

## **Future Energy** Lab

### **Neue Energiebedarfe digitaler Technologien**

**Untersuchung von Schlüsseltechnologien  
für die zukünftige Entwicklung des  
IKT-bedingten Energiebedarfs**

# Impressum

**Herausgeber/Auftraggeber:**

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)  
Chausseestraße 128 a  
10115 Berlin  
Tel: +49 (0)30 66 777-0  
Fax: +49 (0)30 66 777-699  
E-Mail: [info@dena.de](mailto:info@dena.de) / [futureenergylab@dena.de](mailto:futureenergylab@dena.de)  
Internet: [www.dena.de](http://www.dena.de) / [www.dena.de](http://www.dena.de) [www.future-energy-lab.de](http://www.future-energy-lab.de)

**Autorinnen und Autoren/Projektpartner:**

Dr. Ralph Hintemann, Borderstep Institut (Projektleitung)  
Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut  
Tim Grothey, Borderstep Institut  
Simon Hinterholzer, Borderstep Institut  
Janna Axenbeck, ZEW  
Dr. Thomas Niebel, ZEW  
Robin Sack, ZEW

**Redaktion:**

Eva Yanjun Steiger, dena  
Hendrik Zimmermann, dena

**Bildnachweis:**

©woravut/AdobeStock

**Stand:**

09/2023

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

**Bitte zitieren als:**

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023) „Neue Energiebedarfe digitaler Technologien – Untersuchung von Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs“



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.

# Vorwort

Die Gestaltung einer zunehmend dezentralen Energieversorgung wird auf digitale Zukunftstechnologien angewiesen sein – hierüber herrscht Einigkeit unter den Akteuren der Energiewirtschaft. Digitale Zukunftstechnologien werden in allen Sektoren und für die Sektorenintegration zu Schlüsselfaktoren, um die **klimapolitischen Ziele** zu erreichen: Die notwendigen Energiewendebedingungen Koordination, Flexibilisierung und Effizienz können nur digital sichergestellt werden. In den zurückliegenden Jahren hat diese Funktion der Digitalisierung als Enabler der Energiewende (und auch von Verkehrswende und Kreislaufwirtschaft) die Debatten dominiert.<sup>1</sup> Das **Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW)** stellt diesbezüglich einen wichtigen Meilenstein dar.

Zugleich wird der Ruf nach einer kritischen Auseinandersetzung mit den **Stromverbräuchen digitaler Technologien und Anwendungsfelder** selbst zunehmend lauter. In den zurückliegenden Monaten und Jahren haben Politik, Digitalwirtschaft und Zivilgesellschaft intensiv über das **Energieeffizienzgesetz des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)** diskutiert, das der Bundestag Ende September 2023 beschlossen hat. Darin vorgeschriebene höhere Effizianzforderungen an neue große Rechenzentren können diese für mögliche zukünftige Energie- und/oder Wirtschaftskrisen stärken, da Energiepreisschwankungen dann geringere Auswirkungen auf den Betrieb energieeffizienterer Rechenzentren haben. Zudem sinken mit zunehmender Energieeffizienz die „Produktionskosten“ der Rechenzentren (IT-Leistung pro Einsatz von Strom), was den Wirtschaftsstandort Deutschland/Europa stärken kann. Insbesondere vor dem Hintergrund einiger Ausnahmen im Gesetz und auch eines erwarteten Anstiegs des Edge Computing durch die Entwicklung eines Internet of Things ist jedoch anzunehmen, dass das Energieeffizienzgesetz nur einen ersten Markstein darstellt auf dem Weg hin zu den energieeffizienten digitalen Infrastrukturen, die Deutschland und Europa so dringend brauchen.

Neben der Effizienz von Rechenzentren als Basisinfrastruktur rückt auch die Effizienz von Übertragungstechnologien und neuen digitalen softwareseitigen Anwendungen zunehmend in den Fokus. Vor diesem Hintergrund zeigt die hier vorliegende Studie **„Neue Energiebedarfe digitaler Technologien“**, welche Stromverbräuche digitale Technologien künftig auslösen. Da diese Verbräuche relevante Größenordnungen einnehmen werden, sollte der Einsatz digitaler Technologien vor dem Hintergrund ihrer ökologischen, sozialen und ökonomischen Wirkungen überprüft und bewertet werden. Denn nicht jede digitale Technologie und deren Anwendung ist nachhaltig und zukunftsfähig.

Die vorliegende Studie des Borderstep Instituts stellt den **Wissensstand** zu den Strombedarfen von Endgeräten, Rechenzentren und Übertragungstechnologien weltweit und in Deutschland bis April 2022 dar. Sie bietet ferner einen Überblick über die bis dahin verfügbare Literatur zu den Strombedarfen der ausgewählten Schlüsseltechnologien **Künstliche Intelligenz, 5G-Mobilfunk, Internet of Things** und **Distributed-Ledger-Technologies**. Hierbei ist zu beachten, dass Hard- und Software einander bedingen – ebenso wie Infrastrukturen und Anwendungen bzw. Netzwerkarchitekturen. Im Feld dieser zum Teil komplexen Wechselwirkungen liegen zusätzliche Forschungsbedarfe, die die dena z. B. im Projekt **„Energieeffiziente Künstliche Intelligenz“** bereits adressiert.

---

<sup>1</sup> Deutsche Energie-Agentur (dena) (2017) (Hrsg.): „Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz. Eine Analyse digitaler Energiedienstleistungen sowie Handlungsempfehlungen zur verstärkten Nutzung ihrer Potenziale“, [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9228\\_dena-Analyse\\_Digitalisierung\\_Enabler\\_Steigerung\\_Energieeffizienz.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9228_dena-Analyse_Digitalisierung_Enabler_Steigerung_Energieeffizienz.pdf); Strüker, Jens et al. (2021): Decarbonisation through digitalisation: Proposals for transforming the energy sector, Bayreuther Arbeitspapiere zur Wirtschaftsinformatik, No. 69, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Bayreuth, [https://doi.org/10.15495/EPub\\_UBT\\_00005762](https://doi.org/10.15495/EPub_UBT_00005762).

Neben dem Wissensstand zu Strombedarfen und dem Überblick über verfügbare Literatur stellt die vorliegende Studie relevante Einflussfaktoren auf den Strombedarf dieser Technologien zusammen und gibt Empfehlungen, wie dieser Bedarf reduziert werden könnte. Diese **Handlungsempfehlungen** sind überwiegend informatorischer oder koordinativer Natur. Bei neuen Technologien sind Transparenz und Austausch wichtige erste Schritte, um in Zukunft energieeffizientere digitale Infrastrukturen und Technologien zu realisieren. In Bezug auf die Hardware sind Endgeräte, Rechenzentren und Übertragungstechnologien in der aktuellen politischen Diskussion:

- In dieser Studie wird deutlich, dass im Vergleich zu Rechenzentren und Übertragungstechnologien das Gros der Emissionen bei den **Endgeräten** anfällt (siehe die vergleichende Darstellung in Abbildung 8 auf Seite 15).
- Die Bundesregierung adressiert im Energieeffizienzgesetz (siehe oben) bereits Herausforderungen hinsichtlich der Energieeffizienz von **Rechenzentren**. Bei der Stromverbrauchseffektivität, der Abwärmenutzung, dem Kühlwirkungsgrad und dem Einsatz von erneuerbaren Energien sowie Umweltmanagementsystemen gibt es noch Innovationspotenzial in Bezug auf Technik und politische Rahmenbedingungen.
- Bei den **Übertragungstechnologien** stellt die sich in der Umsetzung befindende flächendeckende Versorgung mit Glasfaser einen wichtigen Schritt dar.

Die Basis für die Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren sowie für die Abschätzung der Auswirkungen in dieser Studie waren Literaturrecherchen sowie ein Workshop mit Expertinnen und Experten. Die Studie zeigt damit wichtige Anknüpfungspunkte für weiter gehende quantitative Analysen auf. Sie stellt einen Ausgangspunkt für weitere Schritte dar, die die dena zum Teil schon jetzt in den Blick nimmt:

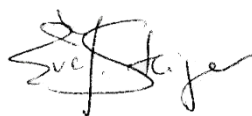
- Die dena untersucht im laufenden Projekt „**Energieeffiziente Künstliche Intelligenz**“ bis Ende 2023 in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut (HHI) die Effizienzwirkungen von neuartigen Rechenbeschleunigern sowie Verfahren zur Kompression und Parameterreduktion neuronaler Modelle. Im Projekt gelingt es, Anwendungen Künstlicher Intelligenz auf Soft- und Hardwareseite deutlich energieeffizienter zu gestalten.
- Im Projekt „**Energieverbrauch digitaler Netzwerke**“ nimmt die dena die Strombedarfe von Distributed-Ledger-Technologies in den Blick und zeigt im Kontext des Trilemmas von Umwelteinfluss, Performance und IT-Sicherheit konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten auf.
- Die dena untersucht im Projekt „**klimakommune.digital**“ die Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes von 5G-Mobilfunk und Internet of Things. Dabei wird die Stadt Hagen zu einer mustergültigen Smart City mit Fokus auf Klimaschutz und Energiewende transformiert.

Für die Gegenwart und Zukunft gilt es, digitale Technologien und deren Anwendungen **so sinnvoll und energieeffizient wie möglich** einzusetzen. Diese Analyse zeigt Ansätze auf, wie dies bei den analysierten Schlüsseltechnologien gelingen kann. Für die tatsächliche Gestaltung einer möglichst klimaschonenden Digitalisierung sind weitere Forschung und Umsetzung in Wissenschaft und Wirtschaft ebenso notwendig wie klare politische Leitplanken und die Impulse einer wachen Zivilgesellschaft. Liebe Leserinnen und Leser, mit dieser Analyse möchten wir sie einbinden in einen Dialog zum effizienten und klimaschonenden Einsatz von digitalen Technologien und Anwendungen.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen!



Hendrik Zimmermann  
Teamleiter Digitale Technologien



Eva Yanjun Steiger  
Expertin Digitale Technologien

# Executive Summary

Die schnell voranschreitende Digitalisierung führt zu gravierenden Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft. Als Enabler bietet sie enorme Chancen für mehr Energieeffizienz und die Integration von erneuerbaren Energien – und damit für Klimaschutz und Nachhaltigkeit. Gleichzeitig verbrauchen digitale Infrastrukturen und Geräte schon heute viel Strom, was einen Trend erkennbar macht, der sich in Zukunft weiter verstärken wird. Daher befasst sich die vorliegende Analyse mit den künftigen Strombedarfen der Digitalisierung.

Ziel dieser Analyse ist es, die **Energiebedarfe neuerer digitaler Technologien und Anwendungen abzuschätzen und zu bewerten**, um mögliche **Effizienzpotenziale zu identifizieren**. Dafür wurde zunächst eine Literaturanalyse durchgeführt und anschließend im Rahmen eines Expertinnen- und Expertenworkshops Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung der Strombedarfe dieser Technologien identifiziert und relevante Einflussfaktoren für ihren Strombedarf ermittelt. Darauf basierend wurden Handlungsempfehlungen entwickelt.

Der Stand der Forschung zur Entwicklung des Strombedarfs der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) wird im Rahmen einer Literaturanalyse zusammengefasst, welche Studien des Zeitraums 2015 bis April 2022 heranzieht. Die Methodiken der Berechnung aktueller und zukünftiger Strombedarfe umfassen dabei sowohl Bottom-up-Strukturmodelle als auch Top-down-Extrapolationen. Es werden die Entwicklungen des IKT-Strombedarfs weltweit sowie speziell in Deutschland jeweils für Endgeräte, Datennetze und Rechenzentren betrachtet.

Über die exakte **Höhe des Strombedarfs der Digitalisierung** besteht in der Forschung Unsicherheit. Aufgrund von methodischen Herausforderungen bei der Erhebung relevanter Daten, unterschiedlichen begrifflichen Abgrenzungen und teilweise nicht verfügbaren Daten kommen die Untersuchungen zu unterschiedlichen Ergebnissen. **So reicht die Spannweite der berücksichtigten Untersuchungen für den weltweiten Strombedarf der Digitalisierung im Jahr 2020 von ca. 1.200 bis 2.200 Terawattstunden (TWh)**. Trotz dieser Unsicherheiten lassen sich mehrere grundsätzliche Trends feststellen:

- Die steigende Tendenz der weltweiten Entwicklung von Strombedarfen durch die Digitalisierung spiegelt sich in Prognosen für Deutschland wider.
- Die Zahl der an das Internet angeschlossenen Endgeräte nimmt massiv zu. Zugleich steigt deren Energieeffizienz. Es werden daher je nach Studie moderate (Andrae, 2020) bis deutliche (The Shift Project, 2019) Anstiege des Gesamtstromverbrauchs von Endgeräten erwartet. Unter Maßgabe der aus dem Pariser Klimaschutzabkommen abgeleiteten Klimaschutzziele liegt jedoch bereits der aktuelle Strombedarf der Endgeräte zu hoch. Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs über den gesamten Lebenszyklus der Endgeräte kommt der Herstellungsphase eine immer höhere Bedeutung zu.
- Der Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen (Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) wird weiter deutlich ansteigen. Zu diesen Ergebnissen kommen alle betrachteten Studien.

Im Rahmen von Expertinnen- und Expertenworkshops wurden wichtige Technologien und Anwendungen identifiziert, die eine hohe Bedeutung für die weitere Digitalisierung und den Energiebedarf haben können: Künstliche Intelligenz, 5G-Mobilfunk, Internet of Things und Distributed-Ledger-Technologien. Diese Technologien bieten Potenziale für die Einsparung von Strom und Ressourcen (Energieeffizienz durch Digitalisierung). Ihr Einsatz wird aber auch dazu führen, dass sich der Energie- und Ressourcenbedarf der Digitalisierung selbst weiter erhöht:

- **Künstliche Intelligenz (KI)** birgt das Potenzial, nicht nur viele Prozesse effizienter zu gestalten, sondern auch hohe Anteile erneuerbarer Energien besser in das Energiesystem zu integrieren. Bei stetiger Optimierung von Hardware und KI-Algorithmen, die tendenziell mit einer Senkung des Stromverbrauchs einhergeht, werden die Stromeinsparungen durch die Ausweitung der Nutzung von KI-Anwendungen überkompensiert (Desislavov, Martínez-Plumed & Hernández-Orallo, 2021; IEA, 2021).
- Mit der **fünften Generation des Mobilfunks (5G)** steigt die Effizienz der Datenübertragung im Mobilfunk erheblich. Gleichzeitig ist 5G ein wesentlicher Treiber von Datenverkehr, z. B. in den Bereichen Industrie 4.0, Smart Cities oder Online Gaming. Zudem führt der Standard zu einem Ausbau der Mobilfunknetze. In Summe führt dies dazu, dass der Strombedarf zunehmen wird (STL Partners, 2019).
- Mit dem **Internet of Things (IoT)** steigt die Anzahl der an das Internet angeschlossenen Geräte sehr stark. Schon heute wird von mehr als 20 Milliarden vorhandenen IoT-Geräten weltweit ausgegangen. Im laufenden Jahrzehnt soll sich diese Zahl vervielfachen. Auch wenn einzelne Geräte aufgrund steigender Energieeffizienz nur einen geringen Energie- und Ressourcenaufwand bei ihrer Vernetzung verursachen, wird durch die starke Zunahme der Geräteanzahl der absolute Energie- und Ressourcenbedarf deutlich wachsen. Darüber hinaus ermöglicht das IoT viele neue Anwendungen, die zusätzliche Strombedarfe nach sich ziehen können.
- **Distributed-Ledger-Technologien (DLT)** dienen der sicheren dezentralen und verteilten Durchführung von Transaktionen und der dezentralen Speicherung von Daten. Sie sind für sehr hohe zusätzliche Energie- und Ressourcenbedarfe verantwortlich. Ein spezielles Element von DLT-Anwendungen, der sogenannte Proof-of-Work-(PoW-)Konsensmechanismus, ist hierfür ursächlich. Der PoW wird eingesetzt, um Manipulationen vorzubeugen, ist jedoch nicht alternativlos. So stellt der Konsensmechanismus Proof-of-Stake (PoS) eine um Größenordnungen energiesparsamere Alternative dar.

Auf Basis der Analyse der genannten Technologien und Anwendungen und in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten wurden **elf Handlungsempfehlungen** entwickelt, mit denen eine energieeffizientere Nutzung der Technologien erreicht werden könnte. Diese umfassen überwiegend informatorische und koordinative, aber auch ordnungsrechtliche und anreizorientierte Ansätze und sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Nr.	Titel der Maßnahme	Zeithorizont der Umsetzung	Mögliche initiiierende Akteure
<b>KI 1</b>	Round Table zu nachhaltiger KI und der Förderung von KI-Start-ups	sehr kurzfristig	BMWK
<b>KI 2</b>	F&E-Förderung für energieeffiziente KI	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommis- sion
<b>KI 3</b>	Intensivierung der Bildung zu nachhaltiger KI	mittel- bis langfristig	BMBF, Bundeslän- der
<b>KI 4</b>	Transparenz durch den Aufbau offener KI-Plattfor- men, die bereits gerechnete Ergebnisse für andere nutzbar machen	mittelfristig	BMWK, EU-Kom- mission
<b>5G 1</b>	Rahmenbedingungen für den energieeffizienten Aus- bau von 5G schaffen	mittelfristig	BMWK
<b>5G 2</b>	Transparenz von Energiebedarf und CO <sub>2</sub> - Fußabdruck des mobilen Netzes	mittelfristig	BMWK, Verbände
<b>5G 3</b>	F&E-Förderung für den nachhaltigen Betrieb neuer Mobilfunkgenerationen	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU- Kommis- sion
<b>IoT 1</b>	Rahmensetzungen für ein energieeffizientes IoT	mittel- bis langfristig	EU-Kommission, BMWK

Nr.	Titel der Maßnahme	Zeithorizont der Umsetzung	Mögliche initiiierende Akteure
<b>IoT 2</b>	F&E für ein energieeffizientes IoT	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
<b>IoT 3</b>	Transparenz erhöhen, Interoperabilität von IoT-Lösungen fördern	mittelfristig	BMWK, Verbände
<b>DLT 1</b>	Transparenz des Energiebedarfs von PoW-basierten Blockchains erhöhen, Informationslage verbessern	kurzfristig	EU-Kommission

Viele der Handlungsempfehlungen zielen darauf ab, durch Forschung und Entwicklung sowie Transparenz- und Bildungsmaßnahmen den Kenntnisstand über den Beitrag der Technologien und Anwendungen zum Energiebedarf der Digitalisierung zu verbessern. So soll eine Grundlage für eine stärkere Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs in der Weiterentwicklung und Anwendung der Schlüsseltechnologien geschaffen werden. Aufgrund der hohen Dynamik der Digitalisierung sollten die vorgeschlagenen Maßnahmen zeitnah initiiert und umgesetzt werden.

Die vorliegende Analyse verdeutlicht den erheblichen Handlungsbedarf, der für eine zukünftige nachhaltige und energieeffiziente Gestaltung der Digitalisierung besteht. Die Politik sollte jetzt den Rahmen schaffen, in dem Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft eine nachhaltigere Digitalisierung ins Werk setzen können.



# Neue Energiebedarfe digitaler Technologien

Untersuchung von Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs

Dr. Ralph Hintemann, Dr. Severin Beucker, Simon Hinterholzer,  
Tim Grothey, Dr. Thomas Niebel, Janna Axenbeck, Robin Sack





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Entwicklung der Energiebedarfe der Digitalisierung: aktueller Wissenstand</b> .....	<b>4</b>
2.1 Herangehensweise .....	5
2.1.1 Studien zur Entwicklung des weltweiten IKT-Energiebedarfs .....	6
2.1.2 Studien mit Fokus auf den IKT-Energiebedarf in Deutschland .....	8
2.2 Energiebedarf von IKT-Endgeräten .....	8
2.2.1 Weltweiter Energiebedarf .....	8
2.2.2 Energiebedarf in Deutschland .....	9
2.3 Energiebedarf von Datennetzen .....	10
2.3.1 Weltweiter Energiebedarf .....	10
2.3.2 Energiebedarf in Deutschland .....	11
2.4 Energiebedarf von Rechenzentren .....	12
2.4.1 Weltweiter Energiebedarf .....	12
2.4.2 Energiebedarf in Deutschland .....	13
2.5 Fazit zum aktuellen Wissensstand: Klar erkennbare Trends trotz variierender Studienergebnisse .....	14
<b>3 Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs</b> .....	<b>17</b>
3.1 Künstliche Intelligenz .....	18
3.1.1 Der Begriff Künstliche Intelligenz und die Verbreitung der Technologie .....	18
3.1.2 Energiebedarf .....	19
3.2 Die fünfte Generation des Mobilfunks .....	23
3.2.1 Der Begriff 5G und die Verbreitung der Technologie .....	23
3.2.2 Energiebedarf .....	24
3.3 Internet of Things .....	27
3.3.1 Der Begriff IoT und die Verbreitung der Technologie .....	27
3.3.2 Energiebedarf .....	30
3.4 Distributed-Ledger-Technologie .....	32
3.4.1 Der Begriff DLT und die Verbreitung der Technologie .....	32

3.4.2 Energiebedarf.....	33
<b>4 Relevante Einflussfaktoren für den Energiebedarf der Schlüsseltechnologien.....</b>	<b>40</b>
4.1 Künstliche Intelligenz.....	40
4.2 5G-Mobilfunk.....	44
4.3 Internet of Things .....	45
4.4 Distributed-Ledger-Technologien (DLT) .....	49
<b>5 Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>52</b>
5.1 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld Künstliche Intelligenz .....	53
5.2 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld 5G-Mobilfunk .....	56
5.3 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld Internet of Things.....	58
5.4 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld DLT/Blockchain.....	60
<b>6 Nächste Schritte für eine energieeffiziente Digitalisierung .....</b>	<b>63</b>
<b>Quellen.....</b>	<b>66</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Überblick über die Spannweite der Ergebnisse in den betrachteten Studien zur Höhe der THG-Emissionen durch die IKT im Jahr 2020. ....	4
Abbildung 2: Energiebedarf von IKT-Endgeräten weltweit.....	9
Abbildung 3: Energiebedarf von IKT-Endgeräten in Deutschland (Bitkom & Accenture beinhaltet neben dem Energiebedarf in der Nutzung auch die Produktion).....	10
Abbildung 4: Energiebedarf von Datennetzen weltweit.....	11
Abbildung 5: Energiebedarf von Datennetzen in Deutschland (Bitkom & Accenture beinhaltet neben dem Energiebedarf in der Nutzung auch die Produktion).....	12
Abbildung 6: Energiebedarf von Rechenzentren weltweit (aufgrund von Definitionsunterschieden von Rechenzentren etwas unterschiedlicher Umfang in den Betrachtungen - teilweise werden Standalone-Server und Serverschränke sowie Kryptomining-Farmen nicht berücksichtigt) 13	
Abbildung 7: Energiebedarf von Rechenzentren in Deutschland .....	14
Abbildung 8: Kenntnisstand zur Höhe des weltweiten Energiebedarfs der Digitalisierung im Jahr 2020 und zur weiteren Entwicklung bis 2030.....	15
Abbildung 9: Schlüsseltechnologien der Digitalisierung (Überblick) .....	17
Abbildung 10: Prozentualer Anteil an Unternehmen in Deutschland, vergleichbaren europäischen Ländern sowie der gesamten EU-27, die im Jahr 2021 KI-Anwendungen nutzten. ....	19
Abbildung 11: Bedarf an Rechenleistung für das Training ausgewählter sehr großer KI-Anwendungen zwischen 2012 und 2018. ....	21
Abbildung 12: Mobilfunkverträge weltweit, aufgeschlüsselt nach Technologien.....	24
Abbildung 13: Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei einer Datenübertragung von 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum in Abhängigkeit der Technikgeneration.....	26
Abbildung 14: Prognose der weltweiten Anzahl an IoT-Geräten nach Art der Verbindung.....	28
Abbildung 15: Prozentualer Anteil an Unternehmen in Deutschland, vergleichbaren europäischen Ländern sowie der gesamten EU-27, die im Jahr 2021 das IoT nutzten.....	29
Abbildung 16: Prozentualer Anteil der deutschen Unternehmen, die das IoT im Jahr 2021 nutzten, aufgliedert nach verschiedenen Wirtschaftsbereichen .....	29
Abbildung 17: Jährlicher Energiebedarf des Bitcoin-Netzwerks (in TWh). ....	34
Abbildung 18: Jährlicher Energiebedarf des Ethereum-Netzwerks (in TWh). ....	35

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Literatur zum weltweiten IKT-Energiebedarf .....	6
Tabelle 2: Studien zum IKT-Energiebedarf mit Fokus auf Deutschland .....	8
Tabelle 3: Handlungsempfehlungen für eine energieeffiziente Digitalisierung der Schlüsseltechnologien KI, 5G- Mobilfunk, IoT und DLT/Blockchain .....	64

## ABKÜRZUNGEN

3G	Mobilfunk der 3. Generation (3G)
4G	Mobilfunk der 4. Generation (4G)
5G	Mobilfunk der 5. Generation (5G)
AG	Arbeitsgruppe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DeFi	Decentralized Finance
DL	Deep Learning
DLT	Distributed-Ledger-Technologie
EB	Exabyte
ESMA	European Securities and Markets Authority
EU-27	Europäische Union – 27 Länder (ab 2020)
EU-28	Europäische Union – 28 Länder (2013 bis 2020)
F&E	Forschung & Entwicklung
GB	Gigabyte
GPU	Graphics Processing Unit
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	Internet der Dinge/Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
IT	Informationstechnik
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWA	Low Power Wide Area
ML	Maschinelles Lernen/Machine Learning
mMe	moderne Messeinrichtung
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmWave	Millimeterwelle (Frequenzbereich)
PB	Petabyte (Einheit für eine Datenmenge von ca. 1.015 Byte)
PoA	Proof-of-Authority-Konsensmechanismus
PoS	Proof-of-Stake-Konsensmechanismus
PoW	Proof-of-Work-Konsensmechanismus

RZ	Rechenzentren
TB	Terabyte (Einheit für eine Datenmenge von ca. 1.012 Byte)
TPU	Tensor Processing Unit
PoA	Proof-of-Authority-Konsensmechanismus



# 1 Einleitung

# 1 Einleitung

Die Digitalisierung führt zu einer Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft, deren Auswirkungen mit den Folgen der Entwicklung der menschlichen Sprache, der Entstehung der Städte, der Erfindung der Druckerpresse oder der industriellen Revolution vergleichbar sind. Vor allem die Wechselwirkungen zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit werden heute zunehmend diskutiert. Die Digitalisierung wirkt auf alle 17 globalen Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen ein, wobei sie sowohl hohe Potenziale zur Erreichung dieser Ziele als auch deutliche Risiken birgt (WBGU, 2019).

Ziel dieser Analyse ist es, die Energiebedarfe<sup>1</sup> neuer digitaler Technologien abzuschätzen und zu bewerten, um so mögliche Effizienzpotenziale zu identifizieren. Hierfür fasst die Studie zunächst den Stand der Forschung zur Entwicklung des Energiebedarfs der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) im Rahmen einer Meta-Analyse zusammen (Kapitel 2). Anschließend werden vier aktuelle Schlüsseltechnologien identifiziert und analysiert, die zu einem digitalisierungsbedingten Anstieg des Energiebedarfs führen können bzw. hohe Energieeffizienzpotenziale versprechen (Kapitel 3). Im Einzelnen sind dies Künstliche Intelligenz, 5G-Mobilfunk, Internet of Things und Distributed Ledger/Blockchain. Aufbauend auf den durchgeführten Analysen werden dann für die jeweiligen Schlüsseltechnologien Einflussfaktoren ermittelt, die zu deutlich steigenden Energiebedarfen der Digitalisierung führen können (Kapitel 4). Der nachfolgende Abschnitt stellt die daraus abzuleitenden Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Digitalisierung dar (Kapitel 5). Abschließend werden die notwendigen nächsten Schritte zusammengefasst (Kapitel 6).

Die Analyse liefert einen Input zur Bedeutung der Digitalisierung im Hinblick auf das Ziel, bis zum Jahr 2045 in Deutschland Klimaneutralität zu erreichen. Welche – möglicherweise disruptiven – technologischen Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung in den kommenden Jahrzehnten auftreten werden, ist heute nur schwer prognostizierbar. Die Ergebnisse dieser Studie können daher nur den Ausgangspunkt für langfristig orientierte Handlungen darstellen und müssen zukünftig regelmäßig überprüft und aktualisiert werden.

Die vorliegende Analyse wurde im Zeitraum Oktober 2021 bis Mai 2022 durchgeführt.

---

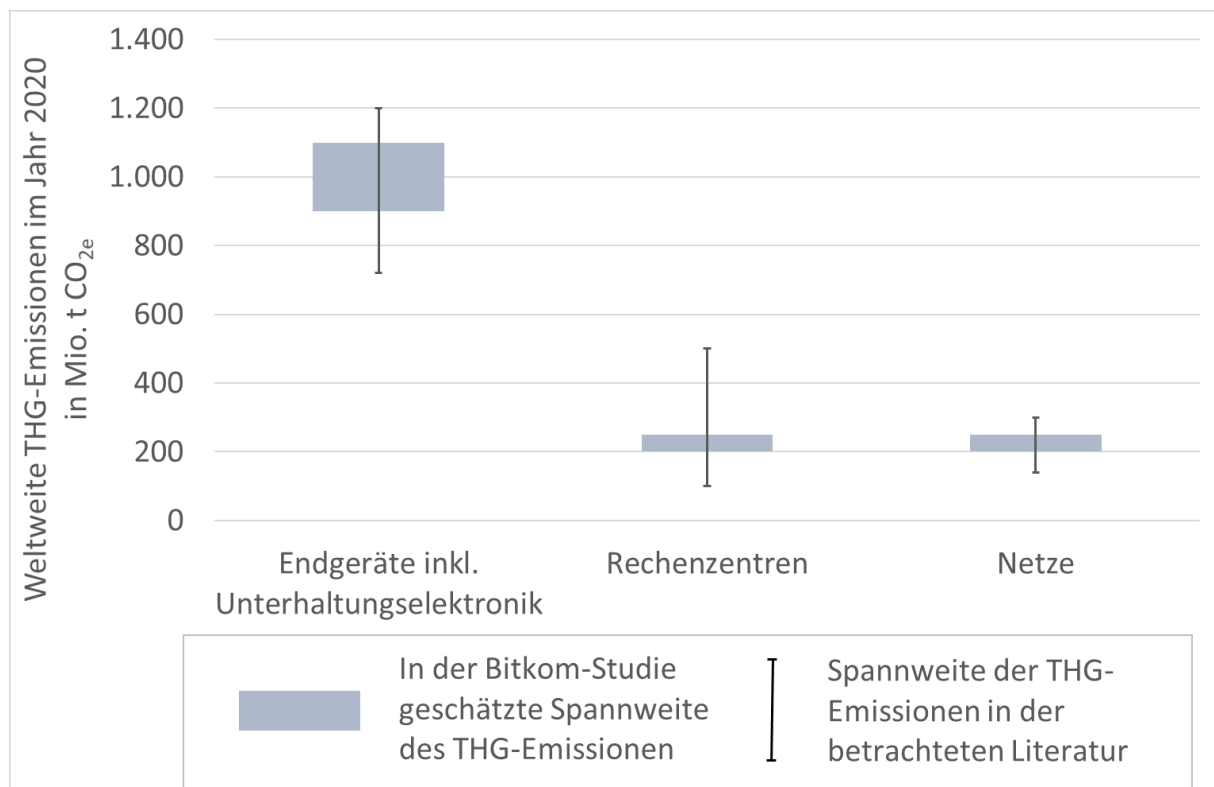
<sup>1</sup> In der relevanten Literatur werden sowohl die Begriffe „Energiebedarf“ als auch „Energieverbrauch“ verwendet. In dieser Studie wird aus Gründen der einheitlichen Begriffsverwendung von „Energiebedarfen“ gesprochen. Im deutschen Sprachgebrauch ist die Verwendung des Begriffs „Energieverbräuche“ ebenso üblich und richtig. Da Energie gemäß den physikalischen Gesetzmäßigkeiten aber nicht „verbraucht“ werden kann, sondern immer nur umgewandelt wird, wird der Begriff Energiebedarf hier vorgezogen.

## **2 Entwicklung der Energiebedarfe der Digitalisierung: aktueller Wissensstand**

## 2 Entwicklung der Energiebedarfe der Digitalisierung: aktueller Wissenstand

Die Betrachtung vorhandener Analysen zur Entwicklung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen (THG) der Digitalisierung zeigt, dass die Abschätzungen zum Energiebedarf von digitalen Technologien teilweise deutlich voneinander abweichen.

**Abbildung 1: Überblick über die Spannweite der Ergebnisse in den betrachteten Studien zur Höhe der THG-Emissionen durch die IKT im Jahr 2020.**



Quelle: Meta-Analyse im Auftrag des Bitkom aus dem Jahr 2020, (Bieser et al. 2020)

In den Analysen zur Entwicklung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen der Digitalisierung werden zumeist die drei Teilsysteme „Endgeräte“, „Rechenzentren (RZ)“ und „Telekommunikationsnetze“ unterschieden. Auch die vorliegende Studie greift auf diese Unterscheidung zurück. Die damit vorgenommene pragmatische Aufteilung stößt jedoch zunehmend an Grenzen. Die komplexen Wechselbeziehungen der digitalen Wertschöpfungskette lassen sich bei einer dergestalt scharfen Trennung zwischen den Teilsystemen nicht adäquat abbilden. So verwischen z. B. beim Edge Computing die Grenzen zwischen Telekommunikationsnetzen und RZ. Zudem werden im Zuge der Digitalisierung immer mehr Geräte und Anlagen, die nicht originär der IKT zuzuordnen sind, mit digitalen Funktionen ausgestattet. Im Bereich der Unterhaltungselektronik ist die Digitalisierung schon so weit fortgeschritten, dass einige der dort angesiedelten Endgeräte bereits den IKT-Endgeräten zugeordnet werden. Dies betrifft z. B. digitale Geräte zur Medienwiedergabe oder Spielekonsolen. Auch in anderen Bereichen wie der industriellen Produktion, dem Verkehr, den Energiesystemen oder der Medizin

nimmt der digitale Anteil der Geräte und Anlagen stetig zu. Eine Abgrenzung dessen, was als „Energiebedarf der Digitalisierung“ zu verstehen ist, wird in diesem Zusammenhang zunehmend schwieriger.

