

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorwort des Ausschusses	5
Zusammenfassung	9
Aktualisierung und Ergänzung vom Juni 2022	19
1 Einleitung	33
2 Wissensstand und Szenarien zu den IKT-bedingten Energiebedarfen	35
2.1 Abgrenzung und Methodik.....	35
2.2 Überblick Energiebedarf der IKT weltweit	36
2.3 Status quo: Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland	39
2.3.1 Methodische Grundlagen.....	39
2.3.2 Bestand an Rechenzentren in Deutschland.....	41
2.3.3 Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2019	43
2.3.4 Abschätzung der aus Deutschland heraus im Ausland induzierten Energiebedarfe von Rechenzentren	46
2.4 Status quo: Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland	48
2.4.1 Methodische Grundlagen.....	48
2.4.2 Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland 2019	49
2.4.3 Energiebedarf der Telekommunikationsnetze gesamt.....	53

	Seite
2.5 Szenarien bis zum Jahr 2030	55
2.5.1 Rechenzentren	55
2.5.2 Telekommunikationsnetze.....	57
2.6 Zwischenfazit	62
3 Energetische Einsparpotenziale in der IKT	63
3.1 Technologische und organisatorische Optionen zur Energieeinsparung in IKT-Infrastrukturen	63
3.1.1 IKT-Hardware	65
3.1.2 Kühlung und Klimatisierung	66
3.1.3 Stromversorgung	68
3.1.4 Management, Netzwerkarchitekturen und Software	71
3.2 Treiber und Hemmnisse für die Realisierung von Einsparpotenzialen.....	75
3.2.1 Nutzung von Abwärme aus dem Betrieb von Rechenzentren	75
3.2.2 Flüssigkeitsgekühlte Server und Komplettsysteme	77
3.2.3 Gleichstromversorgung von Rechenzentren.....	80
3.2.4 Rechenzentren als Anbieter von Regelleistung	82
3.3 Zwischenfazit	84
4 Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom in IKT-Infrastrukturen	87
4.1 Herausforderungen	87
4.2 Ansatzpunkte zur Nutzung regenerativer Energien in IKT-Infrastrukturen	91
4.3 Fallbeispiele.....	92
4.3.1 Windcloud	92
4.3.2 WindCORES	92
4.3.3 Cloud & Heat.....	93
4.3.4 Limebird	93
4.3.5 Hemmnisse und Ansatzpunkte zu deren Überwindung.....	94
4.4 Zwischenfazit	94
5 Vertiefungsthemen.....	97
5.1 Energiebedarf von Blockchainanwendungen am Beispiel von Kryptowährungen	97
5.1.1 Wie funktioniert eine Blockchain?	97
5.1.2 Strombedarf der Kryptowährungen Bitcoin	101
5.1.3 Handlungsoptionen zur Reduktion des Energiebedarfs von Kryptowährungen und weiteren Blockchainanwendungen	106

	Seite
5.2	Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung 107
5.2.1	Abgrenzung und Methodik 107
5.2.2	Energiebedarf der Endgeräte 108
5.2.3	Energiebedarf in Übertragungsnetzen und Rechenzentren..... 116
5.2.4	Entwicklung im Zeitverlauf und Ausblick..... 117
5.2.5	Gestaltungsfelder 120
5.3	Smartbuildings..... 121
5.3.1	Überblick: Energieverbrauch im Gebäudebestand 122
5.3.2	Intelligente Vernetzung bei Gebäuden 123
5.3.3	Energieeinsparungen vs. Eigenverbrauch..... 127
5.3.4	Fazit 130
6	Schlussbetrachtungen 133
7	Literatur 137
7.1	In Auftrag gegebene Gutachten 137
7.2	Literatur aus Aktualisierung 137
7.3	Weitere Literatur..... 142
8	Anhang 155
8.1	Liste der teilnehmenden Experten am Workshop..... 155
8.2	Abbildungen 155
8.3	Tabellen 158
8.4	Glossar..... 159

Vorwort des Ausschusses

Die voranschreitende Digitalisierung führt zu einem tiefgreifenden Umbruch vieler Lebens- und Wirtschaftsbereiche in unserer Gesellschaft. In Bezug auf umwelt- bzw. klimapolitische Ziele verspricht die Digitalisierung durch Effizienzsteigerungen enorme Potenziale zur Einsparung von Rohstoffen und Energie sowie zur Reduktion von Schadstoff- und Klimagasemissionen. Dem steht jedoch gegenüber, dass die Herstellung, der Betrieb und die Entsorgung von Geräten, Komponenten bzw. Produkten der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) große Mengen Energie und Ressourcen verbrauchen sowie weitere Umweltwirkungen verursachen.

Vor diesem Hintergrund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung auf Anregung des Ausschusses für Wirtschaft und Energie (19. WP) das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) beauftragt, einen Bericht zu den durch die IKT-Infrastrukturen – das sind insbesondere Daten- und Rechenzentren sowie Telekommunikationsnetze – verursachten Energieverbräuchen zu erarbeiten.

Der resultierende Bericht des TAB informiert über den aktuellen Wissensstand zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen. Mögliche weitere Entwicklungen bis 2030 werden anhand modellgestützter Szenarien diskutiert. Außerdem werden technologische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie beleuchtet und es wird der Frage nachgegangen, welche Möglichkeiten für die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in IKT-Infrastrukturen existieren. Anhand dreier Vertiefungsthemen werden spezifische Energieverbräuche und Einsparpotenziale vertieft untersucht. Dabei handelt es sich um die Blockchaintechnologie, die private Internet- und digitale Mediennutzung sowie die Einsparmöglichkeiten im Gebäudebereich durch digitales Energiemanagement (Smarthome bzw. Smartbuilding).

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Arbeitsbericht eine fundierte Informationsbasis für die parlamentarische Befassung mit diesem wichtigen Themenfeld.

Berlin, den 6. Juli 2022

Kai Gehring

Vorsitzender

Dr. Holger Becker

Berichterstatter

Lars Rohwer

Berichterstatter

Laura Kraft

Berichterstatterin

Prof. Dr. Stephan Seiter

Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. habil.

Michael Kaufmann

Berichterstatter

Ralph Lenkert

Berichterstatter

Reinhard Grünwald
Claudio Caviezel

**Energieverbrauch
der IKT-Infrastruktur**

Endbericht zum TA-Projekt

TAB-Arbeitsbericht Nr. 198

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Die Digitalisierung durchdringt alle Lebensbereiche und weist ein erhebliches transformatives Potenzial auf. Die enormen Chancen und Risiken des digitalen Umbruchs werden bislang vor allem in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht thematisiert. Dieser Umbruch geht aber auch mit erheblichen ökologischen Wirkungen einher, die als ambivalent einzuschätzen sind: Auf der einen Seite bietet die Digitalisierung die Chance, ökonomische und gesellschaftliche Prozesse neu zu organisieren und insbesondere auch ressourcen- und energieeffizienter zu gestalten. Auf der anderen Seite verbrauchen aber Aufbau und Betrieb der digitalen Infrastrukturen (Endgeräte, Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) große Mengen an Energie und Rohstoffen, wodurch sie wesentlich zur globalen Umwelt- und Klimabelastung beitragen. Zwar wurden in der Vergangenheit beträchtliche Fortschritte bei der Energieeffizienz von elektronischen Komponenten (z. B. Prozessoren von Computern) erzielt. Diese Effizienzgewinne wurden aber durch den enormen Anstieg der Nutzung digitaler Anwendungen konterkariert.

Eine kritische Betrachtung der Energieverbräuche von Informations- und Kommunikationstechnologie- (IKT-)Infrastrukturen ist von erheblicher Relevanz, weil angesichts der mit der Digitalisierung assoziierten bzw. in Aussicht gestellten enormen Nutzenpotenziale ggf. die Gefahr besteht, dass damit einhergehende negative Umweltauswirkungen bei Anwendern, Forschenden und nicht zuletzt auch bei politischen Akteuren zunehmend aus dem Blickfeld geraten könnten. Vor diesem Hintergrund wurden der Wissensstand zum heutigen und prognostizierten Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen analysiert, Einsparpotenziale identifiziert und charakterisiert sowie Wege aufgezeigt, wie diese realisiert werden könnten.

Zur Aktualität des Berichts

Der Redaktionsschluss für den vorliegenden TAB-Bericht war ursprünglich Ende 2020. Im Zeitraum bis zu seiner Veröffentlichung im Sommer 2022 hatten sich durch nicht vorhersehbare Ereignisse einige Rahmenbedingungen, die der Analyse des Energieverbrauchs der IKT-Infrastrukturen zugrunde gelegt worden waren, bedeutend verändert. Dies betrifft vor allem den durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Digitalisierungsschub in vielen Bereichen sowie die Verwerfungen auf den Energiemärkten infolge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine.

