

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Digitalisierung

Manuela Franz

Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme, Technische Universität Wien,
Gußhausstraße 27-29/E366, 1040 Wien, Österreich
email: manuela.franz@tuwien.ac.at

Kurzfassung:

Die Digitalisierung hat im Jahr 2020 einen sprunghaften Anstieg erfahren und eine Systemänderung Richtung Distance Learning und Homeoffice, eine signifikante Steigerung von Online-Shopping und eine Transformation im Gesundheitssektor, verbunden mit einem globalen Big Data-Pilotprojekt, eingeleitet. Diese auf den Digitalsektor gelenkte Aufmerksamkeit führte zu diesem Review, das einen Überblick über die Infrastrukturelemente, traditionelle und zukünftige Anwendungen, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Digitalisierung geben soll. Für das Jahr 2020 wurde in einem "expected case" Berechnungsszenario der globale Energiebedarf von Rechenzentren, Kommunikationsnetzen und Endgeräten auf 1988 TWh geschätzt. Das sind 7 % des globalen Bedarfs an elektrischer Energie mit entsprechenden Treibhausgasemissionen von 944 Mt CO₂-e. Davon entfallen 49 % auf die Nutzung von Endgeräten, 15 % auf Rechenzentren, 17 % auf Kommunikationsnetze und 19 % auf die Herstellung der Infrastruktur. Prognosen für den Energiebedarf für 2030 schwanken zwischen einer Erhöhung um das 1,6-fache bis zu einem "worst case" Szenario um einen Faktor 15 nahezu vollständig zu Lasten der Rechenzentren und Kommunikationsnetze, abhängig von erwarteter Effizienzsteigerung, Technologiesprüngen sowie globaler Datenraten und Workloads. Dem gegenüber zeigen optimistische Prognosen, dass trotz höherem Energiebedarf aufgrund der Anwendung erneuerbarer Energiequellen die Treibhausgasemissionen konstant bleiben oder sogar sinken werden. Im Bereich der Anwendungen der Digitalisierung beträgt der Anteil von Videostreaming und Social Networking derzeit etwa 15 % der Auslastung von Rechenzentren, wobei für zukünftige Anwendungen wie künstliche Intelligenz, Internet der Dinge, Big Data oder Industrie 4.0 in der gesichteten Literatur keine erwarteten anteiligen Zuordnungen ermittelt werden konnten. Während Rechenzentren und traditionelle Endgeräte gut untersucht sind, ist bei der Geräteinfrastruktur zukünftiger Anwendungen und den Kommunikationsnetzen weiterer Forschungsbedarf. Eine zukünftige Herausforderung ist die Entwicklung des Energiebedarfs der Blockchain-Technologie, der 2024 alleine in China bis zu knapp 300 TWh betragen könnte. Um den Auswirkungen des erwarteten Anstiegs des Energiebedarfs der digitalen Infrastruktur entgegenzutreten, liegt der Fokus auf technische Effizienzsteigerungen, Nutzung erneuerbarer Energien und der indirekten Energieeinsparung anderer Sektoren durch Anwendung der IKT. Beispiele hierfür sind virtuelle Mobilität, Ressourcenschonung durch Umweltmonitoring oder Effizienzsteigerungen und Automatisierung in der Industrie.

Keywords: Digitalisierung, Data Center, Energiebedarf, THG-Emissionen, Carbon Footprint

1 Einleitung

Im ersten Quartal des Jahres 2020 haben sich aufgrund der COVID-19-Pandemie weltweit große Segmente der Büroarbeit und des Bildungssektors innerhalb weniger Wochen auf Homeoffice und Distance Learning umgestellt. Darüber hinaus wurde aufgrund weitgehender persönlicher Kontakteinschränkungen im Gesundheitswesen, Parteienverkehr in Ämtern und Behörden sowie aufgrund der Schließung von Geschäften, Restaurants, Kultur- und Freizeiteinrichtungen ein globaler Digitalisierungsschub in allen Lebensbereichen eingeleitet.

Nahezu alle Branchen abseits des produzierenden Gewerbes und der Industrie haben ihre Aktivitäten ins Internet als Online-Dienste verlegt und der Ausbau von Online-Plattformen für Gastronomie und Handel wurde beschleunigt. Weiters wurden gleichzeitig umfassende elektronische Erfassungs-, Registrierungs- und Zutrittssysteme im öffentlichen und privaten Leben eingeführt. Diese Strukturtransformationen und damit einhergehenden Verhaltensänderungen rücken den Blick auf den Themenkomplex Digitalisierung und Big Data in den gesellschaftlichen Vordergrund.

Der Verbrauch an elektrischer Energie ist weltweit während der ersten Lockdowns im Jahr 2020 durch das Rückfahren der Produktion stark zurückgegangen. In China sank der gesamte elektrische Energieverbrauch um 12 %, in den USA und Brasilien um etwa 15 % und in Italien um 20 %. Dem gegenüber stieg durch das Homeoffice der Haushaltsstromverbrauch in einigen Ländern Europas um 40 % (Zhong et al., 2020). Gleichzeitig ist im Jahr 2020 der Bedarf an erneuerbarer Energien in den Schlüsselsektoren Elektrizitäts- und Wärmesektor, Industrie und Transport um 3 % gestiegen. Der Sektor elektrische Energie ist Vorreiter, dessen Nachfrage nach erneuerbaren Energien 2021 um mehr als 8 % steigen wird (IEA, 2021a).

Digitalisierung beschreibt die zunehmende Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) in der gesamten Wirtschaft einschließlich der Energiesysteme. Eine breitere Digitalisierung von Sektoren wird durch Fortschritte in den Bereichen Konnektivität, Daten und Analytik ermöglicht (IEA, 2017). Inmitten der anhaltenden Systemtransformationen und Einführungen neuer Technologien stellt der wachsende IKT-Sektor eine tragende Säule der Digitalisierung dar, dessen Energiebedarf und damit verbundene Treibhausgasemissionen vermehrt einer Nachhaltigkeitsprüfung unterzogen werden muss.

Ziel dieser Arbeit ist auf Basis von Literaturdaten einen Überblick über die globale digitale Infrastruktur, deren Komponenten und dazugehöriger Energiebedarf, sowie derzeitige und zukünftige Einsatzbereiche zusammenzufassen. Insbesondere werden Prognosen und Beispiele sowohl in der technischen Entwicklung als auch in der vielfältigen Anwendung dargestellt und kritische Parameter diskutiert.

2 Methode

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche wurden der Stand des Wissens und Zukunftsprognosen der digitalen Infrastruktur und des damit verbundenen globalen Energieverbrauchs sowie anteilige Treibhausgasemissionen ermittelt. Darüber hinaus werden traditionelle und künftige Anwendungsbereiche der Digitalisierung diskutiert und exemplarisch dienstleistungsspezifische Energiebedarfe dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Literaturdaten zum Energiebedarf und damit verbundenen

Treibhausgasemissionen wurde, wenn nicht in der Literatur selbst angegeben, ein globaler Umrechnungsfaktor von 475 g CO₂-e/kWh, siehe (Bieser et al., 2020), für die Jahre 2018-2021 verwendet. Wegen des erwarteten hohen Anteils erneuerbarer Energiequellen wurde für längerfristige Prognosen des Digitalsektors dieser Umrechnungsfaktor nicht verwendet.

Weiters werden beispielhaft Möglichkeiten und Grenzen zur Erhöhung der Energieeffizienz und Reduzierung der THG-Emissionen sowohl in der IKT-Infrastruktur selbst als auch über indirekte Auswirkungen in Sektoren durch Anwendung von Digitaltechnologien dargestellt.

Die verwendete Literatur ist wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzbänden entnommen, ebenso werden Publikationen von Forschungseinrichtungen, Interessensvertretungen, internationalen Agenturen sowie Medienberichte einbezogen. Der Publikationszeitraum der verwendeten Literatur ist von 2013 bis 2021.

3 Ergebnisse

3.1 Entwicklung der digitalen Infrastruktur und Anwendungen

3.1.1 Digitale Infrastruktur

Die digitale Infrastruktur setzt sich aus drei Hauptkomponenten zusammen, dies sind Rechenzentren, Kommunikationsnetze und Endgeräte. Letztere waren bisher überwiegend im dem Sinne zu verstehen, wie sie von Personen in Unternehmen, Ämtern oder Haushalten als fest installierte oder portable Endgeräte benutzt werden. Zukünftige Anwendungen werden einerseits das Portfolio energierelevanter Endgeräte erweitern und andererseits zu einer Erhöhung von Datenströmen und Rechenleistung führen. Abbildung 1 zeigt die technische Infrastruktur der Digitalisierung mit einer Auswahl an traditionellen und zukünftigen energierelevanten Varianten der einzelnen Infrastrukturelemente.

Rechenzentren

Rechenzentren bestehen aus verschiedenen funktionellen Komponenten. Die IT-Infrastruktur beinhaltet die Servereinheit, die Speichereinheit und ein internes Datennetz. Neben der Gebäude- und Verwaltungsinfrastruktur sind Kühlsysteme und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung nötig.

Es gibt unterschiedliche Größen und Architekturen von Rechenzentren. Dem steigenden Datenverkehr und der Problematik des Energiebedarfs wird mit dem Ausbau von sogenannten Hyperscale-Rechenzentren begegnet, die eine schnellere Datenverarbeitung, skalierbare Serverkapazitäten und hohe Ausfallssicherheit bei hoher Energieeffizienz versprechen (Nooruzzaman & Fernando, 2021). Hyperscale-Rechenzentren haben erheblichen Einfluss auf lokale Netze. Sie benötigen 100-150 MW Netzkapazität mit einem elektrischen Energiebedarf von jährlich mehreren hundert GWh. Von 2015 bis 2019 haben sich global die "Workloads" der Rechenzentren mehr als verdoppelt und es wird geschätzt, dass sich bis 2021 die "workloads" um weitere 50 % erhöhen bei gleichbleibendem Bedarf an elektrischer Energie (IEA, 2019).

Das schnelle Wachstum von neuen Anwendungen wie autonomes Fahren, Smart Cities oder e-Health-Überwachung erfordert den lokalen Aufbau kleinerer sogenannter Edge-Rechenzentren, die zwischen dem Endnutzer und den großen zentralen Cloud-Rechenzentren

installiert sind und vor Ort Echtzeit-Rechenaufgaben übernehmen. Edge-Rechenzentren können je nach implementierter Computerarchitektur, also unterschiedlicher Hardware und Betriebssystem-Software, als sogenannte Fog-Computing-, Mobile Edge Computing- oder Cloudlet Computing-Rechenzentren eingesetzt werden (Dolui & Datta, 2017).

Insgesamt waren 2018 weltweit 55 Mio. Server in 4,9 Mio. Racks installiert. Für 2020 wurden 62 Mio. Server in 5 Mio. Racks prognostiziert (Qi et al., 2019).

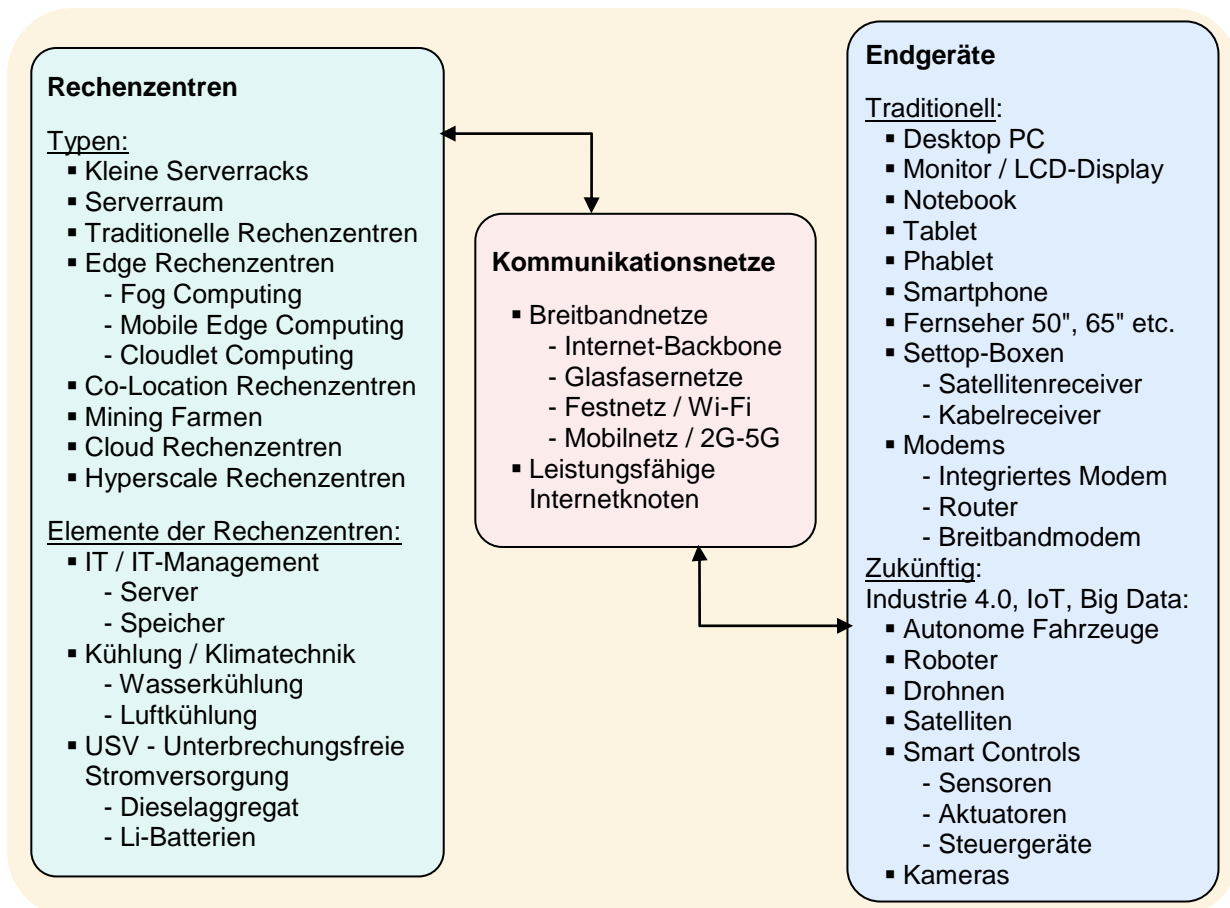


Abbildung 1: Infrastruktur der Digitalisierung (eigene Darstellung).

