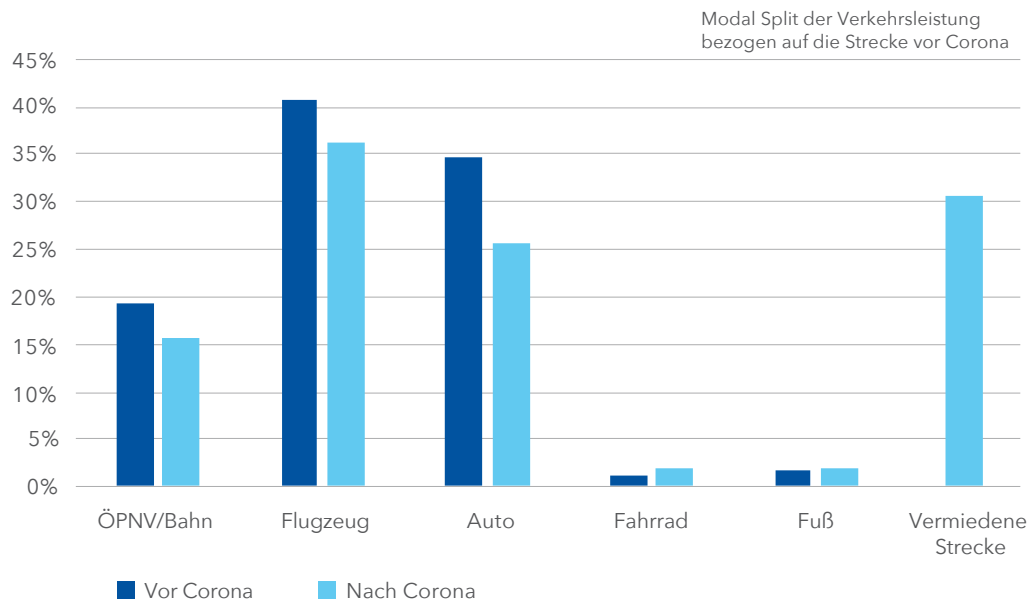
Geschäftsreisen und Videokonferenzen

Berufstätige Menschen in Deutschland legen werktäglich für dienstliche Wege eine Strecke von 7 km zurück (Nobis et al., 2018, S. 104). Dabei führt an einem durchschnittlichen Werktag etwa jeder zehnte Beschäftigte einen dienstlichen Weg durch und legte dabei im Mittel 80 km zurück (Nobis et al., 2018, S. 104).

Insgesamt ist die Datenlage zum Modal Split für den Geschäftsreiseverkehr unbefriedigend. Zumkeller dokumentiert auf Basis von Erhebungsdaten aus den Jahren 1999 bis 2001 für Geschäftsreisen einen Modal Split von 76 % PKW, 13 % Bahn oder Bus, 9 % Flug und 2 % sonstige Verkehrsmittel (Zumkeller, 2005, S. 68). Für die Jahre 2004 bis 2008 liegt ein weiterer Vergleich der Verkehrsmittelwahl von Geschäftsreisenden vor (Fokus, 2009), der einen sukzessiven Anstieg des Anteils von Flugreisen ausweist.

In einer aktuellen repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden durch Borderstep im Rahmen des BMBF-Projektes „Klimaschutzpotenziale der digitalen Transformation“ wurde nach der durchschnittlich vor Beginn der Pandemie zurückgelegten Strecke für Dienstreisen gefragt und zusätzlich um eine Schätzung der zukünftig noch notwendigen Strecken gebeten. Zusätzlich wurde für beide Fälle nach Angaben zum genutzten Modal Split gefragt (Clausen & Schramm, 2021). Vor Corona verteilten sich 1.445 Reisekilometer pro Person auf 20 % Bahn, 42 % Flugzeug, 35 % Auto und je 1,5 % Fahrrad und Zufußgehen. Für die Zeit nach der Pandemie erwarten die Befragten einen Rückgang auf 1.038 Reisekilometer, wobei der Bahn-Anteil mit 20 % konstant bleibt, der Flugzeug Anteil leicht auf 44 % steigt, der Auto-Anteil leicht auf 32 % sinkt und Fahrradfahren und Zufußgehen weiter je einen Anteil von 1,5 % ausmachen. Im Vergleich zur vor Corona gefahrenen Strecke werden aber 27 % der gesamten Strecke vermieden.

Abbildung 26: Fahrtkilometer auf Geschäftsreisen nach Verkehrsmittel



Quelle: Clausen & Schramm (2021), n = 434 (Vor Corona) und n = 390 (Nach Corona).

Im Anschluss an die Corona-Krise könnte also, wenn die Erwartungshaltungen der Befragten sich bestätigen, der Bahn- wie auch der Flug- und Autoverkehr für Geschäftsreisen deutlich und dauerhaft zurückgehen.

Wenn 3,3 Millionen hessische Erwerbstätige (Destatis, 2019a, S. 64) täglich im Durchschnitt 7 km Entfernungen auf Dienstreisen zurücklegen (Nobis et al., 2018, S. 104) ergibt dies eine Gesamtstrecke von ca. 23,1 Mio. Personenkilometern. Teilt man diese nach dem in Abbildung 26 angegebenen Modal Split auf und berücksichtigt die reduzierten Fahrtstrecken, ergeben sich folgende Emissionen von Treibhausgasen aus dem Geschäftsreiseverkehr in Hessen.

Tabelle 7: Nutzung von Verkehrsmitteln auf Geschäftsreisen

THG-Emissionen in 1.000 t CO _{2eq} /a	PKW	Eisenbahn	Flugzeug	Summe
THG-Emissionen vor Corona	269	32	487	789
THG-Emissionen nach Corona	175	23	341	539
			Einspareffekt	249

Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Wie Schramm (2020a, S. 37) zeigt, ist die Durchführung einer vierstündigen Videokonferenz mit vier Beteiligten mit THG-Emissionen von ca. 1 kg CO_{2eq} verbunden. Im Vergleich dazu liegen die THG-Emissionen bei der getrennten Anreise von zwei Personen zu einer Besprechung aus ca. 80 km Entfernung (Nobis et al., 2018, S. 104) unter Heranziehung der Emissionsfaktoren aus Tabelle 4 bei ca. 5 kg CO_{2eq} bei Anreise mit der Bahn, ca. 24 kg CO_{2eq} bei Anreise mit dem PKW

und ca. 37 kg CO₂ bei der bei einer so kurzen Entfernung unrealistischen Anreise mit dem Flugzeug. Die relativen Einsparungen liegen bei 80 % im Fall der Anreise mit der Bahn und 97,3 % bei Anreise mit dem Flugzeug. Wird der nach Corona zu erwartende Modal-Split (Abbildung 26) berücksichtigt, ergeben sich mittlere THG-Emissionen der Anreise von ca. 25 kg CO_{2eq} und relative Einsparungen von 96 %. Von dem in Tabelle 7 errechneten Einsparereffekt könnten also 96 % realisiert werden.

Die dauerhafte Verlagerung von realen Geschäftsreisen auf virtuelle Formate in Hessen könnte zu dauerhaften Einsparungen von ca. 240.000 Tonnen CO_{2eq}-Emissionen pro Jahr führen.

6.3.5 Mobiles Arbeiten als Klimaschutzpotenzial entwickeln

6.3.5.1 Fazit

In Hessen kann das Potenzial zur CO₂-Einsparung durch zusätzliche Home-Office-Tage und damit wegfallendes Pendeln auf grob 180.000 t CO₂ pro Jahr geschätzt werden. Dieser Wert würde erreicht, wenn quasi alle, deren Arbeitsplatz überhaupt für Home-Office geeignet ist (ca. 40 % der Erwerbstätigen), zwei Tage pro Woche ins Home-Office gehen und insgesamt 17 % aller Arbeitstage im Home-Office verbracht würden. Der Wert kann durch Zusatzaufwand zum Heizen des Home-Office und längere Pendlerstrecken reduziert und durch zusätzliche Einsparungen durch Desk Sharing und reduzierte Büroflächen erhöht werden.

Die dauerhafte Verlagerung von realen Geschäftsreisen auf virtuelle Formate in Hessen würde ca. 240.000 t CO₂-Emissionen zusätzlich pro Jahr einsparen. Von der Notwendigkeit, ihr Verhalten ändern zu müssen, wären hier nur ca. 10 % der Erwerbstätigen betroffen (Nobis et al., 2018, S. 104), die überhaupt geschäftlich reisen.

Um diese Verhaltensweisen zu fördern, ist es wichtig, zu reflektieren, welche Treiber sie fördern und welche Hemmnisse gegen eine Ausweitung von Home-Office oder Videokonferenz sprechen.

Als wichtigster Treiber ist in beiden Fällen die Zeitersparnis zu werten (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25), die sich im Fall von Home-Office vermutlich deutlich fördernd auf Zufriedenheit und Work-Life-Balance auswirkt. Im Falle der Videokonferenz als Ersatz realer Dienstreisen kommt als weiterer Treiber die Kostenersparnis hinzu, denn Videokonferenzen senken nicht nur die THG-Emissionen im Zusammenhang mit dem Meeting um 96 %, auch die Kosten der Meetings sinken auf das Niveau einer Flatrate von ca. 12 € pro Monat¹³, unabhängig von der Zahl der Meetings. Die deutsche Wirtschaft trägt jährlich Geschäftsreisekosten von über 55 Mrd. € (VDR, 2019), in Dienstleistungs- und Beratungsunternehmen können die Reisekosten 5 bis 10 % der Personalkosten erreichen. Und galten Reisekosten bisher als weitgehend unvermeidbar, wollen zukünftig 90 % der Unternehmen die Notwendigkeit von Geschäftsreisen stärker hinterfragen (VDR, 2020b).

¹³ Das ist in etwa der Preis einer individuellen Lizenz eines Videokonferenz-Tools.

Als zentraler Schwachpunkt beider Arbeitsformen zeigen sich der mangelnde persönliche Kontakt und das Teamgefühl (Clausen & Schramm, 2021; Schramm, 2020b). Das klingt plausibel, weist aber auch darauf hin, dass die Verlagerung von Meetings aus dem Besprechungsraum auf den PC durch den Kauf und erfolgreichen Betrieb einer geeigneten Software nicht geschafft ist. Es geht vielmehr darum, sich auch in der virtuellen Welt ungezwungen und persönlich zu verhalten und nicht nur die gesparte Zeit und die hohe Effizienz solcher Meetings abzuschöpfen, sondern auch für persönlichen Kontakt und Tiefe zu sorgen. Neben Vorschlägen für virtuelles Teambuilding kristallisieren sich gegenwärtig erste Vorschläge und Erfahrungen heraus, die sich dauerhaft positiv auswirken könnten.

Virtuelle Meetings verbessern

Als Gastgeber größerer Meetings immer 5 oder 10 Minuten vor dem vereinbarten Termin im Meetingraum sein: Dadurch müssen Gäste nicht vor dem Hinweis „der Organisator wird Sie gleich einlassen“ warten und es können vorab persönliche Begrüßungen in Ruhe ausgetauscht oder auch einzelne Angelegenheiten besprochen werden.

Mit Lizenzen nicht sparsam sein: Je einfacher alle Beschäftigten ein virtuelles Meeting einleiten können, desto öfter kann es genutzt werden, um z. B. auch zu zweit die Vorteile des Bildschirmteilens in der Zusammenarbeit zu nutzen.

Öfter kurze Pausen machen, aber in den Pausen den Meetingraum offenlassen: Wer sich seinen Tee schon geholt hat, kann dann, wie beim realen Meeting auch, das eine oder andere private oder dienstliche Wort wechseln.

Virtuelle Kaffeepause: Gruppen von Beschäftigten in Büro und Home-Office verabreden sich in der Kaffee- oder Mittagspause, holen sich Essen oder Getränk vor den Bildschirm und tauschen sich außerhalb offizieller Meetings aus.

Erfahrung mit zusätzlichen Tools aufbauen: Online kann nicht nur Videotelefonie betrieben werden. Durch Bildschirmteilens lassen sich Präsentationen oft besser vorführen als mit dem Beamer und es gibt virtuelle Whiteboards, auf denen Ergebnisse festgehalten werden können, auf denen aber auch alle gleichzeitig schreiben können. Chatfunktion und Chatmoderator helfen Diskussionen mit größeren Gruppen gut zu strukturieren und senken die Hemmschwelle für viele, sich zu äußern.

Alle diese Möglichkeiten versuchen, den Kontakt im Team mit Menschen aus Büro und Home-Office zu verbessern. Sie sind aber u.U. auch geeignet, den Kontakt zu externen Partnerinnen und Partnern über das rein Geschäftliche hinaus zu vertiefen und zu verbessern.

6.3.5.2 Politische Handlungsmöglichkeiten

Welche Möglichkeiten bieten nun Home-Office und Videokonferenz für zusätzliche Klimaschutzeffekte? Mit Blick auf nunmehr ein Jahr Kontaktvermeidung und einen zweiten Lock-down bis zum Sommer 2021 erfolgt eine intensive Nutzung von Videokonferenzen und Home-Office überall dort, wo es geht und selbst dort, wo es nur eine Notlösung ist. Die Frage ist jetzt: Wo haben wir im Laufe des Jahres 2020 mit mobilem Arbeiten und Home-Office gute Erfahrungen gemacht, welche Klimaschutzeffekte haben wir erzielt und wie können wir erreichen, dass nicht durch die Dominanz alter Gewohnheiten nach dem Impfen und ab Sommer 2021 alles wieder so wird, wie vor der Krise?

Zum einen helfen hier die oben aufgeführten Treiber: Zeitersparnis und Kostensenkung, Work-Life-Balance und Zufriedenheit. Sowohl die Unternehmen wie auch die Beschäftigten haben Erfahrungen gemacht und vieles gelernt. Je länger das neue Verhalten geübt wird, desto fester werden sich die neuen Methoden und Erfahrungen in den Gewohnheiten verankern. Es ist also grundsätzlich damit zu rechnen, dass die Treiber dahingehend wirken werden, das mobile Arbeiten, Videokonferenzen und das Home-Office auch in die Zeit nach der Krise weiter zu nutzen.

Anders ist es mit den Hemmnissen: Angst um die Aufrechterhaltung von persönlichem Kontakt und um das Teamgefühl, Angst darum, zu Partnerinnen, Partnern, Kundinnen und Kunden nicht genügend Nähe aufzubauen und so den Auftrag nicht zu bekommen. Solche Hemmnisse und Ängste werden dazu führen, dass die Nutzung der neuen Methoden nicht das aus Sicht des Klimaschutzes Bestmögliche erreicht.

Forschungsbedarf

Es sollte versucht werden, von zufriedenen Nutzern und Vorreitern möglichst viel darüber erfahren, wie Unternehmen und Beschäftigte gemeinsam das digitale Arbeiten verbessert haben und so die notwendige Mobilität effektiv reduzieren. Eine Reihe von Fragen liegt nahe:

- Wie lässt sich der Kontakt zu Kolleginnen, Kollegen, Partnerinnen und Partnern in virtuellen Formaten auf gutem Niveau aufrechterhalten?
- Welche Rolle spielen Videokonferenzen für die standortübergreifende Zusammenarbeit im Team und wie erreichen die Unternehmen, dass diese fachlich wie auch persönlich optimal verlaufen?
- Welche Organisationsformen haben sich bewährt, um Arbeitsqualität und -effizienz sicherzustellen und die Teamqualität zu fördern?
- Welche Lösungen sind für welche Gruppen von Beschäftigten optimal?
- Welche Lösungen bewähren sich in welchen Situationen im Kontakt zu Externen, z.B. Kunden?

Solche Fragen können in empirischen **wissenschaftlichen Projekten** gestellt und beantwortet werden. Hier wäre politisch mit Forschungsförderung anzusetzen. Die Arbeits- und Kommunikationswissenschaft sollte diese Frage stellen, untersuchen und Vorschläge erarbeiten, wie aus den neuen und jetzt eingeübten Instrumenten und Methoden das Bestmögliche herausgeholt werden kann.

Die Fragen können aber auch in (zunächst virtuellen) **Erfahrungsaustauschtreffen** von interessierten Unternehmen gestellt und beantwortet werden, die z.B. durch die lokalen Kammern veranstaltet werden könnten.

Und sie könnten Gegenstand eines **Wettbewerbs** sein. Prämiert werden sollten in einem solchen Wettbewerb Lösungen, die vorbildhaft und innovativ sowie auf andere Unternehmen übertragbar sind und deren Klimaschutzbeitrag plausibel quantifiziert werden kann. Der Wettbewerb sollte vor allem darauf ausgerichtet sein, durch die Dokumentation und Präsentation der Lösungen von Vorreitern andere KMU zu stimulieren, das „neue Normal“ (während der Coronapandemie) in einen kontinuierlichen Zustand zu überführen. Die Form des Wettbewerbs mit Prämierung bietet dabei den Vorteil, vergleichsweise pressewirksam zu sein.