Da eine umfassende Aktualisierung mit vertretbarem Ressourcenaufwand nicht zu leisten war, wurde auf Initiative der Berichterstattergruppe TA des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages ein Kurzgutachten mit der Zielsetzung in Auftrag gegeben, die Inhalte des TAB-Berichts daraufhin zu prüfen, ob diese aus heutiger Sicht noch Bestand haben. Zumeist erfolgte dies qualitativ, weil neue Modellrechnungen nicht durchgeführt wurden. Wissensbasis hierfür ist die verfügbare aktuelle wissenschaftliche Literatur (bis Ende Mai 2022) sowie Experteneinschätzungen der Gutachter/innen des beauftragten Borderstep Instituts für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin. Das Kurzgutachten folgt direkt nach der Zusammenfassung in diesem TAB-Bericht.

Wissensstand und Prognosen zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen

In der Öffentlichkeit haben in jüngster Zeit Studien für Aufsehen gesorgt, in denen ein drastischer Anstieg des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen bis 2030 vorausgesagt wird. Von einigen Autoren wurde eine Verzehnfachung oder mehr (bezogen auf 2010) prognostiziert, was bedeuten würde, dass der IKT-Sektor für mehr als ein Fünftel des gesamten weltweiten Strombedarfs im Jahr 2030 verantwortlich wäre. Allerdings liegen diesen Ergebnissen meist sehr vereinfachende Annahmen zugrunde, insbesondere wurde vielfach ein anhaltendes exponentielles Wachstum des Datenverkehrs unterstellt.

Für die in diesem Bericht vorgenommene Bestimmung des derzeitigen und zukünftigen Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen in Deutschland wurde daher versucht, ein realistisch(er)es Bild zu zeichnen. Als IKT-Infrastrukturen wurden die Rechenzentren sowie die Telekommunikationsnetzwerke (Kernnetz und Zugangsnetze)

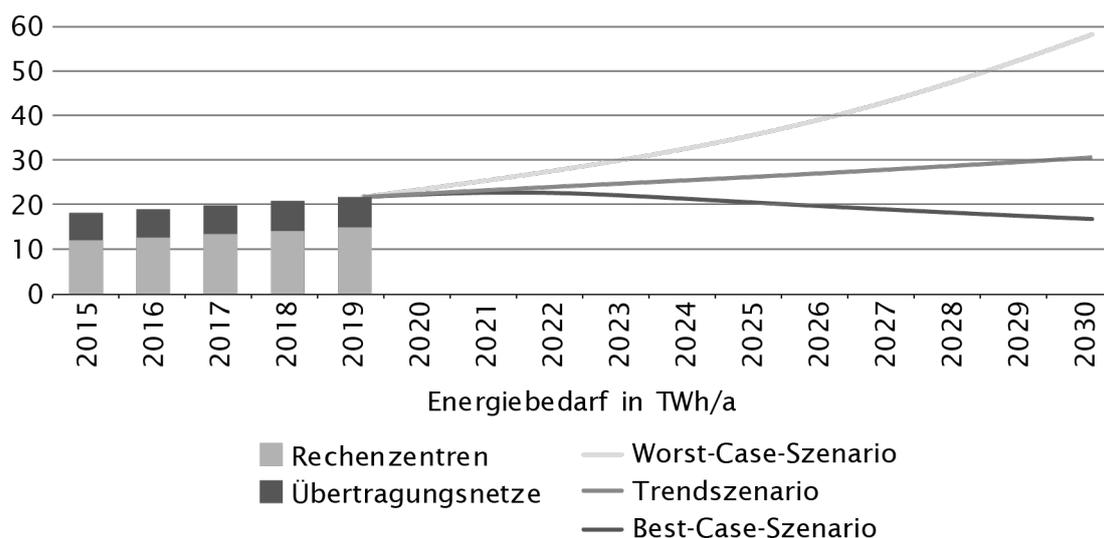
betrachtet. Zugangsnetze verbinden Hausanschlüsse und mobile Endgeräte mit dem Kernnetz. Das Kernnetz leitet die Daten überregional weiter und verbindet die einzelnen regionalen Zugangspunkte. Der verwendete modellbasierte Ansatz basiert auf einer Bottom-up-Methodik, bei der Verkaufszahlen, technische Daten zum Energieverbrauch sowie Nutzungsmuster von IKT-Komponenten erhoben und daraus Energiebedarfe ermittelt werden. Die methodische Herausforderung besteht darin, dass nicht alle für diese Berechnung erforderlichen Daten öffentlich in hinreichender Qualität verfügbar sind.

Die Ergebnisse für den aktuellen Stromverbrauch (Bezugsjahr 2019) der IKT-Infrastrukturen in Deutschland stellen sich wie folgt dar:

- › Der Stromverbrauch der Rechenzentren betrug rund 14,9 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a), was einer Steigerung von etwa 45 % gegenüber dem Stand von 2010 bzw. 25 % gegenüber 2015 entspricht. Der Anstieg wird zu einem Gutteil vom derzeitigen Trend zu immer größeren Rechenzentren getrieben, obwohl diese in der Regel vergleichsweise energieeffizient betrieben werden.
- › Der Jahresstrombedarf der Telekommunikationsnetze (Fest-, Mobilfunk- und Breitbandkabelnetz) betrug etwa 7,1 TWh/a. 2010 lag dieser noch bei etwa 6,5 TWh/a (6,0 TWh/a im Jahr 2015).
- › Bei der Nutzung von IKT-Dienstleistungen in Deutschland werden nicht nur Ressourcen im Inland beansprucht, sondern wegen der ausgeprägten internationalen Vernetzung des Digitalsektors auch erhebliche Energiebedarfe von IKT-Infrastrukturen im Ausland induziert. Eine Abschätzung ergab, dass dieser Anteil mindestens 10 % des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland entspricht.

Die mögliche zukünftige Entwicklung wurde anhand von drei Szenarien für den Gesamtenergieverbrauch (Rechenzentren plus Telekommunikationsnetze) modelliert (Abb. Z.1). Im *Trendszenario*, das die derzeit beobachteten Effizienzfortschritte und Steigerungen des Datenvolumens fortschreibt, steigt der Energiebedarf von aktuell 22 auf 30,6 TWh/a im Jahr 2030.

Abb. Z.1 Szenarien zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland bis 2030



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 61

Im Vergleich zu 2010 entspricht dies einem Anstieg von 80 % (70 % gegenüber 2015). Im *Worst-Case-Szenario*, in dem die Energieeffizienz in den kommenden Jahren nicht mehr so stark gesteigert werden kann wie in der Vergangenheit, ist bis 2030 sogar ein Anstieg auf 58,5 TWh/a denkbar. Damit würde sich der Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland im Vergleich zu 2010 mehr als verdreifachen. Im Gegensatz dazu wäre bei konsequenter Ausschöpfung der Effizienzpotenziale (*Best-Case-Szenario*) im Vergleich zum aktuellen Energiebedarf eine Stabilisierung und langfristig leichte Absenkung möglich. In diesem Fall würde für 2030 wieder das Niveau des Energiebedarfs von 2010 erreicht.

Insgesamt betrachtet, ist der Wissensstand zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen lückenhaft und teilweise widersprüchlich. Daher besteht ein erheblicher Forschungsbedarf. Wünschenswert ist eine genaue und regelmäßige Ermittlung des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen möglichst unter Einbezug von realen Daten aus Unternehmen.

Energetische Einsparpotenziale in der IKT

Der künftige Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen hängt maßgeblich von der weiteren Entwicklung der Energieeffizienz ab. Durch Effizienzverbesserungen ist es in der Vergangenheit gelungen, den Anstieg des Energieverbrauchs im Verhältnis zum rasanten Wachstum in der IKT-Branche in Grenzen zu halten. Verantwortlich hierfür sind die enormen Fortschritte in der Mikroelektronik, die etwa alle 2 Jahre zu einer Verdopplung der Leistungsfähigkeit von Computerkomponenten führten (sogenanntes Mooresches Gesetz), ohne dass deren Strombedarf in gleichem Ausmaß stieg. Außerdem konnte die Energieeffizienz von Rechenzentren durch gebäudetechnische (Anlagen zur Kühlung, Stromversorgung etc.) und organisatorische Maßnahmen deutlich gesteigert werden. So muss für den Gebäudebetrieb neu gebauter Rechenzentren eine Strommenge in Höhe von 30% des Verbrauchs für die IKT-Komponenten zusätzlich aufgewandt werden. Vor 20 Jahren lag dieser Wert noch bei 100%, d. h., die Gebäudeinfrastruktur und die IKT-Komponenten verbrauchten jeweils gleich viel Energie.

Für Deutschland zeigen die Energieverbrauchsszenarien, dass eine Stabilisierung und ggf. sogar leichte Absenkung des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen bis 2030, wenn überhaupt, nur bei einer konsequenten Ausschöpfung vorhandener Energieeffizienzpotenziale erreichbar sind (Best-Case-Szenario). Daher wurden in diesem Bericht bestehende technische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie in den IKT-Infrastrukturen identifiziert und charakterisiert. Dies schließt auch Konzepte der Sektorkopplung unter Einbezug der IKT-Infrastrukturen ein. Deren Ziel ist es, durch die energetische Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Kraftstoffe Effizienzpotenziale zu erschließen, die durch sektorspezifische Strategien allein nicht erreicht werden können.