Cisco prognostizierte 2018, dass sich 2021 die weltweiten Workloads zu 94 % in Cloud-Rechenzentren befinden werden. Diese Cloud-Anbieter greifen oftmals auf Dienste von Co-Location Rechenzentren zurück. Cisco schätzt weiters, dass 2021 weltweit 600 Hyperscale-Rechenzentren installiert sein werden (Hintemann & Clausen, 2018).

Kommunikationsnetze

Für den Datentransfer werden Festnetze und drahtlose Netzwerke unterschieden. Zu den Festnetzen gehören das weltweite core-network zwischen den großen Rechenzentren, regionale metro/edge-networks, content distribution-networks, und kabelgebundene Zugangsnetze. Die Kundenausrüstung und drahtlose lokale Netze, wie WLAN/Wi-Fi, werden hier als eine primäre Einheit betrachtet, die Festen Zugangsnetze (FAN-fixed access networks). Das drahtlose Netzwerk (WAN-wireless access network) ist in den Generationen 2G-5G ausgebaut, wobei das Wachstum des mobilen Datenverkehrs in Zukunft von Anwendungen für M2M (machine-to-machine) und IoT (internet-of-things) dominiert wird (Andrae & Edler, 2015).

Es wird geschätzt, dass Ende 2021 weltweit etwa 436 Untersee-Internetkabel mit einer Länge von insgesamt 1,3 Mio. km in Betrieb sein werden. Neueste Kabeltechnologien sind in der Lage 224 Tbps (Terabit pro Sekunde) zu übertragen (TeleGeography, 2021). Angaben über die Länge des verlegten globalen Internet-Festnetzes am Festland konnten nicht ermittelt werden. Für Österreich wird von einem großen Anbieter berichtet, dass mit 50 Millionen Kilometern verlegten Glasfaser- und Kupferleitungen etwa 97 % der Bevölkerung erreicht werden. Ein kleinerer Anbieter besitzt ein weiteres Leitungsnetz von 60.000 km Kupferkabel und 8.000 km Glasfaserkabel (Schantl, 2021).

Im Jahr 2020 betrug der globale IP-Rechenzentren-Datenverkehr 20 ZB und wird für 2030 auf 275 ZB geschätzt. Davon sind 2020 85 % innerhalb und zwischen Rechenzentren und 2030 79 %. Es wird geschätzt, dass der mobile Anteil am Datenverkehr von 3 % im Jahr 2020 auf 11 % im Jahr 2030 steigt (Andrae, 2021). Die IEA ermittelte eine Verdreifachung des globalen Internet-Datenverkehrs von 2015 bis 2019 (IEA, 2019). Im Bereich des Festnetzes schätzte die IEA, dass für 2021 die globalen Breitband-Geschwindigkeiten der Datenübertragung auf 53 Mb/s, eine Verdoppelung im Vergleich zu 2016. Die Datenanfrage wird vor allem vom Verbrauchermarkt mit einem Anteil von 80 % getrieben und dies vor allem für Videos (IEA, 2017). Cisco prognostizierte ebenfalls durchschnittliche globale Übertragungsraten und ermittelte für 2023 für das Festnetz-Breitbandes 110,4 Mbps (Megabit pro Sekunde), für mobile Netzverbindungen 43,9 Mbps und speziell für das 5G-Netz bis zu 575 Mbps (Cisco, 2020). Mit Stand September 2021 sind gemäß einer interaktiven Karte weltweit 85.000 5G-Sendeanlagen in Betrieb (Ookla, 2021).

Endgeräte

Der globale in Betrieb befindliche Bestand an IKT- und Entertainment & Media (E&M)-Endgeräten wurde für das Jahr 2015 auf 20,5 Mrd. Stück geschätzt und teilt sich in folgende Sektoren auf:

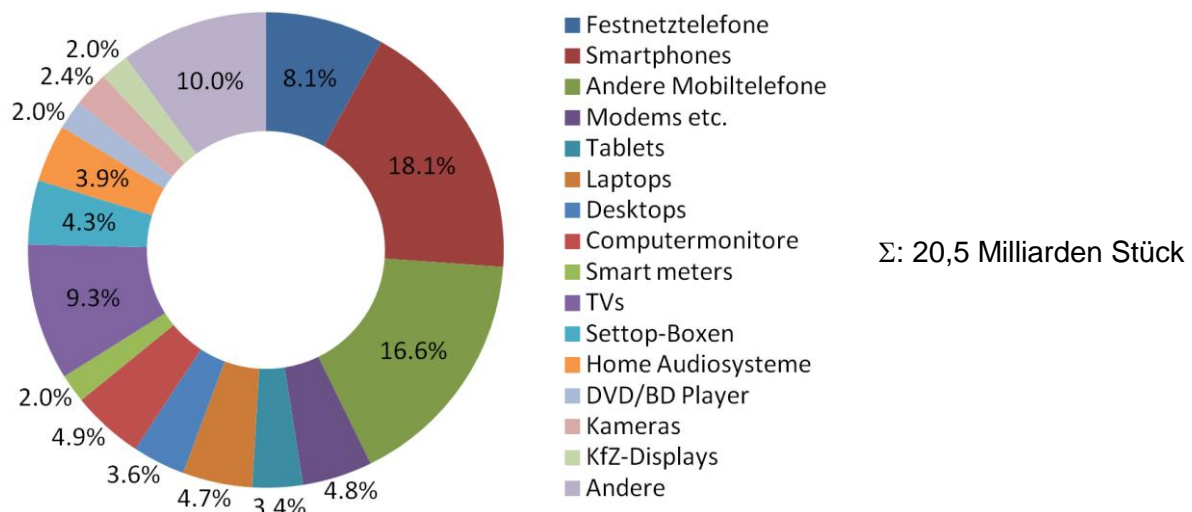


Abbildung 2: Globaler Bestand von IKT- und E&M-Endgeräten, 2015.

Datenquelle: (Malmodin & Lundén, 2018)

Im Vergleich dazu waren im Jahr 2017 in 119 Mio. US-Haushalten 3,5 Mrd. Konsumelektronik-Geräte und 174 Mio. Router und Modems in Betrieb (Urban et al., 2019). Für das Jahr 2030 schätzte eine weitere Studie, dass jährlich 100 Mio. PCs, Laptops und Monitore, 3000 Mio. Mobiltelefone, Tablets, Phablets und Breitbandmodems, 340 Mio. TV-Geräte und

128 Mio. Settop-Boxen hergestellt werden (Andrae & Edler, 2015). In einer Studie von 2020 desselben Autors wurde der globale Bestand an Endgeräten (Smartphones, TV & Peripherie, Computer, Wi-Fi) als durchschnittliche Dauerlast ausgedrückt. Diese wird für 2020 auf 95 GW und für 2030, trotz erwarteter höherer Anzahl, jedoch mit ebenso erwarteter höherer Energieeffizienz, auf 86 GW geschätzt (Andrae, 2020b).

Ein Überblick über zukünftige Anwendungen der Digitalisierung zeigt jedoch, dass derzeitige Energiebedarfsprognosen um weitere Kategorien von Endnutzungsgeräten wie Roboter oder Sensoren und Aktoren für IoT-Anwendungen für Smart Homes, Smart Cities, Smart Mobility sowie den Komplex von Industrie 4.0 und der Verarbeitung von Big Data erweitert werden müssen (Fill & Meier, 2020; Prognos & Z_punkt, 2021). Andere Typen von Endgeräten sind einerseits, energierelevant in der Herstellung, sogenannte CubeSats im Weltraum für die zukünftige Erfassung und Verarbeitung von Big Data für Umweltdaten (Corbett, 2018) und andererseits Geräte mit spezieller Hardware für Bitcoin-Mining, deren globaler Bestand auf 2,9 Millionen Stück mit einer Masse von 39,75 kt und einer Lebensdauer von 1,29 Jahren geschätzt wird (De Vries & Stoll, 2021).

Die weltweite Anzahl an Industrierobotern wurde für 2019 auf knapp 2,6 Millionen geschätzt. Die Anzahl der insgesamt mit dem Internet verbundenen Geräte wurde für 2017 auf 8,4 Milliarden und für 2020 auf 20 Milliarden geschätzt (IEA, 2017). Letztere Daten stehen im Widerspruch zur Anzahl der globalen IKT- und E&M-Geräte mit 20,5 Milliarden Stück bereits im Jahr 2015 (siehe Abbildung 2).

Weiters wird erwartet, dass bis 2025 die Anzahl globaler Internet-of-Things (IoT)-Verbindungen auf 25 Milliarden ansteigen wird (IEA, 2020). Die weltweite Anzahl von Machine-to-machine (M2M)-Verbindungen wurde für das Jahr 2021 auf 13 Mrd. geschätzt (IEA 2017). Zum Vergleich wurde von Cisco geschätzt, dass 2021 alleine in Deutschland 450 Millionen M2M-Geräte, die automatisch über das Internet kommunizieren, vorhanden sein werden. Beispielsweise melden Verkaufsautomaten selbständig bei einem zentralen Rechner, wenn sie neu bestückt werden müssen (Hintemann & Clausen, 2018).

3.1.2 Anwendung der Digitalisierung

Traditionelle Anwendungen der Digitalisierung im Produktions- und Business-Bereich betreffen Cloud-basierte Unternehmenssoftware, die man in Customer-Relationship-Management (CRM) (Kundenbeziehungsmanagement), Produktionssoftware wie Textverarbeitung und Tabellenkalkulation sowie Email aufteilen kann (Masanet et al., 2013). Neben verstärktem Online-Handel und der Ausweitung von Plattformen sind seit 2020 vor allem Videomeetings und Videokonferenzen hinzugekommen. Im Unterhaltungsbereich sind Social Media und Videostreaming energierelevante Faktoren. Abbildung 3 zeigt Beispiele für derzeitige und zukünftige Anwendungsfelder der Digitalisierung.

Gemäß den Daten von Cisco werden 2021 global 15 % der Auslastung von Rechenzentren für Videostreaming und Social Networking verwendet (Hintemann & Clausen, 2018). Die IEA erwartet für 2022, dass 87 % des Verbraucher-Internetverkehrs auf Videostreaming und Gaming fällt, mit einer jährlichen Datenrate von 2,9 ZB für Videostreaming und 180 EB für Gaming. Für jedes Bit, das zwischen Datenzentrum und Endverbraucher transferiert wird, werden weitere 5 Bits innerhalb oder zwischen Datenzentren übertragen. (IEA, 2020). Eine andere Studie schätzte einen weit höheren Anteil des Internet-Datenverkehrs von Video-

Daten, nämlich etwa 75 % (Hintemann & Hinterholzer, 2020). Die Washington Post schrieb wiederum, dass im Jahr 2020 die weltweite Nutzung des Internets mit 80 % von Videostreaming dominiert ist (Hiltner, o.J.).