Weitere Aktivitäten sind mit Blick auf die befürchteten Rebound-Effekte sowie die zusätzlich erschließbaren Potenziale denkbar. So wäre es sinnvoll, **Home-Office als Treiber für längere Pendeldistanzen** zu untersuchen. Es wäre auch zu überlegen, ob der Sinn von steuerlichen Vorteilen wie der Pendlerpauschale darin liegen kann, die Zurücklegung extremer Distanzen finanzierbar zu machen. Eine Deckelung der steuerlichen Geltendmachung der Pendlerpauschale bei 50 km Entfernung¹⁴ würde einer solchen Entwicklung entgegenwirken bzw. diese zumindest nicht unnötig fördern.

Auch die Aufnahme von Untersuchungen und der Aufbau von Unterstützungsstrukturen für die Einführung von **Desk Sharing und die Reduktion von Büroflächen** scheinen hilfreich. Die wahrscheinlicher werdende Entwicklung zu mehr Home-Office könnte so begleitet und die Unternehmen bei der Erschließung der sich anbietenden Kostensenkungspotenziale unterstützt werden.

6.4 Smart Buildings und Smart Neighborhoods

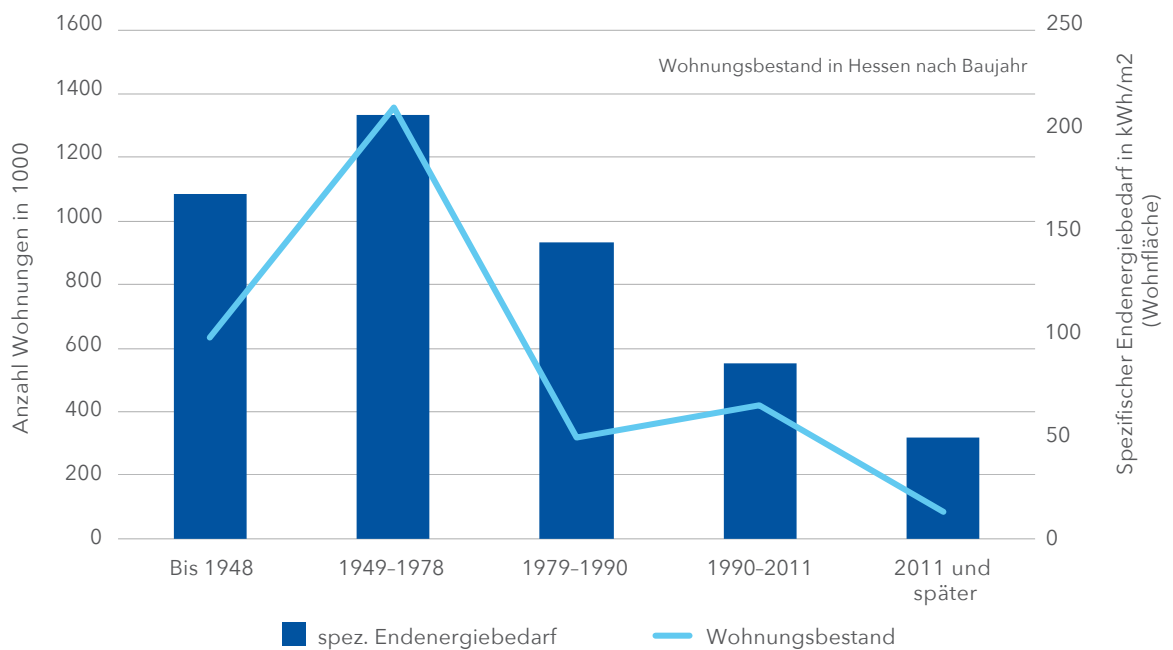
6.4.1 Bedeutung des Gebäudesektors in Hessen

Der Gebäudesektor in Deutschland sowie in Hessen ist für einen großen Anteil des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen verantwortlich. Mit 67,8 TWh werden etwa 30% der Endenergie in Hessen in Gebäuden verbraucht. Davon entfallen 43,8 TWh, also 64,6% auf private Haushalte (van den Busch, Gauler & Müller, 2020). In den privaten Haushalten wiederum wird mit über 35 TWh für Heizwärme und 7,9 TWh für Trinkwarmwasser der weitaus größte Anteil des Endenergieverbrauchs (zusammen rund 84,9%) für Wärmeerzeugung benötigt.

¹⁴ Alternativ könnte die ungeprüfte Anerkennung der Pendlerpauschale bei dieser Entfernung gedeckelt werden. Bei höheren Entfernungen ist nachzuweisen, dass kein selbstverschuldeter Grund wie z.B. ein privat motivierter Umzug zu der hohen Entfernung geführt hat.

In Hessen gibt es ca. 1,4 Millionen Gebäude, dies entspricht 7,3% des Bestands in Deutschland (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2019). Viele dieser Gebäude sind vor dem Inkrafttreten der Wärmeschutzverordnungen (1977 bzw. 1995) erbaut oder saniert worden.

Abbildung 27: Wohnungsbestand in Hessen nach Baualter



Quelle: Eigene nach (Destatis, 2019b) und (Dena, 2018)

Diese älteren Bestandsgebäude weisen einen hohen spezifischen Energiebedarf auf und besitzen daher für die Klimapolitik und die Energiewende eine große Bedeutung. Insgesamt liegen die durch den Gebäudesektor (inklusive GHD) und die Haushalte in Hessen verursachten THG-Emissionen mit 11,1 Mio. t CO_{2eq} deutlich über den THG-Emissionen der Industrie, die für etwa 3,0 Mio. t CO_{2eq} verantwortlich ist (van den Busch et al., 2020, S. 97f).

Der Anteil des Stromverbrauchs an den Klimawirkungen von Gebäuden und Haushalten ist zwar ebenfalls relevant, aus klimapolitischer Sicht ist jedoch mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und dem seit Jahren sinkenden haushaltsbezogenen Stromverbrauch eine Kehrtwende bereits eingeleitet worden.

Trotz des hohen Anteils des gesamtdeutschen und des hessischen Gebäudebestands am Endenergieverbrauch wird die Energiewende in diesem Sektor nur sehr zögerlich umgesetzt. Der wesentliche Grund hierfür liegt darin, dass die bisher genutzten Maßnahmen (Außendämmung, Versorgung mit erneuerbaren Energien, Modernisierung der Wärmeversorgung etc.) mit hohen Investitionskosten und langen Amortisationszeiten verbunden sind. Im Bereich der Mietwohnungen unterliegen die Maßnahmen zudem dem Nutzer-Investor-Dilemma¹⁵, da der Vermieter investieren muss, der Mieter jedoch den Nutzen aus der Modernisierung in Form reduzierter Betriebskosten zieht.

¹⁵ Das Nutzer-Investor-Dilemma (siehe auch Prinzipal-Agent-Theorie nach (Kathleen M. Eisenhardt, 1989)) beschreibt eine spezifische Form des Marktversagens. Demnach wird eine Investition nicht getätigt, da der Investor (Vermieter) aus ihr keinen Ertrag erzielen kann. Der Nutznießer der Investition (Mieter) ist dagegen nicht bereit, den aus der Investition entstehenden Vorteil (z. B. effiziente Heizung) zu zahlen.

Ein vielversprechendes Maßnahmenfeld zur Reduktion von Emissionen im Gebäudesektor stellt intelligente Gebäudetechnik dar. Damit ausgerüstete Gebäude und Quartiere können eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Energiewende spielen. Intelligente Gebäudetechnik ist auch deshalb eine leistungsfähige Ergänzung zu baulichen Sanierungsmaßnahmen, weil sie ergänzend zu diesen genutzt werden kann und niedrige THG-Vermeidungskosten¹⁶ verursacht (Gambardella, Bergset & Beucker, 2012)

In den folgenden Kapiteln werden die Energieeffizienz- und Klimaschutzpotenziale von intelligenter Gebäudetechnik betrachtet. Dabei werden in Absprache mit dem Auftraggeber vor allem Anwendungen in Gebäuden und Quartieren analysiert. Wo sich Schnittstellen zu Anwendungen in weiteren Sektoren (z. B. Mobilität, Smart Grid oder Smarte Regionen) ergeben, werden diese zwar erwähnt, aus Kapazitätsgründen jedoch nicht weiterverfolgt.

6.4.2 Intelligente Vernetzung von Gebäuden: Smart Homes, Smart Buildings und Smart Neighborhoods

Unter intelligenter Gebäudetechnik werden verschiedene IKT-basierte Vernetzungsansätze und -techniken zusammengefasst, die sich jedoch hinsichtlich ihrer Steuerungsebenen, Aufgaben und Funktionen deutlich unterscheiden. Hinzu kommt, dass viele der Techniken (z. B. die Gebäudeautomation) bereits seit den 1990er Jahren existieren, sich aufgrund der Digitalisierung des gesamten Technologiefeldes aber stark weiterentwickelt haben.

Im Zentrum der vorliegenden Analyse stehen Ansätze, die für folgende Aufgaben des Energiemanagements und der Sektorenkopplung in Gebäuden bzw. Quartieren eingesetzt werden können:

- **Effizienter Einsatz von Energie (Wärme und Strom)** auf Gebäude- und Quartiersebene, z. B. durch Reduktion des Energiebedarfs und die Nutzung lokaler und bedarfsgerecht erzeugter Energie z. B. aus Blockheizkraftwerken oder Anlagen für erneuerbare Energien (PV, Solarthermie, Wärmepumpen etc.).
- **Speicherung von Energie** in Gebäuden, z. B. Strom aus erneuerbaren Quellen, der in Wärme bzw. Kälte (Power-to-Heat) umgewandelt oder in Batterien in Gebäuden oder Fahrzeugen z. B. durch smartes, gesteuertes Laden gespeichert wird.
- **Integration von Gebäuden und Quartieren** in übergeordnete Ebenen des Energiesystems (Smart Grid, Smart Infrastructure) und Handelsmechanismen (z. B. virtuelle Kraftwerke), die die Teilnahmen solcher netzreaktiver¹⁷ Einheiten an intelligenten Märkten (Smart Markets) oder anderen lokalen und regionalen Kompensationsmechanismen (z. B. Peer-to-Peer Handel) erlauben.

¹⁶ THG-Vermeidungskosten sind die Kosten, die ausgehend von einem statischen oder dynamischen Bezugssystem oder Referenzzeitpunkt zur Reduktion einer bestimmten THG-Menge aufgewendet werden müssen (Beer et al., 2009). Sie werden in € pro (vermeidene) Tonne CO₂ bzw. CO₂-Äquivalente [€/tCO_{2eq}] angegeben.

¹⁷ Unter einem netzreaktiven Gebäude oder Quartier wird dessen Fähigkeit verstanden, durch eine gezielte Änderung des Strombezugs aus dem Netz und der Kopplung mit strombasierten Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung zur Netzstabilität und Versorgungssicherheit beizutragen (Kalz et al., 2018).

Neben diesen übergeordneten Aufgaben des Energiemanagements kann intelligente Gebäudetechnik auch nach ihren primären Einsatzbereichen unterschieden werden. Diese sind:

- **Smart Home Systeme:** Smart Home Systeme zielen auf die Vernetzung und Steuerung von technischen Komponenten und Geräten auf der Wohnungs- bzw. Haushaltsebene ab. Bestehende Angebote richten sich vornehmlich an Endkunden und umfassen verschiedene Anwendungsfelder. Mithilfe von Aktorik, Sensorik sowie IKT-Komponenten werden Hausgeräte (Herd, Kühlschrank, Waschmaschine etc.) kontrolliert, der Wohnkomfort und das Energiemanagement (Jalousien, Heizung, Lichtquellen etc.) optimiert sowie Sicherheit (Alarm- und Überwachungstechnik) oder auch Entertainment und Mediennutzung (Musik- und Video-Streaming über smarte Endgeräte) gesteuert.
- **Smart Building Systeme:** Smart Building Systeme haben ihren Ursprung oft in der Automatisierungs- und Regelungstechnik und werden für das Energiemanagement in Gebäuden und Quartieren genutzt. Die Technik umfasst Aktorik, Sensorik sowie IKT-Komponenten zur Steuerung definierter Anwendungsbereiche (z. B. effiziente Beheizung, Beleuchtung oder Klimatisierung eines Gebäudes). Aufgrund des Plattformansatzes vieler Systeme und offener Schnittstellen können vielfältige Anwendungen (z. B. Gebäudemanagement, Sicherheitstechnik, digitale Erfassung und Abrechnung von Wärme, Wasser, Strom etc.) sowie die Kommunikation zwischen Vermietern und Mietern eingebunden werden. Die Angebote richten sich vor allem an die private, kommunale und genossenschaftliche Wohnungswirtschaft. Sie unterliegen damit auch anderen Vermarktungs- und Refinanzierungsmodellen als Angebote im Endkundenmarkt.
- **Smart Neighborhood Konzepte:** Hierbei handelt es sich nicht um eine spezifische Systemklasse von Gebäudetechnik, sondern um Vernetzungs- und Steuerungsansätze für Quartiere, die neben dem standortbezogenen Energiemanagement auch komplexe Optimierungs- und Sektorenkopplungsaufgaben übernehmen. Oftmals wird dabei Smart Building Technik genutzt, die mit quartiersinternen oder -externen Systemen (z. B. Marktplattformen) kommuniziert und verschiedene Energieerzeuger und -verbraucher koordiniert bzw. nach Zielvorgaben wie Preisen oder Eigennutzung optimiert. Smart Neighborhood Ansätze bilden auch eine Schnittstelle zu Smart-City Konzepten, die weitaus komplexere Zusammenhänge der Vernetzung, Datenerfassung und -nutzung sowie der Steuerung umfassen.

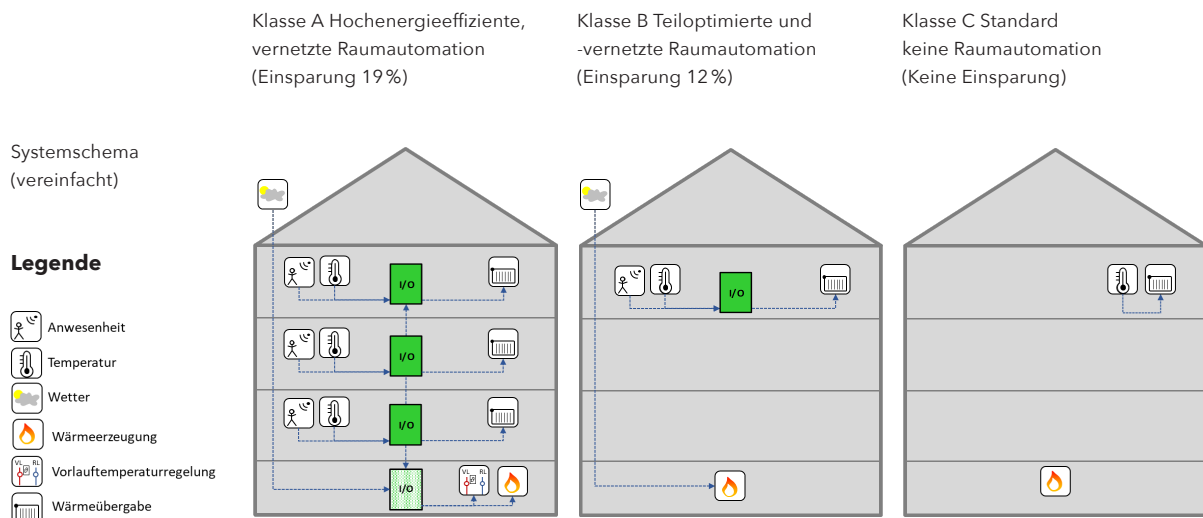
Intelligente Gebäudetechnik besitzt somit vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, die für eine Effizienzsteigerung und eine erhöhte Nutzung Erneuerbarer Energien eingesetzt werden können.