Dazu wurden in einem ersten Schritt über 60 technologische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen identifiziert. Die Einsparoptionen lassen sich jeweils einem der folgenden vier Technologie- bzw. Handlungsfelder zuordnen:

- › IKT-Hardware,
- › Klimatisierung und Kühlung,
- › Stromversorgung,
- › Management, Netzwerkarchitekturen und Software.

Für jedes dieser Felder wurde ein Technologieradar entwickelt, welches den aktuellen Entwicklungsstand und das Einsatzgebiet für eine größere Anzahl von Einsparoptionen anschaulich darstellt.

Aus der Fülle der Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen wurden in einem zweiten Schritt fünf Optionen für eine Detailanalyse gemäß den folgenden Kriterien ausgewählt:

- › Die Technologien bzw. Innovationen sind am Markt bereits verfügbar oder befinden sich zumindest in einem marktnahen Pilotstadium.
- › Sie besitzen ein hohes Energieeinsparpotenzial, sind aber noch wenig verbreitet.
- › Für deutsche Akteure (Betreiber, Nutzer, Behörden, Politik) bestehen wirksame Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung der weiteren Entwicklung und Anwendung der Optionen.

Die ausgewählten Energieeinsparoptionen sind alle dem Bereich der Rechenzentren zuzuordnen. Die identifizierten Optionen mit hohem Einsparpotenzial im Bereich der Telekommunikationsnetze hingegen befinden sich, abgesehen vom Glasfaserausbau, überwiegend in einem frühen Entwicklungsstadium (z. B. energieeffizienzoptimierte Netzwerkarchitekturen) oder sind durch deutsche Akteure in Bezug auf die weitere Entwicklung und Anwendung nur schwer zu beeinflussen (z. B. Videokompressionstechnologien, um das zu übertragende Datenvolumen zu reduzieren).

Nutzung von Abwärme aus dem Betrieb von Rechenzentren

In deutschen Rechenzentren werden große Strommengen (aktuell ca. 15 TWh/a) in Abwärme verwandelt, die bisher weitgehend ungenutzt weggekühlt wird. Im Prinzip könnte diese Wärmequelle sinnvoll genutzt werden, etwa zur Speisung von Wärmenetzen. Dadurch könnten jährlich bis zu 4 Mio. t CO₂ eingespart werden (verglichen mit erdgasbasierten Heizanlagen), sofern die Wärmepumpen, die die Temperatur der Abwärme von 30 auf 90 °C (typische Vorlauftemperatur in deutschen Wärmenetzen) anheben, mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben werden. Die Nutzung der Abwärme aus Rechenzentren ist in Deutschland noch nicht weit verbreitet, anders als z. B. in skandinavischen Ländern, vor allem Schweden. Im Großraum Stockholm sind bereits 30 Rechenzentren in Fernwärmenetze eingebunden, weitere sollen folgen.

Allerdings ist ein wirtschaftlicher Betrieb in Deutschland aufgrund der bestehenden Kostenstrukturen kaum möglich, da die Gesteungskosten der Abwärmenutzung einschließlich Wärmepumpe beim derzeit niedrigen Erdgaspreis (Stand: Ende 2020) meist über jenen der Erdgasverbrennung liegen. Bestehende Förderprogramme können dies nicht ausgleichen. Über die Verschiebung der Kostenstrukturen hinaus (z. B. durch Förderzuschüsse oder durch Anhebung der CO₂-Preise) könnte diese Option auch durch raumplanerische Instrumente attraktiver gemacht werden. Ein Beispiel ist die breite Einführung einer kommunalen Wärmeplanung, die etwa neue Standorte für Rechenzentren an das Vorhandensein von Abnehmern für die Abwärme knüpfen könnte.

Flüssigkeitsgekühlte Server und Komplettsysteme

Stetig steigende Leistungsdichten bei vielen Informationstechnik-(IT-)Komponenten, insbesondere bei Prozessoren, führen dazu, dass die erforderliche Kühlleistung kontinuierlich wächst. Da Luft ein schlechter Wärmeträger ist, gerät die herkömmliche Luftkühlung im Hochleistungsbereich zunehmend an ihre Grenzen. Im Vergleich dazu ist die Kühlung mit Flüssigkeiten (z. B. Wasser) nicht nur leistungsfähiger, sondern auch energieeffizienter. Der Energiebedarf für die Kühlung soll dadurch in Abhängigkeit von den jeweiligen spezifischen Rahmenbedingungen im Rechenzentrum um bis zu 80 % reduziert werden können. Außerdem fällt die Abwärme bei höheren Temperaturen an (etwa 60 °C verglichen mit um die 30 °C bei Luftkühlung), was für ihre weitere Nutzung, z. B. in Wärmenetzen, vorteilhaft ist.

Abseits einzelner Hochleistungszentren (vor allem am Leibniz-Rechenzentrum in München) ist die Flüssigkeitskühlung in Deutschland noch nicht weit verbreitet. Ein Grund dafür sind Vorbehalte der Betreiber, da sie die Verwendung von Wasser in den Servern aufgrund der Kurzschlussgefahr als potenzielles Betriebsrisiko einschätzen. Des Weiteren konzentrierten sich die Anbieter von Systemen zur Flüssigkeitskühlung bisher vor allem auf Höchstleistungscomputer. Breit verfügbare, standardisierte Lösungen müssen erst noch entwickelt werden. Die Initiierung und Förderung von Demonstrationsanlagen, die als Best-Practice-Beispiele dienen, könnten dabei helfen, ggf. vorhandene Vorbehalte gegen die Flüssigkeitskühlung abzubauen.

Gleichstromversorgung von Rechenzentren

Heute üblich ist die Stromversorgung der Geräte und Anlagen im Rechenzentrum (Server, Netzwerktechnik, Ventilatoren etc.) mit Wechselstrom. Um für Versorgungsausfälle des Stromnetzes gerüstet zu sein, verfügen Rechenzentren in der Regel über Akkumulatoren (Akkus), die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) sicherstellen. Diese werden mit Gleichstrom betrieben. Bis der Strom in den Elektronikkomponenten genutzt werden kann, muss der Wechselstrom aus dem Netz erst in Gleichstrom umgewandelt werden, damit er in die Akkus eingespeist werden kann. Am Ausgang der Akkus erfolgt dann eine Rückwandlung in Wechselstrom für die Verteilung im Rechenzentrum. Schließlich wird der Wechselstrom in den Netzteilen der IKT-Komponenten ein weiteres Mal in Gleichstrom (in der Regel 12 Volt [V]) gewandelt. Jeder dieser Umwandlungsprozesse ist mit Verlusten verbunden, die verringert werden können, wenn die Endgeräte direkt mit Gleichstrom aus den Akkus versorgt werden. Das hierdurch zu hebende Einsparpotenzial wird auf 4 bis etwa 10 % geschätzt.

In den letzten 5 Jahren ist das Interesse an der Technologie deutlich gestiegen. So hat etwa in Japan das Telekommunikationsunternehmen NTT bisher 250 seiner Rechenzentren umgerüstet und bis 2030 sollen alle 1.000 Rechenzentren mit Gleichstromsystemen ausgestattet werden. Auch in Deutschland gibt es erste Rechenzentren mit Gleichstromversorgung. Trotz dieser Fortschritte ist der Verbreitungsgrad der Gleichstromtechnologie angesichts einer weltweit in die Millionen gehenden Gesamtzahl an Rechenzentren immer noch sehr gering.

Hemmnisse für die weitere Verbreitung sind u. a. die begrenzte Verfügbarkeit von Komponenten für den Aufbau von Gleichstromsystemen sowie der erhebliche Aufwand, den Betreiber bei einer Umstellung bestehender Rechenzentren auf Gleichstrom leisten müssen. Als Pilotanwender hierzulande kämen beispielsweise staatliche Großrechenzentren aus dem Forschungs- und/oder universitären Bereich infrage, die für die Umsetzung mit den entsprechenden finanziellen und personellen Ressourcen auszustatten wären.

Rechenzentren als Anbieter von Regelleistung

Im Stromnetz muss fortwährend ein Leistungsgleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch aufrechterhalten werden. Übertragungsnetzbetreiber sind daher auf die Regelleistung angewiesen, also elektrische Leistung, die bei Bedarf entweder zusätzlich in die Netze eingespeist werden kann (positive Regelleistung) oder die den Stromverbrauch zusätzlich erhöht (negative Regelleistung).