Weitere Unsicherheiten bei der Ermittlung des gegenwärtigen und der Prognose des zukünftigen Energiebedarfs der Digitalisierung sind vor allem darin begründet, dass bisher kaum verlässliche Datengrundlagen existieren und die entsprechenden Studien daher meist auf Schätzungen beruhen (Bertscheck et al., 2020). Außerdem betrachten solche Studien in ihren Zukunftsprognosen häufig Extremszenarien, um die Spannweite der möglichen Entwicklungen vollumfänglich abbilden zu können.

### 2.1 Herangehensweise

Auf Basis einer Literaturrecherche wird im Folgenden ein Überblick über aktuelle Studien zur Höhe des Energiebedarfs der Digitalisierung gegeben. Dazu wurden wissenschaftliche Publikationen ab dem Jahr 2015 herangezogen, in denen der Energiebedarf der Digitalisierung in den Bereichen der Endgeräte, der Datennetze und der RZ bestimmt wird. Da die Spannweite der Ergebnisse in den Trend- und Basisszenarien bereits verhältnismäßig groß ist, wird hier auf die Darstellung von Extremszenarien verzichtet.

Hinsichtlich der Methoden kann bei den betrachteten Studien zwischen sogenannten Bottom-up-Strukturmodellen und Top-down-Extrapolation differenziert werden. Nachfolgend eine kurze Charakterisierung beider Methoden:

#### Bottom-up-Strukturmodelle

- ▶ erstellen ein Inventar der betrachteten IKT-Geräte, meist anhand von Verkaufszahlen oder Marktanalysen,
- ▶ verwenden Annahmen zu Energiebedarf/Leistungsaufnahme einzelner Geräte,
- ▶ skalieren die Energiebedarfe auf das zuvor erstellte Inventar,
- ▶ bilden zeitliche Verläufe durch die Berücksichtigung von Markttrends sowie der Entwicklung hinsichtlich gerätebezogener Energiebedarfe ab und
- ▶ unterscheiden meist zwischen einem Bezugsjahr bzw. vergangenen Werten, die auf realen Verkaufszahlen beruhen, und Zukunftsprognosen.

#### Top-down-Extrapolationen

- ▶ nutzen Ausgangswerte auf Basis vorhergehender Publikationen (häufig Bottom-up-Publikationen),
- ▶ verwenden variable Wachstumsindikatoren (z. B. Datenverkehr) zur Abbildung zukünftiger IKT-Bedarfe (z. B. von Datennetzen, RZ) sowie Effizienzindikatoren zur Abbildung von Effizienzsteigerungen durch Weiterentwicklung genutzter Technologien und
- ▶ führen mehrjährige Extrapolationen in die Zukunft durch, zur Abbildung der möglichen Spannweite an Entwicklungen häufig mit verschiedenen Szenarien, bei denen die Indikatoren variiert werden.

### 2.1.1 Studien zur Entwicklung des weltweiten IKT-Energiebedarfs

Zur Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs der IKT existieren diverse Untersuchungen mit teilweise sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad und Umfang. Tabelle 1 listet die in der Literaturrecherche identifizierten Publikationen zum weltweiten Energiebedarf der IKT auf.

**Tabelle 1: Literatur zum weltweiten IKT-Energiebedarf**

Titel	Quelle	Betrachtungsgegenstand	Literaturtyp
New perspectives on internet electricity use in 2030	Andrae (2020)	RZ, Netze, Endgeräte	primär
Recalibrating global data center energy-use estimates	Masanet (2020)	RZ	primär
The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015	Malmodin & Lundén (2018)	RZ, Netze, Endgeräte	primär
Efficiency gains are not enough: Data center energy consumption continues to rise significantly	Hintemann (2020)	RZ	primär
Digital economy and climate impact – A bottom-up forecast of the IT sector energy consumption and carbon footprint to 2030	Petit, Carlini & Avelar (2021)	RZ, Netze, Endgeräte	primär
LEAN ICT – towards digital sobriety	The Shift Project (2019)	RZ, Netze, Endgeräte	primär
SMARTer 2030 <sup>2</sup>	GeSI & Deloitte (2019)	RZ, Netze, Endgeräte	primär
Klimaschutz durch digitale Technologien	Bieser et al. (2020)	RZ, Netze, Endgeräte	sekundär

Die Veröffentlichung „New perspectives on internet electricity use in 2030“ stellt eine Top-down-Extrapolation der Energiebedarfe für die Bereiche Datennetze, RZ und Endgeräte inklusive Herstellungsenergiebedarf dar.<sup>3</sup> Zukünftige Entwicklungen werden mithilfe von Exponentialfunktionen bis zum Jahr 2030 prognostiziert.

Das im Nature Magazin veröffentlichte Paper „Recalibrating global data center energy-use estimates“ stellt die Ergebnisse eines Bottom-up-Modells eines US-amerikanischen Teams von Forschenden bezüglich des Energiebedarfs von RZ vor. In dem Modell basiert das Inventar an RZ-Kapazitäten auf Prognosen von Cisco (Cisco, 2018) und die Autorinnen und Autoren nutzen eigene Annahmen aus früheren Publikationen zur Entwicklung der Leistungsaufnahme bzw. der Energieeffizienz der IKT-

<sup>2</sup> Die Studie „Digital with purpose – Delivering a smarter 2030“ (GeSI & Deloitte, 2019) analysiert die Entwicklung der THG-Emissionen und nicht die der Energiebedarfe. Daher sind diese Studienergebnisse im Folgenden nicht in die Diagramme aufgenommen.

<sup>3</sup> Das Paper von Andrae (2020) bildet ein Update der bereits häufig zitierten Berechnungen von Andrae & Edler (2015).



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Hardware (Fuchs et al., 2017; Lei & Masanet, 2021; Shehabi et al., 2016; Shehabi, Smith, Masanet & Koomey, 2018). Die Studie argumentiert, dass der Energiebedarf von RZ aufgrund der hohen Verbreitung effizienter Cloud-Rechenzentren und der darin genutzten Effizienztechnologien (u. a. Leistungssteigerung, Virtualisierung, effizientere Klimatisierung) in der Vergangenheit weniger stark anstieg als in anderen Veröffentlichungen vorhergesagt. Sie sagt allerdings einen weiterhin steigenden Bedarf an Rechenkapazität aufgrund des Anstiegs von Anwendungen in den Bereichen Künstliche Intelligenz, intelligente und vernetzte Energiesysteme, verteilte Produktion sowie autonomes Fahren voraus und räumt ein, dass dadurch der Energiebedarf der RZ ansteigen könnte.

In der Veröffentlichung „The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015“ untersuchen Forscher von Ericsson und Telia Company die THG-Emissionen der IKT anhand eines Bottom-up-Modells. Dabei unterscheiden sie die IKT in die Bereiche Endgeräte, Datennetze und RZ. Neben IKT untersucht die Publikation auch die Unterhaltungselektronik und Mediennutzung. Im Bereich der Endgeräte (Handys, Smartphones, Festnetztelefone, Tablets, Router, Modems, Desktops, Laptops, öffentliche Anzeigen sowie weitere mit dem Internet verbundene Geräte) werden die Modellannahmen ausführlich beschrieben und dokumentiert. Dies gilt sowohl für den Gerätebestand als auch für den Energiebedarf und die THG-Emissionen. Die Modellannahmen der Studie bezüglich RZ und Datennetzen sind dagegen kaum dokumentiert; jedoch existiert nach Auskunft der Autoren auch hier ein detailliertes Berechnungsmodell.

In der Publikation „Efficiency gains are not enough: Data center energy consumption continues to rise significantly“ wird auf Basis eines vorhandenen Bottom-up-Modells für die IKT in Deutschland und Europa (Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi & Stickler, 2020; Stobbe et al., 2015) eine Einschätzung zum weltweiten Energiebedarf von RZ getroffen. In der Publikation wird argumentiert, die enormen Anstiege des Energiebedarfs von RZ, die in einigen Top-down-Analysen prognostiziert werden, seien als wenig realistisch anzusehen. Jedoch seien auch die optimistischen Berechnungen eines nahezu konstanten Energiebedarfs in RZ der letzten Jahre angesichts der zu beobachtenden Marktentwicklungen kaum plausibel.

Der 2021 von Schneider Electric veröffentlichte Bericht „Digital economy and climate impact – A bottom-up forecast of the IT sector energy consumption and carbon footprint to 2030“ beschreibt Energiebedarfe und THG-Emissionen der IKT weltweit. Die Studie trifft explizite Aussagen zum Energiebedarf von RZ (aufgeteilt in Compute, Storage, DC infrastructures), Datennetzen (Fixed, Mobile, Network equipment), Endgeräten (IT devices, IoT devices) sowie der Unterhaltungselektronik (TVs and peripherals). Außerdem werden auch Herstellungsenergiebedarfe angegeben. Die Annahmen werden jeweils für die Jahre 2015, 2020, 2023 und 2030 dokumentiert.

Die Veröffentlichung „LEAN ICT – towards digital sobriety“ des Thinktanks „The Shift Project“ liefert einen umfassenden Bericht zu weltweiten Energiebedarfen und THG-Emissionen digitaler Technologien. Der auf Top-down-Methodik basierende Bericht umfasst die Energiebedarfe von Datennetzen, RZ sowie Endgeräten und schließt sowohl die Herstellungs- als auch die Nutzungsphase mit ein.

Die Studie „Klimaschutz durch digitale Technologien“ untersucht in einer Meta-Auswertung den Energiebedarf digitaler Technologien und stellt somit eine Sekundärquelle dar, die z. T. hier bereits genannte Quellen berücksichtigt. Sie ordnet verschiedene Studien zu den Berechnungen von Energiebedarfen und TGH-Emissionen inhaltlich ein und weist dabei auf die große Spannweite der Ergebnisse diverser Studien hin. Zudem gibt sie eine Einschätzung, in welcher Höhe die Energiebedarfe und Klimaemissionen der IKT im Jahr 2020 weltweit etwa liegen.

### 2.1.2 Studien mit Fokus auf den IKT-Energiebedarf in Deutschland

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigten aktuellen Studien zum Energiebedarf der Digitalisierung in Deutschland.

**Tabelle 2: Studien zum IKT-Energiebedarf mit Fokus auf Deutschland**

Titel	Quelle	Betrachtungsgegenstand	Literaturtyp
Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland	Stobbe et al. (2015)	Endgeräte, Netze, RZ	primär
Klimaeffekte der Digitalisierung: Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz	Bitkom und Accenture (2021)	Endgeräte, Netze, RZ	primär

In der Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ wird der Bestand an digitalen Geräten und Anlagen detailliert modelliert und hinsichtlich des Energiebedarfs ihrer Nutzung untersucht.

Die Untersuchung „Klimaeffekte der Digitalisierung: Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz“ prognostiziert für das Jahr 2030 sowohl mögliche Potenziale digitaler Technologien zur Reduktion der THG-Emissionen wie auch mögliche durch die IKT verursachte Emissionen. Die Prognose zu den Energiebedarfen und THG-Emissionen der IKT ist hier aufgeteilt in Endgeräte, RZ und Kommunikationsnetze, wobei die Endgeräte inklusive ihrer Produktion bilanziert werden, während sich bei RZ sowie Kommunikationsnetzen die errechneten Energiebedarfe und THG-Emissionen ausschließlich auf die Nutzung beziehen. Die Studie dokumentiert zwar die Quellen der Untersuchung, allerdings werden weder Berechnungsweg noch Methode offengelegt.

In der „Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen“ werden die Energiebedarfe und THG-Emissionen der Digitalisierung sowohl für Deutschland als auch für das Bundesland Hessen berechnet.<sup>4</sup> Neben den Berechnungen zum Energiebedarf durch die Nutzung untersucht die Studie auch die THG-Emissionen bei der Herstellung der Geräte.

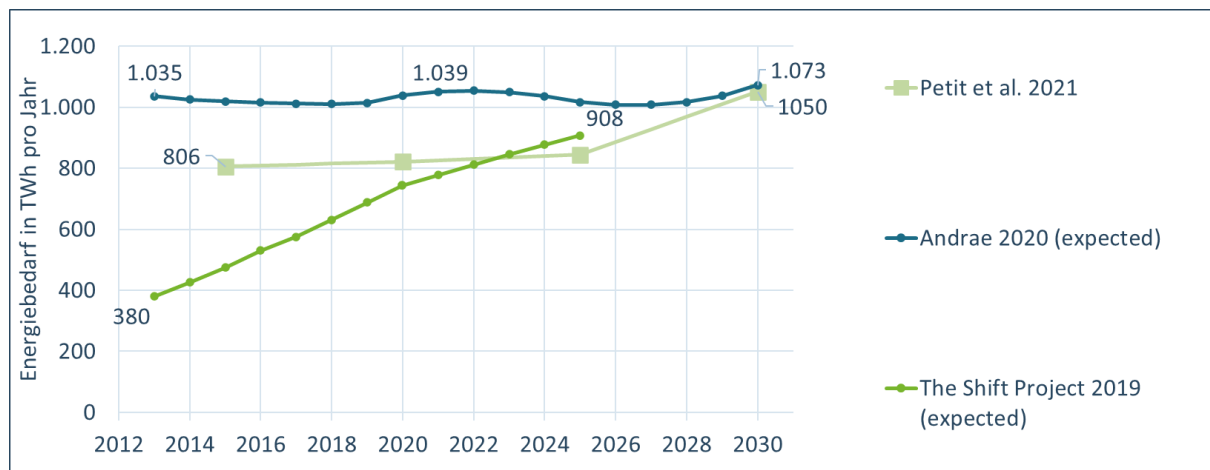
## 2.2 Energiebedarf von IKT-Endgeräten

### 2.2.1 Weltweiter Energiebedarf

Bezüglich der Höhe und der Entwicklung der Energiebedarfe von IKT-Endgeräten weltweit liefern die betrachteten Studien abweichende Ergebnisse (Abbildung 2). Diese Unterschiede lassen sich zu einem großen Teil durch Unterschiede hinsichtlich der in die Untersuchung einbezogenen Geräte erklären. So beziehen einige der Studien auch Geräte der Unterhaltungselektronik und neuartiger IoT-Geräte mit in die Analysen ein, während andere diese Gerätegruppen nicht berücksichtigen.

<sup>4</sup> Die Berechnungen bauen auf der Studie des Bundeswirtschaftsministeriums aus dem Jahr 2015 auf (Stobbe et al., 2015).

Abbildung 2: Energiebedarf von IKT-Endgeräten weltweit



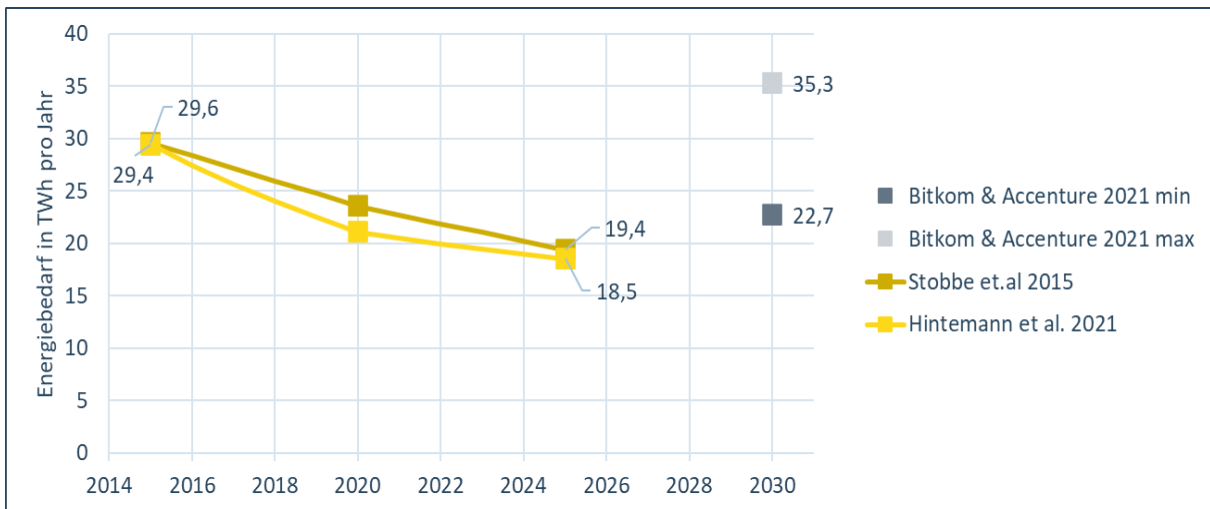
Wie Abbildung 2 zeigt, lässt sich trotz unterschiedlicher Werte in den betrachteten Studien ein ähnlicher Trend der Entwicklung erkennen: Die meisten Prognosen gehen davon aus, dass in Zukunft der weltweite Energiebedarf der IKT-Endgeräte konstant bleibt oder nur noch geringfügig ansteigt. Zu der Schlussfolgerung, dass die Literatur im Bereich der Endgeräte relativ konsistente Ergebnisse bei der Bestimmung von weltweitem Energiebedarf und THG-Emissionen zeigt, kommt auch die Meta-Analyse von Bieser et al. (2020).

### 2.2.2 Energiebedarf in Deutschland

Für Deutschland wurden in der jüngeren Vergangenheit nur wenige umfassende Untersuchungen zum Energiebedarf der digitalen Endgeräte durchgeführt.

Eine umfassende Datenquelle bezüglich des Energiebedarfs der IKT-Endgeräte in Deutschland bieten Hintemann et al. (2021). Die Studie baut auf den Ergebnissen von Stobbe et al. (2015) auf, was eine Erklärung für die nur geringen Abweichungen von diesen liefert. Die aktuelle Abschätzung zum Energiebedarf der IKT-Endgeräte von Bitkom & Accenture (2021) beinhaltet im Gegensatz zu den anderen Studien auch den Energiebedarf durch die Herstellung der Geräte. Insofern ist nachvollziehbar, dass die dort ermittelten Werte deutlich höher liegen, als es eine Extrapolation der anderen Studien nahelegen würde (Abbildung 3).

Abbildung 3: Energiebedarf von IKT-Endgeräten in Deutschland (Bitkom & Accenture beinhaltet neben dem Energiebedarf in der Nutzung auch die Produktion)



Für Deutschland wird ein tendenziell abnehmender Energiebedarf bei den IKT-Endgeräten prognostiziert. Die Studien weisen jedoch darauf hin, dass der Anteil der Herstellerenergie speziell im Bereich der Endgeräte zunehmend an Bedeutung gewinnt und daher der Fokus auf eine möglichst lange Nutzungsdauer der Geräte gelegt werden muss.

## 2.3 Energiebedarf von Datennetzen

### 2.3.1 Weltweiter Energiebedarf

Abbildung 4 zeigt verschiedene Berechnungen und Prognosen zum weltweiten Energiebedarf von Datennetzen. Gemäß Malmodin & Lundén (2018) lag der Energiebedarf der Datennetze im Jahr 2015 bei 242 TWh. The Shift Project (2019) erwartet auf Basis von Andrae & Edler (2015) für 2023 einen Energiebedarf der Netze von 435 TWh und bis 2025 noch einmal mehr als eine Verdopplung auf bis zu 1.007 TWh. Dagegen wird vom Shift Project in einem Szenario mit digitaler Enthaltbarkeit („digital sobriety“) davon ausgegangen, dass der Energiebedarf zwischen 2020 und 2025 nahezu konstant bleibt. Andrae (2020) geht in seiner Prognose („expected“) von einem starken Anstieg des Energiebedarfs zwischen 2020 und 2030 aus, wobei dieser Anstieg seiner Annahme nach erst ab 2023 beginnt. Dies wird mit einer deutlichen Abschwächung weiterer Effizienzgewinne in der Datenübertragung („End of Moore’s law“<sup>5</sup>) ab diesem Zeitpunkt begründet. Petit et al. (2021) errechnen einen ähnlichen Verlauf für den Energiebedarf der Datennetze wie Andrae (2020), allerdings mit etwas geringeren Wachstumsraten in der Zukunft. Eine aktuelle Studie von Malmodin et al. (2022), welche die Energiebedarfe von Netzbetreibern in Europa erhebt, kommt zu dem Schluss, dass deren Energiebedarfe im Zeitraum 2015 bis 2018 nur minimal angestiegen sind.

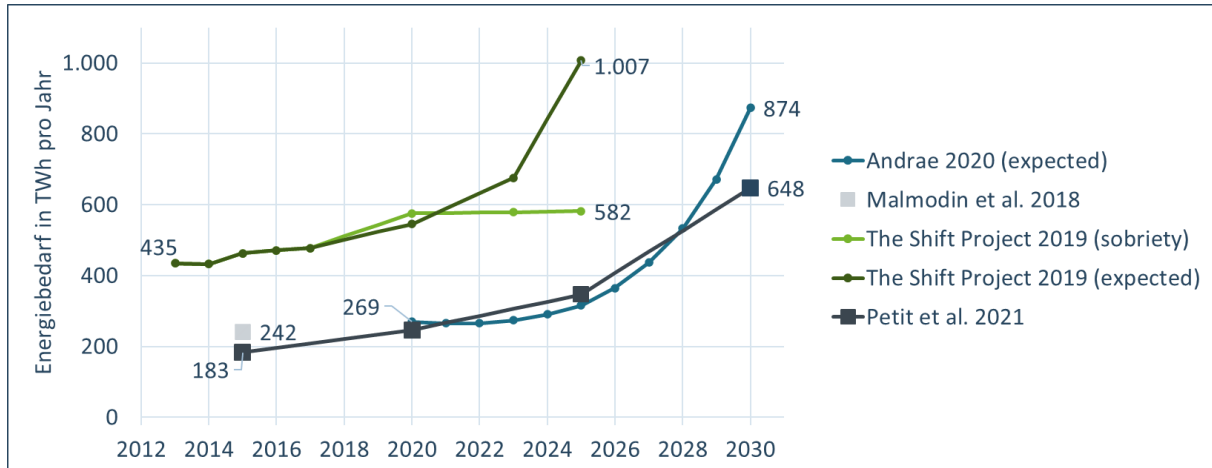
Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Studien zur Höhe des Energiebedarfs der weltweiten Telekommunikationsnetze teilweise deutlich voneinander abweichen. Auch die Meta-

<sup>5</sup> 5 Das mooresche Gesetz (engl.: Moore’s law) beschreibt eine exponentielle Zunahme der Komplexität (bzw. der Anzahl an Komponenten) bei integrierten Schaltkreisen im Zeitverlauf. In Kombination mit dem Gesetz von Dennard (konstante Leistungsdichte von Chips) ergibt sich daraus eine starke Effizienzsteigerung (Leistung pro Watt) bei integrierten Schaltkreisen über die Zeit.

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Auswertung von Bieser et al. (2020) ermittelt in den von ihr berücksichtigten Studien für das Jahr 2020 eine Spannweite des Energiebedarfs der weltweiten Telekommunikationsnetze zwischen 200 und 550 TWh.

Abbildung 4: Energiebedarf von Datennetzen weltweit

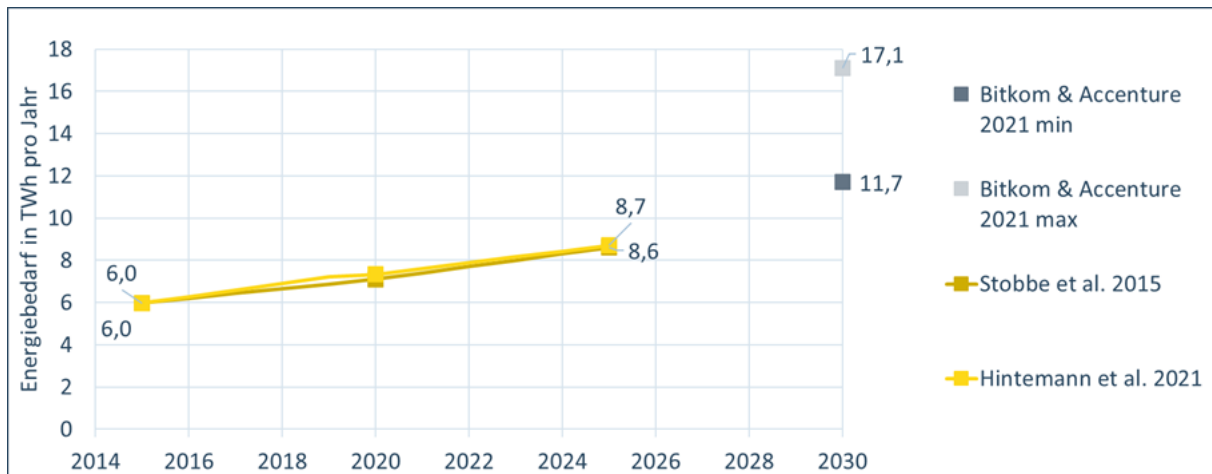


Drei von vier betrachteten Studien gehen davon aus, dass der Energiebedarf in den Datennetzen zukünftig weiter steigen wird. Als Gründe hierfür werden vor allem der steigende Datenverkehr insgesamt sowie die steigende Anzahl von Geräten und die erwartete hohe Dichte an Antennen bei 5G-Mobilfunktechnologien genannt.

### 2.3.2 Energiebedarf in Deutschland

Hinsichtlich der Höhe und Entwicklung des Energiebedarfs der Datennetze in Deutschland kann auf dieselbe Literatur wie bei den Endgeräten zurückgegriffen werden (Abbildung 5). Bei einer linearen Extrapolation der Prognose von Hintemann et al. (2021) hätten Datennetze im Jahr 2030 einen Energiebedarf von ca. 10,4 TWh. Die Prognose von Bitkom & Accenture (2021), die nach eigenen Angaben ebenfalls auf der Studie von Stobbe et al. (2015) basiert, geht von einem stärkeren zukünftigen Wachstum des Energiebedarfs der Datennetze aus. Sie ermittelt für das Jahr 2030 eine Spannweite zwischen 11,7 und 17,1 TWh.

Abbildung 5: Energiebedarf von Datennetzen in Deutschland (Bitkom & Accenture beinhaltet neben dem Energiebedarf in der Nutzung auch die Produktion)



Als wesentlicher Faktor für diese Entwicklung werden die durch den 5G-Mobilfunk ermöglichten neuartigen Dienste und Anwendungen genannt. Auch wenn durch die steigenden Datenraten eine erheblich niedrigere Energieintensität der Datenübertragung (kWh/GB) erwartet werden kann, ist aufgrund des stark wachsenden Datenvolumens bzw. des dafür notwendigen Ausbaus der Netzinfrastruktur weiterhin von einem Anstieg auszugehen. Die Abschaltung älterer Netztechnik, wie etwa dem 3G-Mobilfunk, wirkt der zu erwartenden Steigerung in geringem Maße entgegen.

## 2.4 Energiebedarf von Rechenzentren

### 2.4.1 Weltweiter Energiebedarf

Die Studien zum Energiebedarf von RZ unterscheiden sich hinsichtlich des derzeitigen Energiebedarfs deutlich, noch stärker jedoch in den Zukunftsprognosen (Abbildung 6). Das „expected“-Szenario von The Shift Project (2019) orientiert sich wie im Fall der Datennetze an der Prognose von Andrae & Edler (2015) und geht damit von einem sehr deutlichen Wachstum des Energiebedarfs der RZ aus: von 323 TWh im Jahr 2013 auf 1.918 TWh im Jahr 2025. Seine Prognose von 2015 korrigierte Andrae in seiner Publikation von 2020 nach unten (Andrae, 2020). Im „digital sobriety“-Szenario des Shift Projects steigt der Energiebedarf der RZ im Vergleich zum „expected“-Szenario wesentlich moderater auf 761 TWh im Jahr 2025, was allerdings gegenüber der weiteren betrachteten Literatur noch immer ein sehr starkes Wachstum darstellt.

In der aktuellen Prognose von Andrae (2020) liegt der Energiebedarf der RZ im Jahr 2020 bei 299 TWh, während er bis zum Jahr 2030 eine Steigerung auf 974 TWh/Jahr erwartet. Ebenso wie bei den Datennetzen geht Andrae auch hier davon aus, dass ab dem Jahr 2023 durch eine deutliche Abschwächung der Effizienzgewinne die Wachstumsraten im Energiebedarf zunehmen werden.

Malmodin & Lundén (2018) errechnen für das Jahr 2015 einen weltweiten Energiebedarf von 242 TWh in RZ. Für dasselbe Jahr bestimmen Petit et al. (2021) einen Energiebedarf von 284 TWh in RZ, welcher gemäß ihren Berechnungen auf 341 TWh im Jahr 2020 angestiegen ist. Sie prognostizieren eine weitere Zunahme des Energiebedarfs der RZ auf 719 TWh im Jahr 2030.

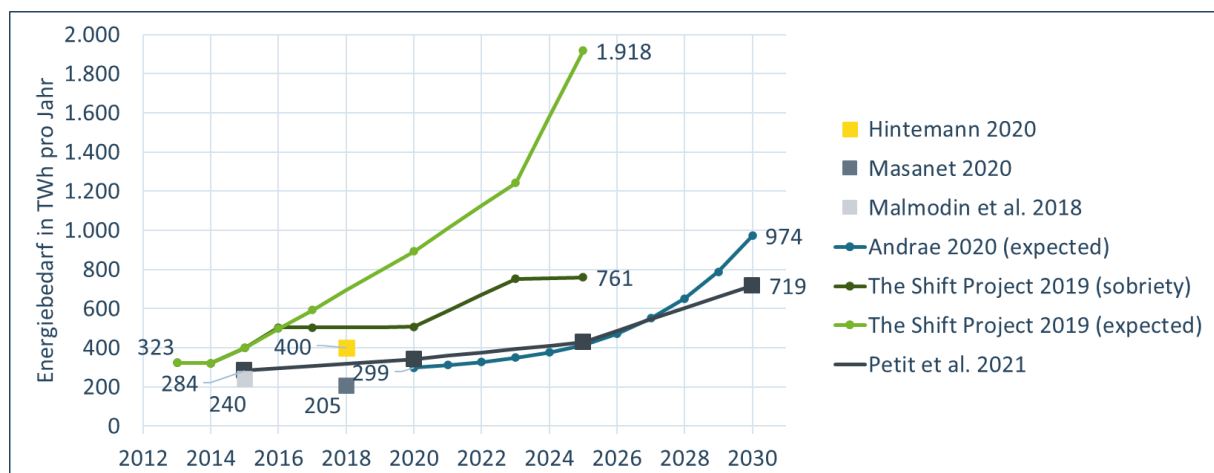


## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Die Publikation von Masanet et al. (2020) stellt mit einem Energiebedarf von 205 TWh im Jahr 2018 gegenüber den anderen Quellen eine vergleichbar optimistische Berechnung des weltweiten Energiebedarfs von RZ an. Verglichen mit dem von ihnen angegebenen Energiebedarf von ca. 196 TWh im Jahr 2010 ist dies ein nahezu gleichbleibender Bedarf. Begründet wird diese Entwicklung mit den starken Effizienzgewinnen bei der verwendeten Technik sowie der verstärkten Nutzung von (Hyper-scale-)Cloud-Rechenzentren, bei denen eine sehr hohe Effizienz angenommen wird. Ein weiterer Grund für das niedrige Niveau der Berechnungen von Masanet et al. ist, dass sie in ihrer Kalkulation den Energiebedarf durch das Mining von Kryptowährungen (siehe Abschnitt 3.4.2) nicht berücksichtigen.

Hintemann (2020) gibt in einer Publikation bezüglich des Energiebedarfs von RZ in Deutschland auch eine Einschätzung zum weltweiten Energiebedarf von RZ von ca. 400 TWh im Jahr 2018 ab. Als Begründung für diesen Wert führt er unter anderem an, dass der Energiebedarf durch Kryptowährungen in RZ stark angestiegen und trotz des starken Wachstums der Kapazitäten von Cloud-Rechenzentren kaum ein Rückgang der Kapazitäten in traditionellen Rechenzentren zu beobachten sei.

**Abbildung 6: Energiebedarf von Rechenzentren weltweit (aufgrund von Definitionsunterschieden von Rechenzentren etwas unterschiedlicher Umfang in den Betrachtungen - teilweise werden Standalone-Server und Serverschränke sowie Kryptomining-Farmen nicht berücksichtigt)**



### 2.4.2 Energiebedarf in Deutschland

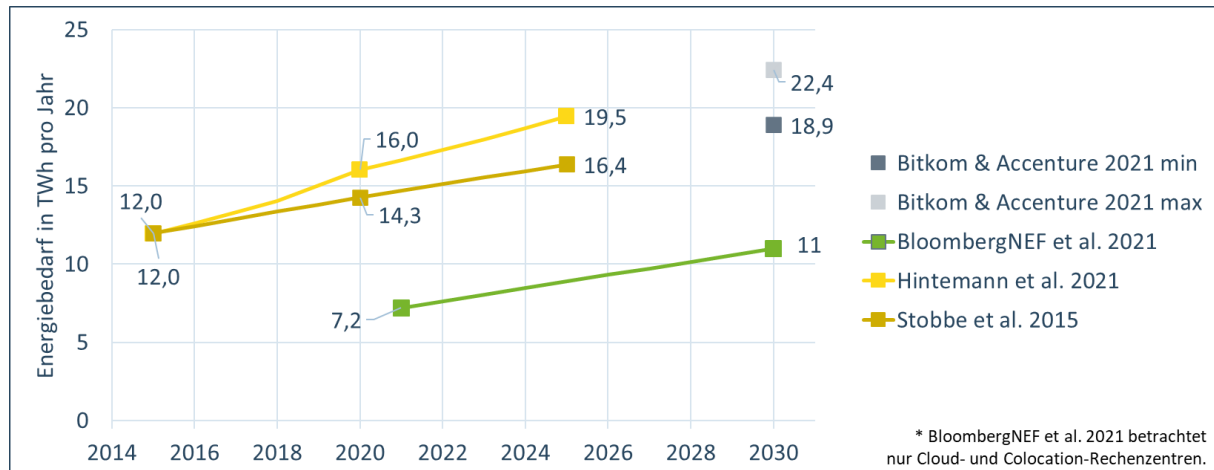
Für Deutschland veröffentlicht das Borderstep Institut fortlaufend Berechnungen zum Energiebedarf von RZ. Die aktuellste Publikation des Instituts (Hintemann, 2021) berechnet einen Gesamtenergiebedarf der RZ in Deutschland von 16 TWh im Jahr 2020. Damit ist der Energiebedarf stärker gestiegen als in der Untersuchung von Stobbe et al. (2015) prognostiziert (Abbildung 7). Begründet wird dies mit dem deutlich über den ursprünglichen Erwartungen liegenden Marktwachstum der Branche (Hintemann et al., 2021).