Eine Gefahr von Rebound-Effekten (Santarius, 2015) in Form erhöhter Energie- und Ressourcenverbräuche aus dem Einsatz der Technik besteht dann, wenn die Systeme nicht primär auf die Steigerung der energetischen Effizienz oder die Nutzung erneuerbarer Energien ausgelegt sind. Dies kann insbesondere bei Smart Home Systemen der Fall sein, die hauptsächlich auf Wohnkomfort, altersgerechtes Wohnen und Leben (z. B. Ambient Assisted Living), Mediennutzung oder Sicherheit (Safety & Security) ausgerichtet sind (Quack, Liu & Gröger, 2019). Untersuchungen zeigen, dass solche Angebote zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führen können, wenn beispielsweise energieintensive Gateways oder Kommunikationsstandards genutzt werden (Quack, Liu & Gröger, 2019; Stobbe et al., 2015). Andererseits besitzt die Technik bei richtiger Auslegung sehr hohe Potenziale zur Senkung des Energieverbrauchs in Haushalten und zur Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden (Beucker & Hinterholzer, 2019; Kalz et al., 2018; Stobbe et al., 2015). Szenariobasierte Lebenszyklusanalysen zeigen, dass die

Systeme in der Wärmeversorgung von Gebäuden deutlich mehr Energie und Ressourcen einsparen können, als sie in Herstellung, Gebrauch und Entsorgung benötigen (Beucker et al., 2016).

Sehr zuverlässig quantifizierbar sind zudem die Einsparungen, die durch Gebäudetechnik im Bereich der Heizenergie erreicht werden können. Mithilfe der Norm DIN EN 15232-1 Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement (DIN EN 15232, 2017) können spezifischen Funktionen einer Gebäudeautomation erzielbare Einsparungen zugeordnet werden. Hochenergieeffiziente Gebäudeautomationsysteme der Klasse A, die u.a. eine Einzelraumregelung des Wärmebedarfs und eine entsprechende adaptive Regelung des Heizkessels umfassen, steigern die Energieeffizienz um 19%. Die etwas weniger effizienten Systeme der Klasse B, die eine Anpassung der Temperaturregelung am Heizkörper vornehmen, ohne dabei in die Regelung des Heizkessels einzugreifen, garantieren noch eine Einsparung von 12%.

Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung von System- und Automationsklassen für das Energiemanagement in Gebäuden



Quelle: Eigene in Anlehnung an (DIN, 2017)

6.4.3 Abschätzung der Klimaschutzwirkung von Smart Buildings und Smart Neighborhoods

6.4.3.1 Ermittlung von Klimaschutzpotenzialen intelligenter Gebäudetechnik in zwei Szenarien

Um das Klimaschutzpotenzial von intelligenter Gebäudetechnik im hessischen Gebäudesektor abschätzen zu können, werden zwei Szenarien betrachtet. Diese berücksichtigen typische Gebäude und Quartiere in Hessen und verschiedene Einsatzfelder der Technik:

- **Szenario 1:** Einsatz intelligenter Gebäudetechnik im hessischen Gebäudebestand: In diesem Szenario wird ermittelt, welche Energie- und THG-Einsparungen aus der Nutzung von intelligenter Gebäudetechnik (Smart Building Systemen) der Klasse A (gemäß DIN EN 15232-1) in Hessen resultieren würde. Dabei wird eine Erschließung von 40% der Wohnfläche von Gebäuden mit einer oder zwei Wohnungen (EZFH) und 60% von Mehrfamilienhäusern (MFH) ab drei Wohnungen bis zum Jahr 2030 angenommen. Das Szenario bildet somit die Potenziale ab, die durch eine effiziente, bedarfsgerechte Erzeugung von Wärme und Warmwasser in den Gebäuden erzielt werden können. Für das Szenario werden Daten zum hessischen Gebäudebestand (Destatis, 2019b) sowie zu dessen aktuellen energetischen Eigenschaften (Energieverbrauch und Brennstoffmix) genutzt (van den Busch et al., 2020). Die Endenergieverbräuche werden auf Basis des Brennstoffmix von privaten Haushalten anhand der Emissionsfaktoren in Anlage 9 (Gebäudeenergiegesetz, 2020) ermittelt. Anhand der Methode der Gradtagszahlen wird mit dem Tool des Instituts für Wohnen und Umwelt Darmstadt (IWU) der Bedarf für Heizwärme in privaten Haushalten auf das langjährige Mittel temperaturbereinigt¹⁸. Das größte Potenzial für den Einsatz der Technik liegt in älteren Bestandsgebäuden, die vor dem Inkrafttreten der Wärmeschutzverordnungen (1977 bzw. 1995) erbaut oder saniert wurden.
- **Szenario 2:** Einsatz intelligenter Gebäudetechnik in Verbindung mit Sektorenkopplung: Im zweiten Szenario wird ermittelt, welche weiteren Energie- und THG-Einsparungen mit einer intelligenten Sektorenkopplung erschlossen werden könnten. Während Sektorenkopplung allgemein die Übertragung von Energien zwischen den verschiedenen Energiesektoren wie beispielsweise Wärme, Strom, Mobilität oder Chemie bedeuten, stellt die intelligente Sektorenkopplung eine systemoptimierte Form dar, die beispielsweise die Verfügbarkeit oder die veränderliche CO₂-Intensität der Stromerzeugung über die Zeit berücksichtigt. Übersteigt beispielsweise das Dargebot von Strom aus Windenergie und Photovoltaik die elektrische Last zeitweise, können solche Spitzen genutzt werden, um in einem anderen Sektor gespeichert zu werden. Man spricht in diesem Fall auch von Flexibilität (Mueller et al., 2019). Dafür ist allerdings ein kommunikativer Austausch mit (externen) Energiemarktakteuren sowie Prognosen und Steuerung der lokalen Umwandlungsprozesse erforderlich. In dem Szenario wird untersucht, welche Potenziale sich in Hessen ergeben, wenn Wärmepumpen und elektrische Heizelemente in Gebäuden im Rahmen einer Sektorenkopplung genutzt würden.

¹⁸ Neue Fassung des Tools vom 26.08.2020. Für das Jahr 2019 ergibt sich für die Gradtagzahl ein Faktor von 0,95 (20/12) bezogen auf das Jahr 2019 gegenüber dem langjährigen Mittel.

Die Berechnungen in beiden Szenarien bauen auf einem am Borderstep Institut entwickelten Modell auf (Beucker & Hinterholzer, 2019). Dieses nutzt Daten zum hessischen Gebäudebestand sowie zu Gebäudetypen des Statistischen Bundesamtes. Für die Ausstattung des hessischen Gebäudebestands mit Smart Building Technik wird die Gebäudeautomationsklasse A der DIN EN 15232 angesetzt, nach der eine Einsparung von 19% an Heizenergie angenommen werden darf. Die angenommenen Erschließungsquoten von 40% der Wohnfläche von Gebäuden mit einer oder zwei Wohnungen und 60% von Mehrfamilienhäusern ab drei Wohnungen in Hessen werden linear über 10 Jahre (Zeitraum 2020 bis 2030) verteilt. Entsprechend können Energieeinsparungen in kWh ermittelt werden.

Um anhand dieser Energieeinsparungen in Wohngebäuden Treibhausgas-Reduktionspotentiale zu bestimmen, wird anhand des Energiemix in Hessischen Wohngebäuden aus (van den Busch et al., 2020) ein gewichteter durchschnittlicher Emissionsfaktor (g_{CO_2}/kWh) bestimmt. Für die einzelnen Energieträger werden die Werte aus der Norm zur energetischen Gebäudebewertung DIN V 18599 angesetzt. Allerdings wird für elektrische Energie für die verschiedenen Stützjahre ein über die Zeit abnehmender Emissionsfaktor entsprechend (Fritsche & Greß, 2019) verwendet. Nicht betrachtet werden Smart Home Systeme, da aufgrund der Vielfalt der angebotenen Lösungen sowie den damit verbundenen Schwankungen und Unsicherheit über verlässliche Einspar- und Rebound-Effekte nur sehr schwer qualifizierte Abschätzungen zur Energieeffizienz und zum Klimaschutzpotenzial der Technik getroffen werden können. Eine detaillierte Analyse der Systeme würde den Auftrag dieser Studie übersteigen.

6.4.3.2 Höhe des Klimaschutzpotenzials für Hessen

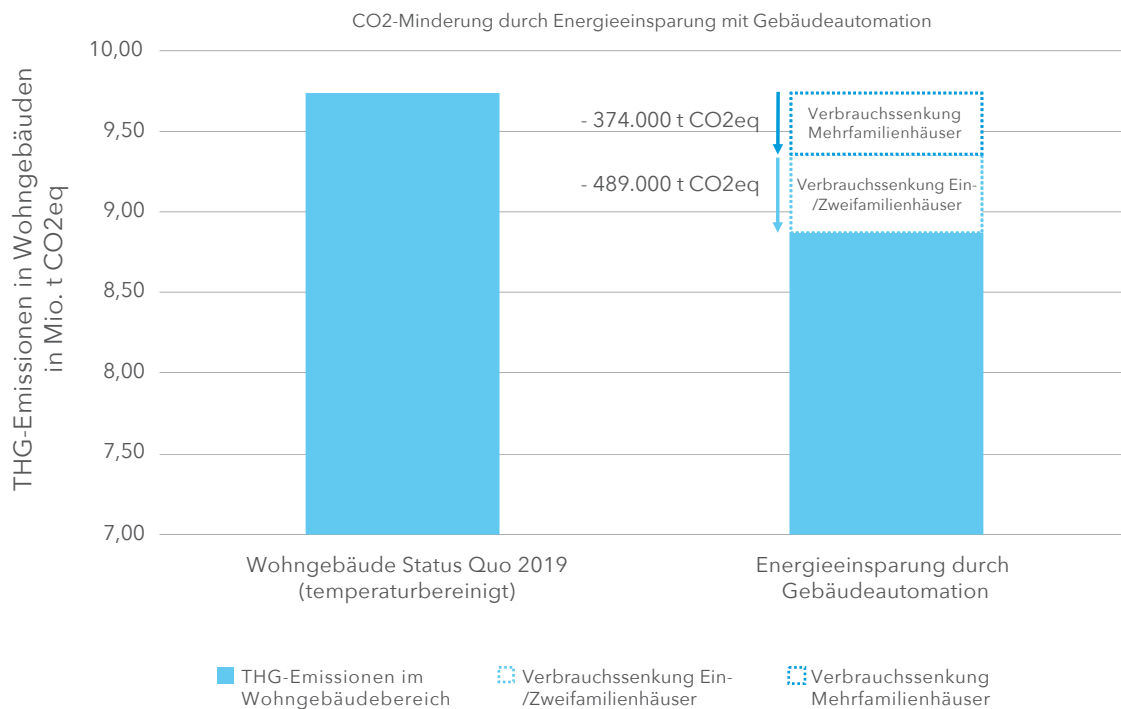
Die Abschätzung des Klimaschutzpotenzials aus dem Einsatz intelligenter Gebäudetechnik sowie der Umsetzung entsprechender Quartiersprojekte erfolgt gemäß verschiedenen Szenarien. Für jedes Szenario werden zentrale Annahmen beschrieben, die THG-Minderungspotenziale in Tonnen CO_2 -Äquivalenten ($t CO_{2eq}$) gegenüber dem temperaturbereinigten¹⁹ Status Quo in 2019 ermittelt und die Höhe dieses Potenzials in den Kontext des hessischen Gebäudesektors eingeordnet.

Szenario 1: Einsatz von Gebäudeautomation im hessischen Gebäudebestand zur Energieeinsparung

Gegenüber dem Status Quo gemäß Energiewende Monitoringbericht Hessen (van den Busch et al., 2020) ergeben sich Einsparpotenziale von bis zu 489.000 $t CO_{2eq}$ in Ein- und Zweifamilienhäusern und 374.000 $t CO_{2eq}$ in Mehrfamilienhäusern. In Summe entspricht dies ca. 8,9% der in 2019 in privaten Haushalten aufgrund von Wärmeerzeugung verursachten THG-Emissionen (temperaturbereinigt).

¹⁹ Der Energieverbrauch für das Heizen von Gebäuden hängt von der Witterung ab. Um den Einfluss des Wetters/ Klimas auf den Energieverbrauch zu bestimmen, wird ein fiktiver Verbrauch berechnet, der sich bei konstanten Temperaturen ergeben hätte. Hierfür werden die „Heizgradtage“ eines bestimmten Jahres ins Verhältnis zu den durchschnittlichen Heizgradtagen über einen längeren Zeitraum gesetzt. Daraus ergibt sich ein Korrekturfaktor, der mit den Energieverbrauch multipliziert wird, um so temperaturbereinigte Werte zu erhalten (siehe auch www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Glossar/was-bedeutet-temperaturbereinigt.html, Abruf April 2021).

Abbildung 29: Treibhausgas-Minderungspotenzial durch Energieeinsparung mit Gebäudeautomation



Quelle: eigene Darstellung

Szenario 2: Einsatz von Gebäudeautomation für Sektorenkopplung

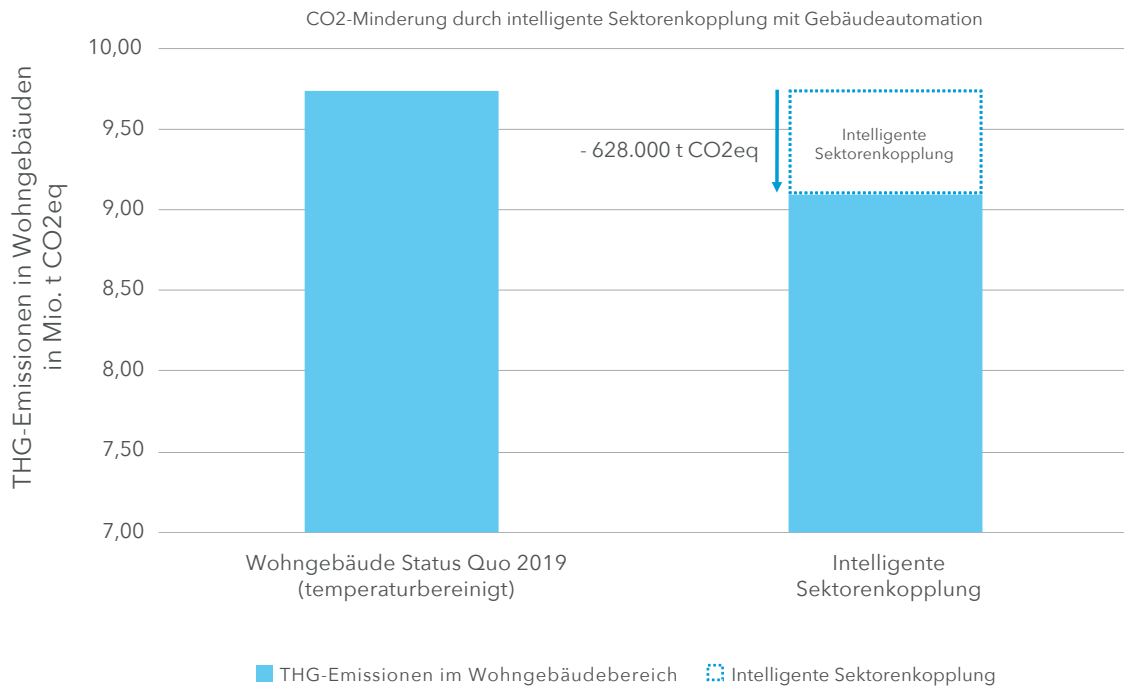
Das Szenario betrachtet Einsparungen, die durch intelligente Sektorenkopplung bzw. einen flexiblen Anlagenbetrieb im hessischen Wohngebäudesektor bis zum Zieljahr 2030 erreicht werden können. Da hierfür Annahmen zur zeitlichen Verfügbarkeit von Stromüberschüssen aus regenerativer Erzeugung notwendig sind, werden prognostizierte Zeitreihen des Karlsruher Institut für Technologie (vom Scheidt, Müller, Staudt & Weinhardt, 2020) für das Jahr 2030 verwendet²⁰. Für die Wärmepumpen wird berücksichtigt, welcher Betrieb unabhängig von der Ansteuerung (wärmegeführt) stattfinden würde²¹. Die durch diese aufgrund von Strom-Überschüssen erzeugte Wärmemenge wird genutzt, um die herkömmliche Wärmeenergie im Gebäudebereich zu substituieren und so THG-Emissionen zu vermeiden. Es wird geschätzt, dass sich der Bestand an Wärmepumpen in Hessen von derzeit ca. 51.000 Stück (Bundesverband Wärmepumpe, 2018) vergleichbar zur Entwicklung in Deutschland (Bundesverband Wärmepumpe, 2016) auf 137.000 Stück im Jahr 2030 ansteigt. Daraus würde sich eine elektrische Anschlussleistung der Wärmepumpen in Hessen von 392 MW ergeben (Bundesverband Wärmepumpe, 2016). Für die Anschlussleistung von direktelektrischer Heizung (Elektrische Speicherheizung, Einschraub-Heizelemente, Elektrodenheizkessel) werden 3.932 MW prognostiziert.