Rechenzentren verfügen über gute technische Voraussetzungen, um in den Regelleistungsmarkt eingebunden zu werden: Die Leistung der Akkus sowie der (meist dieselbetriebenen) Notstromaggregate ist binnen Sekunden bis wenigen Minuten abrufbar und lässt sich als positive Regelleistung vermarkten. Hierfür ist lediglich eine informationstechnische Anbindung an ein sogenanntes virtuelles Kraftwerk erforderlich. Dabei handelt es sich um einen Zusammenschluss von meist kleineren Akteuren, die gemeinsam als Anbieter am Strommarkt fungieren.

Durch die Bereitstellung von Regelleistung aus Akkus oder Notstromaggregaten von Rechenzentren können zwar keine Stromeinsparungen in den IKT-Infrastrukturen realisiert werden, aber es könnten damit ggf. konventionelle Großkraftwerke überflüssig gemacht werden, die bislang den Löwenanteil der Regelleistung erbringen. Dies würde die Transformation des Stromsystems unterstützen.

Das Potenzial von Rechenzentren zur Bereitstellung von Regelleistung wird bislang kaum ausgeschöpft. Derzeit gibt es nur einzelne Betreiber, die Regelleistung anbieten. Notstromaggregate sind ihrer eigentlichen Bestimmung nach technisch meist nicht für einen länger anhaltenden Betrieb ausgelegt und auch immissionsschutzrechtlich sind längere Einsatzzeiten nicht vorgesehen. Für jede Anlage müssen daher die Anforderungen aus der Regelleistungsbereitstellung sowie technische und immissionsschutzrechtliche Restriktionen in Einklang gebracht werden. Zur Unterstützung dieser Option bestehen Handlungsmöglichkeiten unterschiedlicher Eingriffstiefe von der Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben bis hin zur Knüpfung von Genehmigungen von Notstromaggregaten an eine Verpflichtung zur Erbringung von Netzdienstleistungen.

Nutzung erneuerbarer Energien in IKT-Infrastrukturen

Auch beim Thema der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien in IKT-Infrastrukturen geht es im Kern um die zuvor aufgeworfene Frage, wie der IKT-Sektor die Transformation des Stromsystems unterstützen kann. Wegen des hohen Stromverbrauchs und der Wachstumsdynamik spielt der IKT-Sektor eine gewichtige Rolle in diesem Transformationsprozess. Innovative Konzepte, die hier Lösungsbeiträge versprechen, sind daher hochwillkommen.

Aus Sicht der Betreiber von IKT-Infrastrukturen stellt die Nutzung erneuerbarer Energien eine attraktive Option dar, um den ökologischen Fußabdruck des IKT-Sektors nicht zuletzt öffentlichkeits- bzw. werbewirksam zu verringern. Zugleich steht die zuverlässige und ausfallsichere Bereitstellung der Leistung im Vordergrund, sodass für Betreiber die sichere und planbare Stromversorgung einen enorm hohen Stellenwert einnimmt.

Daher beziehen sich Initiativen von globalen IT-Unternehmen, ihre Leistungen CO₂-neutral anzubieten, oft lediglich darauf, den jährlich in ihren Betriebsstätten verbrauchten Strom durch Einkauf oder Eigenproduktion derselben Menge an erneuerbarem Strom auszugleichen. Eine physische Vollversorgung mit volatil erzeugtem Wind- bzw. Solarstrom stellt eine wesentlich größere Herausforderung dar. Hierfür muss zu jedem Zeitpunkt genauso viel erneuerbarer Strom erzeugt werden, wie verbraucht wird. Erzeugungsschwache Zeiten müssen dann etwa mit großvolumigen Stromspeichern oder mit speicherbaren erneuerbaren Energieträgern (wie Biogas oder »grüner« Wasserstoff) überbrückt werden, im ungünstigsten Fall auch über einige Wochen (sogenannte Dunkelflaute).

Die Zielsetzung, in IKT-Infrastrukturen verstärkt erneuerbare Energien direkt zu nutzen bzw. deren Integration in das Stromsystem zu unterstützen, wird in Deutschland von einigen Start-ups verfolgt. Exemplarische Fallbeispiele werden im vorliegenden Bericht vorgestellt: So sieht beispielsweise ein Konzept vor, Rechenzentren am Standort von Windparks zu errichten und diese möglichst ausschließlich mit regenerativer Energie zu betreiben.

Noch einen Schritt weiter geht die Idee, Rechenzentren direkt in die Türme von Windkraftanlagen einzubauen, um hierdurch bereits vorhandene Gebäude, Räumlichkeiten und andere Infrastrukturen wie Glasfaseranschlüsse zu nutzen. Es existieren auch softwarebasierte Ansätze, beispielsweise in Form einer intelligenten Schwarmplattform zur automatisierten Koordination und Betriebsoptimierung von räumlich verteilten Rechenzentren. Damit können Lasten in einem dezentralen Netz von kleineren Rechenzentren so verteilt werden, dass bevorzugt dort gerechnet wird, wo regenerativ erzeugter Strom zur Verfügung steht.

Eine tiefer gehende Untersuchung der ökonomischen bzw. ökologischen Stichhaltigkeit der Fallbeispiele zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien für den Betrieb von IKT-Infrastrukturen war nicht Ziel dieses Projekts. Hierfür wären nicht nur vonseiten der Initiatoren der Konzepte standort- und fallspezifische Detailinformationen notwendig, sondern u. a. auch von den Stromnetzbetreibern der Übertragungs- und Verteilnetze.

Damit aus Ansätzen wie den zuvor vorgestellten technologische Lösungen und Geschäftsmodelle erwachsen können, die aus dem Pilotstadium herauswachsen und sich im breiten Praxiseinsatz bewähren, ist noch einiges an Entwicklungs- und Erprobungsarbeit zu leisten. Es sollte ein Augenmerk darauf gelegt werden, dass nicht Regulierungstatbestände (etwa im EEG¹ oder im Strommarktdesign bzw. bei Netznutzungsentgelten) diese Innovationen unnötig oder unbeabsichtigt hemmen.

Vertiefung: Blockchain, private Internetnutzung, Smartbuildings

Um ein detaillierteres Bild von den Energieverbräuchen und Einsparmöglichkeiten zu erhalten, wurden zwei Anwendungsbereiche aus dem IKT-Sektor ausgewählt und eingehender analysiert. Wegen ihrer Aktualität und ihrer erheblichen Bedeutung für den Energieverbrauch wurden die Blockchaintechnologie sowie die private Internet- und digitale Mediennutzung ausgesucht.

Um die Einsparpotenziale zu beleuchten, die die Nutzung von IKT-Anwendungen in anderen Wirtschaftsbereichen ermöglicht, wurde ein Sektor exemplarisch ausgewählt: die Energieversorgung von Gebäuden.

Energiebedarf von Blockchainanwendungen

Bei der Blockchaintechnologie handelt es sich im Prinzip um ein auf vielen Rechnern dezentral gespeichertes Register etwa von Transaktionen. Mittels kryptografischer Verfahren wird sichergestellt, dass dieses Register manipulationssicher und für jeden transparent nachvollziehbar ist. Die Technologie besitzt vielfältige Anwendungspotenziale etwa im Gesundheitswesen (z. B. sicheres Teilen von Gesundheitsdaten) oder in der digitalen Verwaltung (z. B. fälschungssichere Register von Behördenakten). Die bekanntesten praktischen Anwendungen sind jedoch Kryptowährungen. Insbesondere der Bitcoin, der 2009 als erste blockchainbasierte Kryptowährung eingeführt wurde, zieht durch teils spektakuläre Kursgewinne und -verluste viel Aufmerksamkeit auf sich. Dass mit Bitcoin-Transaktionen auch ein enormer Strombedarf einhergeht, hat zumindest in der Fachöffentlichkeit ebenfalls einiges Aufsehen erregt. So wird vermutet, dass alleine die Kryptowährung Bitcoin für rund 10 bis 20 % des aktuellen weltweiten Strombedarfs in Rechenzentren verantwortlich ist.

Grund dafür ist der Proof-of-Work-Mechanismus, der zur Durchführung und Validierung der Transaktionen verwendet wird. Dieser basiert auf der Idee, dass Einträge (Blocks) in das Bitcoin-Register von demjenigen durchgeführt werden, der nachweist, dass er eine schwierige kryptografische Aufgabe (sogenanntes Hashrätsel) gelöst hat. Hierfür muss ein erheblicher Berechnungsaufwand (Work) geleistet werden, der durch die Ausschüttung einer festgelegten Zahl an Kryptomünzen belohnt wird (sogenanntes Bitcoin-Schürfen). Dieser Mechanismus führt zu einem Wettbewerb unter den Teilnehmern des Netzwerks, der dafür sorgt, dass niemand die Kontrolle über das Bitcoin-Register übernehmen kann.