Eine aktuelle Publikation von BloombergNEF et al. (2021) untersucht den Energiebedarf und das Flexibilitätspotenzial von Colocation- und Hyperscale-Cloud-Rechenzentren in Deutschland und ermittelt dabei für das Jahr 2021 einen Energiebedarf dieser RZ von 7,1 TWh. RZ und kleinere IT-Installationen im Eigenbetrieb („on premise“) von Unternehmen und Behörden werden in dieser Berechnung

nicht berücksichtigt. Hintemann et al. (2021) gehen von einem Energiebedarf der Cloud-Rechenzentren in Deutschland von ca. 6 TWh im Jahr 2020 aus. Die Ergebnisse der beiden Studien kommen also zu durchaus ähnlichen Ergebnissen.

Wie Abbildung 7 zeigt, liegen die Prognosen von Bitkom & Accenture (2021) für den Energiebedarf der RZ in Deutschland im Jahr 2030 etwa im Bereich einer linearen Fortschreibung der von Hintemann (2021) und Stobbe et al. (2015) prognostizierten Entwicklungen.<sup>6</sup>

Abbildung 7: Energiebedarf von Rechenzentren in Deutschland



Zusammenfassend kann auch in Deutschland von einem weiterhin steigenden Energiebedarf der RZ ausgegangen werden. Die Entwicklung der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass aufgrund der dynamischen Marktentwicklung langfristige Vorhersagen relativ schwierig sind. Als Treiber des Energiebedarfs der RZ wird in erster Linie die fortschreitende Digitalisierung gesehen, die weiterhin auch zunehmende Kapazität in RZ benötigen wird. Die am stärksten wachsenden Segmente im Bereich der RZ sind Cloud-Rechenzentren sowie zukünftig auch verteilte Edge-Rechenzentren.

## 2.5 Fazit zum aktuellen Wissensstand: Klar erkennbare Trends trotz variierender Studienergebnisse

Wie die obigen Ausführungen zeigen, kann der Kenntnisstand zur momentanen Höhe des Energiebedarfs der Digitalisierung nicht als gefestigt bezeichnet werden. Insbesondere die Ergebnisse der Studien zur Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs der Digitalisierung kommen zu teilweise deutlich voneinander abweichenden Ergebnissen – dies sowohl bezüglich des aktuellen Energiebedarfs als auch hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung. Abbildung 8 zeigt die Spannweite der in der vorliegenden Studie berücksichtigten Untersuchungen für das Jahr 2020 sowie deren Prognosen für das Jahr

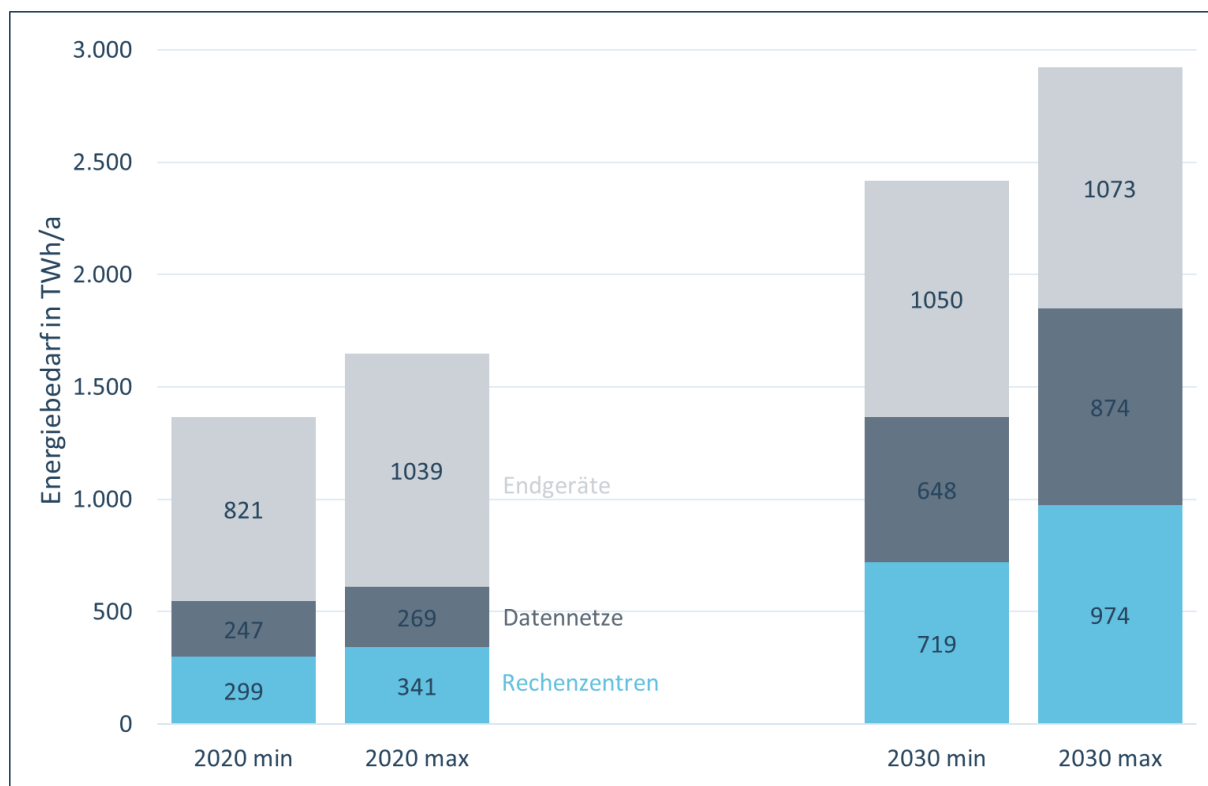
<sup>6</sup> In einer aktuellen Bitkom-Studie wird von einem breiten Entwicklungskorridor des Energiebedarfs von RZ bis zum Jahr 2030 ausgegangen. Je nach Markt- und Technologieentwicklung wird ein Energiebedarf zwischen etwa 23 TWh/Jahr und 35 TWh/Jahr als wahrscheinlich angenommen (Hintemann, Graß, Hinterholzer & Grothey, 2022)

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

2030<sup>7</sup>. Trotz der bestehenden Unsicherheit zur Höhe des jeweiligen Energiebedarfs ist klar erkennbar, dass von einem zukünftigen Anstieg des Energiebedarfs der RZ und Datennetze ausgegangen wird, während bei den Endgeräten teilweise sogar ein Rückgang für möglich gehalten wird.

Diese grundsätzliche Tendenz der weltweiten Entwicklung des Energiebedarfs lässt sich auch für Deutschland feststellen, auch wenn hier vergleichsweise weniger Studien vorliegen. Die Ergebnisse von Studien zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT in Europa<sup>8</sup> werden im Rahmen dieser Untersuchung nicht explizit vorgestellt; sie bestätigen aber ebenfalls, dass Unsicherheit über die tatsächliche Höhe des Energiebedarfs der Digitalisierung besteht. Zudem wird auch auf europäischer Ebene mit einem Anstieg des Energiebedarfs der RZ und der Datennetze gerechnet

**Abbildung 8: Kenntnisstand zur Höhe des weltweiten Energiebedarfs der Digitalisierung im Jahr 2020 und zur weiteren Entwicklung bis 2030**



<sup>7</sup> Es werden in der Graphik nur die Studien berücksichtigt, die sowohl für 2020 als auch für 2030 die Energiebedarfe berechnet haben. Extremszenarien werden nicht dargestellt

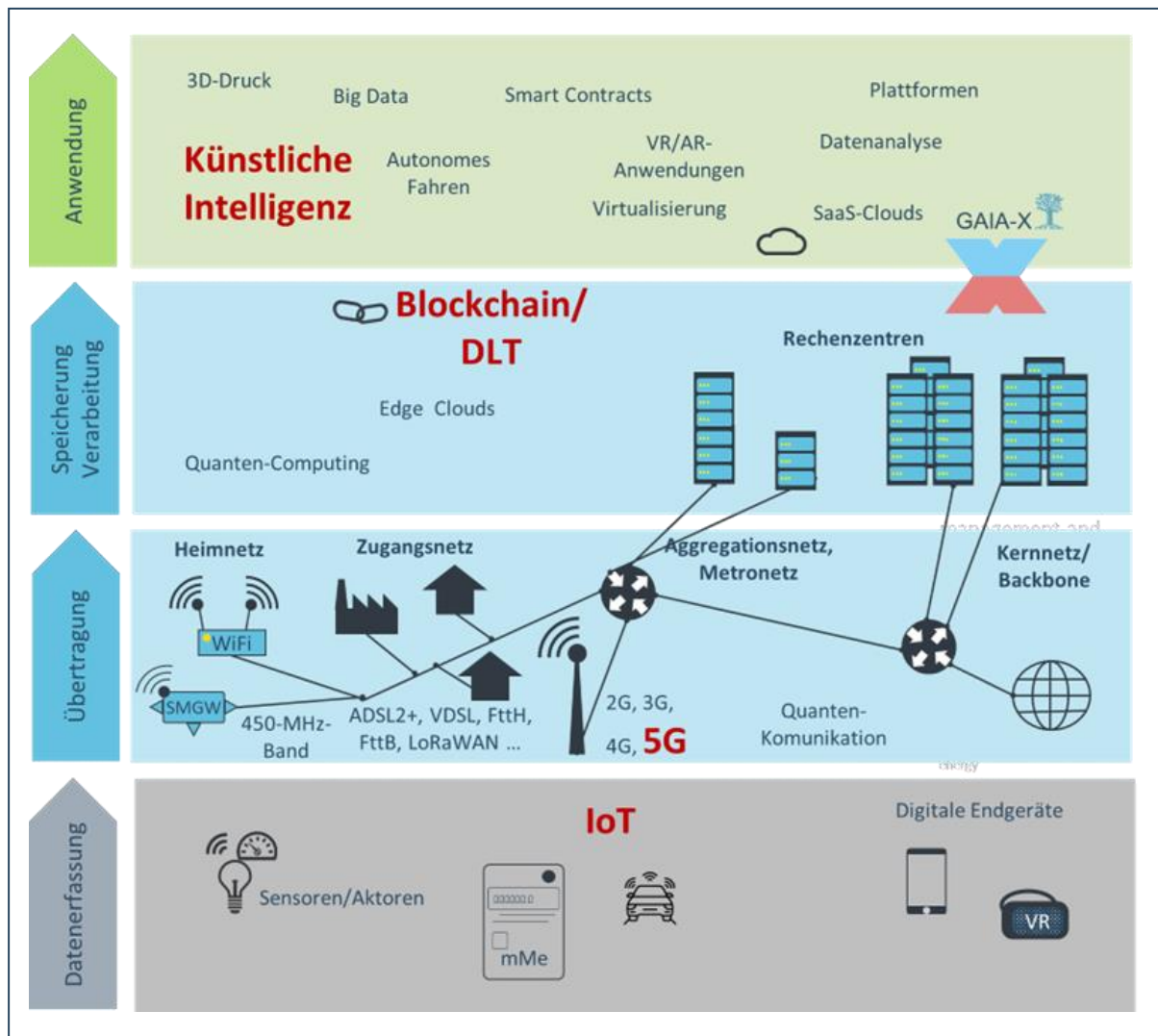
<sup>8</sup> Hierfür insbesondere relevante Studien: Avgerinou, Bertoldi & Castellazzi (2017), Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM (2016), Bordage et al. (2021), Hintemann et al. (2020), Kemna et al. (2020).

# **3 Schlüsseltechnologien für die zukünftige Ent- wicklung des IKT-beding- ten Energiebedarfs**

### 3 Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs

Digitale Schlüsseltechnologien bergen das Risiko, den Energiebedarf der Digitalisierung in Zukunft deutlich ansteigen zu lassen. Abbildung 9 liefert einen (unvollständigen) Überblick von Schlüsseltechnologien entlang der digitalen Wertschöpfungskette

Abbildung 9: Schlüsseltechnologien der Digitalisierung (Überblick)



Im Austausch mit Expertinnen und Experten der Digital- und Energiebranche sowie durch ein Screening von Fachpublikationen und wissenschaftlicher Literatur wurden Schlüsseltechnologien aus den Bereichen Datenerfassung, -übertragung, -speicherung, -governance und -anwendungen hinsichtlich ihrer Relevanz für mögliche zukünftige Energiebedarfe der Digitalisierung verglichen. Dabei stellten sich die Technologien Künstliche Intelligenz (KI), fünfte Generation des Mobilfunks (5G), Internet der Dinge (IoT) und Distributed Ledger (DLT) als besonders bedeutsam insbesondere in Bezug auf die folgenden Punkte heraus:

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- ▶ die **Verbreitung** der Technologie innerhalb eines absehbaren Zeitraums (ca. 10 Jahre),
- ▶ das **Risiko** zur Energiebedarfssteigerung durch die Technologie gemäß vorhandener Literatur,
- ▶ der maximale **Energiebedarf** einzelner Anwendungen sowie
- ▶ das **Veränderungspotenzial** der Technologie, d. h., wie stark sie sich auch auf andere Technologien und Anwendungsfelder auswirken kann oder wird. Hier könnten sich auch sogenannte Spillover-Effekte ergeben, indem an den Einsatzorten der Technologie weitere Innovationen entstehen, die ihrerseits ebenfalls zukünftige Energiebedarfe beeinflussen können.

Die genannten Technologien beeinflussen den weltweiten Energiebedarf schon jetzt in maßgeblichem Umfang. So verbrauchen etwa IoT-Anwendungen in Europa momentan ca. ein Prozent der dort produzierten Strommenge (Bordage et al., 2021a), während die Digitalwährung Bitcoin als Teil der DLT innerhalb eines Jahres weltweit mehr Strom verbraucht als ein Industrieland in der Größenordnung von Schweden, der Niederlande oder Belgien (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2022; Digiconomist, 2022). Auch den Technologien 5G und KI werden ein hoher Bedeutungszuwachs und eine stark zunehmende Verbreitung vorhergesagt. Zugleich decken die vier Technologien weite Teile der digitalen Wertschöpfungskette ab und zeichnen sich darüber hinaus durch ihr Potenzial aus, zu umfassenden Veränderungen wirtschaftlicher und sozialer Strukturen beizutragen. Sie alle sind vielseitig einsetzbar und besitzen Anwendungsmöglichkeiten in zahlreichen Bereichen des Alltags sowie in verschiedenen Wirtschaftszweigen.

### 3.1 Künstliche Intelligenz

#### 3.1.1 Der Begriff Künstliche Intelligenz und die Verbreitung der Technologie

Künstliche Intelligenz umfasst eine Vielzahl an Methoden, Verfahren und Technologien, die die Automatisierung kognitiver Funktionen und Prozesse erlauben. Hierzu werden oft statistische Modelle verwendet, mit deren Hilfe Vorhersagen getroffen, Empfehlungen abgegeben und Entscheidungen gefällt werden können.

In den vergangenen Jahren hat sich das sogenannte Maschinelle Lernen (ML) zur dominierenden Anwendung innerhalb der KI entwickelt. Bei diesem Verfahren erkennt eine KI aus der Analyse von Daten statistische Zusammenhänge und wendet diese für die Problemlösung an. Der Vorgang des Lernens aus der Analyse von Daten wird als Training der KI bezeichnet.

Ein spezielles Verfahren des ML stellt die Methode des Deep Learnings (DL; deutsch: tiefgehendes Lernen) dar. Deep Learning verwendet sogenannte neuronale Netze, die dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind. DL-Modelle können sehr komplex werden und das Training der Modelle erfordert oft sehr hohe Rechenleistungen. Außerdem stellt der Lernprozess bei DL-Verfahren in der Regel eine Blackbox dar, d. h., es sind nur die Eingangsdaten und die Ergebnisse des Prozesses bekannt, nicht aber der Prozess selbst, mit dem die KI zu diesen Ergebnissen gelangt ist. Aktivitäten, die sich mit der Erklärung des Zustandekommens der Ergebnisse befassen, werden unter dem Begriff „Explainable AI“ zusammengefasst. Des Weiteren existieren mit den Verfahren des Reinforcement Learnings (deutsch: verstärkendes Lernen) und Generative Adversarial Networks (deutsch: erzeugende gegnerische Netzwerke) noch komplexere Methoden des Deep Learnings, bei denen der Lernprozess weiter automatisiert wird.

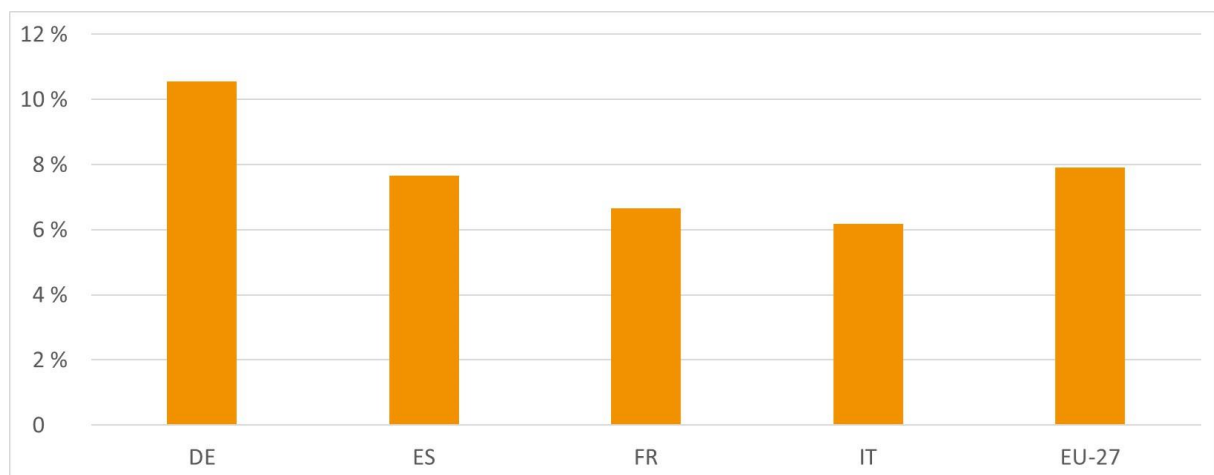
Mittlerweile begegnen wir KI-Anwendungen immer öfter in unserem Alltag – häufig ohne dies bewusst wahrzunehmen. Internetsuchmaschinen, Empfehlungen auf E-Commerce-Plattformen, digitale



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Sprachassistenten, Übersetzungshilfen, die Gesichtserkennung auf dem Smartphone, Einparkhilfen – KI-Lösungen sind allgegenwärtig. Auch immer mehr Unternehmen setzen auf KI. Abbildung 10 zeigt den prozentualen Anteil an Unternehmen, die KI einsetzen, in Deutschland, in verschiedenen europäischen Ländern sowie in der gesamten Europäischen Union (EU-27) für das Jahr 2021. In Deutschland gaben mehr als zehn Prozent der Unternehmen an, KI-Anwendungen zu nutzen. Das ist zwar immer noch ein relativ geringer Teil der Unternehmen, jedoch mehr als in anderen europäischen Ländern. In der gesamten EU-27 waren es nur etwa acht Prozent und in Spanien, Frankreich und Italien noch weniger. Somit nehmen deutsche Unternehmen bei der Anwendung von KI eine Vorreiterrolle ein.

**Abbildung 10: Prozentualer Anteil an Unternehmen in Deutschland, vergleichbaren europäischen Ländern sowie der gesamten EU-27, die im Jahr 2021 KI-Anwendungen nutzten.**



Quelle: Eurostat (2021a)

Die Nutzung von Methoden des ML ist häufig mit der Verwendung großer Datenmengen verbunden. Insofern ergeben sich in den Technologiefeldern KI und Big Data Überschneidungen. In Deutschland ist die Nutzung von Big-Data-Anwendungen in den Unternehmen zwischen 2016 und 2020 von 6 auf 18 Prozent angestiegen. Auch in der gesamten EU-27 lässt sich eine deutliche Zunahme erkennen (Eurostat, 2021a). Es ist davon auszugehen, dass diese Verstärkung der Nutzung von Big Data insbesondere auf die Ausweitung von Methoden des ML zurückzuführen ist.

### 3.1.2 Energiebedarf

Besonders Verfahren des ML und speziell des DL stehen häufig im Mittelpunkt der Diskussion, wenn es um den Energiebedarf von KI geht. Die Anwendung dieser Technologien kann eine maßgebliche Unterstützung bei der Verringerung von Umweltbelastungen bilden (Kaack, Donti, Strubell & Rolnick, 2021). Beispielsweise unterstützen ML-Anwendungen die für eine erfolgreiche Energiewende notwendige Flexibilisierung des Energiesystems (Kratochwill et al., 2020). Gleichzeitig werden für den Einsatz von ML-Lösungen aber auch erhebliche Mengen an Energie benötigt. Insbesondere DL-Modelle sind sehr komplex und besitzen meist Millionen von Parametern, weswegen sie viel Rechenleistung erfordern. Die Bereitstellung dieser Rechenleistung verbraucht große Mengen an Strom; dies gilt sowohl während der Entwicklung und Anpassung eines Modells (Training) als auch bei der Anwendung (Inferenz) dieses Modells (Douwes, Esling & Briot, 2021; Hernandez & Brown, 2020).

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Insbesondere das Training unterschiedlicher Modelle zur Optimierung von Vorhersagen kann sehr energieintensiv sein (Kaack, Donti, Strubell, Kamiya, et al., 2021). In der Praxis werden ähnliche Modelle oft immer wieder neu angepasst, wodurch hohe Ineffizienzen entstehen können (Tornede et al., 2021). Der Ansatz des Model Recyclings kann hier Abhilfe schaffen.

Strubell et al. (2019) berechnen, dass die Entwicklung von sehr komplexen Sprachmodellen über 280 Tonnen CO<sub>2</sub> ausstoßen kann<sup>9</sup>, in etwa so viel, wie fünf Autos über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg emittieren. Bei der Bewertung des Energiebedarfs muss jedoch berücksichtigt werden, dass so ein Modell Tausenden von Menschen zugutekommen kann, während bei einem Auto die Anzahl der Nutzenden überschaubar ist. Außerdem werden solche komplexen Modelle derzeit nur von wenigen Unternehmen tatsächlich genutzt und trainiert. Viele KI-Anwendungen erfordern weitaus weniger Rechenleistung und führen dementsprechend zu einem geringeren Energiebedarf. Auch eine große Menge an Big-Data-Anwendungen, die zum Teil auf deskriptiven Analysen beruhen, benötigen deutlich weniger Energie. Zudem setzt laut Eurostat ein großer Teil der Unternehmen bereits trainierte Modelle ein, was ebenfalls zur Einsparung von Ressourcen beiträgt. Nichtsdestotrotz ist vor allem der Energiebedarf von DL- Anwendungen nicht zu vernachlässigen und wird durch den Einsatz immer komplexerer Modelle (Parcollet & Ravanelli, 2021) und höherer Nutzungsraten wahrscheinlich weiter ansteigen.

Hohe Energiebedarfe können in Zukunft auch durch Automated Machine Learning (AutoML) entstehen. Diese Methode verfolgt den Ansatz, die gesamte Modellentwicklung von den Rohdaten bis hin zum fertigen Modell zu automatisieren. Auf diese Weise soll ML auch fachfremden Personen zugänglich gemacht werden. Gleichzeitig kann die Nutzung von AutoML jedoch zu einer Erhöhung des Energiebedarfs führen, da hierbei groß angelegte automatisierte Tests mit vielen Daten- und Modellmodifikationen von einem Computerprogramm durchgeführt werden (Tornede et al., 2021). Darüber hinaus kann diese Entwicklung durch die höhere Zugänglichkeit über die Vereinfachung der Anwendung die Nutzung von KI noch einmal deutlich intensivieren.

Als ein weiterer KI-Trend bildet das Federated Learning (deutsch: föderiertes Lernen) einen dezentralen Ansatz, bei dem das KI-Modell auf unterschiedlichen Geräten trainiert wird. Federated Learning findet immer häufiger Verwendung, u. a. weil dabei Daten nicht zwangsläufig geteilt werden müssen, was neue Möglichkeiten zum Schutz der Daten generiert. Qiu et al. (2021) zeigen, dass diese Technik nicht zwangsläufig zu einer höheren Umweltbelastung führt, sondern sogar umweltfreundlicher sein kann als eine zentralisierte Lösung, da z. B. weniger Energie für die Kühlung der Hardware benötigt wird.

Um bezüglich des perspektivisch weiter ansteigenden Energiebedarfs von ML mögliche Energieeffizienzpotenziale zu identifizieren, ist ein besseres Verständnis der entsprechenden Einflussfaktoren durch deren detaillierte Betrachtung die Voraussetzung. Zum einen sind hier Faktoren im Zusammenhang mit der Software relevant (Schwartz, Dodge, Smith & Etzioni, 2019). Sowohl beim Training als auch bei der Inferenz ist der Aufbau des Modells maßgeblich (Patterson et al., 2021). Je mehr Rechenoperationen beispielsweise für einen einzelnen Beobachtungspunkt benötigt werden, desto höher ist auch der Energiebedarf des gesamten Modells.

Als Maßeinheit für die Bestimmung der Energieintensität eines Modells empfehlen Schwartz et al. (2019) die Anzahl der Gleitkommaoperationen (engl.: floating point operations, FPO), die ein Algorithmus benötigt, um zum Ergebnis zu gelangen. Dieser Wert ist bei neu entwickelten Modellen in

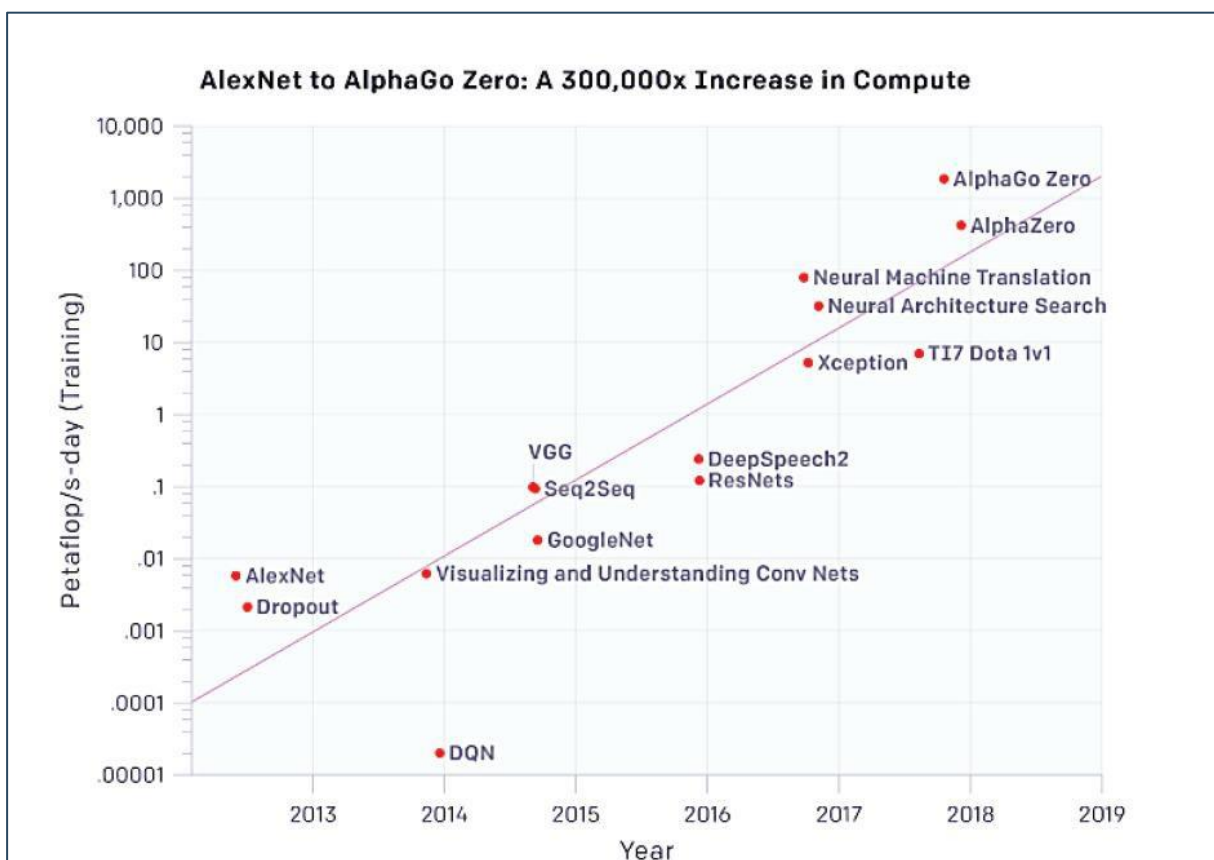
---

<sup>9</sup> Die Berechnung dieses Ergebnisses wird allerdings wissenschaftlich kritisiert von Patterson et al. (2021).

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

den letzten Jahren extrem gewachsen. So stieg er zwischen 2012 und 2018 um das 300.000-fache an (siehe Abbildung 11). Da die Genauigkeit der getroffenen Vorhersagen im selben Zeitraum weniger stark angestiegen ist, spricht Thompson (2021) von abnehmenden Erträgen, d. h., die erzielten Verbesserungen in der Vorhersagegenauigkeit gehen mit einem überproportional hohen Anstieg der Rechenleistung und des Energiebedarfs einher. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich die obigen Aussagen auf Modelle an den Grenzen der aktuellen technischen Möglichkeiten beziehen. Gleichzeitig sind im selben Zeitraum viele Algorithmen erheblich energieeffizienter geworden, denn viele Anwendungen benötigen heute weniger Rechenoperationen, als noch im Jahr 2012 für eine vergleichbar präzise Prognose erforderlich waren (Hernandez & Brown, 2020).

**Abbildung 11: Bedarf an Rechenleistung für das Training ausgewählter sehr großer KI-Anwendungen zwischen 2012 und 2018.**



Quelle: Amodei & Hernandez (2018)

Auch die Datenmenge beeinflusst den Energiebedarf. Werden mehr Beobachtungspunkte für das Trainieren eines ML-Modells verwendet oder sollen Vorhersagen für eine größere Anzahl z. B. an Individuen getätigt werden, muss mehr gerechnet werden. Die weltweite Menge anfallender Daten verdoppelt sich aktuell alle zwei Jahre. Die Möglichkeit der Verarbeitung von immer mehr Beobachtungspunkten kann folglich den Energiebedarf von KI erheblich erhöhen (Freitag et al., 2021).

Darüber hinaus wird oftmals viel Energie für die Modellentwicklung und die Hyperparameteroptimierung, also die Festlegungen von Werten, die den Lernprozess steuern, benötigt. Hier wird in den

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

meisten Fällen dasselbe Modell mit unterschiedlichen Hyperparameterkombinationen durchgerechnet und dann das mit der höchsten Vorhersagekraft ausgewählt. Dieses Vorgehen ist jedoch in vielen Fällen mit Ineffizienzen verbunden. Beispielsweise zeigen Parcollet & Ravanelli (2021), dass marginale Verbesserungen des Modells mit einem extrem hohen Energieaufwand einhergehen können, sobald ein gewisses Level an Vorhersagekraft erreicht ist. Die der Hyperparameteroptimierung übergeordnete Modellentwicklung besteht meist ebenfalls aus iterativen Verfahren zur Identifikation der bestmöglichen Modellkonstruktion.

Zudem ist die Hardware entscheidend für den Energiebedarf von KI-Anwendungen (Lacoste, Luccioni, Schmidt & Dandres, 2019; Patterson et al., 2021). Durch die technische Entwicklung steigert sich die Energieeffizienz der Hardware kontinuierlich. Dies verringert den Anstieg des absoluten, durch den immer größer werdenden Rechenbedarf bedingten Energiebedarfs. Laut dem eng mit Moore's law verknüpften Koomey's law verdoppelt sich die Anzahl der unter Einsatz eines Joules erzielbaren Rechenoperationen etwa alle ein- einhalb Jahre (Koomey, Berard, Sanchez & Wong, 2011). Zum Berechnen komplexer ML-Modelle werden meist GPUs (Graphical Processing Units)<sup>10</sup> oder speziell entwickelte Prozessoren wie die TPUs (Tensor Processing Units) verwendet. Der Energiebedarf der verschiedenen GPUs variiert für unterschiedliche DL-Modelle (Wang et al., 2020).

Darüber hinaus spielt die Art des Rechenzentrums eine große Rolle für den Energiebedarf. Laut Patterson (2021) können Cloud-Rechenzentren eineinhalb bis zwei Mal energieeffizienter sein als herkömmliche RZ. In Zukunft werden aller Voraussicht nach häufig spezialisierte KI-Rechenzentren mit MW-Anschlussleistungen für ML-Anwendungen genutzt werden. Diese sind energieeffizienter als herkömmliche Anlagen und ermöglichen damit eine kostengünstigere und schnellere Berechnung von komplexen Modellen. Dies könnte jedoch gleichzeitig zu einer gesteigerten Nutzung und damit zu Reboundeffekten führen.