²⁰ Hiervon wird anhand der Wind- und PV-Erzeugung sowie der elektrischen Last eine Zeitreihe für die Residuallast ermittelt (inkl. Must-Run Kapazität von 5 GW). Die Wärmepumpen werden auf den maximalen Betrieb geschaltet, sobald die Erzeugung (inkl. Must-Run) höher als die Last ist. Die elektrische Direktheizung wird aufgrund niedriger Effizienz nachrangig genutzt, wenn die Überschüsse (inkl. Must-Run) 10 GW überschreiten.

²¹ Um zu berücksichtigen welche Wärmeenergie bei den Wärmepumpen stattfindet, wird ein Temperaturprofil in stündlicher Auflösung der Wetterstation Gießen/Wettenberg (DWD Stations-ID 1639) verwendet. Es wird bei den Wärmepumpen ein durchschnittlicher COP von 3,15 unterstellt, bei den elektrischen Heizelementen ein Wirkungsgrad von 100 %.

Für das Szenario 2 ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 628.000 t CO_{2eq}, dies entspricht in etwa 6,46 % der in privaten Haushalten aufgrund von Wärmeerzeugung verursachten CO₂-Emissionen im Jahr 2019 (temperaturbereinigt).

Abbildung 30: Treibhausgas-Minderungspotenzial durch intelligente Sektorenkopplung und Gebäudeautomation

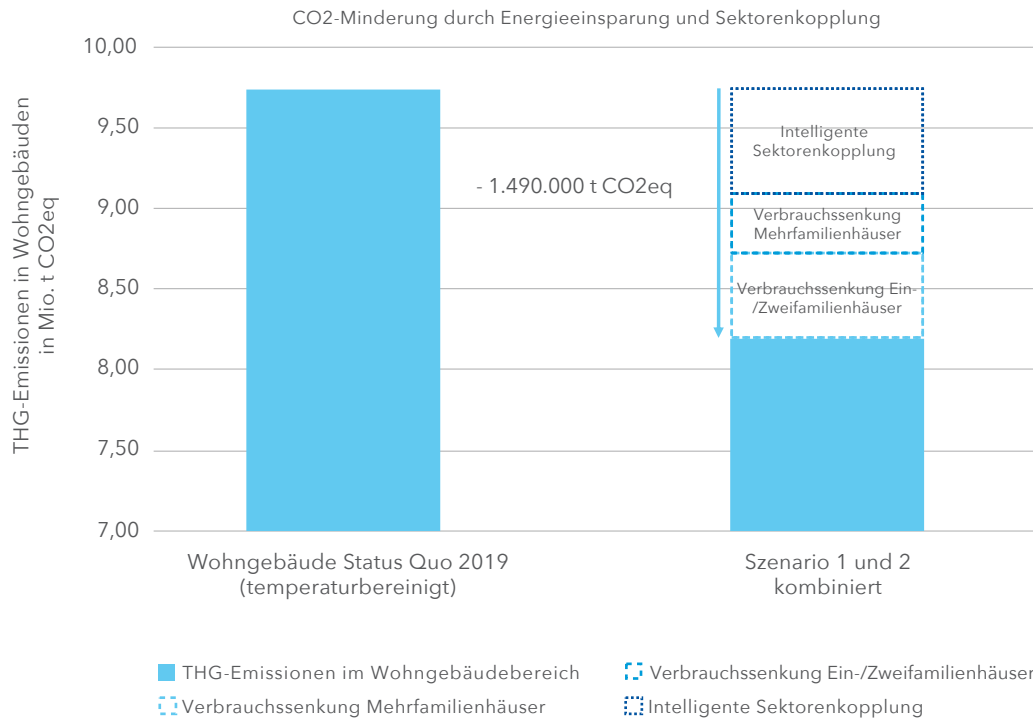


Quelle: eigene Darstellung

Kombinierte Szenarien: Einsatz von intelligenter Gebäudetechnik zur Energieeinsparung und intelligenter Sektorenkopplung

Kombiniert man den Einsatz von intelligenter Gebäudetechnik zur Energieeinsparung und betreibt zusätzlich elektrische Anlagen flexibel im Sinne einer intelligenten Sektorenkopplung, so addieren sich die Einsparungen auf 1.490.000 t CO_{2eq}.

Abbildung 31: Treibhausgas-Minderungspotenziale aus Energieeinsparung und intelligenter Sektorenkopplung durch Gebäudeautomation



Quelle: eigene Darstellung

Das Einsparpotential entspricht etwa 15,3 % der CO₂-Emissionen der für Wärmeerzeugung verbrauchten Endenergie in privaten Haushalten in Hessen im Jahr 2019 (temperaturbereinigt).

6.4.3.3 Bedeutung des Themenfelds für Hessen

6.4.3.3.1 Nachhaltigkeitspotenziale für Hessen

Die Szenarien verdeutlichen, dass mit intelligenter Gebäudetechnik große Klimaschutzpotenziale in Hessen mobilisiert werden können. Vor allem kann die Primärenergienutzung für das Heizen und die Warmwassererzeugung (Gas, Öl etc.) reduziert und der nutzbare Anteil erneuerbarer Energien durch die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme erhöht werden.

Die Technik bildet aber auch die Grundlage für zahlreiche zukünftige Anwendungen, die weitere Nachhaltigkeitseffekte auslösen können. Dazu zählen z. B.:

- Diverse Möglichkeiten der Sektorenkopplung und der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien, z. B. auch im Mobilitätssektor, da mit der Technik eine bedarfsgerechte Erzeugung, Umwandlung oder Speicherung von Energie in Form von Wärme oder Strom möglich ist und dadurch ein lokaler oder regionaler Ausgleich zwischen Energieerzeugung und -verbrauch erreicht werden kann.

- Die Unterstützung von Klimaanpassungsstrategien in Quartieren und Städten, z. B. mit Hilfe von Sensorik und Aktorik aus der intelligenten Gebäudetechnik und Gebäudeautomation, die ein kontinuierliches Monitoring erlauben und die mit weiteren Messdaten zur intelligenten Be- und Entwässerung, Verschattung etc. gekoppelt werden können.
- Die informationstechnische Verknüpfung mit weiteren Anwendungsfeldern aus dem Bereich Smart City, wie dem mobilen Arbeiten (siehe Kapitel 6.3), intelligenten Verkehrskonzepten oder der Nutzung digitaler Bürgerservices sowie von Gemeinde- und Informationsdiensten, die mit reduzierten Energie- und Ressourcenverbräuchen einhergehen sowie zu höherer Lebensqualität und einer besseren Vereinbarkeit von Familie und Beruf beitragen können.

Darüber hinaus kann durch die intelligente Vernetzung von Gebäuden und Quartieren Wertschöpfung in Hessen erzeugt und in der Region gehalten werden. Dies gilt sowohl für die Technik und Infrastruktur, denn viele der Komponenten (Sensoren, Aktoren, Steuerungstechnik, Kommunikationsinfrastruktur etc.) werden von mittelständischen Unternehmen in Deutschland hergestellt, als auch für die Installation und den Betrieb der Technik, die von regionalen Unternehmen und Betrieben vorgenommen wird. Vor allem das Energiemanagement sowie die Umsetzung der Sektorenkopplung in Gebäuden und Quartieren sind arbeitsintensiv und eröffnen zudem Möglichkeiten für die Entwicklung zahlreicher neuer Geschäftsmodelle und Dienstleistungen. Neben kleinen und mittelständischen Unternehmen und Handwerksbetrieben werden hierfür auch energiewirtschaftliche Akteure (z. B. Kontraktoren, Aggregatoren, Direktvermarkter) sowie kommunale Betriebe (Stadtwerke etc.) benötigt.

Die wirtschaftliche Erwartung in dem Themenfeld für das Bundesland Hessen wird auch an der Bildung des Smart Living Cluster Hessen (siehe www.slhcluster.de) deutlich, das sich im Frühjahr 2021 gegründet hat. Das Cluster hat sich zum Ziel gesetzt, Unternehmen der Industrie, Wohnungswirtschaft und Dienstleistern bei der Schaffung von Anwendungen im Smart Living Bereich zu unterstützen und eine Gewerke-übergreifende Zusammenarbeit zu fördern.

6.4.3.3.2 Bestehende Vorhaben und Initiativen in Hessen

In Hessen gibt es bereits zahlreiche Modellvorhaben und Initiativen, an die bei der Entwicklung des Themenfeldes Smart Building und Smart Neighborhoods angeknüpft werden kann. Im Folgenden werden beispielhafte hessische Initiativen genannt, in denen das Themenfeld aufgegriffen werden kann.

- Die Geschäftsstelle Smarte Region im Bereich der Hessischen Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung, die hessische Kommunen mit Informations-, Beratungs- und Transferangeboten bei der Digitalisierung im öffentlichen Raum unterstützt
- Energieland Hessen, mit der das Land über energiepolitische Entscheidungen, Konzepte, Projekte, Beratungs- und Förderangebote sowie Wissen zu den Themen Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Hessen informiert
- Das Bündnis Klima Kommunen Hessen, das als Plattform für Kommunen und den Wissenstransfer dient. Es bietet Beratung zu den Themen Klimaschutz und Klimaanpassung sowie Zugang zu Veranstaltungsangeboten und Unterstützungsleistungen.

- Das bereits oben erwähnte Smart Living Cluster Hessen, das unterschiedliche Gewerke und Betreiber im Themenfeld Smart Living und intelligenter Vernetzung zusammenführen möchte und bereits über mehr als 20 Mitglieder aus Wirtschaft und Wissenschaft verfügt.

Darüber hinaus existieren in Hessen wegweisende Modellvorhaben, in denen Smart Building und intelligente Quartierskonzepte bzw. Teilaspekte davon umgesetzt werden. Sie können als Vorbildfunktion für weitere, vergleichbare Projekte genutzt oder beispielsweise zu Leuchtturmprojekten sowie Sektorenkopplungsvorhaben weiterentwickelt werden. Beispiele hierfür sind:

- **Lincoln-Siedlung in Darmstadt:** Auf der Konversionsfläche eines ehemals von der US-Armee genutzten Areals entsteht eine neue Siedlung, die nach ökologischen Kriterien entwickelt werden soll. Ziel ist es, ein verkehrsberuhigtes Quartier mit Wohnraum für rund 5.000 Menschen zu schaffen, für das ein eigenes Energiekonzept inklusive Versorgung entwickelt wird. In diesem Quartier stellen sich somit zahlreiche Herausforderungen einer effizienten Eigenversorgung und der Sektorenkopplung, bei denen Ansätze der intelligenten Gebäudetechnik eine entscheidende Rolle spielen können. Zukünftig könnte in diese Siedlung beispielsweise auch die Nutzung intelligenter Gebäudetechnik oder die Nutzung von regenerativ erzeugtem Überschussstrom für die Erzeugung von Warmwasser oder die Ladung von E-Mobilen erprobt und umgesetzt werden.
- **Süwag Quartierkraftwerk:** Das Quartierkraftwerk der Süwag ist aus dem Forschungsprojekt Enervator hervorgegangen, das durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (HMWEVL) gefördert wurde. In Kelsterbach entsteht auf einem ehemaligen Betriebsgelände ein gemischtes Wohn- und Gewerbegebiet, das energieautark mit Wärme und Strom versorgt werden soll. Dafür wurde ein hocheffizientes System aus Blockheizkraftwerk, Spitzenlastkessel, Wärmespeicher, Photovoltaikanlage und Stromspeicher umgesetzt. Die Komponenten sind durch eine intelligente, digitale Steuerung miteinander vernetzt. Auch dieses Vorhaben bietet zahlreiche Optionen der Weiterentwicklung zu einem sektorengekoppelten Quartier, in dem Energieumwandlungsprozesse sowie Optimierungszustände für Eigennutzung oder Einspeisung der Energie erprobt werden können. Gegenwärtig wird ein weiteres Quartierkraftwerk in Hattersheim gebaut.
- **Aktiv-Stadthaus Frankfurt:** In der Nähe des Frankfurter Hauptbahnhofs hat die ABG Frankfurt Holding das Aktiv-Stadthaus umgesetzt. Das 74 Wohnungen umfassende Gebäude besitzt eine hoch wärmegeämmte Gebäudehülle mit aktiver Energiegewinnung. Versorgt wird das Gebäude mit PV-Anlagen, wobei der erzeugte Strom in einer Batterie im Haus gespeichert wird und auch nachts genutzt werden kann. Ein Abwasserwärmetauscher ermöglicht die Nutzung von Wärme aus dem Abwasser zur Beheizung des Gebäudes. Die Wohnungen sind zudem mit Touchpad-Displays ausgestattet, die über den Energieverbrauch informieren. Auch dieses Gebäude kann trotz seines bereits hohen Ausrüstungsgrades um Sektorenkopplung (z. B. Ladung von E-Mobilen) weiterentwickelt werden.
- **Quartier der Zukunft in Rüsselsheim:** In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Vorhaben wird in einem Quartier in Rüsselsheim ein Quartiers-Cockpit entwickelt, über das die Anwohnerinnen und Anwohner Zugriff auf Dienste wie ein Quartiersnetzwerk, eine Mobilitätsstation mit Car-Sharing-Fahrzeugen, eine Smart Home-Connection sowie ein Smart Metering-Portal haben. Zentraler Akteur des Vorhabens sind die Stadtwerke Rüsselsheim, die über die Dienste neue Geschäftsfelder und Smart City entwickeln möchten.

Die genannten Vorhaben stellen nur eine kleine, nicht repräsentative Auswahl von hessischen Bau- und Sanierungsprojekten dar, in denen bereits Teile von intelligenter Gebäudetechnik oder entsprechenden Quartierskonzepten umgesetzt wurden. Eine systematische Analyse der in Hessen durchgeführten Vorhaben z. B. durch Einbeziehung kommunaler Wohnungsbaugesellschaften wäre sinnvoll.

6.4.4 Handlungsmöglichkeiten für Hessen

Wesentliche Anreize für die Verbreitung intelligenter Gebäudetechnik sowie die Entwicklung entsprechender Quartiere können auf der Bundesebene geschaffen werden. Dies gilt besonders für das Energiemanagement, da die Wirtschaftlichkeit der Technik stark von Energie- und Emissionspreisen (Steuern und Entgelte für Energie, CO₂-Bepreisung etc.) abhängig ist. Auch die Überwindung des bereits erwähnten Nutzer-Investor-Dilemma kann vor allem durch die Anpassung nationaler Gesetze und Verordnungen, z. B. dem Gebäudeenergiegesetz, der Betriebskostenverordnung oder dem Steuerrecht unterstützt werden. Notwendig wären Regelungen, die Investitionen in Effizienztechnik wirtschaftlich machen und einen klaren Anreizmechanismus schaffen.

Aber auch das Land Hessen und seine Kommunen können das Themenfeld fördern. Dabei sind vor allem die folgenden Vorgehensweisen denkbar:

- Förderung von Pilot- und Leuchtturmvorhaben: Land und Kommunen können ausgewählte, innovative Pilot- und Leuchtturmvorhaben initiieren und fördern, in denen intelligente Gebäudetechnik und Quartierskonzepte zum Einsatz kommen und die über den bisherigen Stand der Technik und der Anwendung hinausgehen. Dies können sowohl Bestandssanierungen als auch Neubauten sein, wobei dem großen Gebäudebestand aufgrund des noch hohen Energieverbrauchs eine große Bedeutung zukommt. Von besonderem Interesse sind dabei Vorhaben, die eine neue Qualität der Flexibilität in der Versorgung mit erneuerbaren Energien, der Sektorenkopplung (z. B. Gebäude, Gewerbe, Mobilität) erproben. Ziel sollte zudem sein, dass die Vorhaben einen deutlichen Nachhaltigkeitseffekt durch Digitalisierung (beispielsweise durch starke Reduktion von Primärenergie und Emissionen) erzeugen und damit eine Vorbildfunktion für hessische Städte und Regionen ausüben.
- Integrierte Planung beim Ausbau der Digitalisierung: Im Rahmen der digitalen Strategie des Landes werden Digitalisierungsaktivitäten gebündelt. Gleichzeitig werden in den verschiedenen Domänen der Digitalisierung (Wohnen, Mobilität, Arbeit, Gesundheit etc.) die Entwicklung von Technik und Standards mit großer Geschwindigkeit vorangetrieben. Dies stellt vor allem große Herausforderungen an die Entwicklung von Infrastrukturen in Städten und Regionen, die von dem Ausbau von Kommunikationsnetzen und der Energieversorgung über die Planung von Verkehrswegen bis hin zur umweltfreundlichen Raumplanung und dem Umgang mit personengebundenen Daten reichen. Mit Hilfe integrierter Planungsansätze können viele Synergien erzielt und Ziele miteinander verbunden werden (z. B. Nutzung von Abwärme aus der Industrie und Gewerbe für die Beheizung von Wohnungen oder paralleler Ausbau von Energie- und Telekommunikationsnetzen). Hierfür kann das

Land entsprechende Planungsleitlinien und -konzepte entwickeln. Aktivitäten und Vorhaben hierzu können ggf. über das neue Programm „Starke Heimat Hessen“²² der Hessischen Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung gefördert werden.