Das Schürfen wird aktuell in riesigen Rechenzentren unter Einsatz von eigens dafür entwickelten Elektronikkomponenten durchgeführt, die äußerst leistungsfähig sind. Wie hoch der Strombedarf für das Schürfen genau ist, ist schwierig zu beziffern. Während die gesamte Rechenleistung im Bitcoin-Netzwerk in Echtzeit dokumentiert wird, sind über die von den Schürfern eingesetzte Hardware und deren Strombedarf oft nur Mutmaßungen möglich. Plausible Annahmen für den jährlichen Strombedarf der Kryptowährung Bitcoin reichen für 2018 von 22 bis 62 TWh und für 2019 von 41 bis 64 TWh, d. h. etwa in der Größenordnung wie der Gesamtstrombedarf von Ungarn (41,4 TWh) oder Österreich (65,5 TWh, jeweils für 2019). Bezogen auf die dokumentierten 120 Mio.

¹ Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)

Transaktionen der Bitcoin-Blockchain im Jahr 2019 bedeutet dies, dass jede Transaktion zwischen 340 bis 530 kWh Strom verbraucht hat. Mit dieser Strommenge könnte ein durchschnittlicher deutscher 2-Personenhaushalt bis zu 2 Monate versorgt werden. Nicht unerheblich sind schließlich die Energie- und Ressourcenbedarfe für die Produktion der Hardware. Die speziell für das Schürfen entwickelten Elektronikkomponenten müssen aufgrund des starken Wettbewerbs oft erneuert werden und sind auch nicht für andere Anwendungen nutzbar. Es wird geschätzt, dass daraus ein zusätzlicher jährlicher Energiebedarf von über 4 TWh resultiert.

Zur Durchführung und Validierung von Transaktionen in einer Blockchain existieren neben dem Proof-of-Work-Mechanismus weitere Verfahren. Beim Proof-of-Stake-Mechanismus etwa übernehmen Teilnehmer, die große Anteile am Gesamtvermögen halten, diese Aufgabe. Dieser Mechanismus ist sehr energieeffizient, da das rechenintensive Lösen des Hashrätsels entfällt. Ein Nachteil ist allerdings, dass es hier zu einer Machtkonzentration durch vermögende Teilnehmer kommen kann.

Durch einen Wechsel auf den energieeffizienteren Proof-of-Stake-Mechanismus könnte der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks auf einen Bruchteil des aktuellen Werts reduziert werden. Dazu müssten sich die Teilnehmer des Netzwerks auf eine Änderung des Blockchain-Protokolls verständigen. Soweit bekannt gibt es hierfür aktuell jedoch keine Pläne. Da staatliche Eingriffe in das Protokoll einer Blockchain nicht möglich sind, verbleibt für die Politik im Wesentlichen die Möglichkeit der Regulierung der Kryptowährungen. Ein mögliches Ziel von Regulierungsmaßnahmen wäre beispielsweise, den Handel mit energieintensiven Kryptowährungen zu erschweren und damit für die Teilnehmer der Netzwerke weniger attraktiv zu machen. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass regionale regulatorische Maßnahmen die gewünschte Wirkung aufgrund des ausgesprochen globalen Charakters von Kryptowährungen ggf. nicht erzielen können.

Über das Thema der Kryptowährungen hinausgedacht erscheint es wichtig, aus den in diesem Pionierfeld der Blockchaintechnologie gemachten Erfahrungen die richtigen politischen Lehren für Blockchainanwendungen in anderen Feldern (Energie, Verkehr, Gesundheit etc.) zu ziehen. In Bezug auf den Energieverbrauch bedeutet dies, dass in künftigen öffentlichen bzw. staatlichen Blockchainanwendungen von Beginn an auf den Einsatz des Proof-of-Work-Mechanismus zugunsten von energieeffizienteren Verfahren verzichtet werden sollte.

Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung

Das Anwendungsfeld der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung gilt als wichtiger Treiber für das Ansteigen des IKT-bedingten Energiebedarfs. Dieser setzt sich aus dem Energieverbrauch der Endgeräte, die in privaten Haushalten in Deutschland in enormer Zahl im Einsatz sind (u. a. Fernsehgeräte, Spielekonsolen, Geräte für den digitalen Audioempfang), sowie den durch die Nutzung induzierten Energieverbrauch in Rechenzentren und Übertragungsnetzen zusammen. Aber nicht nur die Nutzung, sondern auch die sehr energieintensive Herstellung der elektronischen Geräte trägt in erheblichem Umfang zum Energieverbrauch bei.

Der Energieverbrauch der *Endgeräte* in der Nutzungsphase wurde auf Grundlage einer Erhebung des Gerätebestands in privaten Haushalten in Deutschland sowie von Daten zur durchschnittlichen Leistungsaufnahme und zu den täglichen Nutzungszeiten dieser Geräte ermittelt. Im Ergebnis hat der Betrieb von Endgeräten zur privaten Internet- und digitalen Mediennutzung 2018 knapp 15,1 TWh an elektrischer Energie verbraucht. Den größten Anteil mit zusammen knapp 12,3 TWh (81 %) steuerten Fernsehgeräte, stationäre PCs einschließlich Monitore sowie Router bei.

Der Energiebedarf, der dadurch in den Übertragungsnetzen und Rechenzentren ausgelöst wird, lässt sich anhand von Annahmen zum Anteil der privaten Internet- und Mediennutzung am Datenaufkommen abschätzen. Für die *Netze* ergab sich für 2018 ein induzierter Energiebedarf im deutschen Fest- und Mobilfunknetz von insgesamt 4,5 TWh. Hinzu kommt der Energiebedarf für die TV-Datenübertragung über das TV-Kabelnetz, der 2018 1,3 TWh betrug. Der induzierte Energiebedarf in deutschen *Rechenzentren* wurde auf etwa 3,5 TWh/a beziffert. Zu dieser Energiemenge muss noch der aus Deutschland heraus im Ausland induzierte Energiebedarf von Rechenzentren summiert werden. Dieser ist methodisch schwierig zu ermitteln. Alleine für die bei privaten Nutzer/innen beliebten Internetanwendungen »soziale Netzwerke« und »Suche« wurde der Anteil auf etwa 1,4 TWh/a geschätzt. Als untere Grenze für den Energieverbrauch der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung in Rechenzentren in Deutschland und im Ausland ergibt sich für 2018 somit ein Wert von 4,9 TWh.

Da der Energieverbrauch zur *Geräteherstellung* mangels Verfügbarkeit der hierfür erforderlichen Daten nicht systematisch quantifizierbar ist, wurde die Bedeutung der Herstellung für den Gesamtenergiebedarf anhand von zwei typischen Fallbeispielen für Smartphones und mobile PCs näherungsweise illustriert. Unter plausiblen

Annahmen erforderte die Herstellung dieser Geräte grob geschätzt etwa 10-mal so viel Energie, wie bei der Nutzung der Geräte verbraucht wurde.

Die Verbrauchsentwicklung der letzten Jahre zeigt ein gemischtes Bild: Der Gesamtenergiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung konnte im Zeitraum zwischen 2010 und 2015 von 31,4 auf 26,4 TWh/a deutlich reduziert werden, blieb danach aber bis 2018 weitgehend konstant. Dabei sinkt der Energieverbrauch der Endgeräte tendenziell, während bei dem durch die private Internet- und digitale Mediennutzung verursachten Energiebedarf in den IKT-Infrastrukturen eine entgegengesetzte Entwicklung zu beobachten ist. So stieg der Energiebedarf in den Übertragungsnetzen und in Rechenzentren zwischen 2010 und 2018 von 8,5 auf 10,7 TWh/a. Dabei beschleunigte sich der Anstieg seit 2015 deutlich: Lag dieser zwischen 2010 und 2015 noch bei 1,2% p. a., wurden zwischen 2015 und 2018 jährlich 6% mehr Energie in den IKT-Infrastrukturen verbraucht. Als wichtige Ursachen hierfür gelten die zunehmende Vernetzung der Endgeräte und generell die stärkere private Nutzung von Internetdiensten (insbesondere Audio- und Videostreaming), wodurch immer mehr Rechenzentrumskapazitäten benötigt werden und der private Datenverkehr in den Übertragungsnetzen stark ansteigt. Die Folge davon ist, dass die IKT-Infrastrukturen einen immer größeren Anteil am Energieverbrauch der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung beisteuern: Lag dieser 2010 noch bei 27%, belief er sich 2018 bereits auf 41,4%. Setzt sich dieser Trend fort, so ist künftig wieder von einer Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs durch die private Internet- und digitale Mediennutzung auszugehen.

Aus der Analyse lässt sich eine Reihe von politischen Handlungsoptionen für Energieeinsparungen in diesem Bereich ableiten. So sollten in Bezug auf die *Endgeräte* die Anstrengungen dahin zielen, die bisher erreichten Erfolge bei der Senkung des Energieverbrauchs nicht abreißen zu lassen. Dazu könnten Anreize zur Herstellung und zum Kauf energieeffizienter Geräte beitragen. So könnte etwa die Verbrauchskennzeichnung durch EU-Energielabels, die bisher nur für Fernsehgeräte und Monitore verpflichtend sind, auch auf weitere energieintensive Geräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung ausgeweitet werden. Derzeit treibt der Trend zu immer großformatigeren Fernsehgeräten den Energieverbrauch nach oben. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, sind die Entwicklung und Verbreitung energieeffizienterer großformatiger Flachbildfernseher von großer Bedeutung. Auch die zunehmende Vernetzung von Geräten trägt zum Anstieg des Energieverbrauchs bei. Hier ist an eine Erweiterung der Ökodesign-Vorschriften, etwa im Hinblick auf die elektrische Leistungsaufnahme im vernetzten Bereitschaftszustand, zu denken.