Beispiele für Anwendungen der Digitalisierung

Traditionell:

Business

- Unternehmensmanagement
- Software Service
- Email
- Plattformen, Onlinehandel
- Webhosting und Domains
- e-Publishing
- Videokonferenzen

Freizeit

- Social Media
- Musik- und Videostreaming
- Gaming
- Gambling

Zukünftig:

- Künstliche Intelligenz – KI
- Big Data Analysen
 - Gesundheitsmonitoring
 - Umweltmonitoring
- e-Learning, e-Health
- Internet-of-Things (IoT)
 - Smart Home
 - Smart Buildings
 - Smart City
 - Smart Grids
 - Autonomes Fahren
- Blockchain-Technologie
 - Kryptomining (z.B. Bitcoin)
 - Identitätsmanagement
 - Smart Contracts
 - Smart Grids, Smart Cities
 - Elektronische Wahlen
- Industrie 4.0, Automatisierung
 - Machine-to-Machine-Geräte (M2M)

Abbildung 3: Anwendungen der Digitalisierung (eigene Darstellung).

Eine US-Amerikanische Studie ermittelte durchschnittliche Datenraten und Nutzungszeiten von Internetanwendungen, die in folgender Tabelle dargestellt sind (Obringer et al., 2021).

Tabelle 1: Maximale Datenraten und Nutzungszeiten von Internetdiensten.

Datenquelle: (Obringer et al., 2021).

Plattform	GB/hr	Plattform	GB/hr	Plattform	GB/hr	Plattform	GB/hr
Netflix	7.00	Skype	1.86	Google Duo	0.48	TikTok	1.40
Hulu	7.20	Zoom	2.50	Facebook	0.16	WhatsApp	0.40
Amazon Video	7.00	Webex	2.58	Twitter	0.36	WeChat	0.11
Youtube	15.98	FaceTime	0.18	Instagram	0.10	Online Gaming	0.30
Spotify	0.04	Google Hangout	3.24	Snapchat	0.16	Web Surfing	0.15

Folgende Nutzungszeiten wurden angenommen:

Streaming Service: 4 Std. Streaming pro Tag

Videoconferencing: 15 1-stündige Videokonferenzen pro Woche

Social Media: 2 Stunden App-Nutzung pro Tag

Messaging: 1 Stunde Messaging pro Tag

Miscellaneous: 4 Stunden Web-Surfen und Online Gaming pro Tag

Dem gegenüber wurde für Deutschland ermittelt, dass NutzerInnen von kostenpflichtigen Video-Streaming-Angeboten 14 Stunden pro Monat konsumieren (Hintemann & Hinterholzer, 2020). Umgerechnet auf die Bevölkerung ergibt dies etwa 4 Stunden pro EinwohnerIn und Monat. Weiters nutzten in Deutschland im Jahr 2019 unter 40-Jährige Personen

75 Stunden/Woche privat Cloud-Services (Hintemann & Hinterholzer, 2020b). Im Vergleich zu Tabelle 1 wurde in einer anderen Studie für Videos in Standardauflösung ein Datenverkehr im Kommunikationsnetz von 1 GB/h angenommen, für Videos in High Definition (HD) 3 GB/h. Für 2030 wurde geschätzt, dass als typische Video-Technologie 20 GB/h genutzt wird (Andrae, 2020).

Die IEA errechnete für das Jahr 2017 einen globalen Internet-Datenverkehr von 1,1 ZB (IEA, 2017). Für das Jahr 2022 wird geschätzt, dass der globale jährliche Internet-Datenverkehr auf 4,2 ZB steigt. Bis 2022 wird erwartet, dass die treibende globale Nachfrage für Rechenzentren und Netzwerkservices von Video-Streaming und Video-Gaming herrührt. Die Anzahl der globalen mobilen Internet-UserInnen wird von 3,8 Milliarden im Jahr 2019 auf 5 Milliarden in 2025 steigen (IEA, 2020).

Nachhaltige Entwicklung ist oftmals mit leistungsfähigen Recheninfrastrukturen für Simulationen und Analysen mit einem hohen Datenaufkommen verbunden. Die zukünftigen Anwendungsbereiche sind Technologien für Autonomes Fahren, Smart City oder Industrie 4.0 (Hintemann & Hinterholzer, 2020b).

Zusammenfassend besteht die digitale Infrastruktur aller drei Hauptkomponenten, den Rechenzentren, Kommunikationsnetzen und Endgeräten, aus einer Vielzahl an unterschiedlichen elektrischen und elektronischen Anlagen- und Gerätetypen, die wiederum variierende technische Eigenschaften, Energiebedarfe und Effizienzsteigerungspotenzial aufweisen. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenführung der in der Literatur unabhängig voneinander genannten Zahlenwerte zu dem globalen Digitalsektor zugeordneten Geräte und Anwendungen.

Im Bereich der Rechenzentren liegt der Forschungsfokus auf Hyperscale-Rechenzentren. Über die Art und Größe anderer Typen von Rechenzentren und Servern sind nur grobe Gesamtschätzungen publiziert. Der Bestand globaler traditioneller IKT und E&M Endgeräte ist ausführlich untersucht, jedoch lassen zukünftige Gerätetypen und Anwendungsbereiche, wie in den Abbildungen 1 und 3 dargestellt, weltweit Milliarden zusätzlicher Geräte erwarten, deren Art und Anzahl genauer verfolgt werden müssen. Für das Jahr 2015 wurde geschätzt, dass 20,5 Milliarden IKT- und E&M Endgeräte in Betrieb waren und im Jahr 2025 25 Milliarden IoT-Verbindungen bestehen werden.

Die Frage nach den jeweiligen Anteilen des globalen jährlichen Datenverkehrs in den Kommunikationsnetzen der verschiedenen Sektoren und Anwendungen konnte nicht beantwortet werden. Zwar gibt es Einzeldaten, wie in Tabelle 2 dargestellt, die jedoch aufgrund anderer fehlender Daten nicht zusammenführbar und vergleichbar sind. Medien und Literatur konzentrieren sich auf den Datenverkehr von Videostreaming, deren Gesamtanteil nicht genauer definiert mehrmals im Bereich von 80 % angegeben wurde. Einzig eine Literaturstelle schätzte konkret einen Wert von 87 % des *Verbraucher*-Internetverkehrs für Videostreaming und Gaming. Es gibt jedoch keine Angabe darüber, wie groß der gesamte Verbraucher-Internetverkehr ist. Anderen Quellen zufolge wird der globale Internet-Datenverkehr im Jahr 2022 auf 4,2–20,6 ZB geschätzt.

Tabelle 2: Zusammenfassung von quantitativen Literaturdaten in Bezug zu den Komponenten der globalen digitalen Infrastruktur.

Rechenzentren	
600 Hyperscale-Rechenzentren	(2021)
5 Mio. Racks mit	(2020)
62 Mio. Servern	(2020)
94% der Workloads in <i>Cloud</i> -Rechenzentren	(2021)
15% Auslastung von Rechenzentren für Videostreaming und Social Networking	(2021)
87% des <i>Verbraucher</i> -Internetverkehrs: Videostreaming und Gaming	(2022)
Für jedes Bit zw. Rechenzentrum und Endverbraucher 5 weitere Bits in/zw. Rechenzentren	

Datennetze	Endgeräte/-user
70% Anteil mobiler Netzwerke	(2022) 20,5 Mrd. IKT- und E&M-Endgeräte (2015)
4,2-20,6 ZB Datenverkehr	(2022) 3,7 Mrd. Smartphones (2015)
2,9 ZB Datenverkehr für Video-Streaming	(2022) 3,4 Mrd. Andere Mobiltelefone (2015)
180 EB Datenverkehr für Gaming	(2022) 1,9 Mrd. TV-Geräte (2015)
1-16 GB/hr Datenrate für Streaming Services	2,6 Mio. Industrieroboter (2019)
0,18-3,24 GB/hr Datenrate für Videokonferenzen	20 Mrd. Geräte am Internet (2020)
0,1-1,4 GB/hr Datenrate für Social Media	25 Mrd. IoT-Verbindungen (2025)
0,11-0,4 GB/hr Datenrate für Massaging	13 Mrd. M&M-Verbindungen (2021)
0,3 GB/hr Datenrate für Online Gaming	3,8 Mrd. Internet-UserInnen (2019)
0,15 GB/hr Datenrate für Web Surfing	5 Mrd. Internet-UserInnen (2025)

3.2 Energiebedarf und THG-Emissionen der Digitalisierung

Auf Basis der Struktur von Abschnitt 3.1 und traditioneller Anwendungen wie Büro- und Unternehmens-Software sowie Unterhaltungselektronik und Social Media wurden in den letzten Jahren zahlreiche Energiebedarfserhebungen durchgeführt (Andrae & Edler, 2015; Andrae, 2020a/b, 2021; Bieser et al., 2020; Hintemann, 2018; Hintemann & Hinterholzer, 2020a; Kamiya, 2020; Malmodin & Lundén, 2018; Masanet et al., 2013, Obringer et al. 2021; Urban et al., 2019).

Es gibt eine Vielzahl an Berechnungen für den Energiebedarf der digitalen Infrastruktur, deren Ergebnisse oftmals nicht direkt vergleichbar sind, da Systemgrenzen, Einheiten und Randbedingungen unterschiedlich definiert werden. Es bestehen große Unsicherheiten in der Abschätzung des zu erwartenden Datenverkehrs und Rechenleistung sowie die zukünftige Technologieentwicklung energieeffizienter elektronischer Bauelemente und Komponenten, vor allem der Transistortechnologie.

Als Gesamtüberblick über den Energiebedarf der Digitalisierung ist in Abbildung 4 eine graphische Zusammenstellung zweier schwedischer Studien dargestellt, die in verschiedenen Szenarien die Nutzungsphase aller Komponenten sowie die Herstellung der gesamten Infrastruktur der Digitalisierung inklusive Geräte für Rechenzentren und Netzwerke berücksichtigen.

Im worst case-Szenario könnte der Energiebedarf der Digitalisierung bis zu 51 % des globalen Gesamtbedarfes an elektrischer Energie ausmachen, wenn Effizienzsteigerungen auf einem niedrigen Niveau bleiben (Andrae & Edler, 2015; Andrae, 2020a).

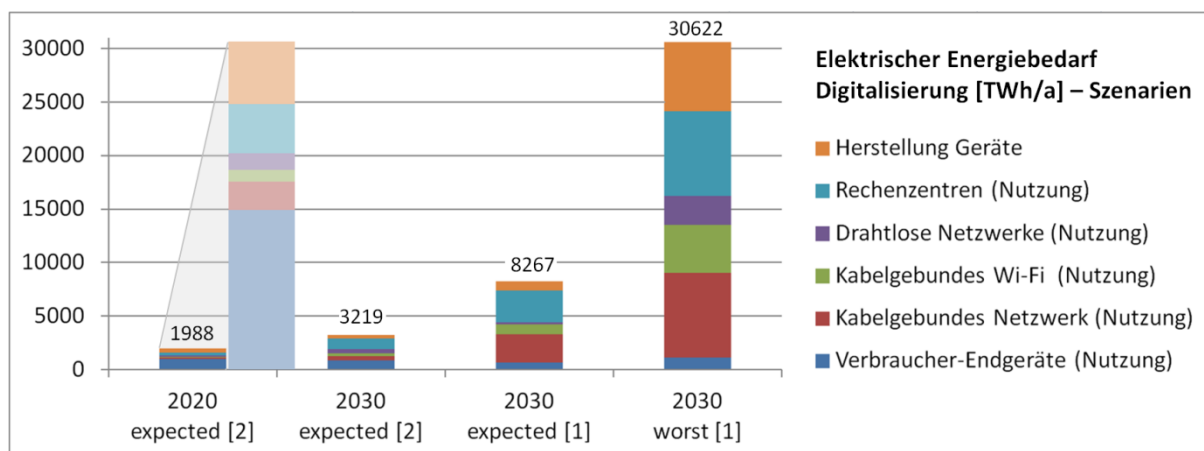


Abbildung 4: Energiebedarfsszenarien der globalen Digitalisierung für 2020 und 2030. Die Vergrößerung von 2020 zeigt die genauen Anteile der Infrastruktur.

Datenquellen: [1]:(Andrae & Edler, 2015); [2]:(Andrae, 2020a).

Für das Jahr 2020 wurde der globale Energiebedarf von Rechenzentren, Kommunikationsnetzen und Endgeräten auf 1988 TWh geschätzt. Dies entspricht 7 % des globalen Bedarfs an elektrischer Energie von 28000 TWh im Jahr 2020 (IEA, 2019b). Die Anteile der Systemkomponenten sind 49 % für die Nutzung von Endgeräten, 15 % für Rechenzentren, 17 % für Kommunikationsnetze und 19 % für die Herstellung der Infrastruktur. Prognosen für 2030 schwanken zwischen einer Erhöhung um das 1,6-fache bis zu einem Worst Case Szenario um einem Faktor 15, abhängig von erwarteter Effizienzsteigerung, Technologiesprünge sowie Datenraten und Workloads. Im Worst Case Szenario bleibt der Anteil des Energiebedarfs für die Geräteherstellung etwa gleich. Jedoch sinkt durch Energieeffizienzsteigerung der Anteil der Endgerätenutzung auf 3,6 %. Rechenzentren und Netzwerke haben je nach Szenario in der Nutzungsphase einen Anteil zwischen 44 % und 81 %.