- Entwicklung von Mindeststandards für landeseigene und kommunale Liegenschaften: Das Land Hessen kann für die Sanierung und den Bau landeseigener und kommunaler Gebäude Mindestanforderungen für den Einsatz intelligenter Gebäudetechnik (z. B. gemäß DIN EN 15232) und die Vorbereitung der Liegenschaften auf die Sektorenkopplung (z. B. Strom-Wärme und Elektromobilität) definieren (siehe auch Kap. 6.4.3). Damit können das Land und die Kommunen den Einsatz der Technik fördern und eine Vorbildfunktion für den privaten Sektor übernehmen. Diese Maßnahmen hätten auch positive Effekte auf mittelständische Unternehmen im Land, die mit der Herstellung, dem Aufbau und Betrieb der Technik Erfahrungen sammeln könnten (z. B. auch im Rahmen des Smart Living Cluster Hessen, siehe Kap. 6.4.3.5).
- Die Förderung smarterer Kommunen und Regionen im Programm „Starke Heimat Hessen“, die 2021 bis 2024 insbesondere interkommunale Digitalisierungsvorhaben von Kommunen unterstützen wird, umfasst auch Aspekte der Nachhaltigkeit, die von Antragstellern zu betrachten sind. Hierüber hat das Land eine Steuerungsmöglichkeit, um Nachhaltigkeit bei Smart Region-Vorhaben zu platzieren.

²² Siehe www.smarte-region-hessen.de/beratung-foerderung/foerderung-smarterer-kommunen-und-regionen, Abruf April 2021

7

Zusammenfassende Darstellung der Handlungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden Handlungsmöglichkeiten für das Land Hessen und die Landesregierung erörtert, wie mit Hilfe der Digitalisierung Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele erreicht werden können. Die Darstellung dieser Handlungsmöglichkeiten stellt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln dar.

Generell ist anzumerken, dass die Digitalisierung und die ihr zugrundeliegenden IKT-Technologien vor allem eine internationale Dimension haben. IKT-Produkte und -Anlagen werden für den Weltmarkt entwickelt und IKT-Dienste werden mehr und mehr von internationalen Anbietern bereitgestellt. Auf Ebene eines Bundeslandes sind daher die Möglichkeiten zur Einflussnahme beschränkt. Sie konzentrieren sich insbesondere auf die Beeinflussung der Rahmenbedingungen für die regionalen IKT-Infrastrukturen, auf die Förderung von Forschung & Entwicklung sowie auf Maßnahmen zur Koordination der verschiedenen lokalen und regionalen Aktivitäten. Weitere Ansatzpunkte bestehen in der nachhaltigen und klimafreundlichen Beschaffung von IKT-Produkten und Anlagen sowie in der Kommunikation und der Erhöhung der Transparenz. Insbesondere beim Thema Rechenzentren kommt dem Land Hessen als internationaler Top-Standort eine besondere Rolle zu, sich für Rahmenbedingungen zur nachhaltigen Entwicklung dieser Branche auch auf Bundes- und EU-Ebene einzusetzen.

Bei den Wirkungen der Digitalisierung auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz sind zwei Ebenen zu unterscheiden: die direkten Wirkungen und die indirekten Wirkungen. Die direkten Wirkungen sind beispielsweise die THG-Emissionen, die durch die Herstellung und den Betrieb der IKT-Geräte und -Anlagen entstehen. Die indirekten Wirkungen sind Effekte, die die Digitalisierung in andere Branchen, z. B. in den Bereichen Industrie, Verkehr oder Wohngebäude auslöst. Im Folgenden werden einzelne Handlungsmöglichkeiten dargestellt, die sich jeweils auf eine der genannten Ebenen beziehen. Bei der Ausgestaltung von Maßnahmen zur Verbesserung von Nachhaltigkeit und Klimaschutz sind aber immer beide Ebenen zu berücksichtigen. So sollten einerseits Maßnahmen zur Reduktion der direkten Wirkungen möglichst nicht dazu führen, die Leistungsfähigkeit der digitalen Infrastrukturen einzuschränken. Damit würden die Chancen reduziert, durch die Digitalisierung den Klimaschutz in anderen Branchen voranzubringen. Die Corona-Pandemie hat deutlich gezeigt, dass leistungsfähige digitale Infrastrukturen notwendig sind, um im Falle einer notwendigen Reduzierung des Verkehrs die Kommunikation aufrechterhalten zu können. Bei Maßnahmen zur Förderung von positiven indirekten Wirkungen der Digitalisierung sind andererseits auch immer die zu erwartenden zusätzlichen direkten Wirkungen zu berücksichtigen. Hier sind vor allem die Risiken von Rebound- und Wachstumseffekten, möglicher zusätzlich induzierter Verbrauch und Veränderungen in Konsum und Verhalten zu berücksichtigen.

Die Handlungsmöglichkeiten zu den **direkten Wirkungen** der Digitalisierung auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz beziehen sich auf die drei Bereiche Rechenzentren, Telekommunikationsnetze und Endgeräte. Die obigen Ausführungen haben gezeigt, dass die hier bestehenden Herausforderungen durch neue technische Entwicklungen und Trends beeinflusst werden. So hat im letzten Jahrzehnt bei den Endgeräten ein deutlicher Wandel stattgefunden. War im Jahr 2010 noch der Betrieb der Geräte für mehr als die Hälfte der verursachten THG-Emissionen

verantwortlich, so dominiert heute die Herstellung der Geräte. Der Betrieb ist dagegen nur noch für ca. ein Drittel der insgesamt durch Endgeräte verursachten THG-Emissionen verantwortlich. Der Trend zum Cloud Computing kann diese Entwicklung noch beschleunigen, da immer mehr Rechenleistung von den Endgeräten in Rechenzentren verlagert wird. Außerdem führt Cloud Computing – obwohl die Bereitstellung der IKT-Leistung in großen Cloud-Rechenzentren meist deutlich effizienter ist als in traditionellen Rechenzentren – zu einem sehr deutlichen Wachstum der Nachfrage nach Rechenleistung. Hier sind Wachstums- und Rebound-Effekte festzustellen. Ein Beispiel für sich ändernde Herausforderungen ist auch der Trend zu mehr Video-Streaming. Video-Streaming führt zu einem sehr deutlichen Anstieg der übertragenen Datenmenge in den Telekommunikationsnetzen. Auch wenn der CO₂-Footprint des einzelnen Nutzers relativ gering ist, führt die zunehmende Nutzung in immer mehr Bevölkerungsschichten dazu, dass Video-Streaming heute für ca. 5 % der THG-Emissionen der IKT in Hessen verantwortlich ist.

Im Themenfeld **Rechenzentren** und Nachhaltigkeit ist das Land Hessen bereits gut aufgestellt. Schon die hessische Digitalstrategie aus dem Jahr 2016 setzt einen deutlichen Fokus auf dieses Thema; dies wird in der aktuellen Strategiefortschreibung „Digitales Hessen – wo Hessen zuhause ist“ noch verstärkt. Eine Vielzahl von Initiativen wie z. B. das House of Digital Transformation, das House of Energy oder der Digital Hub FrankfurtRheinMain arbeiten konstruktiv an der Weiterentwicklung des Rechenzentrumsstandortes Hessen. Künftige Handlungsmöglichkeiten bestehen insbesondere darin, die Rechenzentrums-Initiativen in Hessen weiter zu bündeln und Synergien in der Zusammenarbeit zu nutzen. Das ist in der neuen Digitalstrategie durch den Aufbau eines Hessischen Rechenzentrumsbüros ab 2022 geplant. Eine gemeinsame, nachhaltige Förderung und Weiterentwicklung des Standortes kann dazu beitragen, dass die Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleibt und gleichzeitig Nachhaltigkeit und Klimaschutz verbessert werden. Ein möglicher Ansatzpunkt besteht in der Etablierung eines regelmäßig durchgeführten Rechenzentrumsgipfels in Hessen. Weitere Handlungsmöglichkeiten werden insbesondere beim Thema Abwärmenutzung aus Rechenzentren gesehen. Das Beispiel Stockholm zeigt, dass eine Bündelung der Aktivitäten von lokalen und regionalen Akteuren aus den Bereichen Politik und Verwaltung, Wirtschaftsförderung, Energieversorgung und Digitalbranche notwendig ist. Eine Förderung von Forschung & Entwicklung sowie von Demonstrations- und Leuchtturmprojekten kann dazu beitragen, dass die Abwärmenutzung aus Rechenzentren und andere Möglichkeiten der Sektorkopplung und der Verbesserung der Energieeffizienz vorangebracht werden. Das Land Hessen könnte zudem auf Ebene des Bundes und der Europäischen Union darauf hinwirken, dass die ökonomischen Rahmenbedingungen für die Abwärmenutzung verbessert werden, die Transparenz durch ein anerkanntes Energielabel gefördert und die internationalen Wettbewerbsbedingungen für Rechenzentren angeglichen werden.

Im Bereich der **Telekommunikationsnetze** hat das Land Hessen mit dem Mobilfunkpakt und der Gigabitstrategie bereits gute Grundlagen für eine leistungsfähige Infrastruktur der Zukunft gelegt. Künftige Handlungsmöglichkeiten bestehen insbesondere darin, die Nachhaltigkeitsziele beim weiteren Ausbau der Infrastrukturen noch deutlicher zu verankern. Außerdem scheint eine gezielte Förderung der Forschung zur Nachhaltigkeit von 5G-Mobilfunk und Edge Computing sinnvoll.

Die **Endgeräte** sind in Hessen für etwa ein Drittel der THG-Emissionen der IKT verantwortlich. Anders als bei Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen wird der Hauptteil dieser THG-Emissionen nicht im Betrieb, sondern durch die Herstellung der Geräte verursacht. Handlungsmöglichkeiten bestehen hier also insbesondere bei der Beschaffung der Geräte. Durch Infor-

mationskampagnen und entsprechende Regelungen für die öffentliche Beschaffung kann dazu beigetragen werden, dass eine ganzheitliche Betrachtung aller Lebensphasen bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Endgeräten erfolgt. Auch Initiativen, Endgeräte möglichst lange zu nutzen bzw. nach der Erstnutzung weiterzuverwenden, tragen dazu bei, dass der CO₂-Footprint der Endgeräte verringert werden kann.

Auf der Ebene der **indirekten Effekte** der Digitalisierung bestehen sehr große Chancen, Nachhaltigkeit und Klimaschutz deutlich zu verbessern. Die Potenziale zur Absenkung der THG-Emissionen liegen höher als die THG-Emissionen der digitalen Produkte und Anlagen selbst. Allerdings heben sich diese Potenziale nicht von alleine, sondern bedürfen einer gezielten Förderung. Ohne eine geeignete Lenkung ist es insbesondere durch Rebound- und Wachstumseffekte möglich, dass die Digitalisierung insgesamt zu einer Erhöhung der THG-Emissionen in Hessen führt. Sehr große Potenziale zur Senkung der THG-Emissionen bestehen in den Bereichen Industrie, Gebäude und in der Mobilität. Die obigen Ausführungen haben gezeigt, dass im Land Hessen hierzu bereits eine Vielzahl von Initiativen und Projekten existiert. Die weitere Bündelung und Koordination der Maßnahmen stellt eine wichtige Aufgabe der Zukunft dar. Weitere erfolgversprechende Ansätze auf Landesebene liegen in der Förderung von Forschung & Entwicklung oder in Demonstrations- und Leuchtturmprojekten. Bei der Ausgestaltung der Maßnahmen ist unbedingt die ausreichende und adäquate Berücksichtigung von möglichen Rebound-Effekten und anderen Risiken der Digitalisierung notwendig. Die Handlungsfelder Home-Office/Videokonferenzen und Smart Buildings/Smarte Quartiere wurden im Rahmen dieser Studie vertiefend betrachtet. Hier bestehen in den nächsten Jahren erhebliche Potenziale, zu mehr Nachhaltigkeit und Klimaschutz in Hessen beizutragen.

Durch eine verstärkte Nutzung von **Home-Office und Videokonferenzen** können deutliche Mengen an Treibhausgasemissionen des Verkehrs eingespart werden. Die Corona-Pandemie hat gezeigt, in welchem Maße eine Substitution von physischer Anwesenheit durch Online-Lösungen möglich ist, wenn dies dringend notwendig ist. Aus Klimaschutzsicht gilt es, auch nach der Pandemie möglichst viel Verkehr durch digitale Lösungen zu vermeiden. So könnten etwa 240.000 t CO_{2eq} pro Jahr in Hessen durch eine dauerhafte Substitution von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen eingespart werden. Um diese Potenziale zu heben, bieten sich auf Landesebene insbesondere Handlungsmöglichkeiten in den Bereichen Forschung und Kommunikation/Transparenz an. Bisher fehlt allerdings noch viel Wissen zu den ökonomischen, sozialen und ökologischen Auswirkungen der massiven Einführung von Videokonferenzen. Mit Blick auf das Home-Office ist das Ergebnis dagegen ambivalent. Zwar lassen sich theoretische Einsparpotenziale durch reduziertes Pendeln in einer Größenordnung von ca. 180.000 t CO_{2eq} pro Jahr für Hessen errechnen. Ob diese sich aber langfristig auswirken oder durch verschiedene Rebound-Effekte wieder aufgezehrt werden, ist mangels Daten zu langfristigen Änderungen des Mobilitäts- und Wohnverhaltens weitgehend offen.

Auch zu möglichen Rebound-Wirkungen und zu zusätzlichen Nachhaltigkeitspotenzialen wie der Reduktion von Büro- und Übernachtungsflächen besteht noch Forschungsbedarf. Über geeignete Kommunikationsformate z. B. mit Unterstützung der Kammern können die Chancen und Risiken der digitalen Lösungen kommunal und regional mit Unternehmen diskutiert werden. Ein KMU-Wettbewerb für vorbildhafte und innovative Unternehmenskonzepte zur Nutzung digitaler Kommunikationsmöglichkeiten wäre ein weiterer möglicher Ansatz zur Förderung.

Im Bereich **Smart Buildings und Smarte Quartiere** bestehen besonders hohe Potenziale zur Senkung der THG-Emissionen. In Hessen könnten hier bis zum Jahre 2030 etwa 1,5 Mio. t CO₂ eingespart werden. Auch wenn die wesentlichen Rahmenbedingungen zur Förderung der Technologien auf Bundesebene gesetzt werden, bestehen auch auf Landesebene einige Handlungsmöglichkeiten. Mit der Initiative „Smarte Regionen“ hat das Land Hessen bereits gute Voraussetzungen geschaffen. Mögliche Ansatzpunkte zur Förderung der Nachhaltigkeit im Gebäudesektor bestehen insbesondere noch in der Förderung von Pilot- und Leuchtturmvorhaben. Weiterhin können mit Hilfe integrierter Planungsansätze viele Synergien erzielt und Ziele miteinander verbunden werden. Das Land könnte hierzu entsprechende Planungsleitlinien und -konzepte entwickeln. Auch über die Entwicklung und Setzung von Mindeststandards für den Einsatz smarterer Lösungen bei der Sanierung und beim Bau landeseigener Liegenschaften kann die Verbreitung nachhaltiger Lösungen im Gebäudebereich gefördert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Hessen aufgrund der bisherigen Aktivitäten bereits gute Voraussetzungen für eine nachhaltige Digitalisierung bestehen. Über eine weitere Bündelung und Koordination der Aktivitäten und über ergänzende zielgerichtete Maßnahmen kann Hessen seine führende Rolle weiter ausbauen und auch auf Bundes- und EU-Ebene Impulse setzen, die zu mehr Nachhaltigkeit und Klimaschutz durch Digitalisierung führen.