### Fazit zu Künstlicher Intelligenz

In Summe ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf durch KI-Lösungen in Zukunft deutlich ansteigen wird. Effizienzsteigerungen in der Hard- und Software können den zu beobachtenden steilen Anstieg der Rechenoperationen nur teilweise kompensieren (Desislavov, Martínez-Plumed & Hernández-Orallo, 2021). In den letzten Jahren hat sich beispielsweise bei Facebook der Energiebedarf der RZ durch die Nutzung von KI pro Jahr um 40 Prozent erhöht. Die Nachfrage nach Rechenleistung für das Training von Modellen stieg bei Facebook deutlich stärker um etwa 150 Prozent pro Jahr und auch für die Inferenz hat sich die Rechenleistung um 105 Prozent pro Jahr erhöht (IEA, 2021).

In Deutschland nutzen zwar nur etwa 10 Prozent der Unternehmen KI-Anwendungen, dies ist jedoch dennoch ein höherer Anteil als in vergleichbaren europäischen Ländern. Somit nimmt Deutschland eine Vorreiterrolle ein und besitzt damit auch eine gewisse Vorbildfunktion.

Hohe Energiebedarfe werden insbesondere durch die immer komplexer werdenden DL-Modelle getrieben. Zwar ermöglichen Effizienzverbesserungen in Hard- und Software hier eine Abmilde-

<sup>10</sup> Bei GPU handelt es sich um für rechenintensive Operationen optimierte Computerprozessoren, welche ursprünglich für das schnelle Berechnen von Grafiken z. B. für Computerspiele entwickelt wurden.

zung des Anstiegs des Energiebedarfs; jedoch besteht dennoch Handlungsbedarf, da diese Art von Modellen immer breitere Verwendung findet und ihre Komplexität erwartbar auch in Zukunft weiter zunehmen wird.

### 3.2 Die fünfte Generation des Mobilfunks

#### 3.2.1 Der Begriff 5G und die Verbreitung der Technologie

5G bezeichnet die fünfte Generation von Mobilfunknetzen, welche Datenübertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 10 Gbit/Sekunde erreichen. Zudem weist sie im Vergleich zur vierten Generation deutlich geringere Latenzen von wenigen Millisekunden<sup>11</sup> sowie eine höhere Verbindungsdichte auf. Ermöglicht wird dies u. a. durch die Nutzung höherer Frequenzbereiche (siehe z. B. Bundesregierung, 2017). Diese technologischen Neuerungen bilden die Grundlage für neuartige Dienste und Anwendungen, die zu einer Erhöhung des Datenverbrauchs führen (ITU, 2022). Wie auch die früheren Generationen der Mobilfunkstandards wird der 5G-Standard kontinuierlich weiterentwickelt (ITU, 2021).

In Deutschland waren im Oktober 2021 53,23 Prozent der Fläche mit 5G DSS<sup>12</sup> und 1,79 Prozent der Fläche mit 5G abgedeckt.<sup>13</sup> Bei 5G DSS wird das volle Potenzial von 5G, wie besonders hohe Datenraten oder geringe Latenzzeiten, noch nicht in jedem Fall erreicht (Bundesnetzagentur, 2021a, S. 46). Bezüglich der Anzahl der 5G-Basisstationen in Deutschland ist insgesamt jedoch eine starke Dynamik zu verzeichnen. Gab es im Jahr 2019 lediglich 139 Basisstationen, so hat sich dieser Wert bis zum 2. Quartal 2021 auf 23.972 erhöht, was einem Anteil von 12 Prozent aller Basisstationen entspricht. Das gesamte Datenvolumen in den deutschen Mobilfunknetzen hat sich über alle Mobilfunkstandards hinweg zwischen 2012 und 2021 mit über 5 Exabyte (EB) pro Jahr mehr als verdreißigfacht (Bundesnetzagentur, 2021a, S. 42).

Gemäß Ericsson (2021) wurden bis zum Jahresende 2021 weltweit 660 Mio. 5G-Verträge erwartet. Die Gesamtzahl der erwarteten Mobilfunkverträge wird für 2021 mit 8,1 Mrd. angegeben. Für das Jahr 2027 wird ein Anstieg auf 4,4 Mrd. 5G-Verträge weltweit prognostiziert (Abbildung 12). In Westeuropa wird zum Jahresende 2021 mit einem Anteil von 6 Prozent gerechnet, welcher sich bis 2027 auf 83 Prozent erhöhen soll. Weiterhin schätzt Ericsson (2021), dass der globale mobile Datenverkehr (ohne drahtlose Festnetzzugänge) bis zum Jahresende 2021 rund 65 EB pro Monat erreichen und sich voraussichtlich auf 288 EB pro Monat im Jahr 2027 bis dahin mehr als vervierfachen wird.

Laut Ericsson (2021) macht der Videodatenverkehr aktuell 69 Prozent des gesamten mobilen Datenverkehrs aus; dieser Wert soll bis 2027 auf 79 Prozent steigen. Cisco (2020) erwartet, dass bereits im Jahr 2023 5G-Netze weltweit dreimal mehr Daten übertragen werden als 4G-Netze. Ericsson (2021) geht davon aus, dass im Jahr 2027 5G-Netze 62 Prozent des gesamten mobilen Datenverkehrs übertragen werden.

<sup>11</sup> Die Deutsche Telekom nennt eine Verbesserung um mehr als den Faktor 10 im Vergleich zu 4G

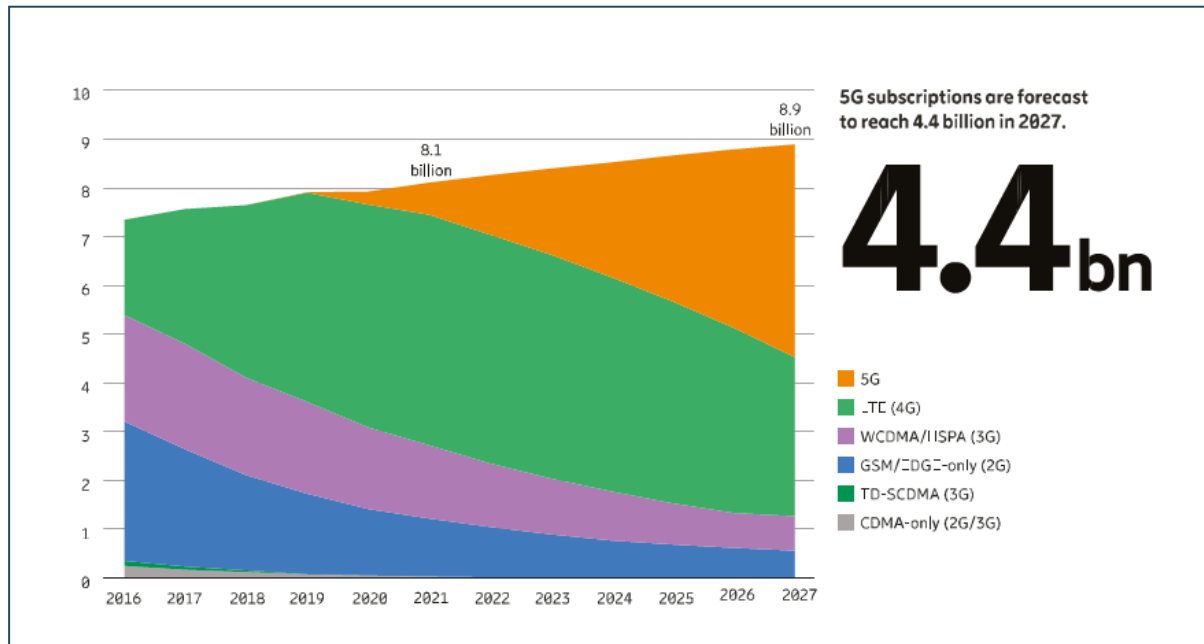
<sup>12</sup> Der aktuelle Ausbau von 5G-Netzen beruht im Wesentlichen auf der bestehenden 4G-Infrastruktur. Dabei kommt vor allem das Dynamic Spectrum Sharing (DSS) zum Einsatz. DSS erlaubt die gleichzeitige Nutzung von 4G und 5G im gleichen Frequenzbereich. Die zur Verfügung stehende Bandbreite eines bestimmten Frequenzbands wird dabei bedarfsgerecht auf die in einer Funkzelle aktiven 4G- und 5G-Nutzenden aufgeteilt. Auf diese Weise kann verhältnismäßig schnell eine 5G-Versorgung in der Fläche erreicht werden“, Quelle:

<sup>13</sup> [https://download.breitband-monitor.de/202110\\_Auswertung\\_Bund\\_Zusammenfassung.pdf](https://download.breitband-monitor.de/202110_Auswertung_Bund_Zusammenfassung.pdf)

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Der Marktanalyst IDC prognostiziert, dass im Jahr 2022 bereits 60 Prozent der verkauften Smartphones weltweit 5G-Geräte sein werden und sich dieser Anteil bei einem jährlich einstellig wachsenden Smartphone-Gesamtmarkt bis zum Jahr 2025 auf über 70 Prozent erhöhen wird.<sup>14</sup>

Abbildung 12: Mobilfunkverträge weltweit, aufgeschlüsselt nach Technologien.



Quelle: Ericsson (2021)

### 3.2.2 Energiebedarf

Hinsichtlich des zukünftigen Energiebedarfs von 5G muss zwischen den Netzen (Herstellung und Betrieb der Netzinfrastruktur) und den 5G-Endgeräten (Herstellung und Betrieb der Geräte) unterschieden werden. Neben herkömmlichen 5G-tauglichen Smartphones, Tablets und Notebooks spielen zukünftig auch IoT-Geräte im Hinblick auf den Energiebedarf eine bedeutende Rolle. Der Fokus in diesem Abschnitt liegt auf der Herstellung sowie dem Betrieb der Netzinfrastruktur; auf den Energiebedarf von IoT wird in Kapitel 3.3 eingegangen.

Williams et al. (2022) liefern eine aktuelle ausführliche Literaturübersicht über die Implikationen des Energiebedarfs von 5G. Neben dem direkten Energiebedarf von 5G liegt der Schwerpunkt der Übersicht auf möglichen Reboundeffekten bzw. dem sich allgemein ändernden Nutzungsverhalten. Letzteres bildet einerseits bei der Bemessung des zukünftigen Energiebedarfs von 5G einen entscheidenden Faktor, ist andererseits jedoch schwer zu prognostizieren.

Die Höhe des zukünftigen Energiebedarfs für den Betrieb der 5G-Netze hängt auch davon ab, wie sich die Zunahme des Datenverkehrs in Zukunft entwickeln wird und wie stark die Netze ausgelastet sein werden. Im Vergleich zu vorherigen Mobilfunkgenerationen ist die Datenübertragung gemessen in kWh/GB im 5G-Netz deutlich effizienter. Allerdings ist es wahrscheinlich, dass diese Effizienzverbesserung durch die verstärkte Nutzung überkompensiert werden wird. Es wird davon ausgegangen,

<sup>14</sup> <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48453121>.



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

dass sich die Bandbreiten und Datenraten in Mobil- und Festnetzen ca. alle 18 Monate verdoppeln. Dieser Annahme wird als Edholm's law bezeichnet (STL Partners, 2019).

Energieeffizienzsteigerungen kann es sowohl im Kernnetz als auch bei den 5G-Basisstationen geben. So nennen STL Partners (2019) als Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz bei den Basisstationen unter anderem Beamforming (die Ausrichtung der Strahlung auf einzelne Nutzende), Schlafmodi bei geringer Auslastung, höhere spektrale Effizienz (durch bessere Modulationsverfahren) und Frequenzen im Millimeterwellenspektrum (mmWave)<sup>15</sup>. Letzteres führt zwar zu einer höheren Energieeffizienz, durch die hierzu notwendigen zusätzlichen Basisstationen und Antennen könnte der absolute Energiebedarf von 5G jedoch trotzdem steigen (GSMA, 2020).

Bereits in der Vergangenheit gab es eine Vielzahl an Studien zum Gesamtenergiebedarf und der Energieintensität von Mobilfunknetzen. Diese werden in Coroamă (2021) systematisch dargestellt und auf ihre Plausibilität hin untersucht.<sup>16</sup> Laut Coroamă (2021) wird die Identitätsgleichung Gesamtenergiebedarf gleich Energieintensität mal übertragener Gesamtdatenmenge jedoch durch die heute vorhandenen Studien oftmals nicht erfüllt, was sich in teilweise implausibel stark divergierenden Werten für den Gesamtenergiebedarf bzw. die Energieintensität ausdrückt.

Nichtsdestotrotz ist es interessant zu sehen, dass trotz Fortschritten in der Energieeffizienz eine Vielzahl an Studien einen Anstieg des Gesamtenergiebedarfs in den 2010er Jahren konstatiert. So stellen etwa Pihkola et al. (2018) in ihrer Studie für Finnland fest, dass trotz eines Rückgangs des Energiebedarfs pro übertragener Datenmenge der Gesamtenergiebedarf der Mobilfunknetze im Jahr 2017 im Vergleich zum Jahr 2010 leicht angestiegen ist. Malmödin & Lundén (2018) berechnen auf Basis extrapolierter Daten einen Anstieg des Gesamtenergiebedarfs der weltweiten Mobilfunknetze von 85 TWh im Jahr 2010 auf 137 TWh im Jahr 2015.

Auch aktuellere Studien, die den Zeitraum 2020 bis 2030 betrachten, gehen von einem weiterhin steigenden Gesamtenergiebedarf der weltweiten Mobilfunknetze aus. Andrae (2020) prognostiziert einen Anstieg des Gesamtenergiebedarfs der weltweiten Mobilfunknetze von 98 TWh im Jahr 2020 auf 446 TWh im Jahr 2030, wovon auf 5G-Netze mit 396 TWh im Jahr 2030 die Mehrheit des Energiebedarfs entfallen soll. Petit et al. (2021) kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen; sie gehen von 85 TWh im Jahr 2020 und einem Anstieg auf 409 TWh im Jahr 2030 aus. Beide Studien betrachten sowohl den Energiebedarf des Betriebs des gesamten Netzes als auch den Bedarf für die Herstellung der entsprechenden Hardware.

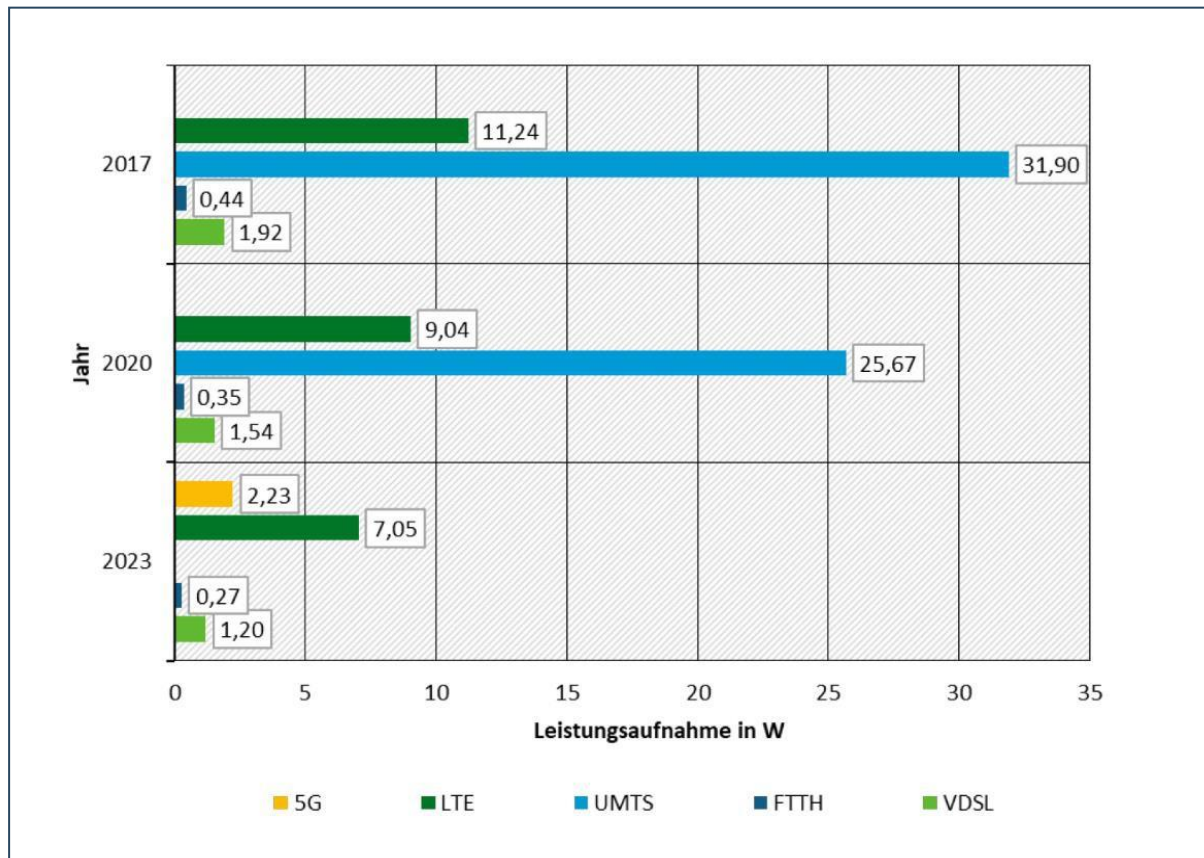
Dass die 5G-Technologie Fortschritte bei der Energieeffizienz mit sich bringt, zeigt eine Modellrechnung von Gröger et al. (2021) für Deutschland. Danach werden 5G-Netze bei einer Datenübertragung von 1 GB/h im Jahr 2023 eine Leistungsaufnahme von 2,23 Watt haben. Dies liegt nur wenig höher als der Wert von VDSL für dieselbe Datenübertragung im Jahr 2017 und entspricht zugleich weniger als einem Zehntel der Leistungsaufnahme von 3G, also UMTS, im Jahr 2017 für diese Datenübertragung (siehe Abbildung 13). Insgesamt kommen Gröger et al. (2021) zu dem Schluss, dass der Mobilfunk aufgrund seiner komplexeren Dämpfungscharakteristik einen höheren Energiebedarf hat als kabelgebundene Anschlüsse. Insbesondere für den Aufbau von 5G-Netzen im Bereich der mm-Wellen ist darüber hinaus eine Vielzahl neuer Antennen notwendig, deren Reichweite gering ist und die eine niedrige spektrale Effizienzaufweisen (5G Americas, 2020).

---

<sup>15</sup> Siehe dazu auch NGMN (2021).

<sup>16</sup> Aslan et al. (2018) bieten eine ähnliche Übersicht über Studien zum Festnetz-Internet.

Abbildung 13: Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei einer Datenübertragung von 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum in Abhängigkeit der Technikgeneration.



Quelle: Gröger et al. (2021, S. 104)

### Fazit zur Fünften Generation Mobilfunk

Basierend auf der aktuellen Studienlage ist noch keine abschließende Abschätzung der künftigen Entwicklung des Energiebedarfs in 5G-Netzen möglich. Zu diesem Schluss kommt auch die IEA (2021) in ihrem Data Centres and Data Transmission Networks Tracking Report: „The overall energy and emissions impacts of 5G, however, are still uncertain...“. Einzelne Studien deuten jedoch darauf hin, dass die Energieeffizienzverbesserungen von 5G nicht ausreichen werden, um den Energiebedarf durch den Anstieg des Datenverkehrs abzufangen. Schlussendlich könnte weltweit bis zum Jahr 2030 in den Mobilfunknetzen mit einem nicht unerheblichen Mehrbedarf zu rechnen sein.

Vieles hängt dabei auch von möglichen Reboundeffekten bzw. dem sich allgemein ändernden Nutzungsverhalten ab. Zudem besteht laut Williams et al. (2022) nach wie vor ein Mangel an öffentlich zugänglichen, von unabhängigen Expertinnen und Experten begutachteten und vollständig transparenten Studien zum gegenwärtigen und zukünftigen Energiebedarf von 5G-Netzen.

Bei der Gesamtbetrachtung hinsichtlich der Auswirkungen von 5G sollte aber stets bedacht wer-



den, dass durch mobiles Internet in vielen anderen Bereichen der Wirtschaft erhebliche Potenziale für Energieeffizienzverbesserungen geschaffen werden können, welche den möglicherweise steigenden Gesamtbedarf der Mobilfunknetze überkompensieren.

### 3.3 Internet of Things

#### 3.3.1 Der Begriff IoT und die Verbreitung der Technologie

Das Internet der Dinge (IoT, engl. für Internet of Things) umfasst mehrere Technologien, welche jeweils eine Verbindung zwischen physischen Objekten und der virtuellen Welt schaffen. Dies erlaubt die Kommunikation von Geräten, Maschinen, Schaltern und Sensoren miteinander und schafft neue Möglichkeiten der digitalen Transformation. Derartige Vernetzungen sind sowohl bei Alltagsgegenständen als auch in der Industrie möglich. Zu den IoT-Anwendungen zählen z. B. Smart-Home-Geräte, vernetzte Industrieanlagen, selbstfahrende Autos und intelligente Stromnetze (DIGITAL X, 2021).

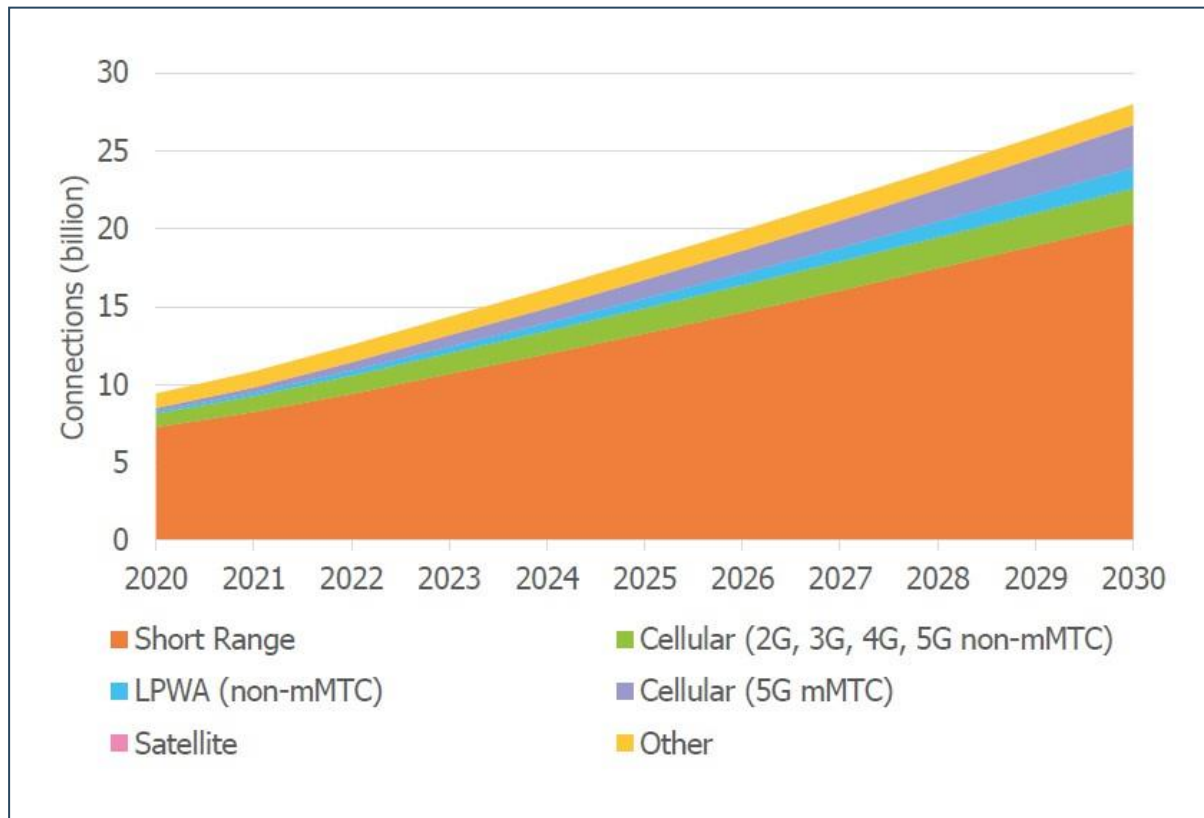
Das Internet der Dinge erlebt momentan ein rasantes Wachstum. Von Grijpink et al. (2020)<sup>17</sup> prognostizieren, dass die Zahl der IoT-Objekte von 19 Mrd. im Jahr 2018 auf 84 Mrd. im Jahr 2030 ansteigen wird. Dies entspräche einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 13 Prozent (CAGR). Transformer Insights (2021) erwartet mit einem Anstieg von 9,4 auf 28 Mrd. IoT-Objekten zwischen 2020 und 2030 eine etwas geringere jährliche Wachstumsrate von 11 Prozent (Abbildung 14).<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> Studie im Auftrag von McKinsey.

<sup>18</sup> Die unterschiedlichen Werte lassen sich u. a. auch durch die unterschiedlichen Definitionen von IoT erklären.

Abbildung 14: Prognose der weltweiten Anzahl an IoT-Geräten nach Art der Verbindung<sup>19</sup>.



Quelle: Transformer Insights (2021)

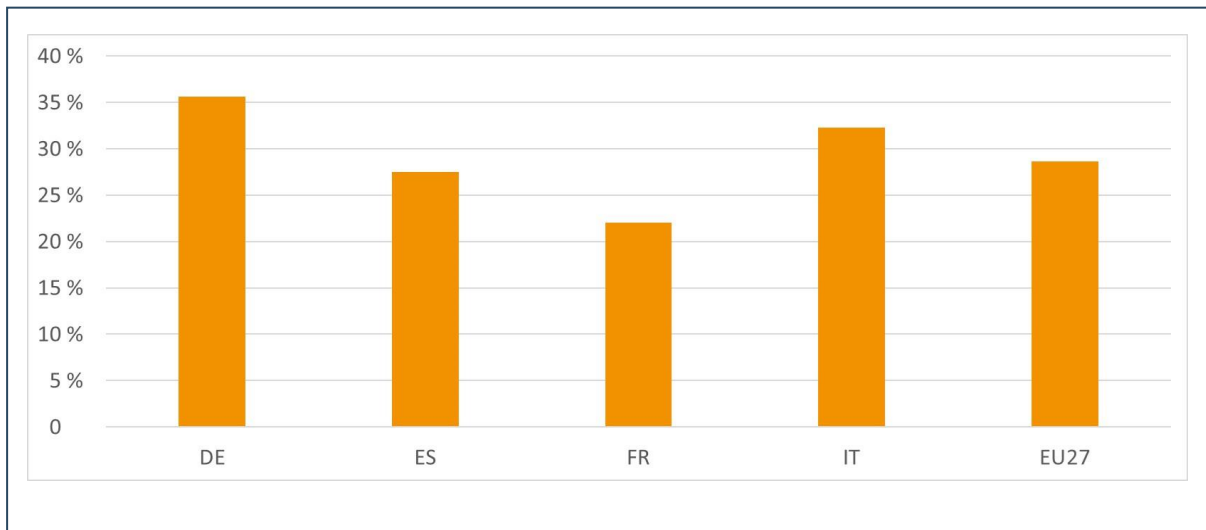
Transformer Insights (2021) geht davon aus, dass die Anzahl an IoT-Objekten in privaten Haushalten etwas höher sein wird als in der Industrie. Außerdem wird voraussichtlich ein Großteil dieser Objekte in Netzwerken mit geringer Reichweite verbunden sein. Das relative Wachstum von Machine-to-Machine-Verbindungen wird aber gemäß Transformer Insights in Mobilfunknetzwerken am höchsten sein. Cisco (2020) erwartet hier ebenfalls mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 30 Prozent den größten Zuwachs.

In Deutschland nutzten im Jahr 2021 bereits mehr als 35 Prozent der Unternehmen miteinander verbundene digitale Geräte oder Systeme (Abbildung 15), deutlich mehr als in ähnlich großen europäischen Ländern sowie in der gesamten EU-27.

<sup>19</sup> mMTC: massive machine-type-communications

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

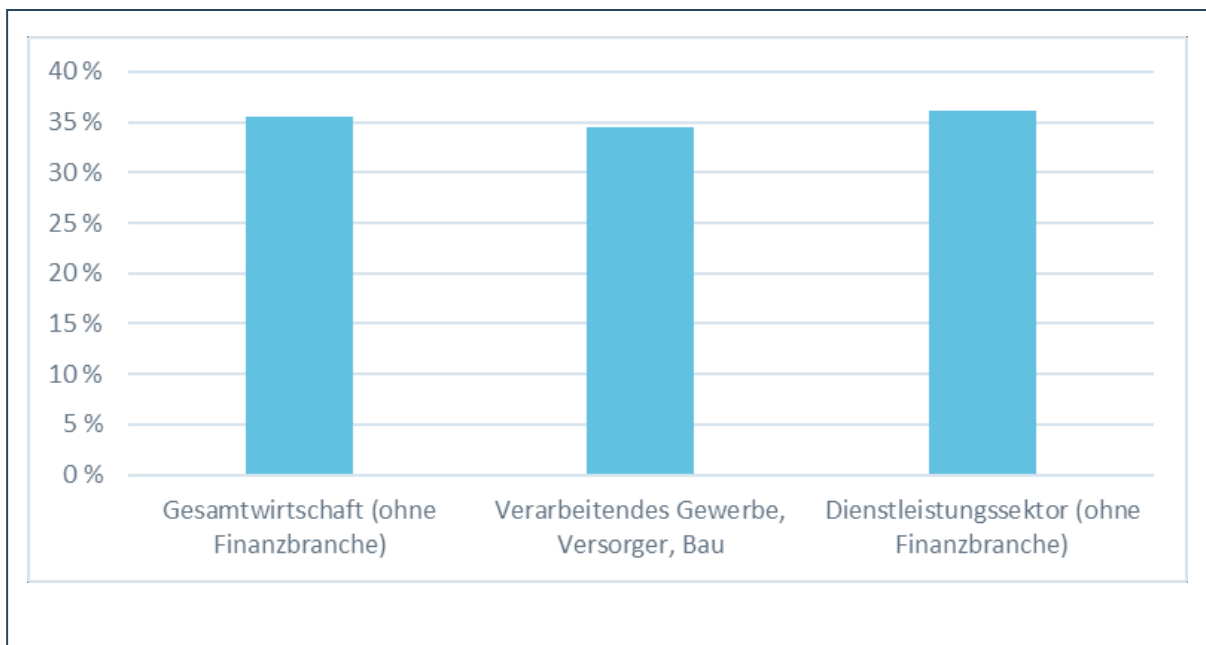
**Abbildung 15: Prozentualer Anteil an Unternehmen in Deutschland, vergleichbaren europäischen Ländern sowie der gesamten EU-27, die im Jahr 2021 das IoT nutzten.**



Quelle: Eurostat (2021a)

IoT-Anwendungen weisen im verarbeitenden Gewerbe und im Dienstleistungssektor ähnlich hohe Nutzungsraten auf. Demzufolge scheint das IoT für den sekundären und den tertiären Sektor eine ähnlich hohe Relevanz zu besitzen (Abbildung 16).

**Abbildung 16: Prozentualer Anteil der deutschen Unternehmen, die das IoT im Jahr 2021 nutzten, aufgliedert nach verschiedenen Wirtschaftsbereichen**



### 3.3.2 Energiebedarf

Das rasante Wachstum des IoT erklärt sich durch die Vielzahl seiner Anwendungsmöglichkeiten u. a. im Bereich Industrie 4.0, Smart Cities und Smart Home. Durch die Vernetzung von Gegenständen kann der Mensch hier in vielfältiger Weise unterstützt werden, beispielweise bei der Verringerung von Umweltbelastungen. So ermöglicht das IoT etwa die Koordination unterschiedlicher dezentraler Energieversorger oder die automatisierte Anpassung des Energiebedarfs an die aktuell verfügbare Strommenge (PWC, 2017). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die verbesserte Informationsbereitstellung durch Sensoren und deren Vernetzung, anhand derer die Industrie 4.0 den Energie- und Materialbedarf in der Produktion reduzieren kann (VDI, 2017, S. 2). Darüber hinaus könnten in der Smart City Bewohnerinnen und Bewohner informationsgestützt schneller und umweltschonender zum Ziel kommen (EnBW, 2021). Dies setzt natürlich voraus, dass die Smart City umweltfreundliche Verkehrsträger unterstützt und den motorisierten Individualverkehr zurückdrängt. Zuhause erlauben Smart Meter eine bessere Überwachung und Steuerung des eigenen Energiebedarfs (EY, 2013).

Dennoch hat die Vielzahl neuer Möglichkeiten auch ihren Preis: Schon heute ist der Strombedarf des IoT sehr hoch. Laut Bordage et al. (2021) verbrauchten im Jahr 2019 IoT-Geräte in der Europäischen Union (EU-28) ca. 27,7 TWh. Dies entspricht ungefähr 10 Prozent des gesamten Energiebedarfs der IKT (Bordage 2021) und ungefähr einem Prozent der gesamten Stromproduktion in Europa (Bordage 2021; Eurostat, 2021b).

Ein IoT-Objekt besteht aus drei Komponenten: (I) dem Gegenstand selbst, (II) einem Element, durch das Daten erhoben oder ausgewertet werden können, und (III) einem Element, das der Vernetzung, d. h. dem Informationsaustausch dient (Bordage et al., 2021b). Durch die zweite und dritte Komponente kommt es folglich zu einem zusätzlichen Verbrauch, der sich nicht unerheblich auf den Gesamtenergiebedarf auswirkt (Bordage et al., 2021b; Hintemann & Hinterholzer, 2018). So beziehen sich Bordage et al. (2021) in ihrer Abschätzung des Energiebedarfs nur auf die tatsächlichen IoT-Komponenten und schließen den herkömmlichen Gegenstand selbst nicht mit ein. Bei dieser Verfahrensweise ist jedoch die exakte Abgrenzung des IoT-Anteils nicht immer eindeutig möglich, was die genaue Bestimmung des hierfür benötigten Energieanteils erschwert.