Der elektrische Energiebedarf für 2020 in Abbildung 4 entspricht, umgerechnet mit dem globalen Faktor lt. IEA 475 g CO₂-e/kWh, siehe (Bieser et al., 2020), THG-Emissionen von 944 Mt CO₂-e. Für Prognosen im Jahr 2030 kann dieser Faktor nicht angewandt werden, da davon ausgegangen wird, dass sich durch Veränderungen des globalen Strommixes zugunsten erneuerbarer Energien dieser Faktor verkleinert.

In einer anderen Studie wurde der Energieverbrauch des Digitalsektors in CO₂-Äquivalenten ermittelt: Die globalen THG-Emissionen des IKT-Sektors werden auf Basis von 2019 um 11 % auf etwa 900 Mt/a im Jahr 2030 steigen. Das entspricht einer Steigerung von 1,6 % auf 1,7 % der globalen THG-Emissionen (Deloitte, 2019). Daraus errechnen sich die globalen THG-Emissionen auf 50,6 Gt im Jahr 2019 und erwartete 52,9 Gt im Jahr 2030 (vermutlich alle anthropogenen THG-Emissionen). Zum Vergleich schätzte die IEA die globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen für 2019 auf 33,2 Gt (IEA, 2020a).

3.2.1 Energiebedarf von Rechenzentren

Der Energieverbrauch von Rechenzentren hat derzeit einen Anteil von etwa 1-2 % des globalen Verbrauchs an elektrischer Energie. Cloud computing besitzt ein großes Potential, den Energieverbrauch gegenüber einer Vielzahl lokaler Rechenzentren signifikant zu reduzieren, vor allem durch die Umstellung auf hocheffiziente zentrale Hyperscale-Rechenzentren. Dadurch wird auch zukünftig trotz steigendem Datenverkehrs nur eine geringe Steigerung des Gesamtenergieverbrauchs erwartet ([Masanet et al., 2013/2020](#)).

Im Vergleich dazu schätzte eine andere Studie für 2018 einen globalen Energiebedarf für Rechenzentren auf 300-400 TWh/a (umgerechnet 143-190 Mt CO₂-e/a), welcher bis 2025 auf 1000 TWh/a steigen könnte ([Hintemann, 2018](#)). In einer Studie von Bitkom wurden Literaturdaten in CO₂-Äquivalente mit dem globalen Faktor lt. IEA 475 g CO₂-e/kWh umgerechnet. Die globalen THG-Emissionen für Rechenzentren ergaben für das Jahr 2020 Werte zwischen etwa 100-500 Mt CO₂-e/a ([Bieser et al., 2020](#)). Umgerechnet ergibt dies 211-1053 TWh, wobei Bitkom Werte im unteren Drittel für wahrscheinlich einschätzt.

In einer US-amerikanischen Studie wird der globale Bedarf an elektrischer Energie für Rechenzentren für das Jahr 2019 auf etwa 200 TWh (umgerechnet 95 Mt CO₂-e/a) oder 0,8 % des globalen Gesamtbedarfs an elektrischer Endenergie geschätzt. Bei gleichbleibendem Trend der Hardware-Effizienz kommt es zu keiner Steigerung des Gesamtenergieverbrauchs von Rechenzentren bis 2022 bei gleichzeitiger Erhöhung der Serviceleistung von 60 % ([Masanet et al., 2020](#)).

Eine schwedische Studie geht davon aus, dass im Jahr 2018 alleine in China der Energiebedarf von 161 TWh (umgerechnet 76 Mt CO₂-e/a) für Rechenzentren bestand und somit der globale Energieverbrauch für Rechenzentren möglicherweise 400 TWh (umgerechnet 190 Mt CO₂-e/a) erreichte ([Andrae & Edler, 2015](#)). Skaliert man die in Deutschland bevölkerungsbezogene Rechenzentrumsintensität auf globale Ebene, würde der globale Energiebedarf 2030 auf über 2000 TWh steigen ([Andrae, 2020b](#)).

Im Jahr 2018 betrug der Bedarf an elektrischer Energie für Rechenzentren in Deutschland 14 TWh (umgerechnet 6,7 Mt CO₂-e/a). IT-Komponenten wie Server, Storage und Netzwerk benötigten 8,5 TWh (umgerechnet 4 Mt CO₂-e/a). Bezogen auf die Komponenten eines Rechenzentrums entfällt der größte Anteil auf die Server mit 39 %, gefolgt von der Kühlung mit 22 % und Speicher mit 18 %. Die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) hat einen Anteil von etwa 13 %. Es wird ein weiterer deutlicher globaler Zuwachs durch Trends Richtung Edge Computing und Künstliche Intelligenz erwartet. Bis zum Jahr 2030 wird ein Zuwachs für Rechenzentren in Deutschland um 50 % geschätzt ([Hintemann, 2018](#)). Bei neu gebauten Rechenzentren ist der Anteil des Energiebedarfs für USV und Kühlung unter 25 % ([Hintemann & Clausen, 2018](#)).

Im Jahr 2020 betrug die gesamten CO₂-Emissionen von Rechenzentren der EU etwa 19 Mt (umgerechnet 40 TWh/a). Die Bestandserhebung und Prognosen für den zukünftigen Energiebedarf von Rechenzentren sind in der Literatur sehr unterschiedlich bewertet. Die Einschätzungen gehen von nur einem geringen Anstieg der letzten Jahre bis zu einem Faktor 4. Die Unterschiede ergeben sich aufgrund insgesamt wenig verfügbaren Daten. Selbst die Verkaufszahlen für unternehmensinterne Server divergieren bis zu 100 % ([Hintemann & Hinterholzer, 2020b](#)).

3.2.2 Energiebedarf von Kommunikationsnetzen

Eine Auswertung von Literaturdaten ergab für das Jahr 2020 globale THG-Emissionen von Kommunikationsnetzen im Bereich von 140-290 Mt CO₂-e/a (Bieser et al., 2020). Rückgerechnet mit dem IEA-Faktor in Abschnitt 3.2.1 ergibt dies etwa 300-600 TWh. Die IEA schätzte den globalen elektrischen Energiebedarf für Datennetze im Jahr 2019 auf 250 TWh (umgerechnet etwa 120 Mt CO₂-e/a). Dieser Wert liegt wie bei Rechenzentren ebenfalls im Bereich von 1 % des globalen Bedarfs an elektrischer Energie. Der Anteil mobiler Netzwerke wird für 2022 auf 70 % geschätzt (IEA, 2020). Verglichen dazu schätzte eine andere Studie den Anteil des Datenverkehrs 2020 im drahtlosen Netz auf nur 15 % (Andrae, 2020). Darüber hinaus ist der Netzenergieverbrauch je Datenrate im Mobilfunknetz deutlich höher als im Festnetz (Hintemann & Hinterholzer, 2020).

Für das Jahr 2030 wird geschätzt, dass im drahtlosen Netz 0,0144 kWh/GB und im Festnetz 0,017 kWh/GB elektrische Energie verbraucht wird. Außerdem würden sich die Verhältnisse der Netznutzung umkehren, 85 % des Datenverkehrs würden in den drahtlosen Netzen stattfinden (Andrae, 2020).

Mobile Datennetze verbrauchten weltweit im Jahr 2020 etwa 98 TWh (umgerechnet 47 Mt CO₂-e/a) und für 2030 wird ein Anstieg auf 316 (± 130) TWh prognostiziert. Optische Netze hatten 2020 eine globale durchschnittliche Leistung von etwa 17 GW (149 TWh/a oder umgerechnet 71 Mt CO₂-e/a) und dies könnte 2030 auf 32 GW (280 TWh/a) ansteigen. (Anm.: Glasfasernetze können durch WDM-Technologie (Wavelength Division Multiplexing) mehrfach genutzt werden). Die Datenübertragungsrate der WDM-Technologie ist bisher schneller gestiegen als die Energieeffizienz der WDM-Technologie. Deshalb wird erwartet, dass zukünftige WDM-Generationen mehr Energie verbrauchen, im besten Fall weniger als 0,2 Nanojoule/Bit (= 5,56*10⁻¹⁷ kWh/Bit). Aktualisierte Schätzungen zeigen jedoch, dass weltweit im Jahr 2020 optische Netze 150 (± 20) TWh verbrauchen könnten und 2030 mit einem Anstieg auf 284 (±140) TWh zu rechnen wäre (Andrae, 2020b).

3.2.3 Energiebedarf von Endgeräten

Im Jahr 2015 betrug der globale elektrische Endenergieverbrauch für die Nutzung von IKT- und E&M-Endgeräten 884 TWh (Malmodin & Lundén, 2018). Im Vergleich dazu ermittelte Bitkom für 2020 globale THG-Emissionen aus der Nutzung von Endgeräten inkl. Unterhaltungselektronik eine relativ große Bandbreite von 725-1200 Mt CO₂-e, das entspricht mittels IEA-Faktor aus Abschnitt 3.2.1 etwa 1500-2500 TWh. Es wird geschätzt, dass die Herstellung einen THG-Emissionsanteil von 50 % des Lebenszyklus hat. Im Bereich der Unterhaltungselektronik dominieren Fernsehgeräte, deren THG-Emissionen in der Nutzungsphase höher als bei IKT, auf 70 % geschätzt wird. (Bieser et al., 2020).

Dem gegenüber schätzte die IEA für 2020 den globalen Verbrauch an elektrischer Energie für die Nutzung von Haushaltsgeräten auf 3100 TWh, davon etwa 15 %, das sind etwa 465 TWh, auf netzwerkfähige Geräte. Das wäre etwas mehr als die Hälfte des Wertes, den Malmodin & Lundén bereits für 2015 geschätzt haben. Die IEA prognostizierte weiters einen nahezu linear ansteigenden elektrischen Energiebedarf von 5200 TWh bis 2040, davon etwa 50 % (also 2600 TWh) für netzwerkfähige Geräte (IEA, 2017).

Neben der Herstellungsenergie ist aufgrund der großen Anzahl globaler Endgeräte der Stand-by Energieverbrauch relevant. Ineffiziente Stand-by Geräte könnten bis 2025 etwa

740 TWh/a verschwenden. Der Stand-by Verbrauch von IoT-Geräten, die mit einer Steckdose verbunden sind (ohne Computer und Fernseher), wird bis 2025 auf 46 TWh/a geschätzt, davon fallen 36 TWh/a auf Hausautomatisierung (IEA, 2017).

Bezogen auf Einzelgeräte untersuchte das Fraunhofer USA Center for Sustainable Energy Systems den Energieverbrauch von 12 Kategorien von Haushalts-Konsumelektronik in den USA. Es wurde errechnet, dass in 119 Millionen Haushalten 3,5 Milliarden Geräte in Betrieb waren, also etwa 29 pro Haushalt. Diese Geräte hatten im Jahr 2017 einen Energiebedarf von insgesamt 148 TWh, also etwa 11 % des Stromverbrauchs von US-Haushalten. Weiters waren im Jahr 2017 in US-Amerikanischen Haushalten insgesamt 174 Millionen Router und Modems durchschnittlich täglich 21,4 Stunden in Betrieb, die einen Gesamtenergieverbrauch von 13 TWh aufwiesen. Folgende durchschnittlichen Verbrauchswerte je Modem-Typ und Stück wurden ermittelt: Integriertes Modem: 0,011 kWh/h, Router: 0,007 kWh/h und Breitbandmodem: 0,007 kWh/h (Urban et al., 2019).

Neben der Nutzungsenergie berücksichtigte eine Studie auch die Herstellungsenergie digitaler Geräte, wobei einerseits Verbraucherendgeräte und andererseits Geräte beispielsweise in Fahrzeugen oder Gebäuden miteinbezogen wurden. Im Jahr 2020 betragen die globalen THG-Emissionen für die Herstellung digitaler Geräte 1 Gt CO₂-e (umgerechnet etwa 2105 TWh) (Andrae, 2020b). Dieser Wert ist verglichen mit dem Szenario für 2020 in Abbildung 4 mehr als doppelt so groß. Auch wenn der Einsatz dieser Geräte teilweise zeitversetzt stattfindet, muss für eine Jahresbilanz noch der ältere Bestand der Geräte hinzugerechnet werden. Der Autor der Studie selbst merkt an, dass Energiebedarfsprognosen in der Literatur für die IT-Geräteherstellung, insbesondere der Halbleiterherstellung, möglicherweise signifikant unterschätzt worden sind. (Andrae, 2020b). In einer früheren Studie desselben Autors wurde geschätzt, dass zwischen 2011 und 2030 eine jährliche Verbesserung der Energieeffizienz für Endgeräten sowohl bei der Herstellung als auch in der Nutzungsphase je nach Prognose-Szenario zwischen 1 % und 5 % erzielt wird (Andrae & Edler, 2015).