8

Literatur

- Aguilera, A. (2008). Business travel and mobile workers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(8), 1109-1116. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.005>
- Andrae, A. S. G. (2019a). 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. (2019b). Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030.
- 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>
- Ball, T. & Kluft, A. (2021). *Quo Vadis, Data Center? Between growth and regulation*. Zugriff am 5.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.luenendonk.de/aktuelles/presseinformationen/quo-vadis-rechenzentrum-standortsuche-und-facility-services-in-einem-dynamischen-markt/>
- Basalisco, B. (2018). European data centres. *Copenhagen Economics*. Zugriff am 7.5.2020. Verfügbar unter: <https://www.copenhageneconomics.com/publications/publication/european-data-centres>
- BearingPoint & Fraunhofer IEE. (2018). *Verteilnetzstudie Hessen 2024 - 2034*. Verfügbar unter: https://www.energieland.hessen.de/verteilnetzstudie_hessen
- Beer, M., Corradini, R., Gobmaier, T., Vogler, G., Köll, L., Podhajsky, T. et al. (2009). *CO2-Vermeidung in Deutschland Teil I - Methodik und Zusammenfassung*. Essen: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE).
- Belkhir, L. & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463.
- Beucker, S., Bergesen, J. D. & Gibon, T. (2016). Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 223-233. <https://doi.org/10.1111/jiec.12378>
- Beucker, S. & Hinterholzer, S. (2019). *CO2-Minderungspotentiale im Wohngebäudesektor durch Gebäudeautomation*. Berlin: Borderstep Institut.
- Beule, P., Spies, S., Laukhuf, A., Runschke, B., Müller, L. & Hofmann, S. (2021). *Einsatz, Adaption und Erfahrungen mit innovativen digitalen Arbeitsformen in hessischen KMU in der Pandemielage (Corona)*. Darmstadt: WiFor Institut.
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S. & Hilty, L. (2020). *Klimaschutz durch digitale Technologien*. Berlin, Zürich: Borderstep Institut, Universität Zürich.
- Bitkom. (2020). Digitalisierung kann fast die Hälfte zu den deutschen Klimazielen beitragen | Bitkom e.V. Zugriff am 15.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierung-kann-fast-die-Haelfte-zu-den-deutschen-Klimazielen-beitragen>
- Bitkom. (2021a). Klimaeffekte der Digitalisierung. Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Klimaschutz>
- Bitkom. (2021b). Blauer Engel für Rechenzentren und für Colocation-Rechenzentren | Bitkom e.V. Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Blauer%20Engel%20f%C3%BCr%20Rechenzentren%20und%20f%C3%BCr%20Colocation-Rechenzentren>
- BITKOM. (2021, Januar 7). Homeoffice statt Büro: Jeder Fünfte würde umziehen. *Bitkom e.V.* Zugriff am 18.1.2021. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Homeoffice-statt-Buero-Jeder-Fuenfte-wuerde-umziehen>
- BMVI. (2020). BMVI – Breitbandatlas. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Breitbandausbau/Breitbandatlas-Karte/start.html>
- BMWi. (2014). *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Zugriff am 8.7.2015. Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true,pdf>

- Bonin, H., Eichhorst, W., Kaczynska, J., Kümmerling, A., Rinne, U., Scholten, A. et al. (2020). *Verbreitung und Auswirkungen von mobiler Arbeit und Homeoffice. Kurzexpertise*. Berlin: BMAS.
- Brien, J. (2020). „Vorurteile in Luft aufgelöst“: Bis zu 140.000 Siemens-Mitarbeiter dürfen ins Homeoffice. *t3n Magazin*. Zugriff am 25.9.2020. Verfügbar unter: <https://t3n.de/news/homeoffice-co-working-buero-1300967/>
- Bundesverband Wärmepumpe. (2016). *BWP-Branchenstudie 2015 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen*. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. Zugriff am 9.12.2020. Verfügbar unter: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/2016-04-08_Branchenprognose_2015_web.pdf
- Bundesverband Wärmepumpe. (2018). *Wärmepumpen in Deutschland Stand 2018*. Zugriff am 9.12.2020. Verfügbar unter: https://www.waermepumpe.de/typo3temp/yag/11/51/Waermepumpen_in_Deutschland_Stand_2018_115144_5ecbdd839.png
- van den Busch, U., Gauler, A. & Müller, H. (2020). *Energiewende in Hessen - Monitoringbericht 2020*. Wiesbaden: Hessen Agentur GmbH. Verfügbar unter: <https://wirtschaft.hessen.de/presse/pressemitteilung/monitoringbericht-zur-energiewende-hessen>
- CBRE. (2020a). *Europe Data Centres Q4 2019*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.cbre.de/en/global/research-and-reports/featured-reports-global/featured-reports-emea>
- CBRE. (2020b). *EMEA Data Centres Q3 2020*. Zugriff am 8.2.2021. Verfügbar unter: <https://www.cbre.com/research-and-reports/EMEA-Data-Centres-Q3-2020>
- CBRE. (2021). *EMEA Data Centres Q4 2020*. Zugriff am 8.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.cbre.com/real-estate-services/real-estate-industries/data-center-solutions/data-center-publications/articles/emea-data-centres-q4-2020>
- Cisco. (2018a). *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2016-2021*. Zugriff am 7.2.2018. Verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf>
- Cisco. (2018b). VNI Forecast Highlights Tool. *Visual Networking Index - Cisco (Forecast Highlights Tool)*. Zugriff am 13.4.2017. Verfügbar unter: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html#
- Clausen, J. (2019). *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., 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. & 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>
- Clausen, J., Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2020). *Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung in Rechenzentren in Deutschland - Hintergrundpapier*. Berlin.
- Clausen, J. & Schramm, S. (2021). *Klimaschutzpotenziale der Nutzung von Videokonferenzen und Homeoffice. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden*. Berlin.
- Clausen, J., Schramm, S. & Hintemann, R. (2019). *Virtuelle Konferenzen und Online-Zusammenarbeit in Unternehmen. Effektiver Klimaschutz oder Mythos?*. Berlin. Zugriff am 20.11.2019. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/08/AP3-2Telekonferenzen_20190821.pdf
- CloudHQ. (2020). *CloudHQ Offenbach Campus | CloudHQ*. Zugriff am 15.12.2020. Verfügbar unter: <https://cloudhq.com/offenbach/>
- Copenhagen Economics. (2017). *Finland's economic opportunities from data centre investments. Copenhagen Economics*. Zugriff am 29.3.2018. Verfügbar unter: <https://www.copenhageneconomics.com/publications/publication/finlands-economic-opportunities-from-data-centre-investments>
- Copenhagen Economics. (2018a). *European data centres How Google's digital infrastructure investment is supporting sustainable growth in Europe Country case: Belgium*. Zugriff am 21.4.2021. Verfügbar unter: https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Filelibrary/file/0/100/1519987854/copenhagen-economics-2018-european-data-centres_case-study-belgium.pdf

Copenhagen Economics. (2018b). *European data centres How Google's digital infrastructure investment is supporting sustainable growth in Europe Country case: Ireland*. Zugriff am 21.4.2021. Verfügbar unter: <https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Filelibrary/file/9/109/1525764693/copenhagen-economics-2018-european-data-centres-case-study-ireland.pdf>

Copenhagen Economics. (2018c). *European data centres How Google's digital infrastructure investment is supporting sustainable growth in Europe Country case: Netherlands*. Zugriff am 21.4.2021. Verfügbar unter: https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Filelibrary/file/2/102/1521103442/copenhagen-economics-european-data-centres-case-study-the-netherlands_final.pdf

Davis, P. K. & Wainfan, L. (2004). *Challenges in virtual collaboration: videoconferencing, audioconferencing, and computermediated communications*. Santa Monica: RAND Corporation.

DE-CIX. (2020). Internetknoten-Betreiber DE-CIX sieht noch mehr Wachstum bei Videokonferenzverkehr – Online- und Cloud-Gaming immer beliebter. Zugriff am 25.5.2020. Verfügbar unter: <https://www.de-cix.net/de/about-de-cix/media-center/press-releases/internet-exchange-operator-de-cix-sees-even-more-growth-in-video-conferencing-traffic>

Dena. (2018). *dena-Gebäudereport Kompakt 2018. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9254_Gebaeudereport_dena_kompakt_2018.pdf

Destatis. (2019a). *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit, Haushalte und Familien – Ergebnisse des Mikrozensus*. Mikrozensus. Statistisches Bundesamt. Zugriff am 7.8.2019. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/Downloads-Haushalte/haushalte-familien-2010300187004.pdf?__blob=publicationFile

Destatis. (2019b). *Wohnen in Deutschland – Zusatzprogramm Mikrozensus*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>

Destatis. (2020a). Internetangebot des Statistischen Bundesamtes. *Statistisches Bundesamt*. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html

Destatis. (2020b). *Erwerbstätige, Arbeitnehmer, Selbständige und mithelfende Familienangehörige (im Inland): Bundesländer, Jahre, Wirtschaftszweige*. Zugriff am 20.11.2020. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructure>

Destatis. (2020c). *BIK(7)-Gemeindegrößenklassen nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte am 31.12.2019*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Zugriff am 10.11.2020. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ-Nicht/39-bik-7.html>

Destatis. (2020d). *Erwerbstätige, die von zu Hause aus arbeiten*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

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

DGB Bundesvorstand. (2016). Mobilität in der Arbeitswelt. Immer mehr Pendler, immer größere Distanzen. *arbeitsmarkttuell*, (2), 1-20.

Digital HUB. (2017, Oktober 20). Digital HUB: „Brexit verstärkt bereits intensiven Boom der Frankfurter Rechenzentren“. *Digital HUB Frankfurt Rhein Main*. Zugriff am 22.2.2018. Verfügbar unter: <https://www.digitalhub-frm.de/2017/digital-hub-brexit-verstaerkt-bereits-intensiven-boom-der-frankfurter-rechenzentren/>

DIN EN 15232. (2017). *DIN EN 15232-1:2017-12 Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag.

Donath, A. (2018, Juni 11). Tesla hat Karosseriefertigung zu 95 Prozent automatisiert. *Golem*. Zugriff am 2.11.2020. Verfügbar unter: <https://www.golem.de/news/autofabrik-tesla-hat-karosseriefertigung-zu-95-prozent-automatisiert-1806-134870.html>

eco. (2020). Digital Hub FrankfurtRheinMain. eco. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.eco.de/digital-hub-frankfurtrheinmain/>

Energiesprong. (2018). *Energiesprong works! Net zero energy homes put to the test both on technical performance and customer satisfaction*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: http://transition-zero.eu/wp-content/uploads/2018/06/Energiesprong-works_DEF.pdf

- Energiesprong, TNO & RIGO. (2017). *Bewonerservaringen en meetresultaten uit nul op de meter woningen in Tilburg*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.energielinq.nl/wp-content/uploads/2017/02/Tilburg-2.pdf>
- ETA-Fabrik. (2020). Vision und Mission. *ETA-Fabrik*. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://eta-fabrik.de/ueber-uns/vision-mission/>
- Europäische Kommission. (2020). Europäische Industriestrategie. *EU-Kommission - European Commission*. Text, Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_de
- Europäischer Rat. (2021). Die Industriepolitik der EU. Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/eu-industrial-policy/>
- Faulconbridge, J. R., Beaverstock, J. V., Derudder, B. & Wiltox, F. (2009). Corporate ecologies of business travel: working towards a research agenda. *European Urban and Regional Studies*, 16(3), 295-308.
- Fichter, K., Hintemann, R., Beucker, S. & Behrendt, S. (2012). *Gutachten zum Thema „Green IT – Nachhaltigkeit“ für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages*. Gutachten Nr. Ausschussdrucksache 17(24)058. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT). Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/Dateien/Green-IT/PDF/green-it-nachhaltigkeit-enquete-kommission-internet-und-digitale-gesellschaft,property=pdf,bereich=green-it,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Fokus. (2009). *Der Markt für Urlaub und Geschäftsreisen. Daten, Fakten, Trends*. München. Zugriff am 2.6.2016. Verfügbar unter: http://www.medialine.de/media/uploads/projekt/medialine/docs/bestellung_download/marktanalysen/2009/foc_ma_urlaubgeschaeftsreisen_200904.pdf
- Fritsche, U. R. & Greß, H.-W. (2019). *Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050 - Bericht für die HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V.* Darmstadt: IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. Zugriff am 8.10.2020. Verfügbar unter: http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2019_KEV_THG_Strom-2018_2020-2050.pdf
- Gambardella, C., Bergset, L. & Beucker, S. (2012). *Vergleich der CO2-Vermeidungskosten zwischen konventionellem Wärmeschutz und einem Hausautomationssystem*. Berlin.
- Gebäudeenergiegesetz. (2020, November 1). *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. Zugriff am 1.11.2020. Verfügbar unter: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*\[@attr_id=%27bgbl120s1728.pdf%27\]#_bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1607595454543](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*[@attr_id=%27bgbl120s1728.pdf%27]#_bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1607595454543)
- 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.
- GfK. (2020). Pressemitteilung Neues Rekordniveau: 24,0 Millionen nutzen im vierten Quartal 2019 Netflix und Co. *GfK*. Zugriff am 7.4.2020. Verfügbar unter: <https://www.gfk.com/de/insights/press-release/neues-rekordniveau-240-millionen-nutzen-im-vierten-quartal-2019-netflix-und-co/>
- GSI. (2020). Erfolgreiche Patentierung und Vermarktung für grünen Supercomputer „made in Hessen“. *GSI*. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: https://www.gsi.de/start/aktuelles/detailseite/2020/02/12/erfolgreiche_patentierung_und_vermarktung_fuer_gruenen_supercomputer.htm
- Günnel, T. (2020, August 17). Karosserie aus einem Guss: Teslas gigantische Druckgussmaschine „bald“ betriebsbereit. *Automobilindustrie*. Zugriff am 6.9.2020. Verfügbar unter: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/karosserie-aus-einem-guss-teslas-gigantische-druckgussmaschine-bald-betriebsbereit-a-956455/>
- Hessisches Ministerium für Digitale Strategie und Entwicklung. (2021). *Digitales Hessen. Wo die Zukunft zuhause ist*. Wiesbaden. Zugriff am 24.6.2021. Verfügbar unter: https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/Strategie_Digitales_Hessen.pdf

- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. (2019). *Energiewende in Hessen, Monitoringbericht 2019*. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. Verfügbar unter: https://www.energieland.hessen.de/download/Energiemonitoringbericht_2019_web.pdf
- Heunemann, F. (2020, Juli 30). Interxion im Traditionsbau: Milliardeninvestition in größten Internetknoten der Welt. *FAZ.NET*.
- Hilty, L. & Bieser, J. (2017). *Opportunities and risks of digitalization for climate protection in Switzerland*. Zürich.
- Hilty, L., Lohmann, W., Behrendt, S., Evers-Wölk, M., Fichter, K. & Hintemann, R. (2015). *Grüne Software. Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT)*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- 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). *DC-HEAT - Data Centre Heat Exchange with AI-Technologies: Kurzfassung der Ergebnisse*. Berlin: Borderstep Institut.
- Hintemann, R. & Clausen, J. (2018a). *Potenzial von Energieeffizienztechnologien bei Colocation Rechenzentren in Hessen*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit.
Zugriff am 26.4.2018. Verfügbar unter: <https://www.digitalstrategie-hessen.de/rechenzentren>
- Hintemann, R. & Clausen, J. (2018b). *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb*. Berlin. Verfügbar unter. Berlin.
Zugriff am 14.6.2018. Verfügbar unter: https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2018a). Innovation alliances for sustainable ICT – Good practices and success factors, using the example of initiatives to improve the energy efficiency of data centers. *EPiC Series in Computing* (Band 52, S. 125-136). Gehalten auf der ICT4S2018, Toronto. <https://doi.org/10.29007/k8d7>
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2018b). Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. *Sustainable Technologies. World Congress. 2018. (WCST 2018)*. Gehalten auf der World Congress on Sustainable Technologies, Cambridge: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
Zugriff am 24.1.2019. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/330359801_Technology_radars_for_energy-efficient_data_centers_A_transdisciplinary_approach_to_technology_identification_analysis_and_evaluation
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2020a). *Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung – Teil 1*. Berlin: Allianz zu Stärkung digitaler Infrastrukturen in Deutschland.
Zugriff am 11.6.2020. Verfügbar unter: <https://digitale-infrastrukturen.net/studie-nachhaltige-digitalisierung-in-europa/>
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2020b). *Borderstep Hintergrundpapier – Videostreaming: Energiebedarf und CO2-Emissionen*. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/publikationen/>
- Hintemann, R., Hinterholzer, S. & Clausen, J. (2020). *Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung – Teil 2*. Berlin: Allianz zu Stärkung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Zugriff am 11.6.2020. Verfügbar unter: <https://digitale-infrastrukturen.net/rechenzentren-in-europa-chancen-fuer-eine-nachhaltige-digitalisierung-teil-2/>
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., Montevecchi, F. & Stickler, T. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*. Berlin, Vienna: Borderstep Institute & Environment Agency Austria.
- Hoffmann, M. (2020). Homeoffice: So stellen sich die Dax-Konzerne das neue „New Normal“ vor – DER SPIEGEL – Job & Karriere. Zugriff am 25.9.2020. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/karriere/homeoffice-so-stellen-sich-die-dax-konzerne-das-neue-new-normal-vor-a-afa46b7e-eec4-4d63-96cc-1908122cf08c>
- House of Energy. (2020). Vision & Strategie.
Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.house-of-energy.org/visionundstrategie>
- House of IT. (2020). House of IT e.V. – Digitale Transformation gestalten.
Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.house-of-it.eu/>
- Ilding, D. (2019, November 15). Rechenzentrum in Großauheim soll eines der größten Europas werden. <https://www.op-online.de>.
Zugriff am 15.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.op-online.de/region/hanau/hanau-rechenzentrum-grossauheim-soll-eines-groessten-europas-werden-13221251.html>