Ein weiteres Problem hinsichtlich des Energie- und Ressourcenbedarfs durch IoT ergibt sich durch die Nutzungsdauer. Der rasante technische Fortschritt digitaler Technologien und die dadurch teilweise bedingte verkürzte Funktionsdauer der IoT-Anteile (Lawrence, 2021) führt oftmals zu einem Anreiz, den gesamten Gegenstand schneller auszutauschen als zuvor.

Der zukünftige Energiebedarf durch IoT wird zum einen durch die wachsende Anzahl an IoT-Objekten beeinflusst. Zum anderen ist aber davon auszugehen, dass diesem Anstieg Effizienzgewinne während der Nutzungsphase der Objekte gegenüberstehen. Andrae und Edler (2015) schätzen demzufolge, dass der Gesamtenergiebedarf für die Verwendung von Endgeräten im Allgemeinen bis zum Jahr 2030 eher ab- als zunehmen wird. Bei der Betrachtung zukünftiger Energiebedarfe von IoT-Objekten sollte jedoch in jedem Fall deren gesamter Lebenszyklus berücksichtigt werden. Das und Mao (2020) gehen beispielsweise davon aus, dass der weltweite Primärenergiebedarf für die Herstellung von IoT-Halbleitern von 556 TWh im Jahr 2016 auf 9.722 TWh im Jahr 2025 ansteigen könnte (Freitag et al., 2021).<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Laut Freitag et al. (2021) besteht allerdings Grund zu der Annahme, dass dieser Wert deutlich zu hoch angesetzt ist.

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

IoT-Objekte sind sehr heterogen, was zu Ungenauigkeiten bei Zukunftsprognosen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus führt. Zwar wird allgemein angenommen, dass die Komplexität eines IoT-Objekts mit der dadurch entstehenden Umweltbelastung korreliert, gleichzeitig ist jedoch die zukünftige Verteilung von komplexen und weniger komplexen IoT-Objekten in der Gesamtmenge der IoT-Objekte ungewiss. Dementsprechend prognostizieren Pirson & Bol (2021) für das Jahr 2027, dass es – abhängig von der Verteilung – durch IoT-Objekte zu einer jährlichen Umweltbelastung von weltweit 22 bis 562 Mrd. t CO<sub>2</sub>e kommen kann. Allein schon die Variationsbreite dieser Angabe zeigt die Unsicherheit einer solchen Vorhersage.

Die kontinuierliche Erreichbarkeit von Geräten, Maschinen, Schaltern und Sensoren erfordert deren ununterbrochenen Bereitschaftsbetrieb. Insofern wird der Energiebedarf von IoT-Geräten maßgeblich vom passiven Standby-Modus beeinflusst. Laut Rozite (2014) können bei einigen Anwendungen bis zu 80 Prozent des Energiebedarfs auf die Aufrechterhaltung der Netzverbindung zurückgeführt werden. Die meisten vernetzten Gegenstände dürfen jedoch infolge von Umweltregulierungen wie etwa die EU-Richtlinie 2009/125/EG (Standby-VO) im Standby-Modus nur eine Leistungsaufnahme im unteren einstelligen Watt-Bereich besitzen. Die einzelnen IoT-Objekte verbrauchen somit in diesem Zustand nur wenig Energie. Der insgesamt sehr hohe Energiebedarf durch den Bereitschaftsbetrieb entsteht durch die hohe Anzahl an IoT-Objekten. Durch das starke Wachstum in diesem Bereich könnte laut Hintemann und Hinterholzer (2018) der jährliche Standby-Stromverbrauch von IoT-Objekten in der EU-28 langfristig bis zu 70 TWh betragen.

Das Internet der Dinge besteht nicht nur aus einer Vielzahl miteinander verbundener Objekte, sondern umfasst auch die gesamte Infrastruktur, die diesen Geräten die Verbindung miteinander erst ermöglicht (Bordage et al., 2021b). Auch dieser Aspekt ist relevant für den Energiebedarf, der nicht zuletzt auch von der Art des Netzwerks abhängt, in dem die IoT-Objekte miteinander verbunden sind. Beispielsweise verbrauchen LPWA-Netzwerke (engl.: Low Power Wide Area) weniger Energie als Mobilfunk-, Satelliten- oder WiFi-Netzwerke; andererseits können durch LPWA-Netzwerke jedoch auch viel geringere Datenmengen im gleichen Zeitintervall übertragen werden.

Eine weitere Herausforderung für den Energiebedarf von IoT-Objekten sind Rebound- und Induktionseffekte. Beispielsweise ist es wahrscheinlich, dass der autonome Staubsaugerroboter öfter zum Einsatz kommt als der herkömmliche Staubsauger. Auch können durch das schnellere Vorankommen in der Smart City, z. B. durch einen in Echtzeit optimierten Verkehrsfluss, weitere Strecken zurückgelegt werden. Zudem eröffnet das IoT neue Konsummöglichkeiten; so können etwa im Smart Home während einer längeren Abwesenheit Räume nach Zeitplan beleuchtet und Jalousien hoch- und heruntergefahren werden, um unerwünschte Eindringlinge abzuschrecken (Quack, Liu & Gröger, 2019).

Auch durch das Ineinandergreifen verschiedener digitaler Schlüsseltechnologien werden Rebound- und Induktionseffekte befördert. So sind z. B. die durch die 5G-Technologie ermöglichten höheren Datenübertragungsraten ein Grund, warum die IoT-bedingte Datenmenge in den kommenden Jahren voraussichtlich exponentiell steigen wird (Bordage et al., 2021b). Künstliche Intelligenz ermöglicht die Analyse dieser Daten sowie das Optimieren von IoT-Anwendungen. Durch Distributed-Ledger-Technologien könnten neue Anwendungsszenarien für IoT-Objekte geschaffen werden. Dies fördert zum einen die Weiterentwicklung und -verbreitung der jeweils verwendeten Technologie und lässt zum anderen die Anzahl der IoT-Objekte weiter steigen.

### Fazit zum Internet der Dinge

Der schon heute sehr hohe Energiebedarf des IoT wird wahrscheinlich in Zukunft noch weiter ansteigen. Angesichts der Vielfalt der Anwendungen und der Tatsache, dass IoT eine sehr schnelle Technologie ist, gestaltet sich das Unterfangen eines vollständigen Überblicks über zukünftige Energiebedarfe jedoch schwierig; hier ist weitere Forschungsarbeit erforderlich. Diese sollte nicht nur den Energiebedarf bei der Nutzung der Objekte, sondern deren gesamten Lebenszyklus sowie auch mögliche Rebound- und Induktionseffekte berücksichtigen.

## 3.4 Distributed-Ledger-Technologie

### 3.4.1 Der Begriff DLT und die Verbreitung der Technologie

Die Begriffe Distributed-Ledger-Technologie und Blockchain werden im öffentlichen Diskurs oftmals synonym verwendet, unterscheiden sich allerdings insofern, als dass die Blockchain-Technologie lediglich eine Unterkategorie der DLT darstellt.

Die DLT bezeichnet eine dezentrale Datenbank, die von vielen verschiedenen Teilnehmenden betrieben wird. In Abhängigkeit der jeweiligen Ausgestaltung (z. B. privat oder öffentlich, s. u.) verfügt sie über keine zentrale Kontroll- oder Vertrauensinstanz und besitzt dementsprechend auch keinen Single Point of Failure. Daten werden von verschiedenen Akteuren zeitgleich in einem dezentralen Transaktionsregister gespeichert. Dies soll zu mehr Transparenz und geringerer Anfälligkeit gegenüber Betrug und Manipulation führen, da somit eine Korruption des Systems erschwert wird (Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, 2018; Expertenkommission Forschung und Innovation, 2019; Reetz, 2019a). Unter Einsatz eines Konsensmechanismus einigen sich die Teilnehmenden einer dezentralen Datenbank gemeinsam auf einen einheitlichen Stand des Registers. Die Wahl dieses Konsensmechanismus ist von zentraler Bedeutung für den Energiebedarf der jeweiligen DLT (Reetz, 2019b).

Die Blockchain ist über den Konsensmechanismus hinaus durch einige weitere Merkmale gekennzeichnet. Informationen werden in sogenannten Blöcken (Blocks) gespeichert, die mittels kryptografischer Verfahren zu einer Kette (Chain) verbunden werden. Jeder Block endet mit einer kryptografischen Signatur, dem Hash, welcher zugleich den Beginn des jeweils folgenden Blocks darstellt. Dieser Hash verändert sich, sobald Informationen innerhalb eines Blocks nachträglich verändert werden. Dies stellt sicher, dass Daten innerhalb der Kette nicht unbemerkt verändert werden können (Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, 2018; Expertenkommission Forschung und Innovation, 2019).

Sowohl die DLT allgemein als auch die Blockchain-Technologie im Speziellen besitzen in nahezu allen Bereichen der Wirtschaft eine Vielzahl potenzieller Anwendungsfelder. Diese reichen von Themen der Finanzwirtschaft wie Decentralized Finance (DeFi), dessen Protokolle sich sogenannte Smart Contracts zunutze machen, über Anwendungen im Supply Chain Management entlang des Wertschöpfungsprozesses einer Industrie 4.0 (etwa zur Sicherstellung einer besseren Transparenz und Nachverfolgbarkeit von Lieferketten) bis hin zu Smart Cities, einer Transformation der Stromindustrie, digitalen Identitäten oder einem digitalen Gesundheitswesen (Alladi, Chamola, Parizi & Choo, 2019; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2019; Cong & He, 2019; Dimitrov, 2019; Dujak & Sajter, 2019; Saberi, Kouhizadeh, Sarkis & Shen, 2019).

Richard et al. (2019) beschäftigen sich in ihrer Blockchain-Studie „Blockchain in der integrierten Energiewende“ mit den Einsatzmöglichkeiten der Blockchain-Technologie in der Energiewirtschaft. Im Ergebnis räumen sie der Technologie das Potenzial ein, die Transformation des Energiesystems durch die Entwicklung neuer digitaler Geschäftsmodelle entscheidend mit voranzutreiben. Das könnte der Energiewirtschaft eine Vorreiterrolle für weitere Branchen verleihen. Im ersten Schritt erfordert dies die Erprobung und Weiterentwicklung der Blockchain-Technologie in geeigneten Anwendungsfällen.<sup>21</sup>

Obwohl die DLT allgemein sowie die Blockchain-Technologie im Speziellen eine Reihe von vielversprechenden und mitunter disruptiven Anwendungsfällen bietet, ist noch unklar, ob sie das Potenzial besitzt, sich als Querschnittstechnologie langfristig zu etablieren. Dies hängt beispielsweise von der Governance der jeweiligen Systeme ab, worunter u. a. das Setzen von Anreizen sowie der jeweils angewandte Konsensmechanismus fallen (Expertenkommission Forschung und Innovation, 2019; Reetz, 2019a). Die Ergebnisse der Bitkom-Research-Untersuchungen zur Digitalisierung der letzten Jahre verdeutlichen die große Unsicherheit bezüglich einer zukünftigen flächendeckenden Verbreitung der Blockchain-Technologie. In einer wiederholten Befragung von rund 600 Unternehmen mit mindestens 20 Mitarbeitenden liegt die Menge derer, die die Blockchain-Technologie aktuell nutzen oder deren Nutzung erwägen, im mittleren einstelligen Prozentbereich (Berg, 2019, 2020, 2021).<sup>22</sup> Allerdings zeichnet sich ein Trend ab, nach dem größere Unternehmen die Blockchain-Technologie, ähnlich wie andere digitale Technologien, deutlich häufiger nutzen als kleinere (Bitkom Research, 2021).

Für eine flächendeckende Anwendung der Technologie müssen zunächst noch weitere Schritte bezüglich ihrer Skalierbarkeit sowie ihres Transaktionsdurchsatzes erfolgen. Dies ist notwendig, um beispielsweise im Bereich der Zahlungsdienstleister mit etablierten Akteuren wie Visa, Mastercard oder PayPal konkurrieren zu können. Nur so kann es der Technologie gelingen, einen echten Mehrwert für die Wirtschaft zu generieren und dauerhaft auch in der Breite Anwendung zu finden. Gegenwärtig werden verschiedene Ansätze zur Adressierung dieser Herausforderungen diskutiert (Bundesnetzagentur, 2021b; Reetz, 2019a).

### 3.4.2 Energiebedarf

Eine aktuelle Herausforderung stellen die hohen Energiebedarfe einiger Blockchains dar. Der Energiebedarf von Blockchain-Lösungen entsteht zum einen durch den Betrieb der Computer, die die jeweilige Blockchain speichern (Nodes), und zum anderen durch die Erstellung neuer Blöcke (Mining). Gerade das Mining ist aktuell bei einigen Blockchains für den deutlich größeren Anteil ihres Energiebedarfs verantwortlich. Von zentraler Bedeutung bei der dezentralen Überprüfung und Speicherung von Transaktionen sowie der Prävention von Manipulationen ist der im Protokoll verwendete Konsensmechanismus zur gemeinsamen Entscheidungsfindung. Im Zentrum der Debatte um den hohen Energiebedarf von Blockchains steht vor allem der sogenannte Proof-of-Work-Konsensmechanismus (PoW), der u. a. in der Blockchain der wohl bekanntesten Kryptowährung, dem Bitcoin, Anwendung findet. Beim PoW wird die Sicherheit der Blockchain durch sehr hohe Anforderungen an die Rechenleistung gewährleistet. Eine Manipulation wird praktisch unmöglich, da hierfür über 50 Prozent der Rechenleistung des jeweiligen Netzwerks notwendig wäre. Die Umsetzung des PoW besteht darin,

<sup>21</sup> Im Folgenden liegt der Fokus der Diskussion über die Energieverbräuche vor allem auf der Blockchain-Technologie, da diese in Abhängigkeit des verwendeten Konsensmechanismus die Energiebedarfe der DLT ggf. maßgeblich treibt.

<sup>22</sup> Die Menge der Unternehmen, die angeben, die Blockchain-Technologie zu nutzen bzw. deren Nutzung zu erwägen, schwankt von 2 Prozent im Jahr 2017 über 6 Prozent 2019 bis hin zu 4 Prozent in der jüngsten Umfrage 2021. Diese Schwankungen dürften auf die geringe Stichprobengröße von 505 bis 606 Unternehmen zurückzuführen sein.

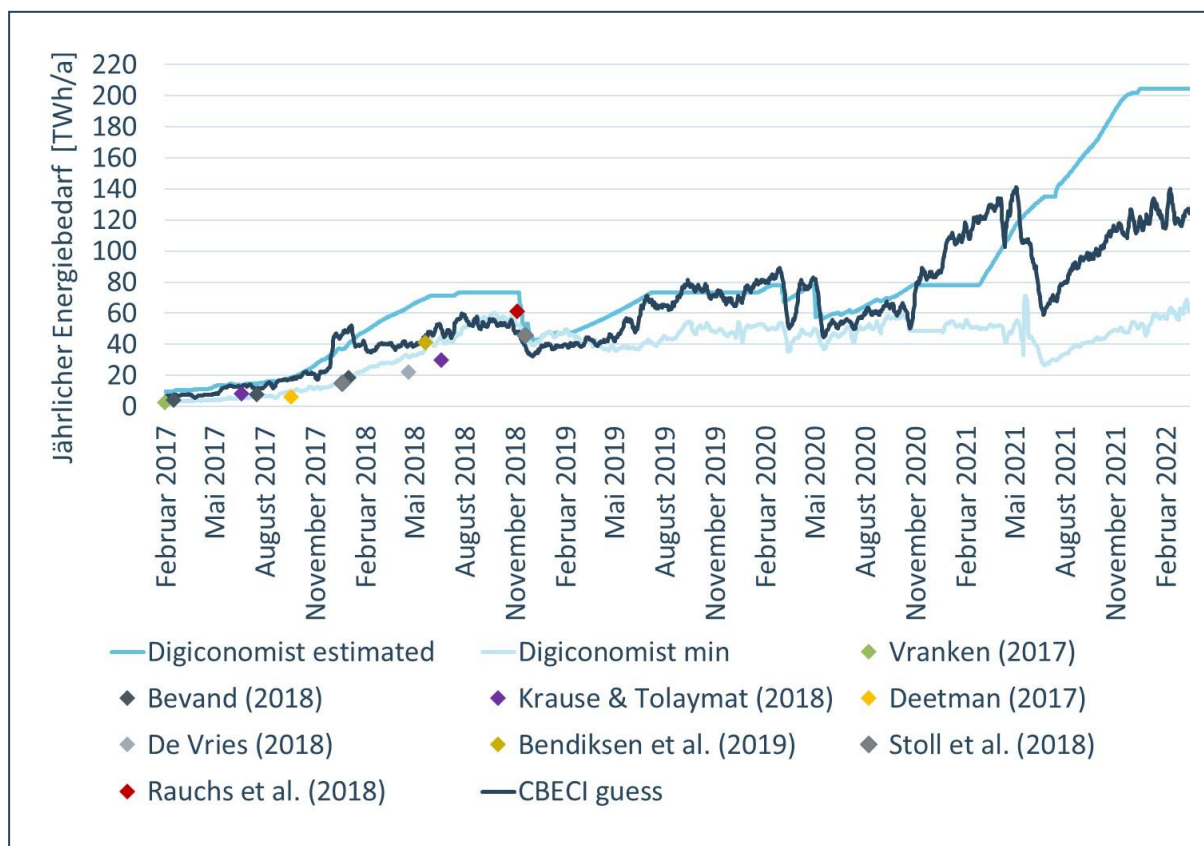


## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

dass die Miner – also voneinander unabhängige, aber miteinander verbundene Nodes, deren Aufgabe darin liegt, Transaktionen zu verifizieren – kryptografische Zufallsrätsel unter hohem Rechenaufwand lösen müssen, um die jeweiligen Transaktionen validieren und der Kette neue Blöcke hinzufügen zu können (Reetz, 2019a; Sedlmeir, Buhl, Fridgen & Keller, 2020).

Die Angaben zur Höhe des jährlichen Stromverbrauchs für das Bitcoin Mining liegen aktuell<sup>23</sup> zwischen etwa 60 TWh/Jahr und 200 TWh/Jahr (Abbildung 17). Die Internationale Energieagentur IEA schätzt den Stromverbrauch, der im Jahr 2021 allein auf Bitcoin entfallen ist, auf etwa 100 TWh (IEA, 2021). Das entspricht in etwa dem Strombedarf von Schweden (Central Intelligence Agency, 2016) und dürfte mit steigender Komplexität der kryptografischen Rätsel weiter zunehmen (Krause & Tolaymat, 2018; de Vries, 2018).

Abbildung 17: Jährlicher Energiebedarf des Bitcoin-Netzwerks (in TWh).



Quellen: Digiconomist (2022), CBECl (2022), Bendiksen et al. (2019), Stoll et al. (2019), Rauchs et al. (2018), De Vries (2018), Krause & Tolaymat (2018), Bevand (2017), Deetman (2017), Vranken (2017)

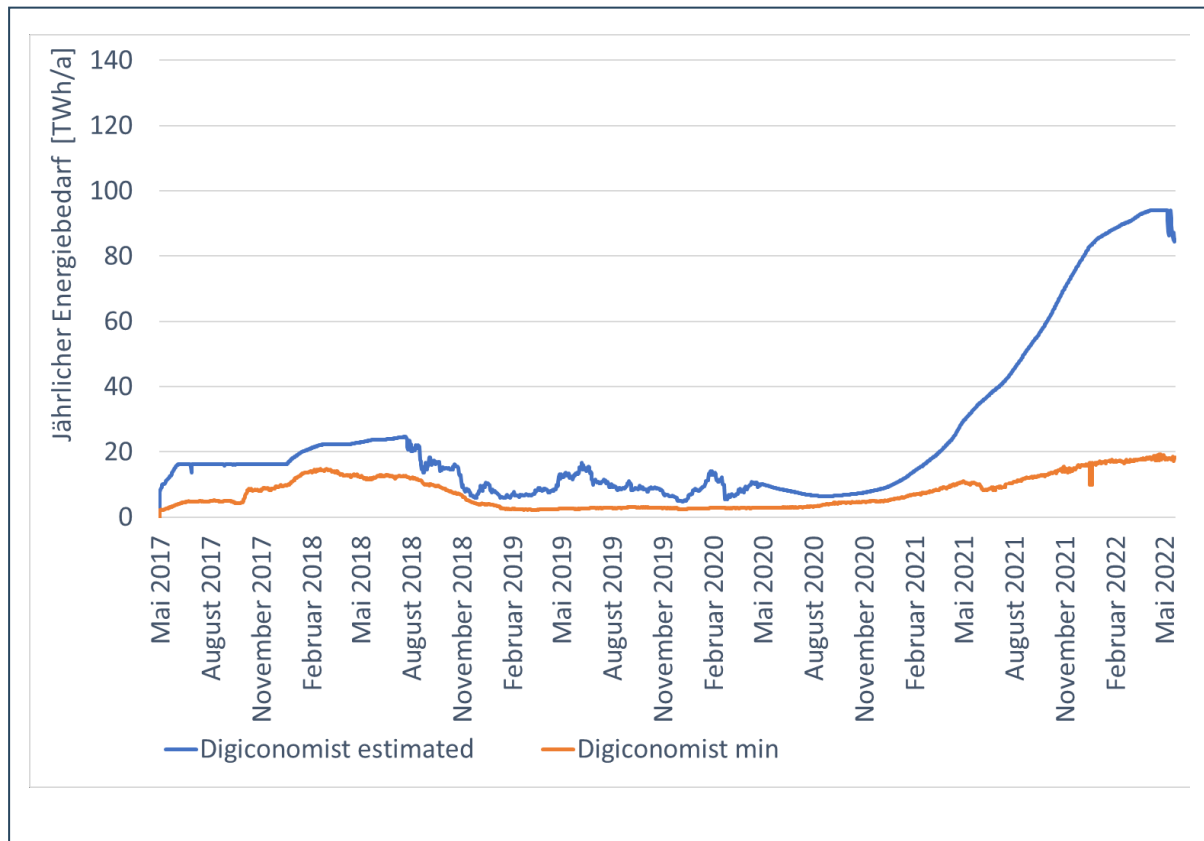
Auch der jährliche Energiebedarf von Ethereum, der Blockchain mit dem nach Bitcoin zweitgrößten Stromverbrauch (Gallersdörfer, Klaaßen & Stoll, 2020), stieg in den vergangenen zwei Jahren stark an. Er wird gegenwärtig auf 17 bis 84 TWh/Jahr<sup>24</sup> geschätzt (Abbildung 18)

<sup>23</sup> Stand: 9. Juni 2022

<sup>24</sup> Stand: 9. Juni 2022



Abbildung 18: Jährlicher Energiebedarf des Ethereum-Netzwerks (in TWh).



Quelle: Digiconomist (2022)

Sollte die Verbreitung von Bitcoin und weiterer Kryptowährungen der Entwicklung anderer weit verbreiteter Technologien folgen, bestünde durch den dadurch hervorgerufenen Energiebedarf sowie den mit diesem verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß eine ernst zu nehmende Gefahr für die Erreichung der Pariser Klimaziele (Mora et al., 2018; Reetz, 2019a). Der genaue Einfluss, den Blockchain-Netzwerke und insbesondere diejenigen, die den PoW nutzen, auf Energiebedarfe und THG-Emissionen haben, hängt jedoch von vielen Faktoren wie etwa der Energieeffizienz der verwendeten Mining-Hardware<sup>25</sup> oder dem Anteil erneuerbarer Energien am Strommix (Dittmar & Praktiknjo, 2019; Gallersdörfer et al., 2020; Mora et al., 2018) ab. Von besonderer Relevanz ist hier auch der Börsenwert der jeweiligen Kryptowährung, da die Miner in dieser bezahlt und die Mining-Aktivitäten daher mit steigendem Börsenwert rentabler werden, woraufhin eine Ausweitung des Minings erfolgt. Ebenso sind der Strompreis und die damit verbundenen Kosten des Minings sowie die regulatorischen Einschränkungen entscheidende Faktoren, welche die Intensität des Minings bzw. den Stromverbrauch von Blockchains, die den PoW nutzen, beeinflussen (Das & Dutta, 2020; IEA, 2019).

Der Kryptobereich ist aktuell derjenige Blockchain-Sektor, der die größte Dynamik aufweist. Insbesondere das Kapital, das in den Protokollen des sogenannten DeFi-Sektors investiert ist („Total Value Locked“), stieg in den vergangenen Jahren exponentiell an (DeFi Pulse, 2022). Die meisten dieser

<sup>25</sup> Effizientere Hardware kann ähnlich wie ein hoher Preis einer Kryptowährung dazu führen, dass mehr Mining betrieben wird, wodurch die Hashrate steigt. Dies führt beispielsweise im Bitcoin-Protokoll wiederum dazu, dass die Schwierigkeit der zu lösenden Rätsel steigt, wodurch der positive Effekt der effizienteren Hardware auf den Energiebedarf stark begrenzt werden kann

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

DeFi-Protokolle operieren auf der Ethereum-Plattform (DeFi Pulse, 2022). Bitcoin, die nach Marktkapitalisierung umfangreichste Kryptowährung, war im Jahr 2020 für rund zwei Drittel des gesamten Energiebedarfs der zwanzig größten Kryptowährungen verantwortlich. Diese zwanzig Kryptowährungen repräsentieren zusammen gut 98 Prozent der gesamten Marktkapitalisierung aller Kryptowährungen; die meisten von ihnen greifen auf den PoW zurück (Gallersdörfer et al., 2020; Reetz, 2019b).

In der öffentlichen Diskussion werden der Bitcoin – und damit verbunden sein energieintensiver PoW-Konsensmechanismus – oftmals fälschlicherweise mit der Blockchain-Technologie gleichgesetzt, obwohl es teilweise sehr tiefgreifende Unterschiede zwischen den Blockchains und ihren jeweiligen Konsensmechanismen gibt (Reetz, 2019b). Diese Fehleinschätzung erweckt den Eindruck, jede Blockchain sei gleichermaßen energieintensiv und damit umweltschädlich.

Um die zukünftigen Energiebedarfe der Blockchain abschätzen und bewerten zu können, bedarf es zunächst der Einordnung verschiedener Formen von Blockchain-Netzwerken. Diese unterscheiden sich zuerst einmal in der Art des Zugangs. Neben den unbeschränkt zugänglichen öffentlichen („public“) gibt es auch geschlossene („private“) Blockchains, bei denen die Teilnehmenden zunächst Zugangskontrollen durchlaufen müssen. Zudem gibt es sogenannte konsortiale Blockchains, die eine hybride Lösung zwischen privaten und öffentlichen Blockchains darstellen. Daneben unterscheidet man auch die Kategorien der „permissionless“ und „permissioned“ Blockchains. Erstere beschreiben Netzwerke, in denen jeder Teilnehmende ein „Validator“ sein kann, wohingegen potenzielle Validatoren in Letzteren einen weiteren Auswahlprozess durchlaufen müssen, um neue Blöcke validieren zu können (Bundesnetzagentur, 2021b; Fridgen, Radszuwill, Urbach & Utz, 2018; Rieger, Guggenmos, Lockl, Fridgen & Urbach, 2019).

Die zentrale Aufgabe eines Blockchain-Netzwerks besteht darin, sicherzustellen, dass sich die verschiedenen Nodes, zwischen denen insbesondere in öffentlichen Netzwerken keine Vertrauensbeziehung besteht, auf eine fälschungssichere Aufzeichnung der Transaktionen einigen und an der längsten Kette weiterarbeiten (Wang et al., 2019). Eine entscheidende Rolle dabei kommt wie erwähnt dem Konsensmechanismus zu. Hierfür gibt es neben dem PoW Alternativen, welche einen deutlich geringeren Strombedarf bei gleichzeitig höheren Transaktionsgeschwindigkeiten und besserer Skalierbarkeit aufweisen (Bundesnetzagentur, 2021b; IEA, 2019; Saleh, 2021; Sedlmeir et al., 2020).

Beim Proof-of-Stake (PoS) beispielsweise wird durch Teilnehmende, die einen Block validieren wollen, eine Sicherheit in Form von Coins (Stake) hinterlegt, die bei betrügerischem Verhalten einbehalten und bei korrektem Verhalten zusammen mit einer Belohnung zurückgezahlt wird. Dabei bestimmt die Höhe der eingesetzten Stakes die Wahrscheinlichkeit, für die Validierung des nächsten Blocks ausgewählt zu werden. Insbesondere für öffentliche Netzwerke stellt der PoS somit eine Alternative zum PoW dar, da hier - zumindest prinzipiell - jeder Teilnehmende die Möglichkeit zur Validierung von Blöcken hat. Schätzungen gehen davon aus, dass ein Wechsel von PoW zu PoS mit einem Einsparpotenzial von rund 99 Prozent des Stromverbrauchs verbunden ist (Reetz, 2019b; Sedlmeir et al., 2020).<sup>26</sup>

---

<sup>26</sup> Nachtrag: Aus diesem Grund ist die Ethereum Foundation (2022a) für die Ethereum-Blockchain im dritten Quartal 2022 vom bisher genutzten energieintensiven PoW auf den energiesparenderen PoS umgestiegen. Sie erwartet dadurch höhere Transaktionsgeschwindigkeiten, eine um den Faktor 2.000 gesteigerte Energieeffizienz sowie, damit verbunden, eine Reduktion des Stromverbrauchs um bis zu 99,95 Prozent. Der genaue Zeitplan der Umsetzung wurde allerdings immer wieder durch Verzögerungen beeinflusst, was die Schwierigkeit einer solchen Umstellung verdeutlicht (Heise, 2021). Auch wurden wiederholt Bedenken bezüglich einer stärkeren Zentralisierung des Ethereum-Netzwerks in Folge der Umstellung auf PoS geäußert. Diese betreffen die Besorgnis, dass sich große Mining-as-a-Service-Anbieter bilden könnten und potenzielle Validatoren für das Staking, also den Prozess zur Freischaltung der Validatoren-Software, 32 ETH<sup>26</sup> hinterlegen müssen (Ethereum Foundation, 2022b) – eine Summe, die viele potenzielle Validatoren bereits von vornherein ausschließt.

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Beim Proof-of-Authority (PoA) ist das Hinzufügen neuer Blöcke dagegen einigen ausgewählten Nodes vorbehalten, wodurch dieser noch ressourcenschonender als der PoS ist. Dazu müssen die Validatoren vorab eine Art Bewerbungsverfahren durchlaufen, in dessen Rahmen sie auch ihre reale Identität preisgeben. Somit dient der jeweilige Ruf der Kandidierenden als „Einsatz“, um als Validator infrage zu kommen. Aufgrund dieses die Offenlegung der tatsächlichen Identität beinhaltenden Bewerbungsprozesses kommt der PoA überwiegend in privaten oder konsortialen Blockchains zum Einsatz. Zu seinen bekanntesten Anwendungen zählt die Hyperledger Fabric Blockchain (Bundesnetzagentur, 2021b; Reetz, 2019b, 2019a; Sedlmeir et al., 2020).

Eine weitere Form des Konsensmechanismus kommt beim Zahlungsnetzwerk Ripple zum Einsatz, das u. a. von der Banco Santander zur Abwicklung internationaler Geldgeschäfte verwendet wird. Konsens wird bei diesem Netzwerk über ein Abstimmungssystem unter mehr als 150 unabhängigen Validatoren-Nodes in einem Intervall von wenigen Sekunden erzielt (Reetz, 2019b; Ripple, 2022).

Neben alternativen Konsensmechanismen gibt es zudem auch alternative DLTs, die zum Ziel haben, die Schwachpunkte der Blockchain-Technologie – Stromverbrauch, Skalierbarkeit, Transaktionsgeschwindigkeit und -gebühren – zu adressieren (IEA, 2019). Ein Beispiel ist IOTA, das über die Nutzung eines sogenannten Tangles auf rechenintensive Konsensmechanismen verzichten kann. Dabei validieren Netzwerk-User gegenseitig vorherige Transaktionen, um eigene Transaktionen hinzufügen zu können. Sicherheit erlangen die Nutzenden durch regelmäßige Bestätigungen der Transaktionen durch Koordinatoren. Allerdings verzichtet IOTA zugunsten von Sicherheit und Skalierbarkeit durch den Einsatz der Koordinatoren ein Stück weit auf Dezentralität (Expertenkommission Forschung und Innovation, 2019; Popov, 2018; Silvano & Marcelino, 2020).

### Fazit zur Distributed-Ledger-Technologie

Bei DLTs bzw. Blockchains handelt es sich um dezentrale Transaktionsregister, über welche Transaktionen abgewickelt und gespeichert werden können, ohne dabei auf eine zentrale Vertrauensinstanz zurückgreifen zu müssen. Um unter der Vielzahl an möglichen Teilnehmenden Konsens über den Stand des Registers zu erzielen, bedarf es bestimmter Mechanismen zur Entscheidungsfindung. Insbesondere in öffentlichen Blockchain-Netzwerken, zu denen unbegrenzter Zugang besteht, wird dafür häufig auf den sehr rechenintensiven Proof-of-Work-Mechanismus zurückgegriffen. Mit zunehmender Komplexität der zu lösenden Rätsel sowie mit steigender Nutzung der Netzwerke führt der Einsatz dieses Mechanismus zu einem exponentiell ansteigenden Energiebedarf der entsprechenden Blockchain-Netzwerke, was weitreichende Folgen für die Energieversorgung einzelner Länder sowie den globalen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Blockchain haben kann.