Weiterführend berechnete die IEA den globalen elektrischen Energieverbrauch der Nutzungsphase für Smart Controls im Gebäudebereich. Im Jahr 2020 wurden 30 TWh (umgerechnet 14 Mt CO₂-e) verbraucht. Für das Jahr 2040 wird der elektrische Energiebedarf auf knapp 280 TWh geschätzt, wobei 53 % auf die Zentralsteuerung, 41 % auf andere Steuergeräte und 6 % auf Aktuatoren und Displays entfallen. Der Energiebedarf in der Nutzung von Sensoren spielt hierbei keine Rolle mehr. Gleichzeitig wurde angenommen, dass die Energieintensität bis 2040 um 45 % sinkt. Durch Digitalisierung von Gebäuden könnte der Energiebedarf um 10 % gesenkt werden (IEA, 2017). Allerdings muss die Herstellung der unzähligen geplanten Sensoren sehr wohl berücksichtigt und zumindest die Größenordnung der Herstellungsenergie abgeschätzt werden.

Zusammenfassend für die globale digitale Infrastruktur zeigt Tabelle 3 repräsentative Bandbreiten der in der Literatur ermittelten und geschätzten Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen insgesamt und aufgeteilt in die Infrastrukturkomponenten Rechenzentren, Datennetze und Endgeräte von 2015 bis 2040.

Es wird in allen Bereichen mit einem Anstieg des Energiebedarfs trotz Effizienzsteigerungen gerechnet. Die Bandbreiten ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Einschätzungen der erwarteten Technologiesprünge. Dennoch wird davon ausgegangen, dass die THG-

Emissionen durch die Anwendung erneuerbarer Energiequellen relativ konstant bleiben werden oder sogar sinken.

Tabelle 3: Globaler Energiebedarf und THG-Emissionen der Digitalisierung 2015-2040 nach Komponenten und Jahr.

	2015	2018	2019	2020	2020	2025	2030	2030	2040	Anmerkungen
	[TWh]	[TWh]	[TWh]	[TWh]	[Mt CO ₂ -e]	[TWh]	[TWh]	[Mt CO ₂ -e]	[TWh]	
Gesamte digitale Infrastruktur				1.988	944		3.219-30.622			Herstellung/Nutzung Rechenzentren, Netze, Endgeräte
								900		IKT-Sektor (ohne nähere Angabe); 1,7 % der THG-Emissionen
Rechenzentren		300-400	200	200-1000	100-500	1.000	2.000			1-2 % des globalen elektrischen Energiebedarfs
Datennetze			250	300-600	140-290					1 % des globalen elektrischen Energiebedarfs
Mobile Netze				98	47		316 (± 130)			
Optische Netze				150 (± 20)	71		284 (±140)			
Endgeräte	884			1500-2500	725-1200					Nutzung IKT- und E&M-Endgeräte
				465					2.600	Nutzung netzwerkfäh. Haushaltsgeräte
				30	14				280	Nutzung Smart Controls Gebäude
				2.105	1.000					Herstellung digitaler Geräte *)

*) Die Herstellungenergie wird in einer Gesamtbilanz nur anteilmäßig über die Lebensdauer des Gerätes gerechnet; hier nicht direkt vergleichbar

Während der Energiebedarf von Großrechenzentren und traditionellen Endgeräten gut dokumentiert ist gibt es zu 5G-Mobilnetzen, lokalen Festnetzen und zukünftigen Arten von Endgeräten weiteren Forschungsbedarf. Eine unbeantwortet gebliebene Frage ist die Allokation des Energiebedarfs von Endgeräten, nämlich welcher Anteil der Digitalisierung und welcher Anteil dem bereits vorhandenen konventionellen Gebrauch zugeordnet werden bzw. wieviele Anwendungen hinzukommen. Es werden weltweit Milliarden zusätzlicher Geräte vor allem im Bereich IoT erwartet, deren Bedarf an Herstellungs- und Nutzungsenergie genauer erforscht werden müssen.

3.2.4 Energiebedarf ausgewählter Anwendungen

Videokonferenzen und Business-Anwendungen

Eine US-Amerikanische Untersuchung begleitete über mehrere Jahre Online-Konferenzen und präsentierte in einem Leitfaden eine nahezu CO₂-freie und kostengünstige Alternative zu Konferenzen. Der Carbon Footprint wurde dabei um den Faktor 100 gegenüber einer Präsenz-Konferenz reduziert. Die Studie untersuchte den Energieverbrauch für Konferenz-Videostreaming und ermittelte, dass Streamingquelle, Übertragungsweg, Zugangsnetz und Endgerät insgesamt 7,9 MJ pro Stunde, das entspricht 2,194 kWh/h, verbrauchten. In einer Pilotkonferenz 2016 hatte eine durchschnittliche Videodatei von 100 Vortragenden eine Größe von 1 GB. Jedes Video wurde in einem Zeitrahmen von 21 Tagen durchschnittlich 63 mal angesehen (Hiltner, o.J.).

Verglichen dazu ermittelte eine Studie von 2021 THG-Emissionen von Rechenzentren ohne Datennetze und Endgeräte für einer Stunde Videokonferenz von 2,27 g CO₂-e (umgerechnet etwa 0,0048 kWh) pro TeilnehmerIn und Stunde. Inklusiv Datennetz, Router und Endgerät erhöhten sich die THG-Emissionen je nach Größe des Monitors auf 55-295 g CO₂-e (umgerechnet etwa 0,116-0,621 kWh) pro Stunde und TeilnehmerIn (Gröger et al., 2021).

Im Bereich der Unternehmens-Software wurde 2013 ermittelt, dass im US-Business bis zu 87 % bzw. 326 PJ (= ca. 90 TWh) an Primärenergie eingespart werden könnte, wenn Emails

und erweiterte Office-Anwendungen von lokalen Computersystemen in zentrale Cloud-Dienste verlagert würden ([Masanet, 2013](#)). Im Office-Sektor wurde von einem britischen Energieunternehmen ermittelt, dass täglich über 64 Mio. "unnötige" Höflichkeits-E-mails ohne Handlungsauftrag, wie "danke", "schönes Wochenende" etc., 23475 t CO₂ verursachen, gefolgt von einer bemerkenswerten "Think Before You Thank"-Campagne ([OVO-energy, 2019](#)). Der Carbon Footprint dieser Art von Email-Verkehr beträgt somit 1 g CO₂/Email.

Video-Streaming

In einer deutschen Studie wurde für den weltweiten Internet-Datenverkehr für 2018 errechnet, dass der Energiebedarf für Video-Streaming in Rechenzentren 0,0321 kWh/GB beträgt. Die Übertragung im Festnetz wurde mit 0,075 kWh/GB und im Mobilfunknetz mit 1,07 kWh/GB errechnet. Es wurde grob geschätzt, dass der Energieverbrauch von Rechenzentren und Kommunikationsnetzen je Stunde Video-Streaming im Jahr 2020 im Vergleich zu 2018 um 25 % reduziert werden konnte. Allerdings steht der Trend zu höherer Energieeffizienz pro GB Datenvolumen der Nutzung einer höheren Auflösung gegenüber. Der durchschnittliche Energiebedarf pro Stunde dürfte etwa gleich bleiben ([Hintemann & Hinterholzer, 2020](#)).

Im Vergleich dazu wurde von einer schwedischen Studie berechnet, dass für Video-Streaming im Jahr 2020 der Anteil in Rechenzentren einen elektrischen Energieverbrauch von 0,015 kWh/GB aufweist. Für das Jahr 2030 wurde eine Reduzierung auf 0,004 kWh/GB angenommen. Weiters wurde für 2020 der elektrische Energiebedarf für Video-Übertragung in drahtlosen Netzen auf 0,18 kWh/GB geschätzt, dem gegenüber im Festnetz nur auf 0,07 kWh/GB ([Andrae, 2020](#)).

Der Energiebedarf von Videostreaming ist jedoch abhängig von der Bildauflösung. Der Gesamtenergiebedarf mit einem 65"-Fernseher als Endgerät am Festnetz variiert bis zu einem Faktor 4,5 je nach gewählter Auflösung von 0,28-1,30 kWh/h. Hierbei wird angenommen, dass eine höhere Auflösung den Energiebedarf der Rechenzentren und Datennetze erhöht, nicht aber den des Endgerätes. Ein weiterer Vergleich verschiedener Endgeräte mit gleicher Auflösung von 1080p zeigt, dass ein 65" Fernseher einen Energiebedarf für Video-Streaming von 0,37 kWh/h und ein Smartphone 0,23 kWh/h aufweist. Insgesamt reduziert sich der Energiebedarf somit um etwa 40 %. Vergleicht man nur den Energiebedarf beider Endgeräte, reduziert er sich sogar um 97 % ([Hintemann & Hinterholzer, 2020](#)). Im Idealfall sollte bei einem im Hintergrund laufenden Videos das Bild weggeschaltet werden ([Obringer et al., 2021](#)).

Bemerkenswert ist die Feststellung, dass eine Stunde Videostreaming weniger CO₂-Emissionen verursacht, als andere Freizeitaktivitäten, die mit individueller Mobilität verbunden sind ([Hintemann & Hinterholzer, 2020](#)).

Am Beispiel von Netflix-Videostreaming schätzte die IEA einen globalen Durchschnitt von THG-Emissionen für Rechenzentren, Datennetzen und Endgeräten von 36g CO₂/h für das Jahr 2019 (umgerechnet etwa 0,076 kWh/h). Das entspricht etwa 200 m Fahrt eines konventionellen Autos. Vorherige Veröffentlichungen für den gleichen Zeitraum ergaben Werte in der Größenordnung von 82-94 g CO₂/h. Darüber hinaus gibt es publizierte Werte in 10-100-facher Größe, insgesamt von 18 g CO₂-e/h bis 2,67 kg CO₂-e/h umgerechnet etwa (umgerechnet 0,038-5,6 kWh/h). Es wird jedoch auf Berechnungsfehler in den älteren

Publikationen hingewiesen, die einerseits einen Umrechnungsfehler Bit/Byte aufweisen und/oder eine unkorrekte Datenrate pro Sekunde annahmen. Andererseits wurde teilweise die Herstellungsenergie der Infrastruktur mit berechnet (IEA, 2020b).

Netflix selbst berichtete von einem eigenen direkten Gesamtenergieverbrauch von 94 GWh für Internet Media & Services im Jahr 2019 bei 167 Mio. AbonentInnen. Weiters wurde der indirekte Energieverbrauch für externe Videoanbieter und Verteilung mit 357 GWh für 2019 angegeben (Netflix, 2019). Bei durchschnittlich 2 h Streaming pro Tag (Kesslassy, 2019) wäre der Energieverbrauch für Netflix-Videostreaming ohne Endgeräte 0,0037 kWh/h (umgerechnet etwa 1,76 g CO₂-e/h). Demgegenüber ermittelte das deutsche Umweltbundesamt einen Primärenergiebedarf bezogen auf Rechenzentren für eine Stunde Videostreaming von 24,2 kJ/h (=0,0067 kWh/h) und dazugehörige THG-Emissionen von 1,46 g CO₂-e/h (Gröger et al., 2021). Verglichen dazu gibt die IEA in einer Neuberechnung für Netflix-Videostreaming einen Energiebedarf inkl. Endgeräte, Datentransfer und Rechenzentren von 0,077 kWh/h (umgerechnet etwa 36,58 g CO₂-e/h) an (IEA, 2020b).

Zusammenfassend sind in der Literatur sehr große Unterschiede von bis zu zwei Größenordnungen in der Berechnung des Energiebedarfs von Videostreaming zu finden. Insgesamt scheint eine realistische Bandbreite für eine Stunde Videostreaming für Rechenzentren, Datennetze und Endgeräte im Bereich von 0,077-1,3 kWh/h zu sein. Im Vergleich dazu ist der Energiebedarf für Videokonferenzen im Bereich von 0,116-0,621 kWh/h pro TeilnehmerIn. Die Darstellung der Ergebnisse in der Literatur variieren zwischen den Einheiten [kWh/GB], [kWh/h] und [CO₂-e/h] und sind somit nur bedingt vergleichbar. Einerseits kann die Dateigröße eines Videos unterschiedlich sein und andererseits ist der Energiebedarf im Einzelfall signifikant abhängig von der Wahl des Endgerätes, der gewählten Auflösung und welche Komponenten berücksichtigt werden. Tabelle 4 zeigt einen Überblick über die heterogenen Literaturdaten zum globalen Energiebedarf von Videostreaming.

Tabelle 4: Literaturdaten zum elektrischen Energiebedarf von Videostreaming.