- Kalz, D., Klein, K., Palzer, A., Schlösser, T., Schumacher, P., Sterchele, P. et al. (2018). *Netzdienliche Gebäude und Quartiere – Gebäude entlasten Stromnetze*. Nr. 1/2018. Bonn: Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEE, RWTH Aachen E.ON ERC. Verfügbar unter: http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Themeninfos/Themen_0118/themen_0118_internetx_neu.pdf
- Kathleen M. Eisenhardt. (1989). Agency Theory: An Assessment and Review. *The Academy of Management Review*, (Vol.14, No. 1), 57–74.
- Krüger, W. (2017). *Digitalisierung und Industrie 4.0 – Herausforderung für den Mittelstand*. Bielefeld. Zugriff am 3.4.2019. Verfügbar unter: https://www.fh-mittelstand.de/fileadmin/pdf/Schriftenreihe/Heft_8.pdf
- Kühling, S. (2020, November 14). VW investiert 1,3 Milliarden für Werk Kassel in Baunatal. *Hessische/Niedersächsische Allgemeine*. Zugriff am 11.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.hna.de/lokales/kreis-kassel/baunatal-ort312516/vw-kassel-investition-elektro-mobilitaet-id3-baunatal-standort-milliarden-90100305.html>
- Lange, J. (2020). Data Centers aus Sicht der Netzbetreiber – Vortrag von Avacon. Gehalten auf der GTAI Round Table Datacenter, Berlin.
- Lott, Y. & Abendroth, A. (2019). *Reasons for not working from home in an ideal worker culture why women perceive more cultural barriers*. Düsseldorf. Zugriff am 11.12.2019. Verfügbar unter: www.boeckler.de
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2016). The energy and carbon footprint of the ICT and E&M sector in Sweden 1990–2015 and beyond. *Paper published and presented at: ICT for Sustainability (ICT4S), Amsterdam, Netherlands*, 30–31.
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027.
- Manager Magazin. (2020). Siemens macht Homeoffice für halbe Belegschaft möglich – manager magazin – Unternehmen. Zugriff am 25.9.2020. Verfügbar unter: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/siemens-macht-homeoffice-fuer-halbe-belegschaft-moeglich-a-d39c8a62-35b9-4e84-a3dd-9e9f7cdf5dbb>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S. & Koomey, J. (2020, Februar 28). Recalibrating global data center energy-use estimates | Science. *Science*. Zugriff am 4.3.2020. Verfügbar unter: <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/984>
- 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.
- Mueller, M., Reinhard, J., Ostermann, A., Estermann, T., Köppl, S., Test, A. et al. (2019). *Regionales Flexibilitäts-Potenzial dezentraler Anlagen Modellierung und Bewertung des regionalen Flexibilitäts-Potenzials von dezentralen Flexibilitäts-Typen im Verteilnetz*. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/attachments/article/867/MMueller_Regionales_Flex-Potenzial_FfE.pdf
- Nahmmacher, Dr. P., Paris, C., Ruge, M., Spieker, S., Anderski, T., Sebastian Bohlen et al. (2020). *Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021*. Berlin: Die Übertragungsnetzbetreiber. Zugriff am 17.7.2020. Verfügbar unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene/netzentwicklungsplan-2035-2021>
- NeRZ. (2020). Über uns – Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren. *NeRZ*. Zugriff am 31.12.2020. Verfügbar unter: <https://ne-rz.de/ueber-uns/>
- Nobis, C., Kuhnimhof, T. & Kuhnimhof, Tobias. (2018). *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht 2018*. Bonn: infas, DLR, IVT, infas 360. Verfügbar unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- Ostler, U. (2018a, Januar 24). Norwegen holt bei der Datacenter-Ansiedlung auf. Zugriff am 31.1.2018. Verfügbar unter: <https://www.datacenter-insider.de/norwegen-holt-bei-der-datacenter-ansiedlung-auf-a-679373/>
- Ostler, U. (2018b). Direkte Wasserkühlung im Server für höhere Effizienz im Rechenzentrum. Zugriff am 13.9.2019. Verfügbar unter: <https://www.datacenter-insider.de/direkte-wasserkuehlung-im-server-fuer-hoehere-effizienz-im-rechenzentrum-a-718995/>
- Pehlken, A., Hintemann, R., Penaherrera, F., Gizli, V., Hurrelmann, K., Hinterholzer, S. et al. (2020). *Abschlussbericht Verbundprojekt TEMPRO*. Oldenburg: TEMPRO. Verfügbar unter: <https://tempro-energy.de/veroeffentlichungen>
- Prakash, S., Antony, F., Köhler, A. & Liu, R. (2016). *Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)*. Nr. Texte, 66/2016. Umweltbundesamt. Zugriff am 30.9.2016. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-oekonomische-aspekte-beim-vergleich>

- Quack, D., Liu, R. & Gröger. (2019). *Smart Home – Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte*. Studie im Rahmen des Projekts Energie 2020 der Verbraucherzentrale NRW. Freiburg/Berlin.
Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Smarthome-Stromverbrauch.pdf>
- Rittal. (2020). Von Menschen und Maschinen: Fit für Industrie 4.0. *Rittal*. Zugriff am 9.12.2020. Verfügbar unter: https://www.rittal.com/de-de/content/de/unternehmen/presse/pressemeldungen/pressemeldung_detail_151747.jsp
- RWTH Aachen Campus. (2016, Juni 23). e.GO Life – Bezahlbares Elektroauto durch Industrie 4.0.
- Rylander, E. (2020, September 24). Interview mit Erik Rylander, Stockholm Data Parks.
- Santarius, T. (2015). *Der Rebound-Effekt: ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch* (Wirtschaftswissenschaftliche Nachhaltigkeitsforschung). Marburg: Metropolis.
- vom Scheidt, F., Müller, C., Staudt, P. & Weinhardt, C. (2020). The German Electricity System in 2030: Data on Consumption, Generation, and the Grid. <https://doi.org/10.5445/IR/1000125576>
- Scherer, E. (2018). Smarte Pressen. *Opel Post*. Verfügbar unter: <https://www.opelpost.com/05/2018/smartepressen/>
- Schlegl, A. (2020, September 25). Bau des riesigen Rechenzentrums beginnt in Offenbach. <https://www.fr.de>. Zugriff am 15.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.fr.de/rhein-main/bau-des-riesigen-rechenzentrums-beginnt-in-offenbach-90053934.html>
- Schramm, S. (2020a). *Effekte der COVID-19-Pandemie auf berufsbedingten Verkehr, geschäftliche Meetings, Home-Office und Klimabilanz – Literaturlauswertung zum Lock-Down Mitte März bis Mitte Mai 2020*. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/12/AP3-5_Literaturlauswertung_20201208.pdf
- Schramm, S. (2020b). *Videokonferenzen und Homeoffice: Was lernen wir durch Corona? Grafische Auswertung einer Online Umfrage*. Unveröffentlicht. Berlin: Borderstep Institut.
- Schramm, S. & Clausen, J. (2020). *Persönliche Treffen und virtuelle Konferenzen*. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/06/AP3-2_Interviewauswertung_Teleconferencing04-06-2020.pdf
- Schuh, G. (2017, März 20). Cut the Loop: Digital ERP Strategy. Gehalten auf der CeBIT 2017, Hannover.
- Schulze, M. (2020, September 19). E-Auto-Logistik bei VW: Viel Automatisierung und ein neuer Baukasten. *Deutsche Verkehrs Zeitung*. Zugriff am 31.10.2020. Verfügbar unter: <https://www.dvz.de/rubriken/logistik/automobillogistik/detail/news/e-auto-logistik-bei-vw-viel-automatisierung-und-ein-neuer-baukasten.html>
- Seven One Media. (2019). *Media Activity Guide 2019 – Trends in der Mediennutzung*. Seven One Media GmbH. Zugriff am 12.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.sevenonemedia.de/documents/924471/1111769/Media+Activity+Guide+2019.pdf/040352cd-a958-6876-6541-93630deee1c7?t=1566987963000>
- Seven One Media. (2020). *Media Activity Guide 2020 – Trends in der Mediennutzung*. Seven One Media GmbH. Zugriff am 12.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.sevenonemedia.de/documents/924471/1111769/Media+Activity+Guide+2020.pdf/f5d31769-e7f0-97a4-1f7e-254d56000e59?t=1603709458463>
- Simon, G. (2016). *Digital Business Hub FrankfurtRheinMain: Nutzbare digitale Infrastrukturen – Garant für Wachstum in der digitalen Gesellschaft*. Frankfurt: Digital Hub FrankfurtRheinMain e.V.
- Simon, G. (2020). Wo entstehen Rechenzentren im Spannungsfeld zwischen Konsolidierung und Expansion? Gehalten auf der Fachdialog Datencenter, Offenbach.
- Soenius, U. (2018). *Pendlermobilität – Die Schiene im Fokus*. Köln: Industrie- und Handelskammer zu Köln.
- Stadt Offenbach. (2020, Oktober 9). Eines der größten Rechenzentren entsteht in Offenbach. city, Zugriff am 15.12.2020. Verfügbar unter: https://www.offenbach.de/wirtschaft/aktuell/Artikel_/rechenzentrum-webkonferenz09.10.2020.php
- Statistikportal. (2020). *Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung*. Zugriff am 12.12.2020. Verfügbar unter: <https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-laenderebene/bruttoinlandsprodukt-bruttowertschoepfung>
- Statistisches Bundesamt. (2020). Eckzahlen zum Arbeitsmarkt, Deutschland. Zugriff am 16.4.2020. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/eckwertabelle.html>

Stobbe, L., Hintemann, R., Proske, M., Clausen, J., Zedel, H. & Beucker, S. (2015). *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. 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>

Stürz, R. A., Stumpf, C. & Mendel, U. (2020). *Digitalisierung durch Corona?*. München. Zugriff am 12.5.2020. Verfügbar unter: <https://www.bidt.digital/studie-homeoffice/>

t3n digital pioneers. (2019, April 3). Elektromobilität: VW ID 3 bis zu 40 Prozent effizienter in der Produktion als ein Golf. *t3n News*. Zugriff am 31.10.2020. Verfügbar unter: <https://t3n.de/news/elektromobilitaet-vw-id-bis-zu-40-prozent-effizienter-in-der-produktion-als-ein-golf-1154101/>

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/>

UBA. (2020a, April 8). Bilanz 2019: CO2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. Zugriff am 2.7.2020. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>

UBA. (2020b). Emissionsdaten. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. Zugriff am 2.7.2020. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten>

Umweltbundesamt. (2020). *Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“: Politische Handlungsempfehlungen*. Zugriff am 15.9.2020. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energie-ressourceneffizienz-digitaler>

Uptime Institute Intelligence. (2021). *The people challenge: Global data center staffing forecast 2021-2025*. Zugriff am 20.1.2021. Verfügbar unter: <https://uptimeinstitute.com/global-data-center-staffing-forecast-2021-2025>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. (2017). *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*. Berlin. Zugriff am 11.12.2020. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.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. (2019). *VDR-Geschäftsreiseanalyse 2019*. Frankfurt am Main. Zugriff am 20.11.2019. Verfügbar unter: https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/Veroeffentlichung_VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2019_Webinar.pdf

VDR. (2020a). Ergebnisse der VDR-Barometerumfrage zum Coronavirus/Covid-19 (Unternehmen) Stand Juni. Zugriff am 18.6.2020. Verfügbar unter: <https://www.vdr-service.de/corona/ergebnisse-der-vdr-barometerumfrage-zum-coronavirus-covid-19-corporates>

VDR. (2020b, November 10). Ergebnisse der VDR-Barometerumfrage zum Coronavirus/Covid-19 (Unternehmen) Stand November. Zugriff am 10.11.2020. Verfügbar unter: <https://www.vdr-service.de/corona/ergebnisse-der-vdr-barometerumfrage-zum-coronavirus-covid-19-corporates>

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>

Zachmann, F. (2020). Global Digital Hub Frankfurt Rhein Main: Erfahrungen, Chancen, Herausforderungen. Gehalten auf der GTAI Round Table Datacenter, Berlin.

Zumkeller, D. (2005). *Die intermodale Vernetzung von Fernverkehrsmitteln unter Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse (INVERMO), Schlussbericht*. Karlsruhe: Institut für Verkehrswesen. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/19812803-Die-intermodale-vernetzung-von-personenverkehrsmitteln-unter-beruecksichtigung-der-nutzerbeduerfnisse-invermo.html>

9

Anhang: Modelldaten Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen

Hinweise:

- Die nachfolgenden Tabellen beziehen sich auf das Bundesgebiet der Bundesrepublik Deutschland.
- Das eigentliche Berechnungsmodell hat über 30.000 Datensätze. Die dargestellten Daten sind ein Auszug, der eine Nachvollziehbarkeit der Berechnungen erlauben soll.
- Für die Ermittlung des CO₂-Footprints in der Nutzungsphase wurden folgende CO₂-Emissionsfaktoren in der Stromerzeugung zugrunde gelegt:

	2010	2015	2020	2025
CO₂-Emissionsfaktor (in kg CO_{2eq}/kWh)	0,600	0,560	0,363	0,313

- Die Daten zu den Energiebedarfen und zum CO₂-Footprint für die verschiedenen Geräte und Anlagen werden immer pro Jahr angegeben.
- Der CO₂-Footprint für Herstellung, Transport und Entsorgung pro Jahr errechnet sich unter Annahme der durchschnittlichen Nutzungsdauern der Geräte und Anlagen.

Geräte Arbeitsplatz

Gerätetyp	Gerätebestand (in Mio. Stück)				Energiebedarf pro Gerät (in kWh/a)				Energiebedarf gesamt (in GWh/a)			
	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025
Desktop PCs	12,8	11,8	9,5	7	189,0	119,0	65,0	45,0	2.419	1.404	618	315
Notebook PCs	11,4	13,9	16,8	20	74,0	54,0	31,0	19,0	844	751	521	380
Thin Clients	2,2	2,8	3,5	4,3	50,0	38,0	27,0	19,0	110	106	95	82
Tablet PCs	0,05	3,1	9,4	15,9	9,0	11,0	12,0	14,0	0	34	113	223
Monitore	26,4	28,9	30	31,9	75,9	53,3	35,8	26,1	2.005	1.541	1.075	832
Drucker / Multifunktionsgeräte	4,6	4,6	4,6	4,6	54,0	54,0	50,0	45,0	248,4	248,4	230	207
Beamer / Whiteboards	1,05	1,5	2	3	316,9	304,0	242,6	224,2	332,7	456,0	553,08	560,6
Faxen / Scannen	4,4	3,8	2,9	1,8	54,4	46,3	38,4	31,9	239,2	175,8	111,456	57,35
Festnetztelefone	24	24	24	24	31,0	35,0	40,0	44,0	744,0	840,0	960	1056
Smartphones	3	10	12	14	1,9	2,5	2,9	3,1	5,6	24,8	35,04	43,435
WLAN-Systeme	2	3,8	4,1	4,5	88,0	88,0	88,0	88,0	176,0	334,4	360,8	396
Netzwerkports	64	66,5	68	71	40,0	33,0	25,1	17,2	2560,0	2194,4	1708,5	1220,2
Gesamt:									9.684	8.110	6.380	5.372