Ein Ansatzpunkt für Maßnahmen, um den Anstieg des durch die private Internet- und digitale Mediennutzung in der IKT-Infrastruktur verursachten Energieverbrauchs zu bremsen, wäre, den Anstieg der verarbeiteten Datenmenge zu drosseln. Eine Schlüsselfunktion nimmt hier die Softwareentwicklung ein. Wesentliche Eigenschaften der Anwendungen werden in diesem Stadium festgelegt. Hier sollte auf die Kriterien Datensparsamkeit und Energieeffizienz der Anwendungen ein wesentlich größeres Augenmerk als bisher gelegt werden. Des Weiteren existieren gewisse Fehlanreize auf Nutzerseite, die den Datenverkehr in die Höhe treiben. So sind etwa Flatrates in Mobilfunkverträgen, die den Konsum beispielsweise von Onlinevideos über mobile Zugangspunkte begünstigen, im Hinblick auf den Energieverbrauch ungünstig. Generell gilt, dass der Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur von den Nutzer/innen noch weniger wahrgenommen wird, als dies bei den Endgeräten der Fall ist. Daher sollten Initiativen entwickelt werden, um die Verbraucher/innen für das Thema zu sensibilisieren und ihnen Orientierung bei Nutzungsentscheidungen zu geben.

Smarthome und Smartbuilding

Das Kernthema in diesem Bericht sind der Energieverbrauch und die Einsparmöglichkeiten in den IKT-Infrastrukturen (insbesondere bei Rechenzentren und Kommunikationsnetzen). Im Kontrast dazu wird in diesem Abschnitt der Frage nachgegangen, welche Energieeffizienzsteigerungen durch den Einsatz von IKT in einem Anwendungssektor, und zwar dem Gebäudesektor, eröffnet werden. Für eine Gesamtbewertung der Auswirkungen der Digitalisierung auf die Energiebilanz müsste diese Analyse im Prinzip für sämtliche Wirtschafts- und Lebensbereiche durchgeführt werden.

Im Mittelpunkt steht die Frage, wie mit intelligenten Energiemanagementsystemen der Wärmeverbrauch in Gebäuden verringert werden kann. Diesen Einsparpotenzialen muss der Energieverbrauch der Energiemanagementsysteme selbst gegenübergestellt werden. Nur gestreift wird dagegen die Frage, auf welche Weise der Stromverbrauch in Gebäuden durch intelligente Energiemanagementsysteme optimiert werden kann. Denn dieser macht nur etwa ein Fünftel des gebäudebezogenen Gesamtenergieverbrauchs aus und ist damit von untergeordneter Bedeutung.

Die ubiquitäre Verbreitung und Nutzung von IKT in fast allen Lebensbereichen machen auch vor dem Gebäudesektor nicht Halt. Hierfür wird häufig der Begriff »smart« verwendet, wobei je nach Fokus der Vernetzung von Smarthome/Smartliving (intelligentes Zuhause), Smartbuilding (Gebäudeautomation) oder Smart Neighborhood (vernetzte Quartiere) gesprochen wird. Dabei ist die Steigerung der energetischen Effizienz von Gebäuden meist nicht das vordringliche Ziel einer intelligenten Vernetzung. Bei vielen Anwendungen stehen eher die Steigerung des Wohnkomforts (z. B. der intelligente Kühlschrank, der selbsttätig Lebensmittel nachbestellt), die Unterstützung altersgerechten Wohnens und Lebens (Ambient assisted Living, also alltagstaugliche Assistenzlösungen für ein selbstbestimmtes Leben) oder eine Erhöhung der Sicherheit (z. B. Einbruchschutz) im Vordergrund.

Die Energiemanagementfunktionen von Smarthome- und Smartbuildingsystemen können durch die Realisierung von Einsparpotenzialen beim Wärmeverbrauch einen wichtigen Beitrag zur Energiewende im Gebäudesektor Deutschlands leisten. Für die energetische Sanierung der Gebäudehülle sind teilweise Jahrzehnte dauernde Instandhaltungszyklen typisch (z. B. bei Dach, Fassade, Fenster). Im Gegensatz dazu ist die Installation von Energiemanagementsystemen relativ kurzfristig umsetzbar. Dies ist insbesondere attraktiv, um zügig Verbrauchssenkungen bei Gebäuden mit schlechten energetischen Eigenschaften realisieren zu können. Dies trifft namentlich auf Wohngebäude zu, die vor 1996 erbaut wurden und die über 80 % der Wohngebäude in Deutschland ausmachen.

Zur Bestimmung des Nettoeffekts muss von den realisierten Energieeinsparungen der für die Vernetzung und das Energiemanagement aufgewendete Verbrauch abgezogen werden. Die in diesem Bericht vorgenommenen Abschätzungen und Berechnungen zeigen, dass dieser Verbrauch kaum ins Gewicht fällt. Intelligente Energiemanagementsysteme sparen somit über ihren Lebenszyklus deutlich mehr Energie ein, als sie verbrauchen.

Eine exakte Quantifizierung der Einsparpotenziale ist allerdings kaum möglich, da diese letztlich nicht nur von den technischen Systemen abhängen, sondern maßgeblich auch von den individuellen Nutzern und deren Bedürfnissen bzw. Verhalten. Daher wird hier lediglich ein beispielhaftes Szenario betrachtet, um die Größenordnung der Einsparungen einschätzen zu können. Unter der Annahme, dass die Verbreitung von intelligenten Energiemanagementsystemen intensiv vorangetrieben wird, lässt sich das Einsparpotenzial bis 2030 auf etwa 10 % der heute im Gebäudesektor verbrauchten Wärmemenge abschätzen.

Handlungsoptionen zur Förderung der Verbreitung und Nutzung intelligenter Energiemanagementsysteme bestehen vor allem im Hinblick auf die Überwindung von Hemmnissen, die einer beschleunigten Marktdurchdringung der Systeme derzeit entgegenstehen. Hierzu zählen u. a. eine mangelnde Transparenz, sodass die Funktionen und erzielbaren Einsparungen der unterschiedlichen Systeme von den potenziellen Nutzern nur schwer verglichen werden können. Zudem fehlen oft offene Standards, sodass ein System meist nicht mit dem eines anderen Herstellers interoperabel ist. Auch Bedenken bei potenziellen Nutzern hinsichtlich des Datenschutzes und der Datensicherheit hemmen derzeit die Verbreitung. Im Mietwohnungsbau spielt schließlich das Investor-Nutzer-Dilemma eine wesentliche Rolle. Es beschreibt das Problem, dass Gebäudeeigentümer energiewirtschaftlich sinnvolle Investitionen nicht tätigen, da sie nicht adäquat am generierten Nutzen partizipieren. Hier wäre nach Wegen zu suchen, wie auch für die Gebäudeeigentümer ein Nutzen gestiftet werden könnte.

Schlussbemerkungen

Die Digitalisierung schreitet in enormem Tempo voran. Immer mehr Daten werden täglich in Rechenzentren oder Endgeräten verarbeitet und über Telekommunikationsnetze übertragen. In der Folge erreicht der IKT-bedingte Energieverbrauch bereits heute eine energie- und volkswirtschaftlich bedeutende Größenordnung. Wie sich der Energieverbrauch in den kommenden Jahren entwickeln wird, hängt maßgeblich von den weiteren Fortschritten bei der Energieeffizienz ab. Klar ist, dass ein starkes Ansteigen des IKT-bedingten Energiebedarfs nur verhindert werden kann, wenn vorhandene Effizienzpotenziale konsequent ausgeschöpft werden. Dazu sind erhebliche Anstrengungen nötig.