Video-streaming	2018 [kWh/GB]	2019 [kWh/h]	2019 [g CO ₂ -e/h]	2019/20 [kWh/h]	2019/20 [g CO ₂ -e/h]	2020 [kWh/GB]	2030 [kWh/GB]	65" TV allg. [kWh/h]	65" TV 1080p [kWh/h]	Smartphone 1080p [kWh/h]
Endgeräte										
Rechenzentren	0,032	0,077	36	0,0067	1,46	0,015 - 0,024	0,004	0,28 - 1,30	0,37	0,23
Festnetz	0,075					0,056 - 0,070				
Mobilnetz	1,070					0,180 - 0,803				
Gesamt ≤ 2020	18 - 2670 g CO ₂ -e/h (0,038-5,6 kWh/h) → oberer Bereich unwahrscheinlich									

Automatisierung

Das Dienstleistungsunternehmen DNV untersuchte die Auswirkung der Digitalisierung und der damit verbundenen Automatisierung auf den Bereich von Maschinen, Motoren und Geräten (MM&A). Der Energiebedarf dieses Produktsektors wird von 13 EJ (=3.611 TWh) im Jahr 2019 auf 20 EJ (=5.556 TWh) im Jahr 2050 steigen, das entspricht einer Differenz von knapp 2000 TWh. Dadurch, erhöht sich der Anteil von MM&A von 32 % im Jahr 2019 auf 44 % im Jahr 2050 im Bereich des globalen Energiebedarfs für Industriegüter (DNV, 2021).

Blockchain Technologie

Die Blockchain-Technologie wird in den Energiebedarfsberechnungen der Digitalisierung nur am Beispiel von Bitcoin mit einbezogen, obwohl sie ein breites und sicheres Anwendungspotential hat, das jedoch mit einem hohen Energiebedarf verbunden ist. Deshalb wird hier genauer darauf eingegangen.

Zentrale Eigenschaften von Blockchain-Profilen sind a) nachträgliche Unveränderbarkeit von Daten, b) der Verzicht auf eine zentrale Vertrauensinstanz, c) eine hohe Resilienz und d) Transparenz durch öffentlich einsehbare Daten. Blockchain selber dient nicht als Speicher für die Daten, sondern speichert nur die Zugriffsberechtigungen. Die Daten werden in einem Speicher außerhalb der Blockchain (OFF-Blockchain) gespeichert (Wiefling et al., 2017).

Blockchain kann neben der Anwendung als Zahlungs- und Informationstool wie digitale Währungen auch für Lieferketten, Qualitätsmanagement im Bauwesen oder für die Intelligente Fertigung genutzt werden (Chai et al., 2020). Eine breite Verwendungsmöglichkeit eröffnet sich im Bereich Smart Contracts im Energiesektor und im Gesundheitswesen, IoT oder die Überwachung der Lebensmittelproduktion (Wiefling et al., 2017). Weitere Anwendungen sind Identitätsmanagement, Smart Grids oder elektronische Wahlen. Die Herausforderung der Blockchain-Technologie ist die Gewährleistung von Rechtssicherheit und Rechtskonformität. Smart Contracts erfüllen einerseits die Sicherstellung von Vertragserfüllungen und können andererseits auch ohne menschliches Eingreifen über Computercodes Sanktionierungen bzw. "Zwangsmaßnahmen" verhängen (Fill & Meier, 2020).

Die Blockchain-Technologie hat großes Potential für die Anwendung in der Kreislaufwirtschaft, um Herstellungsprozesse und Lieferketten in der Verfolgung und Rückverfolgung zu verbessern. Es werden dabei die Transaktionskosten reduziert und hohe Datensicherheitsstandards ermöglicht. Neben der Anwendung in der Kreislaufwirtschaft wird auf die Verbesserung von Vertraulichkeit und Wohlergehen von PatientInnen im Gesundheitswesen und als Hilfsmittel zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks in der Produktion hingewiesen (Upadhyay et al., 2021).

Konkrete Berechnungen für den Energiebedarf der Blockchain-Technologie gibt es nur für eine Anwendung, nämlich für das Mining von Bitcoins. Die IEA schätzte für 2018 einen Bitcoin-Stromverbrauch inklusive Kühlung von 45 TWh. In THG-Emissionen ausgedrückt wurden für 2018 ein relativ niedriger Wert von 10-20 Mt CO₂-e ermittelt, da die Bitcoin-Schürfzentren in Gebieten mit hohem Anteil an erneuerbarer Energie liegen würden. Schätzungen für das Jahr 2019 für den Bitcoin-Stromverbrauch variieren zwischen 20-80 TWh pro Jahr, dies entspricht etwa 0,1-0,3 % des weltweiten Bedarfs an elektrischer Energie (Kamiya, 2019).

In einer anderen Studie wurde für das Jahr 2019 für das globale Mining von Bitcoins 60-70 TWh elektrische Energie ermittelt (Hintemann & Hinterholzer, 2020b). Das entspricht etwa einem Fünftel des globalen Energiebedarfs für Rechenzentren. Dem gegenüber wird im Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index der Energiebedarf live dargestellt und ermittelte mit Stand Oktober 2021 einen jährlichen Erwartungswert von 102,43 TWh mit einer theoretischen Unter- und Obergrenze von 38,38 TWh bzw. 257,19 TWh. Wobei im April 2021 China eine Hashrate, das ist die gesamte Rechenleistung im Proof-of-Work Netzwerk, von 46 % hatte (University of Cambridge, 2021). Im Vergleich dazu ermittelte Digiconomist für

2021 einen jährlichen elektrischen Energiebedarf für Bitcoin-Mining von 170 TWh und einen damit verbundenen Carbon Footprint von 80,55 Mt CO₂ ([Digiconomist, 2021](#)).

Bezogen auf lokaler Ebene untersuchte eine Studie in Nature Communications den Energieverbrauch von Bitcoin-Mining in China. Es wurde prognostiziert, dass ohne politische Intervention im Jahr 2024 ein Peak des Energieverbrauchs für das Mining von Bitcoins in China erreicht wird, nämlich 296,59 TWh bzw. Emissionen von 130,5 Mt CO₂-e ([Jiang et al., 2021](#)).

Ein Artikel in Nature Sustainability stellte das Kryptomining in einen größeren Kontext und verglich den Energieverbrauch sowie den ökonomische Wert von Kryptomining mit dem Mineralienabbau. Dabei wurde errechnet, dass die Energieintensität für das Bitcoin-Mining höher ist als für die Gewinnung von Kupfer, Gold und seltenen Erden (mit Ausnahme von Aluminium), um einen bestimmten ökonomischen Marktwert zu erzielen ([Krause & Tolaymat, 2018](#)).

Zusammenfassend scheint in der Literatur der Energiebedarf für die Blockchain-Technologie im Allgemeinen und speziell Kryptomining im Rahmen der Digitalisierung in hohem Maße unterschätzt zu werden. Ausgehend von einer Schätzung für 2018 mit 45 TWh wird für das Mining von Bitcoins ein Energiebedarf im Jahr 2021 bis zu 170 TWh geschätzt. Allerdings wird nach anderer Quelle ohne Regulierung alleine für China im Jahr 2024 ein Peak von knapp 300 TWh erwartet. Eine anteilige Zuordnung der Blockchain-Technologie zum Energiebedarf von Rechenzentren oder anderen Recheneinheiten konnte nicht ermittelt werden.

3.3 Konzepte zur Energieeffizienzerhöhung und Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch Digitalisierung

Das Konzept der Reduzierung von THG-Emissionen der/durch Digitalisierung stützt sich auf a) Entkopplung des IKT-Sektors b) Erhöhung der Energieeffizienz der technischen Komponenten, c) Nutzung von erneuerbarer Energiequellen, sowie d) Energieeinsparung anderer Sektoren durch Digitalisierung und Verhaltensänderung.

3.3.1 Entkopplung der IKT-Sektors

Eine zentrale Frage der Digitalisierung ist, ob ökonomisches Wachstum vom Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur entkoppelt werden und zu Nachhaltigkeit führen kann. Es stellt sich auch die weitere Frage, ob Digitalisierung nachhaltige Entwicklung fördert oder behindert. Falls das nicht möglich ist, müssen andere Strategien neben dem Wirtschaftswachstum entwickelt werden. Dazu zählen Post-Wachstum, Degrowth, a-growth, Ökonomien ohne Wachstum und Teile der Kreislaufwirtschaft ([Lange et al., 2020](#)).

Die IEA stellte fest, dass die Entkopplung des IKT-Sektors vom Wirtschaftswachstum durch den Ausbau von hocheffizienten Cloud- und Hyperscale Rechenzentren bereits gelungen ist. Diese Erfahrung könne auch für die Energieeffizienz von Gebäuden genutzt werden, nämlich durch Maschinen-Lernen auf Basis vernetzter Geräte, Einsatz von Sensoren, Echtzeitmessungen und feinabgestimmter Regelung ([IEA, 2021](#)). Dem gegenüber wies eine andere Studie nach, dass IKT die Schwierigkeit der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Exergie nicht lösen kann und leitet dies aus den Erkenntnissen der ökologischen Ökonomie her. Einzig, wenn ein sektoraler Wandel zur Erhöhung des Tertiären Sektors auf

Kosten industrieller Produktion im großen Stil führt, würde sich der Gesamtenergieverbrauch reduzieren (Lange et al., 2020).

Die Frage, ob IKT den Energiebedarf tatsächlich reduzieren kann, wurde von einer deutschen Studie untersucht. Es wurden vier Effekte der Digitalisierung berücksichtigt: a) direkte Effekte durch den Lebenszyklus der IKT, b) Energieeffizienzsteigerung durch Digitalisierung, c) Wirtschaftswachstum durch Steigerung der Produktivität und d) sektorale Veränderungen durch IKT-Dienstleistungen. Die AutorInnen kommen zum Ergebnis, dass in Abwägung der gegenläufigen Effekte insgesamt der Energieverbrauch steigen wird. Begründet wird dies u.a. damit, dass Effizienzsteigerungen zu Rebound-Effekten führen, die IKT die Schwierigkeit der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Exergie nicht lösen kann und zukünftige energieintensive digitale Dienstleistungen zu traditionellen Produkten hinzu kommen (Lange et al., 2020).

Eine ähnliche Fragestellung wurde 2017 vom Wuppertal Institute for Climate zu smart energy feedbacks untersucht. In einer Feldstudie wurde die Bedeutung des menschliche Faktors für eine effektive Gestaltung von Öko-Feedback in Bezug auf den Heizenergieverbrauch in Privathaushalten ermittelt. Das Ergebnis ist, dass Smart-Home-Systeme keine signifikante Verringerung des Heizenergieverbrauchs versprechen können. Heizpraktiken der StudienteilnehmerInnen ließen erkennen, dass Komforttemperaturen, fehlende Kompetenzen und träge Heizsysteme die erwarteten Effekte der Feedback-Interventionen überlagern (Buhl et al, 2017).

Auf der technischen Ebene ermittelte eine Studie von 2020, dass aufgrund von Rebound-Effekten Energieeffizienzsteigerungen von Servern mit 67 % - 77,4 % zu einer Verbesserung der Performance führen und nicht zu Energieeinsparungen (Mitchell & York, 2020).

Ein Ausweg aus dem Problem des steigenden Energiebedarfs und damit höheren THG-Emissionen des Digitalsektors ist die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen. In den letzten Jahren haben kapitalstarke große Plattformen wie Google, Amazon, Facebook, Apple sowie Microsoft in großem Stil in den Ausbau erneuerbarer Energien investiert oder langfristige Verträge abgeschlossen (IEA, 2019). Somit sind Rechenzentrenbetreiber und Anbieter von Onlinediensten große Konkurrenten für PPA (Power Purchase Agreements) am Markt für erneuerbare Energien geworden (IEA, 2020).

3.3.2 Erhöhung der Energieeffizienz der technischen Komponenten

Prognosen zur zukünftigen Leistungssteigerung und Energieeffizienz von Rechenzentren hängen vorwiegend von den erwarteten Technologiesprüngen der elektronischen Bauelemente für die IT-Hardware ab. Auf Basis der Miniaturisierung nach dem Moore'schen Gesetz (1,5-jährliche Verdoppelung der Komponenten auf Silizium Chips) bei gleichzeitiger Reduzierung der Leistungsaufnahme von Transistoren wurden bisher Prognosen erstellt. Es bleibt jedoch die Unsicherheit, ob dieser technologische Trend aufrechterhalten werden kann oder unüberwindbare physikalische Grenzen entstehen (Hintemann et al., 2020).

Ein anderer Parameter für die Technologieentwicklung ist das Koomey-Gesetz, welches den Trend der Energieeffizienz in der Informatik beschreibt: Seit 1940 verdoppelt sich die Energieeffizienz alle 1,6 Jahre und seit 2000 alle 2,7 Jahre. Ein ähnlicher Trend kann für die Effizienz von Datenübertragungsnetzwerken beobachtet werden, bei welchen sich seit 2000 die Energieintensität alle zwei Jahre halbiert (IEA, 2020b).