Geräte Arbeitsplatz

Gerätetyp	Nutzungsphase pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)					Herstellung etc. pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)					CO ₂ -Footprint pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)					CO ₂ -Footprint Gerätebestand (in 1.000 t CO _{2eq} /a)				
	2010	2015	2020	2025		2010	2015	2020	2025		2010	2015	2020	2025		2010	2015	2020	2025	
Desktop PCs	113,4	66,6	23,6	14,1		60	60	60	60		173,4	126,6	83,6	74,1		2.220	1.494	794	519	
Notebook PCs	44,4	30,2	11,2	5,9		70	70	70	70		114,4	100,2	81,2	75,9		1.304	1.393	1.365	1.519	
Thin Clients	30,0	21,3	9,8	5,9		19	19	19	19		48,8	40,0	28,5	24,7		107	112	100	106	
Tablet PCs	5,4	6,2	4,4	4,4		20	20	20	20		25,4	26,2	24,4	24,4		1	81	229	388	
Monitore	45,6	29,9	13,0	8,2		13	13	13	13		58,1	42,4	25,5	20,7		1.533	1.224	765	659	
Drucker/Multifunktionsgeräte	32,4	30,2	18,1	14,1		14	14	14	14		46,2	44,2	32,2	28,3		212	203	148	130	
Beamer / Whiteboards	190,1	170,2	88,0	70,1		31	36	41	39		221,5	206,2	129,1	109,3		233	309	294	273	
Faxen / Scannen	32,6	25,9	13,9	10,0		20	20	20	20		52,6	45,9	33,9	30,0		232	174	98	54	
Festnetztelefone	18,6	19,6	14,5	13,8		3	3	3	3		21,1	22,1	17,0	16,3		506	530	408	390	
Smartphones	1,1	1,4	1,1	1,0		24	24	24	24		25,1	25,4	25,1	25,0		75	254	301	350	
WLAN-Systeme	52,8	49,3	31,9	27,5		30	30	30	30		82,8	79,3	61,9	57,5		166	301	254	259	
Netzwerkports	24,0	18,5	9,1	5,4		3	3	3	3		27,0	21,5	12,1	8,4		1.728	1.428	824	595	
																Gesamt:	8.317	7.506	5.581	5.241

Geräte Haushalte

Gerätetyp	Gerätebestand (in Mio. Stück)				Energiebedarf pro Gerät (in kWh/a)				Energiebedarf gesamt (in GWh/a)			
	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025
Fernsehgeräte	61,1	68,6	70,9	71,9	211,8	139,2	82,7	83,5	12.944	9.546	5.862	6.001
Spielekonsolen	22,7	18,1	14,8	14,5	34,8	44,7	36,9	26,5	791	809	546	385
Beamer / Projektoren	0,3	0,6	0,8	0,8	213,7	207,8	187,2	165,9	64	125	150	133
Settop-Boxen	35,8	46,4	48,5	52,2	62,8	38,0	26,1	19,9	2.248	1.761	1.267	1.036
Blu-ray / DVD / Video	40,4	31,2	28,2	27,4	34,8	20,5	15,8	11,7	1.407	640	446	322
Desktop PCs	18,2	15,7	14,5	12,9	123,0	80,0	55,0	46,0	2.239	1.256	798	593
Notebook PCs	22,1	28,6	28,5	29,8	30,0	19,0	14,0	12,0	663	543	399	358
Tablet PCs	0,4	21,2	31	33,8	6,0	6,0	6,0	7,0	2	127	186	237
Monitore	23,8	20,4	17,7	17,8	70,1	47,8	32,6	26,5	1.668	976	578	472
Drucker / Scanner / Fax	38,7	35,9	34,1	34,4	30,1	21,8	14,6	11,5	1.166	783	498	395
Smartphones	11,2	59,3	64,8	67,1	1,9	2,5	2,9	3,1	21	147	189	208
Mobiltelefone	74,9	19	5,6	3,5	0,4	0,4	0,6	0,6	27	8	3	2
Festnetztelefone	49,3	44,2	35,4	30,6	22,9	20,3	17,6	15,8	1.131	899	622	484
Router	26,2	30,6	35,6	40,7	87,6	74,5	61,3	43,8	2.295	2.278	2.183	1.783
Audiogeräte	83,8	66,1	66,2	67,8	29,4	21,2	14,6	10,8	2.464	1.398	969	731
Digitalkameras / Camcorder	42,6	28,8	14	8,7	0,3	0,4	0,5	0,5	14	12	7	4
								Gesamt	16.201	11.763	8.841	7.141

Geräte Haushalte

Gerätetyp	Nutzungsphase pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)				Herstellung etc. pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)				CO ₂ -Footprint pro Gerät und Jahr (in kg CO _{2eq} /a)				CO ₂ -Footprint Gerätebestand (in 1.000 t CO _{2eq} /a)			
	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025
Fernsehergeräte	127,1	77,9	30,0	26,1	26,47	33,98	31,17	37,47	153,6	111,9	61,2	63,6	9.383	7.677	4.337	4.571
Spielekonsolen	20,9	25,0	13,4	8,3	19,52	19,51	19,51	19,51	40,4	44,6	32,9	27,8	918	806	487	403
Beamer / Projektoren	128,2	116,3	67,9	51,9	57,14	57,14	57,14	57,14	185,3	173,5	125,1	109,0	56	104	100	87
Settop-Boxen	37,7	21,3	9,5	6,2	6,67	6,67	6,67	6,67	44,3	27,9	16,2	12,9	1.587	1.296	783	672
Bluray / DVD / Video	20,9	11,5	5,7	3,7	13,31	9,98	8,59	8,40	34,2	21,5	14,3	12,1	1.382	670	404	331
Desktop PCs	73,8	44,8	20,0	14,4	37,50	37,50	37,50	37,50	111,3	82,3	57,5	51,9	2.026	1.292	833	669
Notebook PCs	18,0	10,6	5,1	3,8	56,00	56,00	56,00	56,00	74,0	66,6	61,1	59,8	1.635	1.906	1.741	1.781
Tablet PCs	3,6	3,4	2,2	2,2	20,00	20,00	20,00	20,00	23,6	23,4	22,2	22,2	9	495	687	750
Monitore	42,1	26,8	11,8	8,3	12,50	12,50	12,50	12,50	54,6	39,3	24,3	20,8	1.299	801	431	370
Drucker / Scanner / Fax	18,1	12,2	5,3	3,6	15,86	17,03	17,61	17,90	33,9	29,2	22,9	21,5	1.314	1.050	781	739
Smartphones	1,1	1,4	1,1	1,0	24,00	24,00	24,00	24,00	25,1	25,4	25,1	25,0	281	1.506	1.624	1.676
Mobiltelefone	0,2	0,2	0,2	0,2	6,25	6,25	6,25	6,25	6,5	6,5	6,5	6,4	484	123	36	23
Festnetztelefone	13,8	11,4	6,4	4,9	2,50	2,50	2,50	2,50	16,3	13,9	8,9	7,4	802	614	314	228
Router	52,6	41,7	22,3	13,7	4,20	4,20	4,20	4,20	56,8	45,9	26,5	17,9	1.487	1.404	942	728
Audiogeräte	17,6	11,8	5,3	3,4	7,79	8,76	9,29	9,37	25,4	20,6	14,6	12,7	2.131	1.362	967	864
Digitalkameras / Camcorder	0,2	0,2	0,2	0,1	11,05	10,95	10,49	10,08	11,3	11,2	10,7	10,2	479	322	149	89
	Gesamt															
	25.274 21.429 14.618 13.981															

Öffentlichkeit

Gerätetyp	Gerätebestand (in Mio. Stück)				Energiebedarf pro Gerät (in kWh/a)				Energiebedarf gesamt (in GWh/a)			
	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025	2010	2015	2020	2025
Kassensysteme	1,021	1,049	1,111	1,134	267,4	224,0	195,3	165,8	273	235	217	188
Bankautomaten	0,117	0,113	0,112	0,108	957,3	964,6	875,0	787,0	112	109	98	85
Ticketautomaten	0,028	0,028	0,028	0,028	1285,7	1285,7	1142,9	1035,7	36	36	32	29
Hotspots	0,200	0,250	0,280	0,300	175,0	156,0	132,1	130,0	35	39	37	39
Werbeanzeigen und Displays	0,048	0,140	0,210	0,314	895,8	850,0	695,2	621,0	43	119	146	195
Maut Kontrollbrücken, Terminals	0,003	0,003	0,003	0,003	1269,8	1428,6	1269,8	1174,6	4	4,5	4	3,7
Mautsysteme on Board	0,790	0,889	0,890	0,890	8,7	8,8	8,8	8,8	6,9	7,8	7,8	7,8
Gesamt					510	550	542	548	510	550	542	548
					CO₂-Footprint Nutzung (in 1.000 t CO_{2eq}/a)							
									171			
					CO₂-Footprint Herstellung etc. (in 1.000 t CO_{2eq}/a)							
									132			
					CO₂-Footprint gesamt (in 1.000 t CO_{2eq}/a)							
									438			
									509			
									474			
									534			

Rechenzentren

	Energiebedarf gesamt (in GWh/a)			
	2010	2015	2020	2025
Server	3.750	4.553	6.536	8.940
Speicher	1.653	2.070	2.809	3.012
Netzwerk	379	378	741	855
Kühlung	2.706	2.931	3.530	3.842
USV	1.622	1.669	1.916	2.305
Sonstiges	284	350	504	512
Gesamt	10.395	11.952	16.036	19.467

	CO ₂ -Footprint Rechenzentren in 1.000 t CO _{2eq} /a)			
	2010	2015	2020	2025
Nutzung Rechenzentren	6.237	6.693	5.819	6.088
Herstellung etc. Rechenzentren	693	744	647	676
Gesamt	6.930	7.437	6.466	6.764

Nachrichtlich: Bestandszahlen Geräte

	2010	2015	2020	2025
Serverbestand	1.780.000	2.120.000	2.410.000	2.570.000
Zahl Festplatten	12.560.000	22.650.000	40.480.000	51.600.000
Zahl Storagecontroller	270.000	266.000	265.000	204.000
Zahl Netzwerkports	12.500.000	13.130.000	14.420.000	14.470.000
USV	1.622	1.669	1.916	2.305
Sonstiges	284	350	504	512
Gesamt	10.395	11.952	16.036	19.467

Telekommunikationsnetze

	Energiebedarf gesamt (in GWh/a)			
	2010	2015	2020	2025
PSTN/ISDN Netze	1.347	651	0	0
DSL-Netze	688	845	1.408	1.472
Fibre-to-the-Home (FTTH)	12	33	76	289
Festnetz Kernnetz	545	741	1.135	1.565
Breitbandkabel Zugangsnetz	1.750	1.493	1.348	1.340
Breitbandkabel Kernnetz	467	558	719	917
2G Mobilfunkanlagen	814	485	635	453
3G Mobilfunkanlagen	554	485	272	0
4G Mobilfunkanlagen	11	311	898	1.088
5G Mobilfunkanlagen	-	-	8	394
Mobilfunk Kernnetz	266	372	841	1.187
Gesamt Festnetz+Breitbandkabel	4.809	4.321	4.686	5.583
Gesamt Mobilfunk	1.645	1.653	2.653	3.123
Gesamt Netze	6.454	5.974	7.339	8.706

	CO ₂ -Footprint Netze in 1.000 t CO _{2eq} /a)			
Nutzung Netze (in 1000 t CO_{2eq}/a)	3.872	3.345	2.663	2.723
Herstellung Netze Mobilfunk (in 1000 t CO_{2eq}/a)	430	372	296	303

Nachrichtlich

	Anzahl in Millionen			
	2010	2015	2020	2025
Anschlüsse PSTN/ISDN	30,5	15,7	0,0	0,0
Anschlüsse DSL	23,0	23,5	25,2	24,0
Anschlüsse FTTH	0,1	0,4	1,8	5,0

	Anzahl in Millionen			
	2010	2015	2020	2025
Anschlüsse TV-Kabel	17,0	11,7	8,1	0,0
Anschlüsse HFC-Kabel (Breitband)	2,8	6,3	9,0	17,0

	Anzahl			
	2010	2015	2020	2025
2G Mobilfunkanlagen	65.000	45.000	70.000	50.000
3G Mobilfunkanlagen	47.000	45.000	30.000	0
4G Mobilfunkanlagen	1.000	30.000	99.000	120.000
5G Mobilfunkanlagen	0	0	1.000	50.000

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen	11
Abbildung 2:	Neuverträgen von Colocation-Rechenzentren in den FLAP-Märkten im Jahr 2019 gemessen an der verkauften IT-Leistung in MW	13
Abbildung 3:	Entwicklung der angebotenen Rechenzentrumskapazitäten in der Region Frankfurt a. M. zwischen 2006 und 2025 (ab 2021: Prognose)	14
Abbildung 4:	Unternehmen in der Rechenzentrumsbranche in Hessen	16
Abbildung 5:	Energiebedarf der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)	21
Abbildung 6:	Energiebedarf der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)	22
Abbildung 7:	Energiebedarf der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)	23
Abbildung 8:	Energiebedarf der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)	24
Abbildung 9:	Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)	25
Abbildung 10:	Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)	26
Abbildung 11:	Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (inkl. Unterhaltungselektronik)	27
Abbildung 12:	Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen 2010 bis 2020 (ohne Unterhaltungselektronik)	28
Abbildung 13:	Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Cloud-Rechenzentren in den Jahren 2010 bis 2018 und Prognose bis 2025	30
Abbildung 14:	Energiebedarf durch Video-Streaming am TV mit verschiedenen Auflösungen	31
Abbildung 15:	Basisprognose zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	32

Abbildung 16: Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	33
Abbildung 17: Basisprognose zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Hessen bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	34
Abbildung 18: Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Hessen bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	35
Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der IKT-Endgeräte in Hessen 2010 bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	41
Abbildung 20: Treibhausgas-Vermeidungspotenziale durch den Einsatz von IKT in Deutschland bis zum Jahr 2030	43
Abbildung 21: Ergebnisse zu Treibhausgas-Einsparpotenzialen der Digitalisierung in Deutschland im Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 (Accenture-Studie im Auftrag des Bitkom)	45
Abbildung 22: Die Durchgängigkeit der IT-Systeme als Voraussetzung für hochfrequente Change Requests	48
Abbildung 23: Erfahrungen mit Home-Office von Geschäftsreisenden im Vergleich zur Arbeit im Unternehmen	54
Abbildung 24: Erfahrungen mit unternehmensinternen Video-Meetings im Vergleich zu persönlichen Meetings	55
Abbildung 25: Modal Split der Verkehrsleistung beim Pendeln vor und nach Corona	57
Abbildung 26: Fahrtkilometer auf Geschäftsreisen nach Verkehrsmittel	61
Abbildung 27: Wohnungsbestand in Hessen nach Baualter	66
Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung von System- und Automationsklassen für das Energiemanagement in Gebäuden	69
Abbildung 29: Treibhausgas-Minderungspotenzial durch Energieeinsparung mit Gebäudeautomation	72
Abbildung 30: Treibhausgas-Minderungspotenzial durch intelligente Sektorenkopplung und Gebäudeautomation	73
Abbildung 31: Treibhausgas-Minderungspotenziale aus Energieeinsparung und intelligenter Sektorenkopplung durch Gebäudeautomation	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen in 1.000 t CO _{2eq} /a der IKT in Hessen in den Jahren 2010 bis 2030 (ab 2025: Prognose)	9
Tabelle 2: Datendurchsatz in den Internetknoten in Frankfurt, London, Amsterdam und Paris (Stand 2021)	12
Tabelle 3: Zentrale Einflussgrößen auf die Wahl eines realen oder virtuellen Meetings	52
Tabelle 4: Treibhausgas-Emissionsfaktoren je Verkehrsmittel	56
Tabelle 5: Verteilung der Berufspendler in Deutschland nach genutzten Verkehrsmitteln zur Arbeitsstätte im Jahr 2012 nach Wohnort	57
Tabelle 6: Nutzung von Verkehrsmitteln für das Pendeln in Hessen	58
Tabelle 7: Nutzung von Verkehrsmitteln auf Geschäftsreisen	61

Impressum

Autoren / Autorinnen

Dr. Ralph Hintemann (Borderstep Institut) | hintemann@borderstep.de
 Dr. Jens Clausen (Borderstep Institut) | clausen@borderstep.de
 Dr. Severin Beucker (Borderstep Institut) | beucker@borderstep.de
 Simon Hinterholzer (Borderstep Institut) | hinterholzer@borderstep.de

Herausgeber

Hessische Staatskanzlei,
 Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung
 Georg-August-Zinn-Straße 1
 65183 Wiesbaden

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung des Herausgebers übereinstimmen.

© Hessische Staatskanzlei,
 Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung
 Georg-August-Zinn-Straße 1
 65183 Wiesbaden
www.digitales.hessen.de

Projekträger und Auftraggeber der Studie

Hessen Trade & Invest GmbH
 im Auftrag der Hessischen Staatskanzlei,
 Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung

Kontaktdaten
 Hessen Trade & Invest GmbH
 Konradinallee 9
 65189 Wiesbaden
 Tel +49 611 95017-80 /-85,
 Fax +49 611 95017-8466
info@htai.de
www.htai.de
www.digitalstrategie-hessen.de

Lektorat

Daniela Hill

Gestaltung

hesh.de – Wiesbaden

Ausschluss Wahlwerbung

Dieses PDF wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Hessischen Landesregierung herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundstags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen und Werbemittel.

Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf dieses PDF nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Die genannten Beschränkungen gelten unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl dieses PDF dem Empfänger zu gegangen ist.

Den Parteien ist es jedoch gestattet, dieses PDF zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Stand

Wiesbaden, Juli 2021

Download

www.digitales.hessen.de