In erster Linie sind hier die Betreiber der IKT-Infrastrukturen gefordert, die innovative Energieeinsparlösungen in den Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen in die Praxis umsetzen müssen. Staatlichen Akteuren (Politik, Behörden und weitere Einrichtungen der öffentlichen Hand) stehen dabei unterschiedliche Möglichkeiten offen, um die Diffusion innovativer Lösungen zu unterstützen:

- › Einige Einsparoptionen befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung, weitere Effizienzinnovationen werden im Rahmen der angewandten Forschung vorangetrieben. Durch den Ausbau der Forschungsförderung über das bisherige Maß hinaus könnte das Entwicklungstempo weiter beschleunigt werden.
- › Für zahlreiche innovative Lösungen existieren bisher nur Nischenmärkte. Die öffentliche Hand mit ihrem großen Bedarf an IKT-Infrastrukturen und -Dienstleistungen könnte hier als Nachfrager auftreten und so die Marktdynamik erheblich stimulieren. Um Nischenprodukten schneller zum Marktdurchbruch zu verhelfen, könnte zudem die Auslobung von Innovationspreisen ein aussichtsreicher Ansatz sein.
- › Bei einer Reihe von Einsparoptionen stehen Bedenken der Anwender (Praxistauglichkeit, Betriebssicherheit, Umstellungsaufwand, Wirtschaftlichkeit) einer raschen Verbreitung noch im Weg. Die Initiierung und Förderung von Demonstrationsanlagen als Best-Practice-Beispiele könnten helfen, diese Vorbehalte abzubauen.
- › Zu einer beschleunigten Verbreitung von Effizienzinnovationen können auch regulatorische Maßnahmen beitragen. Die Bandbreite der Regulierungsmöglichkeiten und -adressaten ist groß und reicht von gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von IKT-Infrastrukturen oder -Komponenten bis hin zur Verpflichtung von Kommunen zur Erstellung einer Wärmeplanung, die Standorte von Rechenzentren an das Vorhandensein von Wärmeabnehmern knüpft.
- › Die Realisierung einiger innovativer Lösungen wird derzeit durch regulative bzw. rechtliche Hürden gebremst. Der Abbau innovationshemmender Bestimmungen könnte hier Abhilfe schaffen.

Nicht nur die Betreiber, sondern auch die Nutzer/innen der IKT-Infrastrukturen können einen Beitrag zur Verringerung des IKT-bedingten Energieverbrauchs leisten. Problematisch in diesem Zusammenhang wirkt sich die Tatsache aus, dass Nutzer/innen kaum wahrnehmen, dass sie mit einem Klick unter Umständen einen erheblichen Energieverbrauch bei der IKT-Infrastruktur auslösen. Ein wichtiges Ziel von politischen Initiativen zur Reduktion des Energiebedarfs in den IKT-Infrastrukturen sollte daher darin bestehen, die Verbraucher/innen für das Thema zu sensibilisieren und ihnen Orientierung bei Nutzungsentscheidungen zu geben. Wünschenswert wäre hier insbesondere, dass der durch die Internet- und die digitale Mediennutzung verursachte Energieverbrauch transparenter und sichtbarer gemacht wird.

Zum Gesamtenergieverbrauch der IKT-Infrastrukturen tragen neben Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen auch die Endgeräte bei. Konnte der Energiebedarf bei den IKT-Endgeräten in privaten Haushalten seit 2010 dank der Effizienzfortschritte reduziert werden, so scheint sich dieser Trend aktuell wieder umzukehren. Nötig sind daher Anstrengungen, um die bisher erreichten Erfolge bei der Energieeffizienz nicht abreißen zu lassen. Politische Möglichkeiten hierzu bestehen u. a. in der Ausweitung der Verbrauchskennzeichnung durch EU-Energielabels oder der Verschärfung der Ökodesign-Vorschriften.

Von überragender Bedeutung für die Bemühungen zur Reduktion des IKT-bedingten Energieverbrauchs ist schließlich die Softwareentwicklung. Die Eigenschaften der Software entscheiden, welche Hardwarekapazitäten vorgehalten bzw. eingesetzt werden und wie viel elektrische Energie letztlich in Rechenzentren, Telekommunikationsnetzen und Endgeräten verbraucht wird. Bisher allerdings spielen in der Softwareentwicklung die Kriterien Datensparsamkeit und Energieeffizienz von Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle. Durch Maßnahmen, die die Entwicklung und Verbreitung von ressourcen- und energieeffizienten Softwareprodukten unterstützen, ließe sich daher ein (mutmaßlich) enormes Einsparpotenzial erschließen. In dieser Hinsicht sind verstärkte Forschungs- und Förderaktivitäten, mit denen diese Zielsetzung verfolgt werden kann, ein aussichtsreicher Ansatz.

Die Frage, inwieweit die Nutzung von IKT-Anwendungen Energieeinsparungen in anderen Wirtschaftsbereichen ermöglicht, wurde hier nicht systematisch untersucht. Gleichwohl zeigt das exemplarisch analysierte Fallbeispiel des Einsatzes von intelligenten Energiemanagementsystem bei der Wärmeversorgung von Gebäuden, dass damit bedeutende Energieeffizienzpotenziale verbunden sein können. In vielen weiteren Wirtschaftsbereichen werden ähnliche Effizienzpotenziale vermutet. Eine zwar aufwendige, aber dennoch lohnende Aufgabe ist es, diese Potenziale zu identifizieren, zu untersuchen und adäquate Rahmenbedingung zur Realisierung entsprechender Lösungen zu schaffen.

Aktualisierung und Ergänzung vom Juni 2022

Der Redaktionsschluss für den vorliegenden TAB-Bericht war ursprünglich Ende 2020. Im Zeitraum bis zu seiner Veröffentlichung im Sommer 2022 hatten sich durch nicht vorhersehbare Ereignisse einige Rahmenbedingungen, die der Analyse des Energieverbrauchs der IKT-Infrastrukturen zugrunde gelegt wurden, bedeutend verändert. Dies betrifft vor allem den durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Digitalisierungsschub in vielen Bereichen sowie die Verwerfungen auf den Energiemärkten infolge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine.

Da eine umfassende Aktualisierung mit vertretbarem Ressourcenaufwand nicht zu leisten war, wurde auf Initiative der Berichterstattergruppe TA des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung ein Kurzgutachten mit der Zielsetzung in Auftrag gegeben, die Inhalte des TAB-Berichts daraufhin zu prüfen, ob diese aus heutiger Sicht noch Bestand haben. Zumeist erfolgte dies qualitativ, weil neue Modellrechnungen nicht durchgeführt wurden. Wissensbasis hierfür sind die verfügbare aktuelle wissenschaftliche Literatur (bis Ende Mai 2022) sowie Experteneinschätzungen der Gutachter/innen des vom Bundestag beauftragten Borderstep Instituts für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, Berlin. An dieser Stelle sei Stefanie Schramm, Dr. Ralph Hintemann, Dr. Severin Beucker und Prof. Dr. Klaus Fichter herzlich gedankt. Der Inhalt des Kurzgutachtens wird im Folgenden dargestellt.

Einführung

Die Digitalisierung verändert Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend und dies mit einer sehr hohen Dynamik. Vor diesem Hintergrund soll hinterfragt werden, inwieweit die Inhalte des Ende 2020 fertiggestellten TAB-Berichts »Energieverbrauch der IT-Infrastruktur« zum aktuellen Zeitpunkt noch Bestand haben. Seit Fertigstellung des Berichts haben sich mit der COVID-19-Pandemie Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung ergeben (u. a. verstärktes Homeschooling, Homeoffice, Nutzung von Videokonferenzen), die in dieser Form nicht vorhersehbar waren. Zudem lösen stark steigende Energie- und Rohstoffpreise aktuell große Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft aus. Auch dies kann einen Einfluss auf die weitere Digitalisierung haben.

Im Rahmen der Erstellung des Kurzgutachtens hat das Borderstep Institut die Auswirkungen der skizzierten Entwicklungen auf die Inhalte des TAB-Berichts analysiert und bewertet. Hierzu wurde insbesondere auf neue Forschungsergebnisse und Publikationen zurückgegriffen, in denen sich mit den aktuellen Entwicklungen durch die COVID-19-Pandemie befasst wurde. Das Borderstep Institut widmet sich seit 2019 in zahlreichen Projekten ausführlich mit ebensolchen Entwicklungen. Aus diesen Vorhaben liegen aktuelle Informationen und Daten zur Entwicklung der Digitalisierung in Deutschland vor, die für das Kurzgutachten genutzt wurden.

Wissensstand und Szenarien zu den IKT-bedingten Energiebedarfen (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 2 im TAB-Bericht)

Die Entwicklung der IKT-bedingten Energiebedarfe in Deutschland wurde in dem im Jahr 2019 für das TAB verfasste Gutachten des Borderstep Instituts umfassend analysiert und dargestellt. Die COVID-19-Pandemie hat zu einer deutlich veränderten Nutzung der IKT-Infrastrukturen geführt. Außerdem wurden neue Studien zur Entwicklung des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen publiziert. Auf Basis dieser neuen Informationen wird im Folgenden dargestellt, wie sich der Energiebedarf von Rechenzentren und Telekommunikationsinfrastruktur in der COVID-19-Pandemie entwickelt hat und welche künftigen Entwicklungen zu erwarten sind.