Ein von Deutschland finanziertes Projekt, TEMPRO-Total Energy Management for Professional Data Centers, hat das Ziel einer Entwicklung eines Technologie-Radars, das die ganzheitliche Energie- und Ressourceneffizienz von Rechenzentren auf Lebenszyklusbasis inklusive der Herstellung der Infrastruktur evaluiert und bewertet (Hintemann & Hinterholzer, 2018). Im Bereich der Serverkühlung kann die Energieeffizienz durch Verwendung einer Wasserkühlung wegen der höheren Wärmekapazität von Wasser gegenüber Luft erhöht werden. Die Abwärme kann rückgewonnen und beispielsweise für die Raumheizung von Büros weiterverwendet werden.

Ein weiteres Ziel ist das Auffinden energieeffizienter Technologien für die Stromversorgung, wobei sich folgende innovative Konzepte herauskristallisiert haben: Flexibilität für das Smart Grid mithilfe der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) und eines Diesel-Generators (Rechenzentren als Quelle von Regelleistung zur Stabilisierung des Stromnetzes) und weiters eine zentrale Gleichstromversorgung zur Reduzierung von Umwandlungsverlusten (Hintemann & Hinterholzer, 2018). Im Bereich der Energieversorgung liegt das höchste Effizienzpotential für die USV in der Nutzung von Brennstoffzellen alternativ zu Dieselaggregaten (Hintemann et al., 2020). Auf IKT-Ebene könnte durch neue Servertechnologien mit Software-gesteuerter Stromversorgung eine Optimierung und Anpassung an die jeweils aktuelle Arbeitslast erfolgen (Hintemann & Hinterholzer, 2018).

Das dritte Ziel fokussiert auf energieeffiziente IT-Komponenten und Management-Tools, die die Energieeffizienz der Hardware weiter erhöhen. Die drei vielversprechendsten Technologien hierfür sind Enterprise resource planning (ERP)-Software für Datenzentren, Energieeffizienz-Analyse-Software zur besseren Auswertung von Sensor- und Messdaten sowie Neuromorphes Computing auf Basis von neuromorphen Chips, die nach dem Vorbild des menschlichen Gehirns lernen (Hintemann & Hinterholzer, 2018).

Zur Erhöhung der Energieeffizienz wurde in China ein Infrastruktur-Management-System für Rechenzentren entwickelt, das auf künstliche Intelligenz (KI) und Big Data Technologie basiert. Auf Basis von KI kann eine Fehlerquelle im System in Echtzeit lokalisiert und bestätigt werden. Big Data-Technologien unterstützen eine Vorwarnfunktion für Überlastung, wie beispielsweise die Erfassung von Strom- und Spannungsdaten von Batterien und Kondensatoren. Weiters ermöglichen KI und Big Data-Technologien eine dynamische energiesparende Steuerung der Infrastruktur, wie die Regelung des Kühl- und Stromversorgungssystems (Qi et al., 2019).

In einer deutschen Studie wurde das Projekt Green Cloud Computing (GCC) vorgestellt, in dem Kennzahlen für die Umwelteffekte von Cloud-Dienstleistungen bezogen auf deren Service-Einheiten entwickelt wurden. Es werden der Rohstoffaufwand, THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand und Wasserverbrauch erfasst und den Cloud-Dienstleistungen zugeordnet (Gröger et al., 2021).

3.3.3 Variable Parameter für Energieprognosen von Rechenzentren

Die energie- und THG-emissionsrelevanten Parameter eines Rechenzentrums sind folgende: a) Global installierte Speicherkapazität, b) Globaler IP-Datenverkehr in Rechenzentren, c) Arbeitslasten im Rechenzentrum und Datenverarbeitungsinstanzen, d) Weltweit installierte Basis-Server, e) Durchschnittliche Power Usage Effectiveness (PUE), f) Typische Energieintensität des Servers (Wh pro Berechnungsvorgang), g) Durchschnittliche Anzahl von

Servern pro Arbeitslast, h) Durchschnittlicher Energieverbrauch des Speicherlaufwerks (kWh/TB), i) Energiequelle, j) Kühlung, k) Stromversorgung, l) Verlagerung von Dienstleistungen von kleinen Servern auf Hyperscale-Rechenzentren, m) Politische Umsetzung von aktuellen Energieeffizienzstandards aller IT-Komponenten ([Masanet et al., 2020](#)).

Prognosen für den zukünftigen elektrischen Energiebedarf hängen weiters von den vorhandenen "Ausgangswerten", regionalen Unterschieden und Störungen oder Ausfälle ab. Der Autor stellt darüber hinaus fest, dass der Datenverkehr in GB/s bzw. kWh/GB möglicherweise nicht die beste Proxy-Metrik für die Schätzung des Stromverbrauchs von Computern ist. Die funktionellen Einheiten "operation" und "Joule per operation" scheinen für die Vorhersage und Skalierung von Bottom-up-Modellen vielversprechender zu sein ([Andrae, 2020](#)).

3.3.4 "Greening through ICT"

Die immer mehr aufkommenden Vorbehalte gegenüber den erwarteten Anstieg des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen der Digitalisierungs-Infrastruktur führten zu dem Argument, dass die THG-Emissionen anderer Sektoren durch digitale Anwendungen reduziert werden ("Greening through ICT"). Es könnte jedoch auch ein Rebound-Effekt auftreten. Der sogenannte "Enablement-Faktor" gibt an, um wieviel eine Branche durch den Einsatz von IKT mehr THG-Emissionen einspart (indirekter Effekt) als der IKT-Sektor selbst für diesen Service verursacht (direkter Effekt). Je nach Studie und untersuchten Sektoren schwankt dieser Faktor für 2030 zwischen 0,7 im schlechtesten Fall und 9,7 im besten Fall. Es könnte auch ein sogenannter "Induktionseffekt" eintreten, der eine neue Nachfrage von Gütern durch Änderung der Technologie oder Digitalisierung erzeugt. Rebound-Effekte werden in den meisten Studien nur teilweise oder gar nicht berücksichtigt ([Bieser et al., 2020](#)).

Die Nachhaltigkeitswirkung von Rechenzentren liegt nicht nur in der Steigerung der Energieeffizienz der Systeme selbst, sondern es können auch durch die Anwendung der Digitaltechnik die Mobilität und damit Treibhausgasemissionen signifikant reduziert werden, indem Verkehrsströme effizienter gestaltet oder sogar gänzlich wegfallen. Weiters können Wirtschaftsprozesse aller Sektoren ressourcenschonender realisiert werden ([Hintemann & Hinterholzer, 2020a](#)).

Ein Beispiel für erwartete Energieverbrauchsreduktionen ist der Transportsektor, in dem durch virtuelle Mobilität in Form von Video-Konferenzen und Video-Meetings vor allem Flugreisen und der Individualverkehr ersetzt werden sollen und weiters eine bessere Logistik zur Vermeidung von Leerfahrten von LKWs. Andere Einsatzbereiche der Digitalisierung sind das Monitoring und die Steuerung des Energieverbrauch in Gebäuden, effizientere Abläufe in der Industrieproduktion oder der Ersatz von Printmedien durch digitale Medien. Eine neue Anwendung wäre in der Landwirtschaft die digitale Messung der Bodenbeschaffenheit für bedarfsgerechten Düngemiteleinsetz. Darüber hinaus kann mittels Digitalisierung die Überwachung und Steuerung von Landmaschinen, ein Monitoring des Gesundheitszustands von Tieren und die Reduktion von Lebensmittelabfällen umgesetzt werden ([Bieser et al., 2020](#)).

Durch den Einsatz der Digitalisierung im Bergbau könnten mittels Sensoren und Lagerstättenmodellierungen die Kosten für die Energierohstoffgewinnung um 10-20 %

gesenkt und die technisch förderbaren Öl- und Gasreserven um etwa 5 % erhöht werden. Das Monitoring von Öl- und Gasleitungen mittels Drohnen führt zu einer Effizienzsteigerung von notwendigen Wartungsarbeiten. Insgesamt wird durch Digitalisierung des Energiesektors eine Reduzierung von nur 5 % der Energieerzeugungskosten erwartet. Insgesamt sieht die IEA das größte Transformationspotential der Digitalisierung im Energiesektor in der Schaffung von Schnittstellen zu anderen Sektoren. Durch "Smart Demand Response" von intelligenten (Haushalts)Endgeräten oder Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge könnten global 185 Gigawatt an Systemflexibilität generiert und somit Kraftwerke eingespart werden. (IEA, 2017).

Das Dienstleistungsunternehmen Deloitte untersuchte die Auswirkungen von sieben digitalen Technologien auf die Ziele der Agenda 2030: Digitaler Zugang für alle Menschen, schnelles Internet, Cloud-Services, IoT, Kognition, virtuelle Realität und Blockchain. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass die CO₂-e Emissionen, die im Jahr 2030 durch eine größere Verbreitung dieser Anwendungsfälle vermieden werden, fast siebenmal so groß sind wie das Wachstum des gesamten Emissions-Fußabdrucks des IKT-Sektors zwischen heute und 2030. Alle diese Technologien sollen über Artificial Intelligence (AI) und 5G zusammenarbeiten. In einem ambitionierten Szenario zur Dekarbonisierung für 2030 würde der THG-Fußabdruck des IKT-Sektors um 70 Mt CO₂ sinken und durch die Anwendung der Digitaltechnologien zusätzlich weitere 3,5 Gt CO₂ in anderen Sektoren (Deloitte, 2019).

Zusammenfassend stützt sich Nachhaltigkeit der Digitalisierung auf folgende 6 Säulen:

- **Entkopplung** des Digitalsektors vom Wirtschaftswachstum
- Erhöhung der **Energieeffizienz** der technischen Komponenten schneller als Erhöhung der Datenrate und Workloads (vgl. Rebound-Effekte)
- Nutzung von **erneuerbarer Energiequellen**
- "**Greening through ICT**": höhere Energieeinsparung anderer Sektoren durch Digitalisierung und Vermeidung von Rebound-Effekten
- **Sektorale Veränderungen**: Erhöhung des Tertiären Sektors auf Kosten industrieller Produktion durch IKT-Dienstleistungen
- **Verhaltensänderung** der Gesellschaft v.a. durch virtuelle Mobilität

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Technische Infrastruktur für die Digitalisierung besteht aus drei Hauptkomponenten, das sind Rechenzentren, Datennetze und Endgeräte. Innerhalb der einzelnen Kategorien gibt es eine Vielzahl an technischen Varianten. Vor allem im Bereich der Endgeräte sind neben den derzeitigen IKT- und Freizeitelektronik-Geräten zukünftig global Milliarden an Robotern, Drohen, Satelliten, Sensoren, Aktoren, Steuergeräten und Überwachungskameras zu erwarten.

Der globale Gesamtenergieverbrauch der digitalen Technologien wird nach einer aktuellen Studie für das Jahr 2020 auf einen erwarteten Wert von knapp 2000 TWh für den Betrieb von Rechenzentren, Datennetzen und Endgeräten sowie die Herstellung der Geräte geschätzt. Prognosen für 2030 zeigen eine Erhöhung des Energieverbrauchs um dem Faktor 1,6-15. Dies ist abhängig von einer Vielzahl von Parametern zur Energieeffizienzverbesserung und erwarteten Technologiesprüngen, der Einschätzung des Datenverkehrs und Berechnungs-

vorgänge sowie der Anwendungsbereiche und der Anzahl und Art der gesamt im Betrieb befindlichen Geräte. Hinzu kommt bei internetfähigen Endgeräten die Problematik, welcher Anteil der Digitalisierung zugerechnet wird.

Der IT-Sektor steht unter großem Druck, durch den exponentiell wachsenden Energieverbrauch die THG-Emissionen zu minimieren. Einem erwarteten Anstieg der THG-Emissionen wird neben Effizienzsteigerungen dadurch begegnet, dass einerseits Rechenzentren und Datennetze über erneuerbare Energiequellen versorgt werden und andererseits erwartet wird, dass durch die Digitalisierung anderer Sektoren insgesamt ein 0,7-bis 9,7-faches gegenüber dem Eigenbedarf eingespart wird.

Dies hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass der kapitalstarke IT-Sektor selbst in großem Stil in erneuerbare Energie bzw. langfristige Ökostrom-Verträge mit Energieversorgern investiert hat. Dies könnte zu einer konkurrierenden Situation führen, dass leicht und damit kostengünstiger erschließbare erneuerbare Energiequellen vom Markt verschwinden und andere Sektoren und Branchen, insbesondere nationale kleinere Unternehmen oder Kommunen, auf teurere und konfliktträchtigere Energieressourcen zurückgreifen müssen.

Zukünftige Herausforderungen sind neben der Energieeffizienz elektrischer Geräte und Komponenten der Energiebedarf der vielfältig anwendbaren Blockchain-Technologie, die Entwicklung des 5G-Netzes und die Erfassung und Verarbeitung von Big Data.