Demgegenüber bestehen zum einen alternative Konsensmechanismen wie der Proof-of-Stake, die deutlich energieeffizienter arbeiten, sowie zum anderen private Blockchains, die insbesondere im Unternehmenskontext zwischen Parteien Anwendung finden, die sich kennen und vertrauen. Infolgedessen können sie oftmals auf energieintensive Validierungsprozesse verzichten und stattdessen auf effizientere Verfahren zurückgreifen. Gleichzeitig bieten sie Möglichkeiten zur besseren Skalierung von Blockchain-Lösungen. Insofern ist nicht unbedingt die Blockchain-Technologie selbst ein Faktor, der die Umwelt negativ beeinflusst, sondern vielmehr ihre konkrete Ausgestaltung (de Vries, 2018).

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der zukünftige Energiebedarf der Blockchain-Technologie maßgeblich vom Wachstum der verschiedenen Netzwerke sowie der Wahl der jeweiligen Konsensmechanismen abhängt. Somit ist eine zuverlässige Prognose der zukünftigen Energieverbräuche aus heutiger Sicht nicht möglich.

## **4 Relevante Einflussfaktoren für den Energiebedarf der Schlüsseltechnologien**

## 4 Relevante Einflussfaktoren für den Energiebedarf der Schlüsseltechnologien

Im folgenden Abschnitt sind die relevanten Einflussfaktoren für die Entwicklung des Energiebedarfs der in Kapitel 3 vorgestellten Schlüsseltechnologien dargestellt. Neben einer Erläuterung des Wirkungszusammenhangs und der relevanten Akteure wird auch eine Abschätzung der potenziellen Auswirkungen der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf der Digitalisierung vorgenommen.

Die Basis für die Ermittlung und Darstellung der wesentlichen Einflussfaktoren<sup>27</sup> sowie der Abschätzung der Auswirkungen sind zum einen die im Rahmen dieser Studie durchgeführten und oben beschriebenen Recherchen und zum anderen die Ergebnisse eines Workshops mit Expertinnen und Experten, der im Rahmen des Vorhabens im Januar 2022 durchgeführt wurde. Im Zuge dieses Workshops wurde die Relevanz der verschiedenen Einflussfaktoren auf den künftigen Energiebedarf der Schlüsseltechnologien diskutiert und bewertet. An dem Workshop nahmen Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Forschung sowie der Zivilgesellschaft und von Bundesbehörden, Verbänden, Technologieunternehmen und Netzbetreibern teil.

Die betrachteten Schlüsseltechnologien und die ermittelten Einflussfaktoren verstärken selbst den Trend zu immer mehr Digitalisierung. So werden KI und IoT dazu führen, dass mehr Daten erfasst und verarbeitet werden. Auch die leistungsfähigen 5G-Netze sind Enabler für weiteres Datenwachstum. Insbesondere durch die Ausweitung des IoT ist zu erwarten, dass die Zahl der digitalen Geräte deutlich zunehmen wird.<sup>28</sup>

### 4.1 Künstliche Intelligenz

#### Starke Zunahme der Nutzung von Machine Learning

Aufgrund der Ausweitung der möglichen Anwendungsgebiete sowie der immer anwenderfreundlicheren Entwicklung und Handhabung wird die Nutzung von Machine Learning und speziell von DL-Modellen in Zukunft voraussichtlich deutlich ansteigen. Die Verfügbarkeit von vortrainierten Modellen sowie von automatisiertem Machine Learning wird die Verbreitung von KI-Anwendungen fördern. Auch ist von einem Ausbau des fachspezifischen Know-hows und von einer immer leistungsfähigeren Recheninfrastruktur (s. o.: Moore's law) auszugehen. Damit können immer komplexere und rechenintensivere Modelle in der Breite genutzt werden. Die hohe technologie- und wirtschaftspolitische Bedeutung der KI und die daraus resultierenden milliarden-schweren Förderprogramme in der Europäischen Union und ihren Mitgliedsstaaten werden ebenfalls zu einer starken Zunahme der Anwendung von ML-Modellen beitragen.

#### **Einflussfaktor KI 1: Hoher Bedarf an Rechenleistung durch verstärkte Nutzung von Deep Learning**


Involvierte Akteure

KI-Forschung und -Entwicklung, KI-Lösungsanbieter, Hardwarehersteller, globale Internet-/Datenunternehmen, KI-Anwendende

<sup>27</sup> Auf die Darstellung von Einflussfaktoren, die nur geringe Auswirkungen auf den Energiebedarf der Digitalisierung haben, wird hier verzichtet.


<sup>28</sup> Es wird prognostiziert, dass die Anzahl an vernetzten Geräten weltweit von 18,4 Mrd. im Jahr 2018 auf 29,3 Mrd. im Jahr 2023 ansteigt (Cisco, 2021).

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Obwohl die Leistungsfähigkeit neuer Chips kontinuierlich steigt, wird der starke Anstieg des Bedarfs an Rechenkapazitäten durch DL-Anwendungen nur mit zusätzlicher Hardware gedeckt werden können. Das betrifft sowohl die für die Modellentwicklung und das Training notwendige Hardware als auch die Inferenz. Der steigende Hardwarebedarf wird sich auch in einer deutlichen Zunahme des Energiebedarfs äußern. Beispielsweise werden für die hoch parallelisierte Datenverarbeitung zur Bilderkennung Chips mit üblicherweise mehreren 100 Watt Leistungsaufnahme eingesetzt.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Durch die starke Verbreitung leistungsstarker KI-Hardware (z. B. beim autonomen Fahren oder im Bereich Industrie 4.0) besteht die Gefahr, dass hohe Energiebedarfe entstehen. Es ist wahrscheinlich, dass zur zentralen Bereitstellung von Rechenkapazität zunehmend dedizierte RZ mit spezieller KI-Hardware, vergleichbar mit aktuellen Krypto-Mining-Rechenzentren, entstehen werden. 

### Potenziell deutlich erhöhte Menge der erfassten, zu verarbeitenden und zu speichernden Datenmengen durch verstärkten Einsatz von KI-Lösungen


Für die Ausweitung des KI-Einsatzes, insbesondere von ML-Lösungen, ist es notwendig, immer mehr Daten zu erfassen und zu speichern, vor allem zum Training der Modelle. Durch den Einsatz von KI-Lösungen kann sich gleichzeitig die Menge der zu analysierenden Daten erhöhen, indem z. B. im Bereich der Sprach- und Bilderkennung beim Einsatz der Lösungen neue Daten erhoben werden. Hier besteht ein enger Zusammenhang mit Entwicklungen im Bereich des IoT.

<b>Einflussfaktor KI 2: Hoher Anstieg der Datenmengen durch KI</b>	
Involvierte Akteure	KI-Forschung und -Entwicklung, KI-Lösungsanbieter, globale Internet-/Datenunternehmen, KI-Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	KI-Lösungen sind ein wesentlicher Treiber des künftigen Wachstums der zu übertragenden, zu verarbeitenden und zu speichernden Daten. Dieses Datenwachstum führt zu einer Zunahme des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen sowohl im Betrieb als auch durch den erhöhten Bedarf an Geräten (Netzwerk- und Speichertechnik).
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Die Menge der digitalen Daten, die erfasst, übertragen und verarbeitet werden, nimmt seit der Einführung der Digitaltechnik exponentiell zu. Trotz der erheblichen Effizienzsteigerung in der Datenübertragung, -verarbeitung und -speicherung führte diese Zunahme der Datenmenge in der Vergangenheit zu einem Netto-Anstieg des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen (siehe Kapitel 2). Es ist zu erwarten, dass das durch den zunehmenden KI-Einsatz bedingte Datenwachstum den Energiebedarf weiter ansteigen lassen wird. 

### Geringe Beachtung des Energie- und Ressourcenbedarfs bei der Entwicklung von KI-Anwendungen

In der Vergangenheit konnte die Leistungsfähigkeit digitaler Hardware immer weiter gesteigert werden. Dementsprechend gibt es bei Entwicklerinnen, Entwicklern und Anwendenden von digitalen Lösungen nur wenig Bewusstsein für eine sparsame Nutzung der IT-Hardware (Hilty et al., 2015). Dies betrifft auch KI-Anwendungen. Suffizienz-Ziele werden kaum verfolgt.

**Einflussfaktor KI 3: Nicht-Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs von KI-Anwendungen**

Involvierte Akteure	KI-Forschung und -Entwicklung, KI-Lösungsanbieter, KI-Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Für einen zukünftig nachhaltigen Einsatz der Technologie ist es unerlässlich, die durch sie verursachten Energie- und Ressourcenbedarfe in das Bewusstsein von KI-Entwickelnden und -Anwendenden zu bringen.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	<p>Insbesondere die Anwendung von ML- und speziell DL-Modellen befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium und wird in Zukunft voraussichtlich sehr stark zunehmen. Im Zusammenhang mit einer hohen Verbreitung und den hohen Energiebedarfen (pro Chip/Gerät) durch Modellentwicklung, Training und Inferenz wird eine Nicht-Berücksichtigung der Energie- und Ressourcenbedarfe bei der Entwicklung von KI-Lösungen sehr deutliche Auswirkungen auf den Energiebedarf haben.</p>  <p>gering                      mittel                      hoch                      sehr hoch</p>


### Unzureichende Nutzung der Potenziale zur Effizienzsteigerung in Hardware

Bislang ist die Energieeffizienz bei der Entwicklung von KI-Soft- und Hardware häufig kaum ein Thema. Die Effizienzpotenziale von speziell für KI-Anwendungen entwickelter Hardware werden bisher nur sehr wenig genutzt. Mit neu entwickelter bzw. auf KI-Anwendungen ausgelegter Hardware sowie auf diese Hardware angepasster Software könnte die Energieeffizienz von KI-Lösungen voraussichtlich um Größenordnungen gegenüber dem heutigen Stand verbessert werden.

**Einflussfaktor KI 4: Ineffizienzen bei der Entwicklung von Soft- und Hardware**


Involvierte Akteure	KI-Forschung und -Entwicklung, KI-Lösungsanbieter, Hardwarehersteller, KI-Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Energieeffizienz ist bei der Entwicklung von KI-Software und -Hardware häufig kein wesentliches Kriterium. Ineffiziente KI-Nutzung wird den Energiebedarf durch KI vervielfachen. Bei der Softwareentwicklung besitzt Effizienz bisher häufig keine Priorität. Darüber hinaus werden KI-Anwendungen teilweise auf Standard-Prozessoren (z. B. x86) betrieben, obwohl spezifische Hardware (z. B. GPUs, FPGAs, ASICs) wesentlich effizienter wäre.



<p>Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen</p>	<p>Speziell für KI-Anwendungen entwickelte Schaltkreise in Halbleiter-Chips können den Energiebedarf von KI-Algorithmen auf einen Bruchteil reduzieren. Bei der zu erwartenden enorm hohen Stückzahl an Geräten, die solche Algorithmen nutzen werden, wird die Auswirkung der Ineffizienzen aufgrund einer Nichtnutzung solcher Chips als hoch eingestuft.</p> 
---	--

**Fehlendes Sharing von KI-Modellen und Daten**

Es gibt viele Gründe, aus denen Daten und KI-Modelle nicht geteilt werden. Diese liegen zum einen im wettbewerblichen Verhalten der Akteure, da der Zugriff auf Daten und Modelle als Wettbewerbsfaktor gilt. Zum anderen ist oftmals auch das Wissen über vorhandene Modelle und Daten nicht verfügbar. Uneinheitliche Datenformate bzw. die Nichtverfügbarkeit der notwendigen Infrastruktur sowie mangelndes Know-how sind weitere Hindernisse. Zudem gibt es bislang auch kaum Geschäftsmodelle, die ein Sharing fördern.

<p><b>Einflussfaktor KI 5: Sharing von KI-Modellen und Daten</b></p>	
<p>Involvierte Akteure</p>	<p>KI-Forschung und -Entwicklung, KI-Lösungsanbieter, KI-Anwendende, Politik</p>
<p>Zusammenhang mit dem Energiebedarf</p>	<p>Häufig werden identische oder sehr ähnliche KI-Modelle von verschiedenen Software-Entwickelnden, Forschungseinrichtungen bzw. Hochschulen oder Unternehmen entwickelt und mit Daten trainiert. Sowohl die Modellentwicklung als auch das Training eines Modells, ggf. auf Spezialrechnern/GPUs, benötigen Energie und Ressourcen. Hier könnte sehr viel Energie über das Teilen und die gemeinsame Nutzung vortrainierter Modelle oder über das sogenannte Model Recycling eingespart werden, da ein Großteil des (Rechen-)Aufwands nur einmalig für das vortrainierte Modell aufgewandt werden müsste.</p>
<p>Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen</p>	<p>Die Potenziale zur Einsparung von Energie im Bereich der Modellentwicklung und des Trainings können im Einzelfall erheblich sein. In Summe ist von Energieeinsparpotenzialen auf mittlerem Niveau auszugehen.</p> 

**Unreflektierter, leichtfertiger Einsatz von KI trotz der Existenz deutlich effizienterer und effektiverer Alternativen**

KI ist zurzeit ein wahres Hype-Thema. So ist teilweise eine sehr unreflektierte und leichtfertige Verwendung von Methoden der KI festzustellen. Nicht selten werden auch solche Probleme mit KI gelöst, bei denen andere Ansätze deutlich effizienter und effektiver wären.

**Einflussfaktor KI 6: Unreflektierter und leichtfertiger Einsatz von KI**

Involvierte Akteure	KI-Entwickelnde, KI-Lösungsanbieter, Bildungs- und Weiterbildungs-Akteure, KI-Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Durch den unreflektierten und leichtfertigen Einsatz von KI werden unnötige Energiebedarfe für Modellierung, Training und Inferenz erzeugt.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Die Gefahr des unreflektierten und leichtfertigen Einsatzes von KI-Lösungen wird als besonders hoch eingeschätzt. Dieser würde zu einer vermehrten Anwendung von KI auch in Fällen führen, in denen andere IT-Lösungen effizienter wären. Die Auswirkungen dieser Ineffizienzen auf den Energiebedarf werden im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren als mittel eingeschätzt.

A horizontal scale with four labels: gering, mittel, hoch, sehr hoch. A yellow circle is positioned above the 'mittel' label.

## 4.2 5G-Mobilfunk

### Möglichkeit neuer Mobilfunkanwendungen durch 5G

Mit steigenden Bandbreiten und insbesondere mit sinkenden Latenzzeiten werden neue Anwendungen im Mobilfunknetz möglich. Aus aktueller Sicht sind vor allem in den Bereichen Industrie 4.0, Verkehr (autonomes Fahren), Gaming sowie Augmented und Virtual Reality (AR/VR) neue Anwendungen zu erwarten. Diese können eine starke Erhöhung der Datenmengen im Mobilfunknetz mit sich bringen.

**Einflussfaktor 5G 1: Erhöhung der Datenmenge durch neue Mobilfunkanwendungen**

Involvierte Akteure	Mobilfunknetzbetreiber, Anwendungsentwickelnde, Edge-/Cloud-Anbieter, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Neue, durch 5G ermöglichte Anwendungen führen zu einer Erhöhung des Datenverkehrs sowie ggf. auch der Datenverarbeitung im 5G-Netz (in Edge-Rechenzentren/Edge-Nodes). Zum anderen kann die durch sie stark ansteigende Datenmenge bei der Speicherung und Verarbeitung auch weitere Energiebedarfe in zentralen RZ (Cloud) mit sich bringen. 5G unterstützt den Trend zu weiterhin stark ansteigenden Datenmengen in der Informations- und Kommunikationstechnik, welcher die Effizienzgewinne neuerer Hardware häufig kompensiert oder sogar überkompensiert (Reboundeffekt).
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Die ersten Jahrzehnte des Internets haben gezeigt, dass die Entwicklung neuer Anwendungen und die immer intensivere Nutzung ein exponentielles Wachstum des Datenverkehrs verursacht. Es ist anzunehmen, dass sich dieser enorme Anstieg der Datenmengen fortsetzen wird, insbesondere im Mobilfunkbereich. Trotz der auf die Energieintensität (KWh/GB) bezogenen technischen Effizienzgewinne ist zu erwarten, dass der Energiebedarf in den Mobilfunknetzen auch weiterhin ansteigen wird.

A horizontal scale with four labels: gering, mittel, hoch, sehr hoch. An orange circle is positioned above the 'hoch' label.

## Hohe Bandbreiten von 5G, verbunden mit hoher Nachfrage nach Videoanwendungen, wirken den Effizienzpotenzialen entgegen

5G ermöglicht auch im Mobilfunk sehr hohe Datenraten. Damit können hochauflösende Videos und andere Videoanwendungen über Mobilfunk realisiert werden, die bisher eher im Festnetz genutzt wurden. Dies wirkt möglichen Effizienzgewinnen von 5G entgegen.

Einflussfaktor 5G 2: Intensivere Datennutzung im Mobilfunknetz durch Videoanwendungen	
Involvierte Akteure	(Video-)Streaming-Anbieter, Betreiber von Content-Delivery-Netzwerken, Mobilfunknetzbetreiber, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Die neuere Technologie im 5G-Mobilfunk ermöglicht die wesentlich effizientere Übertragung von Daten. Eine intensivere Nutzung von (hochauflösenden) Videodaten im Mobilfunk erhöht jedoch die zu übertragenden Datenmengen extrem stark, was möglichen Effizienzgewinnen der neuen Technik entgegenwirkt. Außerdem ist zu erwarten, dass die Nutzung von Videostreaming auf verschiedenen Geräten insgesamt zunehmen wird, wodurch auch der Energiebedarf dieser Geräte steigen dürfte. Bislang liegt in Deutschland das Datenvolumen pro Anschluss im Festnetz um mehr als den Faktor 50 höher als im mobilen Netz (Bundesnetzagentur, 2021a). Eine durch 5G ermöglichte starke Erhöhung des Anteils des Datenverkehrs in den Mobilfunknetzen kann hier zu deutlich höheren Energiebedarfen führen.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	In der Vergangenheit hat parallel zum Anstieg der Datenmengen in den Netzen eine enorme Effizienzsteigerung bezogen auf die pro kWh übertragene Datenmenge stattgefunden. Entsprechend stieg der Energiebedarf in Relation zur Datenmenge nicht bzw. nur in geringem Maße an (siehe Kapitel 2). Durch die zunehmende Nutzung von Mobilfunknetzen für Anwendungen mit hohen Datenraten wie Videoanwendungen ist mit einem mittleren Anstieg des Energiebedarfs der Mobilfunknetze zu rechnen.
	<p>The diagram shows a horizontal scale with four labels: 'gering', 'mittel', 'hoch', and 'sehr hoch'. A yellow circle is positioned exactly above the 'mittel' label, indicating a moderate impact.</p>

### 4.3 Internet of Things

#### Wachsender Energiebedarf durch die hohe Anzahl von Geräten, die „always-on“ sind

Die fortschreitende Verbreitung des Internet of Things führt dazu, dass immer mehr Geräte vernetzt und dauerhaft mit dem Internet verbunden sein werden (always-on). Prognosen erwarten für die kommenden Jahre durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Anzahl der IoT-Geräte von 11 bis teilweise 30 Prozent (Cisco, 2020; Grijpink et al., 2020; Transformer Insights, 2021)

**Einflussfaktor IoT 1: Hohe Geräteanzahl und „always-on“**

Involvierte Akteure	IoT-Gerätehersteller, IoT-Systemanbieter, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Auch wenn der Energiebedarf für die Vernetzung in den einzelnen Geräten gering ist, führt die sehr hohe Anzahl an Geräten doch zu einem deutlich steigenden Energiebedarf der Digitalisierung. Damit die einzelnen Geräte auf ein mögliches Signal reagieren können, muss ihre Sende-/Empfangseinheit durchgehend in Bereitschaft sein, auch wenn die eigentliche Datenübertragung nur wenige Sekunden oder Minuten am Tag andauert.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Die Leistungsaufnahme von vernetzten Geräten im Bereitschaftsmodus bewegt sich üblicherweise im Bereich von ca. einem Watt, insbesondere da viele dieser Geräte durch die Standby-Verordnung reguliert werden. Steigt die Anzahl an vernetzten Geräten jedoch massiv an, wie es viele Marktforschungsunternehmen für IoT prognostizieren, kann auch eine sehr geringe zusätzliche Leistungsaufnahme pro Gerät in Summe zu sehr hohen zusätzlichen Energiebedarfen führen.

The diagram shows a horizontal scale with four labels: 'gering', 'mittel', 'hoch', and 'sehr hoch'. A red dot is positioned at the 'sehr hoch' end of the scale, indicating a high potential impact.

**Die Möglichkeit neuer Anwendungen durch das IoT und der damit getriebene Energiebedarf**

Das Erfassen und somit die Generierung von Daten sowie die Interaktion mit bisher nicht mit dem Internet verbundenen Geräten durch das IoT ermöglichen neue Anwendungen, die wiederum zu neuen Energiebedarfen führen können. Beispielsweise können die von IoT erfassten Daten das vermehrte Training und Anwenden von KI-Modellen ermöglichen oder es können Lieferdienste durch das IoT voll automatisiert und in der Folge wesentlich intensiver genutzt werden.


**Einflussfaktor IoT 2: IoT als Treiber für neue Anwendungen**

Involvierte Akteure	Anwendungsentwickelnde, IoT-Systemanbieter, IoT-Gerätehersteller, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Durch die Möglichkeiten des IoT werden weitere neue digitale Anwendungen entstehen, die zu zusätzlichen Energiebedarfen führen.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Das Potenzial der Entwicklung und Nutzung neuer digitaler Anwendungen durch das IoT wird als hoch eingeschätzt. Somit ist auch ein hoher zusätzlicher Energiebedarf der Digitalisierung durch diesen Einflussfaktor zu erwarten. Mit den hierdurch ermöglichten neuen Anwendungen können zugleich auch indirekte Effekte verbunden sein, die sich sowohl positiv als auch negativ auf die Höhe des gesamten Energiebedarfs auswirken können.

The diagram shows a horizontal scale with four labels: 'gering', 'mittel', 'hoch', and 'sehr hoch'. An orange dot is positioned at the 'hoch' end of the scale, indicating a high potential impact.

### Durch Speicherung, Übertragung und Verarbeitung der über das IoT erhöhten Datenmengen verursachter Energiebedarf

Die bereits jetzt hohe und weiterhin steigende Anzahl von IoT-Geräten sammelt kontinuierlich Daten, die gespeichert, übertragen und verarbeitet werden müssen.

Einflussfaktor IoT 3: Höhere Datenmengen durch das IoT	
Involvierte Akteure	IoT-Systemanbieter, Netzbetreiber, Cloud-/Edge-Betreiber, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Die neuen Endgeräte und Interfaces des IoT führen zu immer weiter steigenden Datenmengen, welche kontinuierlich erfasst, übertragen und verarbeitet werden müssen. Das zieht zusätzliche Energiebedarfe von Endgeräten, Datennetzen und RZ nach sich. Das Ausmaß dieses zusätzlichen Energiebedarfs ist abhängig davon, wo die jeweiligen Daten verarbeitet werden, wie und in welchem Format sie übertragen werden und welche Anwendungen und Algorithmen zu ihrer Verarbeitung genutzt werden.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Mit Milliarden neu an das Internet angeschlossenen Geräten steigt die Menge der erfassten Daten sehr stark an. Da sich gleichzeitig die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Datennetzen und RZ erhöht, ist zu erwarten, dass der Energiebedarf durch den IoT-bedingten Anstieg der Datenmenge zwar ebenfalls ansteigt, aber im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren eher in einem mittleren Ausmaß. 

### Erhöhung des Ressourcenbedarfs durch proprietäre Ökosysteme verschiedener Hersteller

Im Rahmen des IoT existieren gänzlich unterschiedliche Ökosysteme wie z. B. in den Bereichen Smart Home, Smart City, Industrie 4.0, Automobile, aber auch Smartphone-Betriebssysteme und Sprachassistenten. Manche IoT-Systemanbieter zielen hier auf das Anbieten proprietärer Lösungen ab, um die Kundschaft dadurch an ihre Plattform zu binden. Solche Systeme bieten selten offene Schnittstellen und sind daher meist inkompatibel mit denen anderer Anbieter.<sup>29</sup> Dies birgt die Gefahr von Redundanzen und verfrühter Obsoleszenz, da Komponenten ggf. mehrfach bereitgestellt werden müssen oder Systeme nicht beliebig skalierbar und erweiterbar sind.

<sup>29</sup> Mit dem von der Connectivity Standards Alliance (CSA; <https://csa-iot.org>) entwickelten Smart-Home-Standard „Matter“ besteht hingegen inzwischen aufgrund der hohen Zahl der Beteiligten die Möglichkeit, dass sich für den Smart-Home-Bereich ein gemeinsamer Standard durchsetzt. Mitglieder der CSA sind über 180 Unternehmen, u. a. Apple, Amazon, Google, Infineon, Samsung, Ikea und Huawei.

**Einflussfaktor IoT 4: Proprietäre Ökosysteme im Bereich IoT**

Involvierte Akteure	IoT-Systemanbieter, IoT-Gerätehersteller, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Proprietäre Ökosysteme führen zu einer geringeren Flexibilität der betreffenden IoT-Systeme, was den Datenaustausch oder die Erweiterung mit Systemen von Drittanbietern erschwert. Beispielsweise kann in einem Smart-Home-System zur Heizungsoptimierung ein Sensor zur Erkennung einer Fensteröffnung verbaut sein, dessen Informationen auch für Sicherheitsfunktionen (Einbruchschutz) genutzt werden könnten. Sind die Systeme für Heizungsoptimierung und Sicherheit allerdings nicht miteinander kompatibel, müsste dieser Sensor doppelt ausgeführt werden, was den Energie- und Ressourcenbedarf erhöhen würde. Im schlechtesten Fall kann ein geschlossenes Ökosystem auch dazu führen, dass das gesamte System obsolet wird, weil es um eine bestimmte gewünschte oder erforderliche Funktion nicht erweitert werden kann.
Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen	Derzeit existieren im IoT-Bereich noch sehr unterschiedliche Ökosysteme, die oft wenig kompatibel miteinander sind. Die Auswirkungen solcher proprietären Ökosysteme auf den Energiebedarf werden als mittel eingeschätzt.

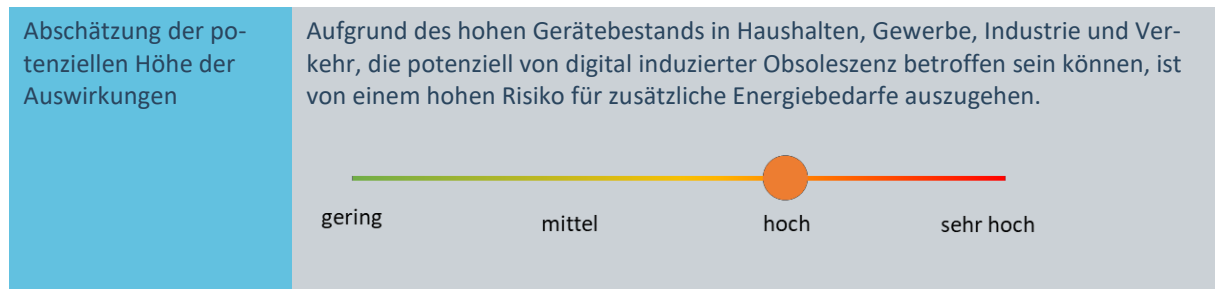
gering                      mittel                      hoch                      sehr hoch

**Verursachung verfrühter Obsoleszenz von Geräten durch IoT-Komponenten**

Die Vernetzung von Geräten in Haushalt, Verkehr, Industrie etc. nimmt durch das IoT immer mehr zu. Bereits in der Vergangenheit war erkennbar, dass digitale Geräte beispielsweise in privaten Haushalten aufgrund der hohen Innovationsdynamik meist nur für einen relativ kurzen Zeitraum von wenigen Jahren genutzt wurden, um dann durch neuere Geräte ersetzt zu werden. Herkömmliche elektrische Haushaltsgeräte dagegen werden oft über deutlich längere Zeiträume genutzt. Durch die Integration von Mikrocontrollern und Schnittstellen in derartigen Geräten besteht das Risiko, dass vormals langlebige Geräte infolge ihrer mikroelektronischen Bauteile nun früher obsolet werden. Dies kann zum einen daran liegen, dass ein Austausch erfolgt, weil neuere digitale Geräte leistungsfähiger sind. Zum anderen werden aber auch teilweise für die entsprechenden digitalen Komponenten bereits nach wenigen Jahren keine Software-Updates mehr bereitgestellt, was ihre Nutzung entweder ganz unmöglich oder zumindest unsicher macht.

**Einflussfaktor IoT 5: Frühere Obsoleszenz von Geräten**

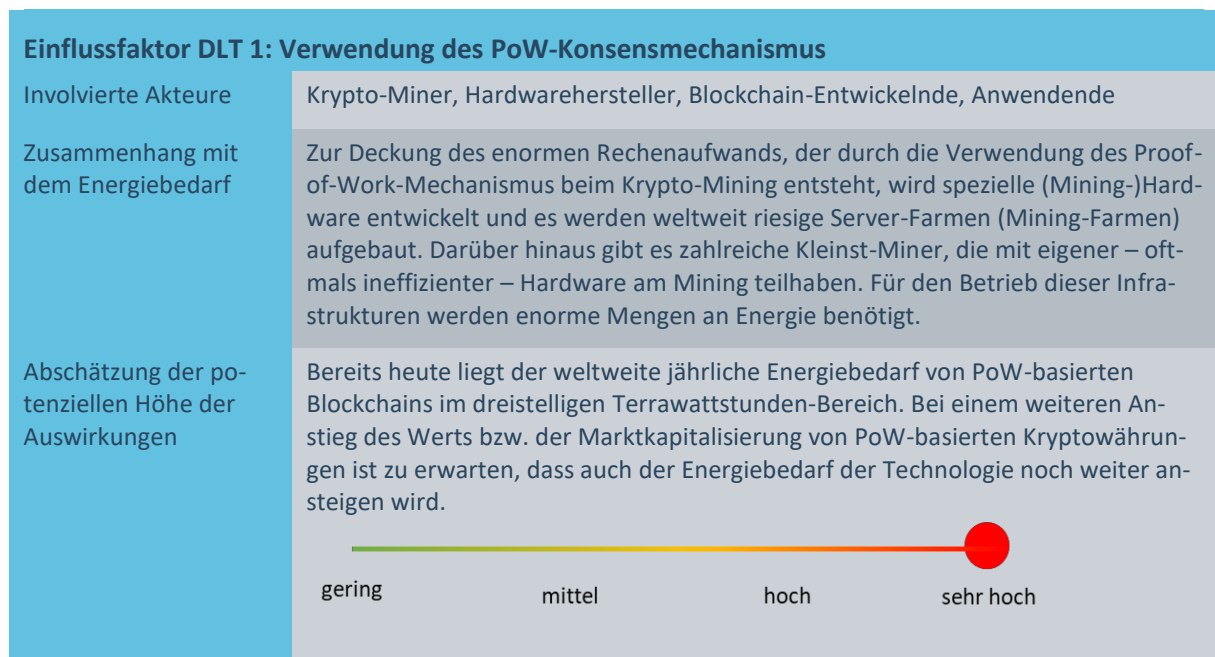
Involvierte Akteure	IoT-Systemanbieter, Softwareentwickelnde, Anwendende
Zusammenhang mit dem Energiebedarf	Geräte benötigen nicht nur für ihre Nutzung Energie, welche sie beispielsweise durch ihre Stromversorgung aufnehmen, sondern über ihren Lebenszyklus betrachtet auch für ihre Herstellung, im Rahmen von Transport und Verkauf sowie für ihre Entsorgung bzw. ihr Recycling. Daher wirkt sich eine möglichst lange Nutzungsdauer in der Regel positiv auf den Energie- und Ressourcenbedarf aus. Wenn Geräte von ihren rein physischen Eigenschaften her eigentlich für eine lange Nutzungsdauer ermöglichen, jedoch aufgrund der Alterung digitaler Komponenten schneller obsolet werden, spricht man von digital induzierter oder softwareinduzierter Obsoleszenz.



## 4.4 Distributed-Ledger-Technologien (DLT)

### Weiterhin intensive Nutzung des PoW-Konsensmechanismus für DLT/Blockchains

Besonders bei Kryptowährungen, die auf einer offenen und stark dezentralen Datenhaltung und Verifizierung beruhen, muss durch starke Regeln bzw. Mechanismen die Sicherheit gegen Manipulation gewährleistet werden. Der hier oftmals eingesetzte Proof-of-Work-Konsensmechanismus bringt die Notwendigkeit eines enorm hohen kryptografischen Berechnungsaufwands zur Verifizierung der Transaktionen mit sich. Gleichzeitig verdienen aktuell viele Akteure sehr gut durch die Bereitstellung und den Betrieb von Krypto-Mining, sodass sie wenig Interesse an einer Verwendung alternativer Konsensmechanismen haben.



### Einsatz von DLT außerhalb von Kryptowährungen und ohne PoW

Neben ihrem sehr bekannten Einsatzbereich der Kryptowährungen bieten die DLT und insbesondere die Blockchain-Technologie die Möglichkeit weiterer Anwendungen. Potenziale bestehen hier beispielsweise in der Energiewirtschaft oder bei Lieferketten- und Herkunftsnachweisen.

### Einflussfaktor DLT/Blockchain 2: DLT-Nutzung ohne PoW

Involvierte Akteure

IT-Dienstleister, Plattformanbieter, DLT-/Blockchain-Entwickelnde, Anwendende

Zusammenhang mit dem Energiebedarf

Jede Bereitstellung von Datenbankdiensten oder IKT-Services benötigt Ressourcen. Auch ohne PoW-Konsensmechanismus werden beim Einsatz von Blockchain-Lösungen Daten erfasst, übertragen und verarbeitet. Diese Daten können im Gegensatz zu vielen PoW-basierten DLTs jedoch auch auf herkömmlicher IKT-Hardware verarbeitet werden.

Abschätzung der potenziellen Höhe der Auswirkungen

Der Rechenaufwand bzw. die Datenmengen, die für Blockchains ohne Einsatz des PoW-Mechanismus anfallen, wird um Größenordnungen niedriger sein als derjenige bei PoW-basierten Blockchains. Entsprechend ist hier auch der Energiebedarf als gering einzustufen.





# 5 Handlungsempfehlungen

## 5 Handlungsempfehlungen

Insbesondere mit der zunehmenden Verbreitung des Internets und der steigenden Anzahl von IT-Geräten in den 2000er Jahren haben die Diskussionen über den Energie- und Ressourcenbedarf der Digitalisierung deutlich zugenommen. Es wurde eine Vielzahl an Handlungsmöglichkeiten und Empfehlungen für eine nachhaltigere und energieeffizientere Gestaltung der Digitalisierung erarbeitet. Eine umfangreiche Bottom-up-Analyse des Energiebedarfs der IKT wurde erstmals im Jahr 2003 im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums durchgeführt (Cremer et al., 2003). Darin entwickelten Cremer et al. einen Mix verschiedener Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz der Informations- und Kommunikationstechnik. Dabei unterschieden sie zwischen ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten, Instrumenten der Technologie- und Innovationspolitik sowie weiteren Instrumenten informatorischer, organisatorischer oder freiwilliger Art. In den Jahren 2009 und 2015 wurde diese Analyse jeweils weiter konkretisiert, erweitert und um zusätzliche Handlungsempfehlungen ergänzt (Stobbe et al., 2009, 2015).

Mit dem „Aktionsplan: Green IT-Pionier Deutschland“ (BMW, 2008) hat das Bundeswirtschaftsministerium zum IT-Gipfel 2008 ein Programm mit konkreten Handlungsplänen vorgelegt, um grüne IKT-Lösungen in Deutschland zu entwickeln. Auch der Digital-Gipfel 2020 legte einen Schwerpunkt auf das Thema nachhaltige Digitalisierung. Der Deutsche Bundestag hat sich im Rahmen seiner Enquete-Kommission „Internet und digitale Gesellschaft“ (Deutscher Bundestag, 2013) u. a. mit dem Themenfeld Green IT befasst und konkrete Handlungsempfehlungen hierzu erarbeitet. Mit seinem Gutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ (WBGU, 2019) hat der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen eine umfangreiche Analyse der Wechselwirkungen von Digitalisierung und Nachhaltigkeit mit ausführlichen Handlungs- und Forschungsempfehlungen vorgelegt. In der Umweltpolitischen Digitalagenda (BMU, 2020) hat das Bundesumweltministerium umfängliche Maßnahmenpakete geschnürt, um den Schutz der Umwelt in der Digitalpolitik langfristig zu verankern. Zudem entwickelt eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Studien und Ausarbeitungen im Themenfeld Digitalisierung und Nachhaltigkeit Handlungsempfehlungen für eine energieeffiziente Digitalisierung auf nationaler und europäischer Ebene (Andres et al., 2021; Bertscheck et al., 2020; Bordage et al., 2021a; Clausen et al., 2022; Hilty et al., 2015; Hintemann et al., 2021, 2020; Kemna et al., 2020).

Die Analyse dieser verschiedenen Handlungsempfehlungen zeigt, dass in allen Fällen ein diversifiziertes Maßnahmenportfolio empfohlen wird. Neben ordnungsrechtlichen Instrumenten werden ökonomische Maßnahmen wie Steuern oder Förderungen, technologiepolitische Mittel im Bereich Forschung & Entwicklung (F&E), Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz und zur Verbesserung der Bildung sowie Maßnahmen im Bereich neuer Initiativen und Netzwerke gefordert.

Für die im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Schlüsseltechnologien werden im Folgenden Handlungsempfehlungen vorgestellt, um neue und zusätzliche Energiebedarfe der Digitalisierung zu begrenzen. Diese Handlungsempfehlungen basieren zum einen auf der Analyse der vorhandenen Literatur und zum anderen auf den Ergebnissen eines Workshops mit Expertinnen und Experten, der im Rahmen der Erstellung der Studie zum Thema Handlungsempfehlungen im Februar 2022 durchgeführt wurde. Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops waren Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Forschung, der Zivilgesellschaft, von Bundesbehörden, Verbänden, Technologieunternehmen und Netzbetreibern.

Die entwickelten Handlungsempfehlungen beziehen sich konkret auf die hier untersuchten vier Schlüsseltechnologien. Sie können und sollen durch weitere technologieübergreifende Maßnahmen

für eine energieeffiziente Digitalisierung ergänzt werden. Derartige übergreifende Maßnahmen sind vor allem in den Bereichen „Schaffung von Transparenz zu Energiebedarfen“, „F&E“ und „Bildung“ wichtig.

### 5.1 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld Künstliche Intelligenz

Das Technologiefeld der Künstlichen Intelligenz entwickelt zurzeit eine sehr hohe Dynamik. Aufgrund der hohen wirtschafts- und technologiepolitischen Relevanz von KI sind ordnungsrechtliche Eingriffe in den Markt mit hohen Risiken verbunden. Dementsprechend fokussieren sich die Handlungsempfehlungen, die in dem Workshop von Experten und Expertinnen gegeben wurden, überwiegend auf Instrumente mit kooperativem Charakter, eine weitere Förderung der F&E sowie Maßnahmen im Bereich der Bildung und der Transparenz.

Auch in der Literatur fokussieren die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von KI-Lösungen weniger ordnungsrechtliche Maßnahmen und stattdessen eher „weiche“ Ansätze wie Transparenz, Bildung und Anreize. Viele Studien empfehlen den Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Ausstoß von ML-Anwendungen zu kommunizieren (García-Martín, Rodrigues, Riley & Grahn, 2019; Patterson et al., 2021). Die so zu schaffende Transparenz soll in einem ersten Schritt das Bewusstsein für den Energiebedarf von KI wecken. Beispielsweise entwickelten Lacoste et al. (2019) den „Machine Learning Emissions Calculator“, Anthony et al. (2020) den „Carbontracker“ und Henderson et al. (2020) den „Experiment Impact Tracker“. Mithilfe dieser Programme können jeweils der Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Ausstoß berechnet werden.

Zusätzlich wird in der Literatur empfohlen, nach Möglichkeit nicht nur den Verbrauch, sondern auch den Code und das trainierte Modell zu veröffentlichen. Dies würde es Dritten ermöglichen, den Code weiterzuentwickeln und in diesem Zuge eventuell auch dessen Energieeffizienz zu verbessern. Zudem würde dieser Ansatz des Model Recyclings bedeuten, dass Entwicklerinnen und Entwickler zur Lösung einer ähnlich gelagerten Problemstellung kein neues Modell konzipieren und berechnen müssen, sondern auf vorhandene Modelle zurückgreifen können. Grundsätzlich ermöglicht die Verwendung von bereits vortrainierten Modellen die Einsparung erheblicher Energiemengen.

Aufbauend auf einer transparenten Berichterstattung befürworten u. a. Douwes et al. (2021) die Berücksichtigung der Energieeffizienz bei der Auswahl von ML-Modellen, konkret das Verhältnis der Vorhersagequalität eines kalibrierten Modells zu seinem Energiebedarf. Es sollten also die potenzielle Genauigkeit und der Energiebedarf möglicher Alternativen vorab eingeschätzt und daraufhin dasjenige Modell ausgewählt werden, welches zum Erreichen der benötigten Qualität den geringsten Energiebedarf hat. Sogenannte Budget/Accuracy-Kurven können dabei als Entscheidungshilfe dienen (Dodge, Gururangan, Card, Schwartz & Smith, 2019).

Henderson et al. (2020) empfehlen darüber hinaus die energieeffiziente Konfiguration der Standardeinstellung in der Software, sogenannte Green Defaults. Damit sollte generell ein besonders energieeffizienter, wenig komplexer Modellaufbau die Standardeinstellung in Softwarelösungen sein. Zugleich sollte die Lerngeschwindigkeit relativ hoch eingestellt sein, damit Modelle schneller konvergieren. Darüber hinaus lassen sich Abbruchregeln für den Zeitpunkt definieren, an dem durch das weitere Training der Modelle nur noch marginale Verbesserungen erzielt werden (Anthony et al., 2020).

Durch das Pruning (engl. für zurechtstutzen), eine Methode, bei der nicht benötigte Parameter aus einem trainierten Modell entfernt werden, kann der Energiebedarf während der Modellanwendung

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

reduziert werden (Menghani, 2021). Bezüglich der Daten sollte die verwendete Datenmenge auf die Hardware abgestimmt sein. Dabei gilt: Je besser die Qualität der Daten ist, desto weniger Aufwand wird für die Anpassung von Modellen benötigt. Auch eine Modifikation der Daten kann die Energieeffizienz beeinflussen. So können durch Verwendung des geeigneten Datenformats Modellparameter und Beobachtungspunkte effizienter abgespeichert und berechnet werden (Menghani, 2021).

Bei der Hyperparameteroptimierung sollten Kombinationen fokussiert werden, die tatsächlich eine Verbesserung der Genauigkeit versprechen. Zudem ist es günstig, anstelle des bloßen Durchprobierens („grid search“, engl. für Rastersuche) eine „random search“ oder „Bayesian optimization“ anzuwenden (Anthony et al., 2020). Auch die Energieeffizienz der Hardware sollte Beachtung finden (dena, 2022). Da einige GPUs/ASICs eine wesentlich höhere Energieeffizienz besitzen als andere, kann eine entsprechende Auswahl der Hardware zu erheblichen Unterschieden im Energiebedarf führen.

Ein Aspekt, der sich zwar nicht auf den Energiebedarf von KI bezieht, jedoch durchaus auf deren Klimawirkungen, ist die regionale Verortung von Rechenkapazitäten. So wird in der entsprechenden Literatur argumentiert, dass erhebliche Mengen an THG-Emissionen eingespart werden können, wenn KI-Systeme vorrangig in Regionen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zuge der Stromerzeugung betrieben werden (Anthony et al., 2020; Henderson et al., 2020; Wiesner, Behnke, Scheinert, Gontarska & Thamsen, 2021).

Auf Basis der vorgenommenen Literaturlauswertung und der durchgeführten Workshops werden im Rahmen der vorliegenden Analyse folgende vier konkrete Handlungsempfehlungen im Technologiefeld KI gegeben.

### Handlungsempfehlung KI 1: Round Table zu nachhaltiger KI und der Förderung von KI-Start-ups

Mithilfe eines nationalen Round Tables sollen frühzeitig strategische Weichenstellungen zur Förderung des Einsatzes nachhaltiger KI in Deutschland diskutiert und eingeleitet werden. Im Rahmen des Round Tables sollen Fragestellungen zu notwendiger Forschungsförderung, Möglichkeiten zur Erhöhung der Transparenz des Energiebedarfs der KI und insbesondere auch Ansätze zur Förderung nachhaltiger KI-Start-ups erörtert werden. Der Round Table soll inter- und transdisziplinär mit KI-Entwickelnden, KI-Anwendenden, Herstellern von Hard- und Software sowie Vertreterinnen und Vertretern von Verbänden, Zivilgesellschaft, Behörden, Politik und Wissenschaft besetzt werden. Die Initiierung und Einberufung des Round Tables sollte zeitnah erfolgen, da mit dieser Initiative Grundlagen für die weitere Ausgestaltung von Maßnahmen zur Förderung energieeffizienter und nachhaltiger KI gelegt werden können. Um eine breite Mitarbeit im Round Table sicherzustellen, ist es erforderlich, dieses Vorhaben von der Regierung zu initiieren, gestützt durch Verbände und Akteure aus Zivilgesellschaft und Wissenschaft.

Initiierender Akteur	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einflussfaktor KI 3: Nicht-Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs von KI-Anwendungen</li><li>• Einflussfaktor KI 4: Ineffizienzen bei der Entwicklung von Soft- und Hardware</li><li>• Einflussfaktor KI 5: Sharing von KI-Modellen und Daten</li><li>• Einflussfaktor KI 6: Unreflektierter und leichtfertiger Einsatz von KI</li></ul>
Umsetzung	Die Handlungsempfehlung ist sehr kurzfristig umsetzbar.

**Handlungsempfehlung KI 2: F&E-Förderung für energieeffiziente KI**

Um europäische und nationale Akzente in der weiteren Entwicklung der KI zu setzen, ist eine gezielte F&E-Förderung nachhaltiger KI notwendig. Auf diese Weise kann auch ein Gegengewicht zu den sehr marktzentrierten US-amerikanischen Aktivitäten und den stark zentralistisch gesteuerten chinesischen Anstrengungen gesetzt werden. Neben dem Thema Datenschutz müssen insbesondere die ökologische Nachhaltigkeit und die Energieeffizienz Schwerpunkte der nationalen und europäischen Förderprogramme sein. Konkret geht es darum, bereits existierende F&E-Förderungen zu nachhaltiger und energieeffizienter KI weiter auszubauen und zu verstetigen. Aus aktueller Sicht sind bezüglich der Förderung energieeffizienter KI folgende Schwerpunktthemen relevant:

- Energieeffiziente KI-Hard- und Softwareentwicklung in Europa sowie Optimierung des Zusammenspiels von Hard- und Software
- Entwicklung von Guidelines für den energieeffizienten KI-Einsatz
- Erforschung von Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz des Energiebedarfs von KI, z. B. Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener KI-Anwendungen, Möglichkeit von Kosteneinsparungen durch CO<sub>2</sub>-Vermeidung, Implementierung von Transparenz des Energiebedarfs in KI-Frameworks oder ganzheitliche Analysen des Energiebedarfs über den gesamten Lebenszyklus der KI-Anwendung
- Erforschung von Ansätzen zur mehrfachen Nutzung von KI-Modellen und Daten (Model Recycling, Open KI Services, Open-KI-Bibliotheken, Open Data)

Initiierender Akteur

BMWK, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), EU-Kommission

Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren

- Einflussfaktor KI 1: Hoher Bedarf an Rechenleistung durch verstärkte Nutzung von Deep Learning
- Einflussfaktor KI 2: Hoher Anstieg der Datenmengen durch KI
- Einflussfaktor KI 3: Nicht-Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs von KI-Anwendungen
- Einflussfaktor KI 4: Ineffizienzen bei der Entwicklung von Soft- und Hardware
- Einflussfaktor KI 5: Sharing von KI-Modellen und Daten

Umsetzung

Die stärkere Integration des Themas Nachhaltigkeit in bestehende Förderprogramme ist kurzfristig umsetzbar. Neue, ergänzende Förderprogramme können zeitnah entwickelt werden.

**Handlungsempfehlung KI 3: Intensivierung der Bildung zu nachhaltiger KI**

Eine Ursache für die mangelnde Berücksichtigung von Energieeffizienzkriterien bei der Entwicklung und Anwendung von KI-Lösungen ist die mangelnde Aufmerksamkeit für das Thema in der Öffentlichkeit und in der Fachwelt. Daher muss in der Ausbildung an Hochschulen die energieeffiziente Nutzung von KI stärker in die Lehrpläne integriert werden. Auch sollen Schulungen zur energieeffizienten Ausgestaltung von KI stärker in bestehende Bildungsmaßnahmen integriert werden. Aufgrund der voraussichtlich hohen gesellschaftlichen Bedeutung von KI ist es wichtig, auch in der schulischen Bildung das Thema KI bereits deutlich stärker zu integrieren und in diesem Zusammenhang auf Nachhaltigkeitsaspekte einzugehen.

Initiierender Akteur

BMBF, Bundesländer

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einflussfaktor KI 3: Nicht-Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs von KI-Anwendungen</li><li>• Einflussfaktor KI 4: Ineffizienzen bei der Entwicklung von Soft- und Hardware</li><li>• Einflussfaktor KI 5: Sharing von KI-Modellen und Daten</li><li>• Einflussfaktor KI 6: Unreflektierter und leichtfertiger Einsatz von KI</li></ul>
Umsetzung	Die Initiierung der Maßnahme sollte kurzfristig erfolgen, die Umsetzung wird längere Zeit in Anspruch nehmen.

### Handlungsempfehlung KI 4: Transparenz durch den Aufbau offener KI-Plattformen

Die Herstellung von Transparenz des Energiebedarfs von KI-Anwendungen stellt eine notwendige Voraussetzung zur Verbesserung der Energieeffizienz dar (siehe auch Handlungsempfehlung KI 2). Mit der Initiierung und Förderung von Plattformen wie einer Open-KI-Bibliothek, Open-KI-Services oder Open Data, z. B. im Rahmen eines „Dateninstituts für Deutschland“, kann ein wesentlicher Impuls für mehr Transparenz gesetzt werden. Je nach Anwendungsfeld und Zielsetzung können solche Plattformen auf nationaler oder europäischer Ebene aufgebaut werden. Wie diese Plattformen ausgestaltet und organisiert werden können, sollte in einem breiten Diskussionsprozess der relevanten Akteure erarbeitet werden (siehe auch Handlungsempfehlung KI-1).

Initiierender Akteur	BMWK, EU-Kommission
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einflussfaktor KI 3: Nicht-Berücksichtigung des Energie- und Ressourcenbedarfs von KI-Anwendungen</li><li>• Einflussfaktor KI 4: Ineffizienzen bei der Entwicklung von Soft- und Hardware</li><li>• Einflussfaktor KI 5: Sharing von KI-Modellen und Daten</li></ul>
Umsetzung	Erste Aktivitäten sind kurzfristig umsetzbar, der Aufbau offener Plattformen wird mittelfristig möglich sein.

## 5.2 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld 5G-Mobilfunk

Die Handlungsempfehlungen im Technologiefeld 5G-Mobilfunk fokussieren sich insbesondere auf Maßnahmen zum energieeffizienten Ausbau der 5G-Netze und zur Erhöhung der Transparenz hinsichtlich des Energie- und Ressourcenbedarfs bei der Datennutzung im 5G-Netz. Damit sollen zum einen die Energie- und Ressourceneffizienz der Netze verbessert und zum anderen der Anstieg der in den Netzen übertragenen Datenmengen begrenzt werden. Laut Williams et al. (2022) ist dabei ein besonderes Augenmerk darauf zu richten, wie das Nutzungsverhalten gestaltet werden kann, um Reboundeffekte zu vermeiden. Konkret geben z. B. Pihkola et al. (2018) die Handlungsempfehlung, die Verbraucherinnen und Verbraucher explizit über die Umweltauswirkungen im Zusammenhang der Nutzung mobiler Technologien zu informieren. Auch eine verstärkte Forschung zur Nachhaltigkeit von 5G-Mobilfunk sowie das Einbeziehen von Nachhaltigkeitszielen bei der Formulierung von staatlichen 5G-Ausbaustrategien werden empfohlen (Hintemann et al., 2021).

Im Rahmen der vorliegenden Analyse werden folgende drei konkrete Handlungsempfehlungen im Technologiefeld 5G-Mobilfunk gegeben.

**Handlungsempfehlung 5G 1: Rahmenbedingungen für den energieeffizienten Ausbau von 5G schaffen**

Ein wesentlicher Ansatzpunkt für einen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz optimierten Betrieb von Mobilfunknetzen liegt in der Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen für den Netzausbau. Dies betrifft etwa die gemeinsame Nutzung von Mobilfunkstandorten, die Weiternutzung von 3G-Masten für den 5G-Ausbau oder die Definition von Servicelevel-Anforderungen unter Berücksichtigung von Energieeffizienzkriterien. Förderprogramme zum Mobilfunknetzausbau sollten sich verstärkt an Nachhaltigkeitskriterien orientieren. Eine Möglichkeit wäre es beispielsweise, die Nutzung erneuerbarer Energien für den Betrieb der Mobilfunknetze zu fördern. Die Diskussion und Definition solcher Rahmenbedingungen sollte durch den Regulator gemeinsam mit den Netzbetreibern und unter Einbeziehung von Akteuren der Wissenschaft erfolgen. Auch Möglichkeiten, die Dienstanbieter stärker für den von ihnen in den Netzen verursachten Datenverkehr in Verantwortung zu nehmen, könnten diskutiert werden.

Initiierender Akteur	BMWK
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einflussfaktor 5G 1: Erhöhung der Datenmenge durch neue Mobilfunkanwendungen</li> <li>• Einflussfaktor 5G 2: Intensivere Datennutzung im Mobilfunknetz durch Videoanwendungen</li> </ul>
Umsetzung	Erste Aktivitäten sind kurzfristig umsetzbar, die Umsetzung der meisten Maßnahmen wird mittelfristig möglich sein.

**Handlungsempfehlung 5G 2: Transparenz von Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im mobilen Netz**

Bislang existiert noch kein gesicherter Kenntnisstand über die Höhe des Energiebedarfs und der THG-Emissionen bei der Datenübertragung in Mobilfunknetzen. Im Zuge des Ausbaus neuer Netzgenerationen (5G, 6G etc.) sollten die spezifischen Energiebedarfe pro GB übertragener Daten transparent gemacht und dabei auch ggf. unterschiedliche Auslastungszustände der Netze berücksichtigt werden. Gemeinsam mit Netzbetreibern, Akteuren der Wissenschaft und Herstellern soll ein Konzept dafür erarbeitet werden, wie Energiebedarfe der Netznutzung möglichst automatisiert ermittelt und bereitgestellt werden können, um daraufhin Energieeffizienzoptimierungen bei der Nutzung verschiedener Anwendungen wie z. B. beim Videostreaming zu ermöglichen. Auf Basis der somit verfügbar gemachten Informationen können auch Maßnahmen zur Sensibilisierung von Mobilfunknutzenden hinsichtlich des von ihnen verursachten Energiebedarfs erfolgen. Sollten die getroffenen Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz nicht ausreichen, um den Anstieg des Energiebedarfs im Mobilfunknetz zu verringern, können auf der Grundlage der dann vorliegenden Informationen ggf. auch gezielte regulatorische Eingriffe erfolgen.

Initiierender Akteur	BMWK, Verbände
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einflussfaktor 5G 1: Erhöhung der Datenmenge durch neue Mobilfunkanwendungen</li> <li>• Einflussfaktor 5G 2: Intensivere Datennutzung im Mobilfunknetz durch Videoanwendungen</li> </ul>
Umsetzung	Die Initiierung der Maßnahme sollte kurzfristig erfolgen, die Umsetzung wird mittelfristig möglich sein.



**Handlungsempfehlung 5G 3: F&E-Förderung für den nachhaltigen Betrieb neuer Mobilfunkgenerationen**

Durch gezielte F&E kann die Energieeffizienz im Mobilfunknetz weiter erhöht werden. Aus aktueller Sicht sind dafür insbesondere folgende Forschungsthemen relevant:

- Optimierung des Gesamtsystems der Datenübertragung
- Abgestimmter Einsatz unterschiedlicher Technologien
- Nutzung der Potenziale softwarebasierter Verbesserungen für mehr Energieeffizienz im Mobilfunk
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien für den Netzbetrieb

Initiierender Akteur	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einflussfaktor 5G 1: Erhöhung der Datenmenge durch neue Mobilfunkanwendungen</li> <li>• Einflussfaktor 5G 2: Intensivere Datennutzung im Mobilfunknetz durch Videoanwendungen</li> </ul>
Umsetzung	Die stärkere Integration des Themas Nachhaltigkeit in bestehende Förderprogramme ist kurzfristig umsetzbar. Neue, ergänzende Förderprogramme können zeitnah entwickelt werden.

**5.3 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld Internet of Things**

Die Energieeffizienz im Internet of Things kann durch einen Instrumentenmix von ordnungsrechtlichen Vorgaben, weitere F&E sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz gefördert werden. In der wissenschaftlichen Literatur werden unterschiedliche Vorhaben zur energieeffizienten Ausgestaltung von IoT-Anwendungen diskutiert. Zhu et al. (2015) führen in diesem Zusammenhang den Begriff „Green IoT“ ein. Dieser bezeichnet meist technische Lösungen, welche die negativen Auswirkungen des IoT auf Mensch und Umwelt verringern sollen, sowie die Suche nach diesen (Alsamhi, Ma, Ansari & Meng, 2019). Die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsprinzipien sowohl bei der Herstellung und Entsorgung als auch beim Produktdesign und bei der Nutzung der Geräte soll dazu führen, dass diese keine oder nur minimale negative Auswirkungen haben (Nandyala & Kim, 2016). Arshad et al. (2017) formulieren diesbezüglich konkrete Maßnahmen. Beispielweise sollten IoT-Netzwerke nur so groß wie nötig sein. Eine Verkleinerung des Netzwerkes kann z. B. durch ausgeklügelte Routing-Mechanismen erreicht werden. Hieran anknüpfend betonen Raza et al. (2017) die Wichtigkeit der Interoperabilität zwischen verschiedenen LPWA-Netzwerken (ermöglicht etwa durch Standardisierungen). Auch Stärken und Schwächen des jeweiligen Einsatzes verschiedener Netzwerktypen, z. B. 5G vs. LPWA, sollten berücksichtigt werden.

Darüber hinaus empfehlen Arshad et al. (2017) sowie Rault et al. (2014), dass nur solche Daten gesammelt beziehungsweise versendet werden sollten, die in der jeweiligen Situation erforderlich sind. Hierdurch kann eine erhebliche Menge an Energie eingespart werden. Zudem raten Arshad et al. (2017) dazu, eindeutige Richtlinien bezüglich des Energiebedarfs von IoT zu veröffentlichen. Im Bereich der IoT-Anwendungen von privaten Konsumenten ist oft der Energiebedarf im Standby-Modus hauptverantwortlich für den insgesamt resultierenden Energiebedarf. Daher wäre eine weitere Absenkung der Vorgaben der Standby-Verordnung (Verordnung EG 1275/2008) sinnvoll. Außerdem sollten drahtlose Schnittstellen im Auslieferungszustand (Default-Einstellungen) deaktiviert sein, sodass



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

sie erst durch das bewusste Aktivieren der oder des Nutzenden in Betrieb genommen werden (Hintemann & Hinterholzer, 2018).

Der Energiebedarf der nötigen Herstellungsprozesse kann durch eine längere Nutzungsdauer von IoT-Objekten verringert werden. Dafür ist es zum einen wichtig, dass der IoT-Anteil eines Gegenstands nicht vorzeitig defekt wird bzw. im Fall eines Schadens leicht ausgetauscht werden kann. Zum anderen sollte der Gegenstand auch langfristig kompatibel mit neu entwickelten technischen Lösungen sowie Software-Updates sein.

Des Weiteren existieren mittlerweile Sensoren, die selbstständig Energie aus natürlichen oder künstlichen Quellen in ihrer Umwelt aufnehmen können. Dies macht sie unabhängig von Batterien und damit langlebiger (Zeadally, Shaikh, Talpur & Sheng, 2020). Beispielweise gibt es bereits heute industrielle Sensoren, die wegen des Wegfalls der vormals benötigten Batterien nur eine minimale Wartung erfordern und mehr als 20 Jahre lang kontinuierlich Informationen versenden (Kresser, 2020). Auch der energieeffiziente Einsatz passiver und aktiver Sensoren (Arshad et al., 2017) oder die Optimierung des Schlaf- und Aktivmodus diverser IoT-Objekte (Rault et al., 2014) sind Möglichkeiten, den Stromverbrauch entsprechender Anwendungen zu senken.

Handlungsmaßnahmen, die Rebound- und Induktionseffekte abmildern oder verhindern, lassen sich aus der allgemeinen Fachliteratur zum Thema Reboundeffekte entnehmen. Hier wird z. B. die verstärkte Kommunikation von energiesparenden Alternativen und die Förderung nachhaltiger Lebensstile empfohlen sowie auch die Selbstverpflichtung ganzer Branchen zur Erfüllung bestimmter Standards. Auch die Einführung von CO<sub>2</sub>-Obergrenzen und die Einrichtung eines diesbezüglichen Emissionsrechtehandels auf gesamtwirtschaftlicher Ebene können verhindern, dass neue durch das Internet der Dinge hervorgerufene Verhaltensweisen das Klima zusätzlich belasten (Lange et al., 2019).

Im Rahmen der vorliegenden Analyse werden folgende drei konkrete Handlungsempfehlungen im Technologiefeld IoT gegeben.

### Handlungsempfehlung IoT 1: Rahmensetzungen für ein energieeffizientes IoT

Mithilfe konkreter Vorgaben zum Energiebedarf von IoT-Geräten insbesondere im Standby-Modus kann deren Energiebedarf auch bei massenhafter Verbreitung begrenzt werden. Entsprechende Vorgaben sollen im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie festgelegt werden. Auch Ansätze wie verpflichtende Vorgaben für eine Modularisierung von IoT-Komponenten müssen im Rahmen des Ökodesigns definiert werden, um einer Obsoleszenz und mangelnder Update-Fähigkeit vorzubeugen. Zudem bedarf es Vorgaben dazu, bestimmte Funktionalitäten in den Default-Einstellungen von Geräten abzuschalten, um unnötige Energiebedarfe zu vermeiden. IoT-Geräte können auch mit Warnfunktionen bei unnötigen Energiebedarfen durch nicht genutzte Geräte oder Funktionen ausgestattet werden. Darüber hinaus kann die Etablierung branchenübergreifender Standards die Interoperabilität von Geräten und Netzen ermöglichen.

Initiierender Akteur

EU-Kommission, BMWK

Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren

- Einflussfaktor IoT 1: Hohe Geräteanzahl und „always-on“
- Einflussfaktor IoT 3: Höhere Datenmengen durch das IoT
- Einflussfaktor IoT 4: Proprietäre Ökosysteme im Bereich IoT
- Einflussfaktor IoT 5: Frühere Obsoleszenz von Geräten

Umsetzung

Die Initiierung der Maßnahme sollte kurzfristig erfolgen. Die Umsetzung wird mittel- bis langfristig möglich sein.

**Handlungsempfehlung IoT 2: F&E für ein energieeffizientes IoT**

Ein F&E-Programm für energieeffizientes IoT kann insbesondere bei folgenden Themen ansetzen:

- Energieeffiziente Optimierung von IoT-Gesamtsystemen, Optimierung der Netzwerksysteme und -strukturen
- Lebenszyklenorientierte Ermittlung und Optimierung des Energiebedarfs von IoT-Lösungen
- Energy Harvesting
- Reduktion vermeidbarer Reboundeffekte durch IoT-Systeme

Initiierender Akteur	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einflussfaktor IoT 1: Hohe Geräteanzahl und „always-on“</li> <li>• Einflussfaktor IoT 2: IoT als Treiber für neue Anwendungen</li> <li>• Einflussfaktor IoT 3: Höhere Datenmengen durch das IoT</li> <li>• Einflussfaktor IoT 4: Proprietäre Ökosysteme im Bereich IoT</li> <li>• Einflussfaktor IoT 5: Frühere Obsoleszenz von Geräten</li> </ul>
Umsetzung	Eine stärkere Integration des Themas Nachhaltigkeit in bestehende Förderprogramme ist kurzfristig umsetzbar. Neue, ergänzende Förderprogramme können zeitnah entwickelt werden.

**Handlungsempfehlung IoT 3: Transparenz erhöhen, Interoperabilität von IoT-Lösungen fördern**

Über eine gemeinsame Initiative von Politik und IoT-Branche könnte die Transparenz zum ganzheitlichen Energie- und Ressourcenbedarf von IoT-Lösungen erhöht werden. So könnten z. B. ein Label für energieeffiziente IoT-Lösungen entwickelt und ein Wettbewerb für besonders energieeffiziente Lösungen ausgelobt werden. Die Hersteller sollten über Standardisierung und Interoperabilität den Aufbau unnötiger Redundanzen im Smart Home vermeiden.

Initiierender Akteur	BMWK, Verbände
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einflussfaktor IoT 1: Hohe Geräteanzahl und „always-on“</li> <li>• Einflussfaktor IoT 4: Proprietäre Ökosysteme im Bereich IoT</li> <li>• Einflussfaktor IoT 5: Frühere Obsoleszenz von Geräten</li> </ul>
Umsetzung	Die Initiierung der Maßnahme sollte kurzfristig erfolgen. Die Umsetzung wird mittelfristig möglich sein.

**5.4 Handlungsempfehlungen im Technologiefeld DLT/Blockchain**

Wie die Auswertung der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur und der Workshops mit Expertinnen und Experten zeigt, ist der entscheidende Faktor für den Stromverbrauch der DLT bzw. der Blockchain-Technologie der gewählte Konsensmechanismus. Eine Reduktion der aktuell hohen Energiebedarfe durch Blockchain-Lösungen könnte entsprechend in der Förderung energiesparender Konsensmechanismen bis hin zu einem Verbot des PoW liegen. Letzteres wäre jedoch nur im Verbund vieler Staaten möglich, da ansonsten Mining-Kapazitäten schlicht dorthin verlagert würden, wo die Bedingungen am günstigsten sind (Reetz, 2019b; Truby, 2018). Einen Vorstoß in Europa machte

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

der Vizepräsident der Europäischen Wertpapier- und Marktaufsichtsbehörde (ESMA) Erik Thedéen, der ein Verbot des PoW zusammen mit einer Förderung des energiesparenden PoS vorschlug (Szalay, 2022). Eine weitere Alternative bestünde in der Internalisierung der durch das energieintensive Kryptomining via PoW verursachten negativen Externalitäten, z. B. in Form einer Steuer. Hierbei wäre jedoch ein differenziertes Vorgehen wichtig, um nicht zugleich die Entwicklung nachhaltiger Blockchain-Anwendungen zu gefährden (Truby, 2018).

Im Rahmen der vorliegenden Analyse wird folgende konkrete Handlungsempfehlung im Technologiefeld DLT/Blockchain gegeben.