Berechnungen zu nachhaltiger Entwicklung legen den Schluss nahe, dass generell Aktivitäten im Internet klimafreundlicher sind als Aktivitäten in der realen Welt, die oftmals zwangsläufig mit motorisierter Mobilität im Zusammenhang stehen.

Für viele Details der Digitalisierung und den Übergang ins Zeitalter des "Internets der Dinge" besteht weiterhin großer Forschungsbedarf, der ganzheitlich und interdisziplinär vorangetrieben werden soll.

Abkürzungen

1080p: Videoauflösung von 1920 x 1080 Pixeln; a: Anno (Jahr); Anm.: Anmerkung der Autorin; CO₂-e: Kohlenstoffdioxid-Äquivalent; EB: Exabyte; E&M: Entertainment & Media; EU: Europäische Union; GB: Gigabyte; Gb: Gigabit; Gt: Gigatonnen; h, hr: hour (Stunde); IEA: International Energy Agency; IKT: Informations- und Kommunikationstechnologien; IoT: Internet-of-Things; IP: Internet Protocol (IP-Adresse: Adresse zur Identifizierung eines Netzwerk-Geräts); IT: Informationstechnik; kt: Kilotonnen; kWh: Kilowattstunden; Mbps: Megabit per second; M2M: Machine to machine; Mb: Megabit; Mio.: Millionen; MM&A: powering machines, motors, and appliances; Mrd.: Milliarden; Mt: Megatonnen; o.J.: ohne Jahresangabe; PJ: Petajoule; PUE: Power Usage Effectiveness (technische Kennzahl zur Darstellung der Energie-Effizienz von Rechenzentren); s: Sekunde; t: Tonnen; TB: Terabyte; Tbps: Terabit per second; THG: Treibhausgas (Emissionen); TWh: Terawattstunden; USV: Unterbrechungsfreie Stromversorgung; WAN: Wireless access network; Wh: Wattstunden; Wi-Fi: Wireless fidelity; WLAN: Wireless Local Area Network; ZB: Zettabyte

Literatur

- Abbasi, Ahmed; Sarker, Sprateek; Chiang, Roger H.L. (2016) Big Data Research in Information Systems: Toward an Inclusive Research Agenda. *Journal of the Association for Information Systems*, Volume 17, Issue 2, pp. i-xxxii, February 2016. DOI: 10.17705/1jais.00423.
- Andrae, Anders S.G. (2020a) New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letters*, June 2020. DOI: 10.30538/psrp-easl2020.0038.
- Andrae, Anders S.G. (2020b) Hypotheses for Primary Energy Use, Electricity Use and CO2 Emissions of Global Computing and Its Shares of the Total Between 2020 and 2030. *WSEAS Transactions on Power Systems* • March 2020. E-ISSN: 2224-350X, Volume 15, 2020, pp. 50-59. DOI: 10.37394/232016.2020.15.6.
- Andrae, Anders S.G. (2021) Internet's handprint. *Eng. Appl. Sci. Lett.* 2021, 4(1), 80-97; doi:10.30538/psrp-easl2021.0065.
- Andrae, Anders; Edler, Thomas (2015) On Global Electricity Usage of Communication Technology Trends to 2030. *Challenges* 2015, 6, 117-157; doi:10.3390/challe6010117.
- Bieser, Jan; Hintemann, Ralph; Beucker, Severin; Schramm, Stefanie; Hilty, Lorenz (2020) Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Kurzstudie. Bitkom e. V. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Berlin, Germany.
- Buhl, J., Hasselkuß, M., Suski, P., Berg, H. (2017) Automating Behavior? An Experimental Living Lab Study on the Effect of Smart Home Systems and Traffic Light Feedback on Heating Energy Consumption. *Current Journal of Applied Science and Technology* 22, 1–18. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/34414> [Sept. 2021].
- Chai, H.; Chen, X.; Wang, H. (2020) Special issue: Blockchain technology application. *Front. Eng. Manag.* 7, 467–470 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0141-1> [Sept. 2021].
- Cisco (2020) Cisco Annual Internet Report (2018–2023). White paper. Cisco public. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf> [Sept. 2021].
- Corbett, Charles J. (2018) How Sustainable Is Big Data? *Production and Operations Management*, 27(9), 2018-09-01. DOI 10.1111/poms.12837. <https://escholarship.org/uc/item/01z6d3xn> [Sept. 2021].
- De Vries, Alex; Stoll, Christian (2021) Bitcoin's growing e-waste problem. *Resources, Conservation & Recycling* 175 (2021) 105901. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901> [Sept. 2021].
- Deloitte MCS Limited (2019) Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030. Summary. Im Auftrag von GeSI-Global e-Sustainability Initiative.
- Digiconomist (2021) Bitcoin Energy Consumption Index. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/> [Sept. 2021].
- DNV (2021) Energy Transition Outlook. A global and regional forecast to 2050.
- Dolui, Koustabh; Datta, Soumya Kanti (2017) Comparison of Edge Computing Implementations: Fog Computing, Cloudlet and Mobile Edge Computing. *IEEE 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, 6-9 June 2017, Geneva, Switzerland. DOI: 10.1109/GIOTS.2017.8016213.
- Etzion, D.; Aragon-Correa, J.A. (2016) Big data, management, and sustainability: Strategic opportunities ahead. *Organization & Environment* 29(2) 147-155.
- Fill, Hans-Georg; Meier, Andreas (2020) Blockchain kompakt. Grundlagen, Anwendungsoptionen und kritische Bewertung. Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-27460-3.

Gröger, Jens; Liu, Ran; Stobbe, Lutz; Druschke, Jan; Richter, Nikolai (2021) Green Cloud Computing Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Abschlussbericht. Im Auftrag des (deutschen) Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, Juni 2021, TEXTE 94/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf [Sept. 2021].

Hiltner, Ken (o.J.) A Nearly Carbon-Neutral Conference Model. Overview / Practical Guide. University of California at Santa Barbara (UCSB). <https://hiltner.english.ucsb.edu/index.php/ncnc-guide/> [Sept. 2021].

Hintemann, Ralph; Clausen, Jens (2018) Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin, Germany.

Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2018) Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. IEEE Congress on Sustainable Technologies, Cambridge: 2018. (WCST 2018). https://www.researchgate.net/publication/330359801_Technology_radars_for_energy-efficient_data_centers_A_transdisciplinary_approach_to_technology_identification_analysis_and_evaluation [Sept. 2021].

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2020a) Videostreaming: Energiebedarf und CO₂-Emissionen; Hintergrundpapier. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, Berlin.

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2020b) Rechenzentren in Europa. Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung. Berlin: Borderstep Institut.

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon; Clausen, Jens (2020) Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung – Teil 2. Berlin: Borderstep Institut.

IEA (2017) Digitalization & Energy. OECD/IEA.

IEA (2019) Data centres and energy – from global headlines to local headaches?, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches> [Sept. 2021].

IEA (2019b) Electricity generation by fuel and scenario, 2018-2040. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-generation-by-fuel-and-scenario-2018-2040> [Sept. 2021].

IEA (2020) Data Centres and Data Transmission Networks, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> [Sept. 2021].

IEA (2020a) Global Energy Review 2019. The latest trends in energy and emissions in 2019.

IEA (2020b), The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines> [Sept. 2021].

IEA (2021a) Global Energy Review 2021, Overview. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> [Sept. 2021].

IEA (2021b) 5 ways Big Tech could have big impacts on clean energy transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/5-ways-big-tech-could-have-big-impacts-on-clean-energy-transitions> [Sept. 2021].

Jiang, Shangrong; Li, Yuze; Lu, Quanying; Hong, Yongmiao; Guan, Dabo; Xiong, Yu; Wang, Shouyang (2021) Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. NATURE COMMUNICATIONS | (2021)12:1938 | <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22256-3> [Sept. 2021].

Kamiya, George (2019), Bitcoin energy use - mined the gap. Commentary-5 July 2019, International Energy Agency-IEA, Paris. <https://www.iea.org/commentaries/bitcoin-energy-use-mined-the-gap> [Sept. 2021].

Kamiya, George (2020) Factcheck: What is the carbon footprint of streaming video on Netflix? CarbonBrief, 25 February 2020 13:08. <https://www.carbonbrief.org/factcheck-what-is-the-carbon-footprint-of-streaming-video-on-netflix> [Sept. 2021].

Keslassy, Elsa (2019) Netflix's Cindy Holland Says Subscribers Watch an Average of Two Hours a Day. Variety, Mar 11, 2019, 4:06am. <https://variety.com/2019/tv/news/netflix-cindy-holland-subscribers-watch-average-two-hours-day-1203159868/> [Sept. 2021].

Krause, M.J., Tolaymat, T. Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. Nat Sustain 1, 711–718 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7> [Sept. 2021].

Lange, Steffen; Pohl, Johanna; Santarius, Tilman (2020) Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? Ecological Economics 176 (2020) 106760.

Malmodin, Jens; Lundén, Dag (2018) The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. Sustainability 2018,10, 3027; doi:10.3390/su10093027.

Masanet, Eric; Shehabi, Arman; Ramakrishnan, Lavanya; Liang, Jiaqi; Ma, Xiaohui; Walker, Benjamin; Hendrix, Valerie; Mantha, Pradeep (2013) The Energy Efficiency Potential of Cloud-based Software: A U.S. Case Study. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. https://crd.lbl.gov/assets/pubs_presos/ACS/cloud_efficiency_study.pdf [Sept. 2021].

Masanet, Eric; Shehabi, Arman; Lei, Nuoa; Smith, Sarah; Koomey, Jonathan (2020) Recalibrating global data center energy-use estimates. Science, 28 February 2020, VOL 367 Issue 6481, pp. 984-986.

Mitchell, Ronald B.; York, Richard (2020) Reducing the web's carbon footprint: Does improved electrical efficiency reduce webserver electricity use? Energy Research & Social Science 65 (2020) 101474.

Netflix (2019) Environmental Social Governance 2019 Sustainability Accounting Standards Board (SASB) Report.

Nooruzzaman, M.; Fernando, X. (2021) "Hyperscale Data Center Networks with Transparent HyperX Architecture," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 6, pp. 120-125, June 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2001070.

Obringer, Renee; Rachunok, Benjamin; Maia-Silva, Debora; Arbabzadeh, Maryam; Nateghi, Roshanak; Madani, Kaveh (2021) The overlooked environmental footprint of increasing Internet use (Perspective). Resources, Conservation & Recycling 167 (2021) 105389.

Ookla (2021) Speedtest. <https://www.speedtest.net/ookla-5g-map> [Sept. 2021].

OVO-Energy (2019) 'Think Before You Thank': If every Brit sent one less thank you email a day, we would save 16,433 tonnes of carbon a year - the same as 81,152 flights to Madrid. Press releases November 2019. <https://www.ovoenergy.com/ovo-newsroom/press-releases/2019/november/think-before-you-thank-if-every-brit-sent-one-less-thank-you-email-a-day-we-would-save-16433-tonnes-of-carbon-a-year-the-same-as-81152-flights-to-madrid.html> [Sept. 2021].

Prognos AG; Z_punkt GmbH (2021) VOR AUS: schau! II. Runde: 30 Themen. Beauftragt vom [Deutschen] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Februar 2021. https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/Foresight_30_Themenblaetter.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Sept. 2021].

Qi, Shuguang; Zhang, Yu; Wang, Mengdi (2019) Study and Application on Data Center Infrastructure Management System Based on Artificial Intelligence (AI) and Big Data Technology. 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). DOI: 10.1109/IFEEEC47410.2019.9014987

Schantl, Mario, Online Marketing (2021) Breitband Internetanbieter. Den besten Internetanbieter in Österreich finden. <https://www.breitbandinternetanbieter.at/> [Sept. 2021].

TeleGeography (2021) Submarine Cable. <https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions> [Sept. 2021].

University of Cambridge (2021) Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Bitcoin network power demand, updated every 24 hours. <https://cbeci.org/index> [Sept. 2021].

Upadhyay, Arvind; Mukhuty, Sumona; Kumar, Vikas; Kazancoglu, Yigit (2021) Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal of Cleaner Production* 293 (2021) 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130> [Sept. 2021].

Urban, Bryan; Roth, Kurt; Singh, Mahendra; Howes, Duncan (2019) Residential Consumer Electronics Energy Consumption in the United States in 2017. Proceedings of the 9th international conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL '17). DOI: 10.2760/667696.

Wiefling, Stephan; Lo Iacono, Luigi; Sandbrink, Frederik (2017) Anwendung der Blockchain außerhalb von Geldwährungen. *DuD • Datenschutz und Datensicherheit* 8 | 2017.

Zhong, Haiwang; Tan, Zhenfei; He, Yiliu; Xie, Le; Kang, Chongqing (2020) Implications of COVID-19 for the Electricity Industry: A Comprehensive Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 6, No. 3, September 2020, pp. 489-495. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.02500.