### Handlungsempfehlung DLT 1: Transparenz des Energiebedarfs von PoW-basierten Blockchains erhöhen, Informationslage verbessern

Um die exzessive Nutzung des PoW zu verringern, bestehen, wie oben dargestellt, unterschiedliche Ansatzpunkte wie z. B. das Verbot des Minings von Kryptowährungen. Auch das Verbot spezieller Hardware oder ökonomische Anreize für nachhaltigere Alternativen wären denkbar. Allerdings können solche Maßnahmen auch ungewollte Auswirkungen auf die FinTech-Branche oder Ausweichreaktionen der Mining-Unternehmen zur Folge haben. Daher ist es notwendig, vor solchen Eingriffen zunächst eine verbesserte Informationslage zu den Energiebedarfen verschiedener DLT zu schaffen. Außerdem müssen die Auswirkungen von technischen und ökonomischen Entwicklungen sowie von regulatorischen Eingriffen in verschiedenen Szenarien untersucht werden. Auf dieser Basis können zum einen gezielt energieeffiziente DLT-Alternativen in Anwendungen bevorzugt und zum anderen eine Strategie zur Verringerung des Einsatzes des PoW entwickelt werden. Eine solche Strategie ist zumindest auf Ebene der EU zu erarbeiten – besser noch wäre ein international abgestimmtes Vorgehen. Initiiert werden könnte die Entwicklung einer solchen Strategie durch ein nationales oder europäisches Forschungsprogramm, in dessen Rahmen sowohl technische Optionen zu untersuchen als auch die ökonomischen Auswirkungen verschiedener Strategien zu analysieren wären.

Initiierender Akteur	EU-Kommission
Hauptsächlich adressierte Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einflussfaktor DLT 1: Verwendung des Proof-of-Work-Konsensmechanismus</li></ul>
Umsetzung	Die Initiierung der Maßnahme sollte kurzfristig erfolgen. Die Umsetzung sollte aufgrund des hohen Handlungsdrucks möglichst zeitnah in Angriff genommen werden.

# **6 Nächste Schritte für eine energieeffiziente Di- gitalisierung**

## 6 Nächste Schritte für eine energieeffiziente Digitalisierung

Die vorliegende Studie gibt einen Überblick zum aktuellen Wissensstand hinsichtlich der Energiebedarfe der Digitalisierung. Damit wird eine Grundlage zur Abschätzung künftiger Entwicklungen geschaffen und es werden erste Ansatzpunkte für Handlungsmöglichkeiten zur Begrenzung neuer Energiebedarfe identifiziert.

Im Ergebnis zeigt sich, dass zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht von der Existenz eines gesicherten Kenntnisstands hinsichtlich der Höhe der Energiebedarfe digitaler Produkte und Lösungen gesprochen werden kann. Die aktuell verfügbaren nationalen und internationalen Studien kommen hier teilweise zu deutlich voneinander abweichenden Ergebnissen. Die Gründe dafür liegen zum einen in unterschiedlichen Abgrenzungen und Methoden der verschiedenen Studien. Eine zweite wesentliche Schwierigkeit liegt in der Verwendung digitaler Lösungen in nahezu allen Lebens- und Wirtschaftsbereichen. Dies macht sie zu einem integrativen Bestandteil aller typischerweise bei der Bestimmung von Energiebedarfen betrachteten Sektoren wie Industrie, Gebäude oder Verkehr. Eine isolierte Betrachtung der Energiebedarfe der Digitalisierung ist daher mithilfe der klassischen Methoden kaum möglich. Deshalb werden diese Energiebedarfe zumeist über mehr oder weniger detaillierte Modelle bestimmt, in denen eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden müssen.

Trotz der teilweise stark variierenden Ergebnisse der vorhandenen Studien herrscht eine weitgehende Einigkeit darüber, dass der Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen wie z. B. von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen in Zukunft weiter ansteigen wird. Bei den Telekommunikationsnetzen werden steigende Energiebedarfe insbesondere durch den Ausbau der Mobilfunknetze erwartet. Bei den digitalen Endgeräten gewinnt die Herstellungsphase hinsichtlich des Energiebedarfs zunehmend an Bedeutung, bedingt vor allem durch die erreichten Energieeffizienzgewinne in der Nutzung und die stark wachsende Zahl der Geräte.

Jede einzelne der vier digitalen Schlüsseltechnologien Künstliche Intelligenz, 5G-Mobilfunk, Internet of Things und DLT/Blockchain besitzt das Potenzial, den Energiebedarf der Digitalisierung in Zukunft deutlich ansteigen zu lassen. Während im Bereich Blockchain und Internet of Things bereits heute relevante Energiebedarfe zu verzeichnen sind, muss für den 5G-Mobilfunk und für Lösungen der Künstlichen Intelligenz vor allem im kommenden Jahrzehnt mit einer deutlichen Zunahme gerechnet werden.

Blockchain-Lösungen können von ihrem grundsätzlichen technischen Ansatz her auch sehr energieeffizient betrieben werden. Hohe Energiebedarfe werden hier vor allem durch die Verwendung des Proof-of-Work-Konsensmechanismus verursacht. IoT-Lösungen sind bezüglich ihres Energiebedarfs vor allem durch die enorme Anzahl der vernetzten Geräte und die dadurch möglichen neuen Anwendungsfelder sehr relevant. Der Ausbau der 5G-Mobilfunknetze wird zwar zu einer deutlichen Leistungssteigerung in der mobilen Datenübertragung führen, aber voraussichtlich auch durch zunehmende Anwendungsmöglichkeiten mit einem Anstieg des Energiebedarfs verbunden sein. KI-Anwendungen könnten perspektivisch viele menschliche Tätigkeiten unterstützen. Insbesondere Lösungen im Bereich des Machine Learning und speziell Deep-Learning-Anwendungen können einen sehr hohen Bedarf an Rechenleistung hervorrufen und damit den künftigen Energiebedarf von KI deutlich erhöhen.

Die vorliegende Studie entwickelt insgesamt elf Handlungsempfehlungen zur Förderung der Energieeffizienz der genannten Schlüsseltechnologien. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle zusammen-

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

gefasst. Der Maßnahmenmix umfasst sowohl ordnungsrechtliche als auch kooperative und anreizorientierte Ansätze. Handlungsbedarfe bestehen aus aktueller Sicht zunächst darin, den Kenntnisstand zur Entwicklung der Energiebedarfe der Digitalisierung zu verbessern sowie die Transparenz zu erhöhen. Darüber hinaus sind energieeffizienzorientierte Bildungsmaßnahmen sowohl für Digitalisierungsexpertinnen und -experten als auch für die breite Öffentlichkeit notwendig.

**Tabelle 3: Handlungsempfehlungen für eine energieeffiziente Digitalisierung der Schlüsseltechnologien KI, 5G- Mobilfunk, IoT und DLT/Blockchain**

Nr.	Titel der Maßnahme	Zeithorizont der Umsetzung	Mögliche initiiierende Akteure
<b>KI 1</b>	Round Table zu nachhaltiger KI und der Förderung von KI-Start-ups	sehr kurzfristig	BMWK
<b>KI 2</b>	F&E-Förderung für energieeffiziente KI	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
<b>KI 3</b>	Intensivierung der Bildung zu nachhaltiger KI	mittel- bis langfristig	BMBF, Bundesländer
<b>KI 4</b>	Transparenz durch den Aufbau offener KI-Plattformen, die bereits gerechnete Ergebnisse für andere nutzbar machen	mittelfristig	BMWK, EU-Kommission
<b>5G 1</b>	Rahmenbedingungen für den energieeffizienten Ausbau von 5G schaffen	mittelfristig	BMWK
<b>5G 2</b>	Transparenz von Energiebedarf und CO <sub>2</sub> -Fußabdruck des mobilen Netzes	mittelfristig	BMWK, Verbände
<b>5G 3</b>	F&E-Förderung für den nachhaltigen Betrieb neuer Mobilfunkgenerationen	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
<b>IoT 1</b>	Rahmensetzungen für ein energieeffizientes IoT	mittel- bis langfristig	EU-Kommission, BMWK
<b>IoT 2</b>	F&E für ein energieeffizientes IoT	kurzfristig	BMWK, BMBF, BMUV, EU-Kommission
<b>IoT 3</b>	Transparenz erhöhen, Interoperabilität von IoT-Lösungen fördern	mittelfristig	BMWK, Verbände

Nr.	Titel der Maßnahme	Zeithorizont der Umsetzung	Mögliche initiiierende Akteure
<b>DLT 1</b>	Transparenz des Energiebedarfs von PoW-basierten Blockchains erhöhen, Informationslage verbessern	kurzfristig	EU-Kommission

Zum Erreichen einer energieeffizienten Digitalisierung der im Rahmen dieser Studie betrachteten Schlüssel--technologien sollten alle Maßnahmen zeitnah initiiert und entwickelt werden. Je nach Art der Maßnahme ist der Zeithorizont der Wirksamkeit jedoch unterschiedlich. Ein nationaler Round Table zu nachhaltiger KI (KI 1) kann sehr kurzfristig initiiert und gebildet werden. Dieser kann dann konkrete Maßnahmen erarbeiten und der Politik vorschlagen. Auch Maßnahmen im Bereich F&E zur Förderung der Energieeffizienz der Schlüsseltechnologien (KI 2, 5G 3, IoT 2) können kurzfristig initiiert und umgesetzt werden. Aufgrund der bestehenden Dringlichkeit sind Maßnahmen zur Begrenzung des Energiebedarfs von Distributed Ledger Technologies (DLT 1) möglichst kurzfristig umzusetzen. Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz und Förderung von Bildung und Weiterbildung werden dagegen eher mittelfristig Wirksamkeit zeitigen.

Die weiter gehende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft kann, wie die vorliegende Studie zeigt, zu einer deutlichen Erhöhung der Energiebedarfe führen. Dies ist aber keine zwangsläufige Entwicklung: Wenn es gelingt, in Kooperation von Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Wissenschaft und Politik die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige und energieeffiziente Digitalisierung zu setzen, ist es durchaus möglich, den Nutzen der Digitalisierung mit einem ökologisch vertretbaren Energieaufwand zu realisieren. Die Digitalisierung im Energiesystem stellt eine wichtige Grundlage dafür dar, sektorübergreifende Energieeinsparungen zu ermöglichen und die Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft voranzubringen. Sie muss selbst so energieeffizient erfolgen wie möglich.

### QUELLEN

- 5G Americas. (2020, Dezember 1). Understanding Millimeter Wave Spectrum for 5G Networks. 5G Americas. Zugriff am 10.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.5gamericas.org/understanding-millimeter-wave-spectrum-for-5g-networks/>
- Alladi, T., Chamola, V., Parizi, R. M. & Choo, K.-K. R. (2019). Blockchain Applications for Industry 4.0 and Industrial IoT: A Review. *IEEE Access*, 7, 176935–176951. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2956748>
- Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, Mohd. S. & Meng, Q. (2019). Greening internet of things for greener and smarter cities: a survey and future prospects. *Telecommunication Systems*, 72(4), 609–632. <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00597-1>
- Amodei, D. & Hernandez, D. (2018). AI and Compute. *OpenAI*.
- Andrae, A. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letters*, 3(2), 19–31.
- 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>
- Andres, R., Axenbeck, J., Bertschek, I., Breithaupt, P., Janßen, R., Kollmann, E. et al. (2021). Meta-studie – Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung in Baden-Württemberg. Mannheim.
- Anthony, L. F. W., Kanding, B. & Selvan, R. (2020, Juni 7). Carbontracker: Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2007.03051v1>
- Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M. A., Wahid, A. & Yu, H. (2017). Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond. *IEEE Access*, 5, 15667–15681. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2686092>
- Aslan, J., Mayers, K., Koomey, J. G. & France, C. (2018). Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 785–798. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
- Avgerinou, M., Bertoldi, P. & Castellazzi, L. (2017). Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. *energies*.
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (Hrsg.). (2018). What is the difference between DLT and blockchain? Verfügbar unter: <https://www.bbva.com/en/difference-dlt-blockchain/>
- Bendiksen, C., Gibbons, S. & Lim, E. (2019). The Bitcoin Mining Network-Trends, Marginal Creation Cost, Electricity Consumption & Sources, June 2019 Update. *CoinShares Research*, 21.
- Berg, A. (2019, April). Digitalisierung der Wirtschaft. Berlin: Bitkom Research. Verfügbar unter: [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-04/bitkom\\_charts\\_hub\\_-\\_digitalisierung\\_der\\_wirtschaft\\_10\\_04\\_2019\\_final.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-04/bitkom_charts_hub_-_digitalisierung_der_wirtschaft_10_04_2019_final.pdf)
- Berg, A. (2020, April). Digitalisierung der Wirtschaft. Berlin: Bitkom Research. Verfügbar unter: [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-03/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-01-04-2020\\_final.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-03/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-01-04-2020_final.pdf)
- Berg, A. (2021, November). Digitalisierung der Wirtschaft - Wo steht Deutschland nach zwei Jahren Pandemie? Berlin: Bitkom Research. Verfügbar unter: [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-11/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-24-11-2021\\_final.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-11/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-24-11-2021_final.pdf)



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- Bertscheck, I., Erdsiek, D., Niebel, T., Schuck, B., Seifried, M., Ewald, J. et al. (2020). Schwerpunkt- studie Digitalisierung und Energieeffizienz - Erkenntnisse aus Forschung und Praxis. Berlin: BMWi. Zugriff am 19.5.2021. Verfügbar unter: [https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/schwerpunktstudie-digitalisierung-energieeffizienz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/schwerpunktstudie-digitalisierung-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=12)
- Bevand, M. (2017, März 10). Electricity consumption of Bitcoin: a market-based and technical analysis. Zugriff am 27.10.2019. Verfügbar unter: <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S. & Hilty, L. (2020). Klimaschutz durch digitale Technologien. Berlin: Bitkom e.V. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/klimaschutz-digital>
- Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM. (2016). Ecodesign Preparatory Study on Enterprise Servers and Data Equipment. Brussels. Zugriff am 22.1.2018. Verfügbar unter: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6ec8bbe6-b8f7-11e5-8d3c-01aa75ed71a1>
- Bitkom & Accenture. (2021). Klimateffekte der Digitalisierung. Zugriff am 9.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Klimaschutz>
- Bitkom Research. (2021, Oktober). Nachhaltig geht nur digital: Wie Deutschland mit KI und Co. die Zukunft gestaltet. Tata Consultancy Services and Bitkom Research. Verfügbar unter: <https://www.tcs.com/de-de/trendstudie-digitalisierung/studie-digitalisierung-2021-nachhaltigkeit>
- BloombergNEF, Statkraft, & Eaton. (2021). Data Centers and decarbonization Unlocking Flexibility in Europe's Data Centers. Zugriff am 18.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.eaton.com/gb/en-gb/company/news-insights/energy-transition/bnef-data-centres-and-decarbonisation-study.html?source=post:1427248746593282584>
- BMU. (2020). Umweltpolitische Digitalagenda. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff am 25.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/digitalagenda/>
- BMWi. (2008). Aktionsplan: Green IT-Pionier Deutschland. Berlin.
- Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D. et al. (2021). Behind the figures: understanding the environmental impacts of ICT and taking action. (E.GreenIT.fr., Hrsg.).
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2019). Blockchain/Distributed-Ledger-Technologie. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Kryptografie/Blockchain/blockchain.html>
- Bundesnetzagentur. (2021a). Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2020/2021. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2021/TTB2020.pdf>
- Bundesnetzagentur. (2021b). Die Blockchain-Technologie Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen. (Bundesnetzagentur, Hrsg.). Zugriff am 20.6.2022. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Blockchain/Links\\_Dokumente/einfuehrung\\_bc.pdf](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Blockchain/Links_Dokumente/einfuehrung_bc.pdf)
- Bundesregierung. (2017). Eine 5G-Strategie für Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/blaetterkatalog/catalogs/350336/pdf/complete.pdf>
- Cambridge Centre for Alternative Finance. (2022). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://ccaf.io/cbeci/index>

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- CBECI. (2021, Oktober 13). Geographic shift - News & insight. Cambridge Judge Business School. Zugriff am 6.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.jbs.cam.ac.uk/insight/2021/geographic-shift/>
- Central Intelligence Agency. (2016). The World Factbook: Country Comparisons - Electricity consumption. Verfügbar unter: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/electricity-consumption/country-comparison>
- Cisco. (2018). Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2016-2021. Zugriff am 7.7.2021. Verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf>
- Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Clausen, J., Niebel, T., Hintemann, R., Schramm, S., Axenbeck, J. & Iffländer, S. (2022). Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos? CliDiTrans Endbericht. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/01/AP4\\_CliDiTrans\\_Endbericht\\_20220202.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/01/AP4_CliDiTrans_Endbericht_20220202.pdf)
- coinbase. (2022). Ethereum an Euro. Verfügbar unter: <https://www.coinbase.com/de/convert/eth/eur>
- Cong, L. W. & He, Z. (2019). Blockchain Disruption and Smart Contracts. *The Review of Financial Studies*, 32(5), 1754–1797. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz007>
- Coroamă, V. (2021). Investigating the Inconsistencies among Energy and Energy Intensity Estimates of the Internet: Metrics and Harmonising Values. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67656&Load=true>
- Cremer, C., Eichhammer, W., Friedewald, M., Georgieff, P., Rieth-Hoerst, S., Schlomann, B. et al. (2003). Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der Informations- und Kommunikationstechnik auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010 – Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Energieeinsparung in diesen Bereichen. Karlsruhe/Zürich.
- Das, D. & Dutta, A. (2020). Bitcoin's energy consumption: Is it the Achilles heel to miner's revenue? *Economics Letters*, 186, 108530. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2019.108530>
- Das, S. & Mao, E. (2020). The global energy footprint of information and communication technology electronics in connected Internet-of-Things devices. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 24, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100408>
- Deetman, S. (2017). Bitcoin Could Consume as Much Electricity as Denmark by 2020. 2016. *Vice*. DeFi Pulse. (2022). Total Value Locked (USD) in DeFi. Verfügbar unter: <https://defipulse.com/>
- dena. (2022). Künstliche Intelligenz in der Energiewirtschaft - dena-Umfrage. Zugriff am 30.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-umfrage-dena-factsheet-kuenstliche-intelligenz-in-der-energiewirtschaft/>
- Deutscher Bundestag. (2013). Schlussbericht der Enquete-Kommission „Internet und digitale Gesellschaft“. Zugriff am 8.8.2016. Verfügbar unter: <https://dip.bundestag.de/vorgang/.../24667>
- Digiconomist. (2022). Bitcoin Energy Consumption Index. Zugriff am 16.6.2022. Verfügbar unter: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Digital technologies in Europe: an environmental life cycle approach. (2021). Brussels, online: GreenIT.fr. Zugriff am 7.12.2021. Verfügbar unter: <http://extranet.greens-efa-service.eu/public/media/file/1/7388>

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- DIGITAL X. (2021). Internet der Dinge: Was bedeutet IoT? Verfügbar unter: <https://www.digital-x.eu/de/magazin/artikel/dx-xplain/das-internet-der-dinge-definition>
- Dimitrov, D. V. (2019). Blockchain Applications for Healthcare Data Management. *Healthcare informatics research*, 25(1), 51–56. <https://doi.org/10.4258/hir.2019.25.1.51>
- Dittmar, L. & Praktiknjo, A. (2019). Could Bitcoin emissions push global warming above 2 °C? *Nature Climate Change*, 9(9), 656–657. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0534-5>
- Dodge, J., Gururangan, S., Card, D., Schwartz, R. & Smith, N. A. (2019, September 6). Show Your Work: Improved Reporting of Experimental Results. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1909.03004>
- Douwes, C., Esling, P. & Briot, J.-P. (2021, Juni 7). Energy Consumption of Deep Generative AudioModels. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2107.02621v2>
- Dujak, D. & Sajter, D. (2019). Blockchain Applications in Supply Chain (EcoProduction). In A. Kawa & A. Maryniak (Hrsg.), *SMART Supply Network* (S. 21–46). Cham: Springer International Publishing.
- EnBW. (2021). Smart City - Definition und Anwendungsbeispiele. Verfügbar unter: <https://www.enbw.com/energie-entdecken/gesellschaft/smart-cities/>
- Ericsson. (2021). Ericsson Mobility Report. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2021>
- Ethereum Foundation. (2022a). Ethereum energy consumption. Verfügbar unter: <https://ethereum.org/en/energy-consumption/#proof-of-stake>
- Ethereum Foundation. (2022b). Earn rewards while securing Ethereum. Verfügbar unter: <https://ethereum.org/en/staking/>
- Eurostat. (2021a). Community Survey on ICT Usage and E-Commerce in Enterprises. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220609-1>
- Eurostat. (2021b, November 11). Electricity production, consumption and market overview. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_production,\\_consumption\\_and\\_market\\_overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview)
- Expertenkommission Forschung und Innovation. (2019). Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2019. EFI. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.e-fi.de/publikationen/gutachten>
- EY. (2013). Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler.html>
- Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S. & Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), 100340. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- Fridgen, G., Radszuwill, S., Urbach, N. & Utz, L. (2018). Cross-Organizational Workflow Management Using Blockchain Technology – Towards Applicability, Auditability, and Automation: Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Waiko-loa Village: Fraunhofer FIT.
- Fuchs, H., Shehabi, A., Ganeshalingam, M., Desroches, L.-B., Lim, B., Roth, K. et al. (2017). Characteristics and Energy Use of Volume Servers in the U.S. California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- Bitcoin. Joule, 4(9), 1843–1846. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013>
- García-Martín, E., Rodrigues, C. F., Riley, G. & Grahn, H. (2019). Estimation of energy consumption in machine learning. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 134, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.07.007>
- GeSI & Deloitte. (2019). Digital with purpose - Delivering a smarter 2030. Brussels.
- Grijpink, F., Kutcher, E., Ménard, A., Ramaswamy, S., Schiavotto, D., Manyika, J. et al. (2020). Connected world: An evolution in connectivity beyond the 5G revolution. McKinsey & Company.
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J. & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. (Umweltbundesamt, Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-cloud-computing>
- GSMA. (2020). 5G energy efficiencies: Green is the new black. Verfügbar unter: <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=54165956&file=241120-5G-energy.pdf>
- heise. (2021, Oktober 21). Kryptowährung Ethereum: Energieintensives GPU-Mining bleibt bis 2022 erhalten. (Heise Medien GmbH & Co. KG, Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.heise.de/news/Kryptowaehrung-Ethereum-Grafikkarten-Mining-bleibt-doch-bis-2022-erhalten-6225293.html>
- Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D. & Pineau, J. (2020, Januar 31). Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2002.05651v1>
- Hernandez, D. & Brown, T. B. (2020, Mai 9). Measuring the Algorithmic Efficiency of Neural Networks. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/2005.04305>
- 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). Data centers 2018. Efficiency gains are not enough: Data center energy consumption continues to rise significantly. Berlin: Borderstep Institute.
- Hintemann, R. (2021). Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep\\_Rechenzentren2020\\_20210301\\_final.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf)
- Hintemann, R., Clausen, J., Beucker, S. & Hinterholzer, S. (2021). Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen. Studie für Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag der Hessischen Staatskanzlei, Hessische Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung. Wiesbaden: Hessische Staatskanzlei, Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung.
- Hintemann, R., Graß, M., Hinterholzer, S. & Grothey, T. (2022). Rechenzentren in Deutschland - Aktuelle Marktentwicklungen. Bitkom. Zugriff am 15.4.2022. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Rechenzentren-in-Deutschland-2022>
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2018). Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten. Berlin: Borderstep Institut. Verfügbar unter: [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/07/energiewende\\_studie\\_vernetzte\\_produkte.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/07/energiewende_studie_vernetzte_produkte.pdf)

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- 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. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-183168542>
- IEA. (2019). Bitcoin energy use - mined the gap. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/commentaries/bitcoin-energy-use-mined-the-gap>
- IEA. (2021). Data Centres and Data Transmission Networks. Zugriff am 14.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- ITU. (2021). Beyond 5G: What's next for IMT? Verfügbar unter: <https://www.itu.int/hub/2021/02/beyond-5g-whats-next-for-imt/>
- ITU. (2022). 5G - Fifth generation of mobile technologies. Zugriff am 30.04.2022. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- Kaack, L., Donti, P., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F. & Rolnick, D. (2021). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation: hal-03368037. Verfügbar unter: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03368037/>
- Kaack, L., Donti, P., Strubell, E. & Rolnick, D. (2021). Künstliche Intelligenz und Klimawandel. (Heinrich-Böll-Stiftung, Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.boell.de/de/2021/06/02/kuenstliche-intelligenz-und-klimawandel>
- Koomey, J. G., Berard, S., Sanchez, M. & Wong, H. (2011). Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 46–54. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2010.28>
- Kratochwill, L., Richard, P., Babilon, L., Rehmann, F., Sara, M. & Fasbender, S. (2020). dena-Analyse: Künstliche Intelligenz – vom Hype zur energiewirtschaftlichen Realität: Vertiefte Analyse von KI-Anwendungsfeldern in der Energiewirtschaft. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-analyse-kuenstliche-intelligenz-vom-hype-zur-energiewirtschaftlichen-realiaet/>
- Krause, M. J. & Tolaymat, T. (2018). Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. *Nature Sustainability*, 1(11), 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>
- Kresser, T. (2020). Internet der Dinge: Gelingt der Durchbruch mit Sensoren? ingenieur.de - Job- börse und Nachrichtenportal für Ingenieure.
- Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V. & Dandres, T. (2019, Oktober 22). Quantifying the Carbon Emissions of Machine Learning. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1910.09700>
- Lange, S., Banning, M., Berner, A., Kern, F., Lutz, C., Peuckert, J. et al. (2019). Economy-Wide Rebound Effects: State of the art, a new taxonomy, policy and research gaps. Berlin, Osnabrück, Göttingen.
- Lei, N. & Masanet, E. R. (2021). Global data center energy demand and strategies to conserve energy. *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*, 15–26. Wiley Online Library.
- Lundén, D., Malmodin, J., Bergmark, P. & Lövehagen, N. (2022). Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators. *Sustainability*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052637>



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S. & Koomey, J. (2020, Februar 28). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*. Zugriff am 4.3.2020. Verfügbar unter: <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/984>
- Menghani, G. (2021, Juni 16). Efficient Deep Learning: A Survey on Making Deep Learning Models Smaller, Faster, and Better. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/2106.08962>
- Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M. et al. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. *Nature Climate Change*, 8(11), 931–933.
- Nandyala, C. S. & Kim, H.-K. (2016). Green IoT Agriculture and Healthcare Application (GAHA). *International Journal of Smart Home*, 10(4), 289–300. <https://doi.org/10.14257/ijsh.2016.10.4.26>
- NGMN. (2021). Green Future Networks: Network Energy Efficiency.
- Parcollet, T. & Ravanelli, M. (2021). The Energy and Carbon Footprint of Training End-to-End Speech. Verfügbar unter: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03190119/document>
- Patterson, D., Gonzalez, J., Le Quoc, Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D. et al. (2021, April 21). Carbon Emissions and Large Neural Network Training. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2104.10350v3>
- Petit, V., Carlini, S. & Avelar, V. (2021). Digital economy and climate impact: A bottom-up forecast of the IT sector energy consumption and carbon footprint to 2030. Nanterre: Schneider Electric. Verfügbar unter: <https://www.se.com/ww/en/insights/tl/electricity-4-0/digital-economy-and-climate-impact>
- Pihkola, H., Hongisto, M., Apilo, O. & Lasanen, M. (2018). Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking. *Sustainability*, 10(7), 2494. <https://doi.org/10.3390/su10072494>
- Pirson, T. & Bol, D. (2021). Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 322(1), 128966. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128966>
- Popov, S. (2018). The Tangle. Verfügbar unter: <http://www.descriptions.com/lota.pdf>
- Qiu, X., Parcollet, T., Fernandez-Marques, J., de Gusmao, P. P. B., Beutel, D. J., Topal, T. et al. (2021, Februar 15). A first look into the carbon footprint of federated learning. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/2102.07627>
- 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: Öko-Institut e.V. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oeko-doc/Smarthome-Stromverbrauch.pdf>
- Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G. C., Recanatini, M. & Zhang, B. Z. (2018). 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Available at SSRN 3306125.
- Rault, T., Bouabdallah, A. & Challal, Y. (2014). Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Computer Networks*, 67, 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.027>
- Raza, U., Kulkarni, P. & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873. <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2652320>

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- Reetz, F. (2019a). Herausforderungen und Förderstrategien für die Blockchain-Technologie: Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI). Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/194280>
- Reetz, F. (2019b, März). Blockchain & das Klima: Warum die nationale Blockchain-Strategie Innovations- und Klimapolitik zusammenbringen sollte. Berlin: Stiftung Neue Verantwortung e. V.
- René Kemna, Leo Wierda, William Li, van den Boorn, R., van Elburg, M., Viegand, J. et al. (2020). ICT Impact study. Brussels: VHK and Viegand Maagøe. Verfügbar unter: [https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-11/IA\\_report-ICT\\_study\\_final\\_2020\\_\(CIRCABC\).pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-11/IA_report-ICT_study_final_2020_(CIRCABC).pdf)
- Richard, P., Mamel, S. & Vogel, L. (2019). dena-MULTI-STAKEHOLDER-STUDIE – Blockchain in der integrierten Energiewende. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg.). Berlin. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Studie\\_Blockchain\\_Integrierte\\_Energiewende\\_DE4.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Studie_Blockchain_Integrierte_Energiewende_DE4.pdf)
- Rieger, A., Guggenmos, F., Lockl, J., Fridgen, G. & Urbach, N. (2019). Building a Blockchain Application that Complies with the EU General Data Protection Regulation. *MIS Quarterly Executive*, 18(4), 263–279. <https://doi.org/10.17705/2msqe.00020>
- Ripple. (2022). XRP – Utility for the new global economy. Verfügbar unter: <https://ripple.com/xrp/#Rozite>, V. (2014). More Data, Less Energy: Making Network Standby More Efficient in Billions of Connected Devices. International Energy Agency. Zugriff am 18.1.2022. Verfügbar unter: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/3fadb2cb-c2c7-4775-947f-0b8f38be0a19/More-Data\\_LessEnergy.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/3fadb2cb-c2c7-4775-947f-0b8f38be0a19/More-Data_LessEnergy.pdf)
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J. & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Saleh, F. (2021). Blockchain without Waste: Proof-of-Stake. *The Review of Financial Studies*, 34(3), 1156–1190. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa075>
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A. & Etzioni, O. (2019, Juli 22). Green AI. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1907.10597>
- Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G. & Keller, R. (2020). The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599–608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>
- Shehabi, A., Smith, S. J., Masanet, E. & Koomey, J. G. (2018). Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. *Environmental Research Letters*, 13(12).
- Shehabi, A., Smith, S., Sartor, D., Brown, R., Herrlin, M., Koomey, J. et al. (2016). United States Data Center Energy Usage Report. Nr. LBNL-1005775. Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Zugriff am 19.2.2018. Verfügbar unter: <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>
- Silvano, W. F. & Marcelino, R. (2020). Iota Tangle: A cryptocurrency to communicate Internet-of-Things data. *Future Generation Computer Systems*, 112, 307–319. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.047>
- STL Partners. (2019). Curtailing Carbon Emissions—Can 5G Help? Verfügbar unter: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBGV2/download/program/Industries-5G/Curtailing-Carbon-Emissions-Can-5G-Help.pdf>

## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

- 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>
- Stobbe, L., Nissen, N., Proske, M., Middendorf, A., Schlomann, B., Friedewald, M. et al. (2009). Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Nr. D 4 – 02 08 15–43/08. (S. 164). Berlin, Karlsruhe: Fraunhofer IZM.
- Stoll, C., Klaaßen, L. & Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*, 3(7), 1647–1661. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>
- Strubell, E., Ganesh, A. & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. arXiv:1906.02243 [cs].
- Szalay, E. (2022). EU should ban energy-intensive mode of crypto mining, regulator says: Esma vice-chair criticises method of minting bitcoin that is using more renewable energy. London. Verfügbar unter: <https://www.ft.com/content/8a29b412-348d-4f73-8af4-1f38e69f28cf>
- 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/>
- Thompson, N. C. (2021). Deep Learning's Diminishing Returns. *IEEE Spectrum*.
- Tornede, T., Tornede, A., Hanselle, J., Wever, M., Mohr, F. & Hüllermeier, E. (2021, Oktober 11). Towards Green Automated Machine Learning: Status Quo and Future Directions. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2111.05850v1>
- Transformer Insights. (2021). Global IoT Forecast Report, 2020-2030.
- Truby, J. (2018). Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of Blockchain technologies and digital currencies. *Energy Research & Social Science*, 44, 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.009>
- VDI. (2017). Studie: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. Verfügbar unter: <https://www.resource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/>
- Vranken, H. (2017). Sustainability of bitcoin and blockchains. *Current opinion in environmental sustainability*, 28, 1–9.
- de Vries, A. (2018). Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*, 2(5), 801–805. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>
- Wang, W., Hoang, D. T., Hu, P., Xiong, Z., Niyato, D., Wang, P. et al. (2019). A Survey on Consensus Mechanisms and Mining Strategy Management in Blockchain Networks. *IEEE Access*, 7, 22328–22370. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2896108>
- Wang, Y. Q., Shi Shaohuai, He Xin, Tang Zhenheng, Zhao Kaiyong, & Chu Xiaowen. (2020). Benchmarking the Performance and Energy Efficiency of AI Accelerators for AI Training. 2020 20th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGRID) (S. 744–751). <https://doi.org/10.1109/CCGrid49817.2020.00-15>
- 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>



## NEUE ENERGIEBEDARFE DIGITALER TECHNOLOGIEN

Wiesner, P., Behnke, I., Scheinert, D., Gontarska, K. & Thamsen, L. (2021). Let's Wait Awhile: How Temporal Workload Shifting Can Reduce Carbon Emissions in the Cloud. <https://doi.org/10.1145/3464298.3493399>

Williams, L., Sovacool, B. K. & Foxon, T. J. (2022). The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112033>

Zeadally, S., Shaikh, F. K., Talpur, A. & Sheng, Q. Z. (2020). Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109901>

Zhu, C., Leung, V. C. M., Shu, L. & Ngai, E. C.-H. (2015). Green Internet of Things for Smart World. *IEEE Access*, 3, 2151–2162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2497312>



[www.dena.de](http://www.dena.de)

[future-energy-lab.de](http://future-energy-lab.de)

**dena**  
Deutsche Energie-Agentur