Relevante Entwicklungen seit 2019

- › Die COVID-19-Pandemie hat zu einer verstärkten Nachfrage nach Clouddienstleistungen und zu einem deutlichen Anstieg des Datenverkehrs in den Mobil- und Festnetzen geführt. Gleichzeitig hat die Pandemie aber auch das wirtschaftliche Wachstum in vielen Branchen beeinträchtigt, sodass die Investitionen in eigene IKT-Infrastrukturen bei vielen Unternehmen zurückgegangen sind. Unterbrochene Lieferketten, Verzögerungen in administrativen Abläufen u. Ä. haben auch den Ausbau der digitalen Infrastrukturen beeinträchtigt.
- › Der Markt für Clouddienste und das Angebot von Cloudrechenzentren in Deutschland sind deutlich gestiegen. Schon vor der COVID-19-Pandemie haben große internationale Cloudanbieter begonnen, neue Cloudkapazitäten in Deutschland aufzubauen. Es ist eine Reihe von Großrechenzentren mit Leistungsaufnahmen von teilweise über 100 MW geplant.
- › Auch wenn sich die Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Entwicklung des Energiebedarfs von digitalen Infrastrukturen teilweise deutlich unterscheiden, so ist doch der Trend klar erkennbar, dass deren Energiebedarf in Zukunft ansteigen wird.

Die Ergebnisse neuer Studien zur Entwicklung des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen auf europäischer (Benqassem et al. 2021; Hintemann et al. 2020; Kemna et al. 2020) und internationaler Ebene (Andrae 2020; Masanet et al. 2020; Petit et al. 2021) weichen zum Teil deutlich voneinander ab. Für 2020 wird von einem weltweiten Energiebedarf zwischen ca. 300 TWh/a und etwas über 500 TWh/a ausgegangen. Bei den Telekommunikationsnetzen reichen die realistischen Berechnungen von etwa 250 TWh/a bis knapp 600 TWh/a. Von einem gesicherten Kenntnisstand zur Höhe des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen kann also weiterhin nicht gesprochen werden.

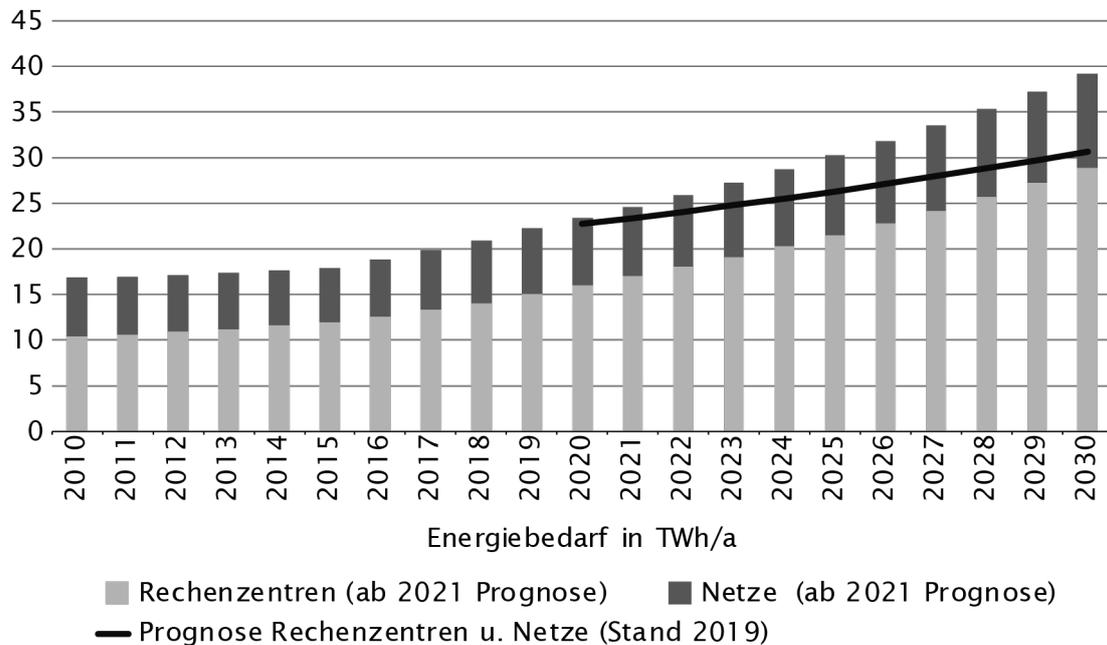
Für Deutschland liegen neuere Berechnungen des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen vor, die bereits die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie berücksichtigen (Hintemann et al. 2021; Hintemann et al. 2022a). Im Vergleich zu den Berechnungen und Prognosen im TAB-Bericht zur Entwicklung des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen zeigen die neueren Analysen etwas abweichende Ergebnisse (Abb. A.1):

- › 2020 lag der Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen etwas höher (ca. 0,7 TWh/a) als für 2019 im TAB-Bericht prognostiziert. Die Rechenzentren in Deutschland hatten 2020 einen Energiebedarf von 16,0 TWh, die Telekommunikationsnetze einen Energiebedarf von 7,3 TWh. Für 2021 weicht die aktuelle Prognose schon um 1,2 TWh/a von der Prognose für 2019 ab.
- › Für das kommende Jahrzehnt wird für das Trendszenario ein deutlich stärkerer Anstieg des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen erwartet als im TAB-Bericht prognostiziert. Während für die Entwicklung des Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze für 2030 mit einem um etwa 1 TWh/a höheren Energiebedarf gerechnet wird (Hintemann et al. 2021), liegt die aktuelle Prognose für den Energiebedarf der Rechenzentren für 2030 um 7,5 TWh/a höher als im TAB-Bericht prognostiziert. Insgesamt steigt der Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen im Trendszenario bis 2030 auf 39,2 TWh/a.

Für die im TAB-Bericht zur Entwicklung des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen modellierten Szenarien (Best Case, Worst Case) lassen sich aus aktueller Sicht folgende Einschätzungen abgeben: Die Annahmen für das Worst-Case-Szenario scheinen weiterhin plausibel, sodass ein Anstieg des Energiebedarfs auf maximal 58,5 TWh/a für 2030 denkbar erscheint. Das Best-Case-Szenario scheint aus heutiger Sicht nicht mehr realistisch. Eine Stabilisierung des Energiebedarfs auf dem Niveau von 2020 wäre schon ein Erfolg.²

² In der aktuellen Bitkom-Studie zum Rechenzentrumsmarkt in Deutschland wurden gemeinsam mit den Bitkom-Experten Szenarien zur Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren entwickelt. Hier wird selbst eine Stabilisierung des Energiebedarfs der Rechenzentren auf dem aktuellen Niveau als unrealistisch angesehen (Hintemann et al. 2022a).

Abb. A.1 Vergleich aktueller Prognosen des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen in Deutschland mit den Prognosen aus dem Jahr 2019 (vorliegender TAB-Bericht)



Quellen: Hintemann et al. 2021 u. 2022a; Kap. 2 im TAB-Bericht

Ein Grund für die erwartete Zunahme des Energiebedarfs der digitalen Infrastrukturen ist der Digitalisierungsschub durch die COVID-19-Pandemie. Die COVID-19-Pandemie hat zu einer deutlichen Zunahme der im Internet übertragenden Datenmenge geführt, das Datenvolumen stieg im Frühjahr 2020 in kurzer Zeit um 15 bis 20 %. Dieser Anstieg konnte mit den bestehenden Infrastrukturen bewältigt werden (Feldmann et al. 2020). Dies liegt zum einen daran, dass ausreichend Reservekapazitäten zur Verfügung standen, zum anderen aber auch daran, dass der zusätzliche Datenverkehr im Wesentlichen außerhalb der vorherigen Hauptnutzungszeiten auftrat (Witmer-Goßner 2021). Während der Pandemie erhöhte sich der Energiebedarf der Netze nur geringfügig, da der Stromverbrauch von Netzinfrastrukturen nur unterproportional mit steigender Auslastung zunimmt. Der durch das steigende Datenvolumen induzierte Ausbau der Netzkapazitäten wird allerdings dauerhaft zu einem höheren Energiebedarf der Netze führen als vor der Pandemie erwartet.

Schon vor der COVID-19-Pandemie war eine deutliche Zunahme der Investitionen in große Rechenzentren in Deutschland festzustellen. Vor allem durch die Ansiedlung internationaler Cloudanbieter stieg die Nachfrage nach Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland stark an (CBRE Research 2020; CBRE 2020b; Hintemann 2021). Rechenzentrumsprojekte mit Anschlussleistungen in der Größenordnung von 100 MW und mehr wurden insbesondere im Raum Frankfurt a.M. und in Berlin initiiert (Hintemann et al. 2021, 2022a u. 2022b).

Die COVID-19-Pandemie hat sich zunächst hemmend auf den weiteren Ausbau der Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland ausgewirkt. Aufgrund von Mobilitätseinschränkungen, beeinträchtigten Lieferketten und Verzögerungen in administrativen Abläufen konnten Neubauprojekte nicht so schnell realisiert werden wie geplant. Außerdem gab es in vielen IT-Anwender-Branchen eine Investitionszurückhaltung bei IT-Hardware (CBRE 2020a; Hintemann 2021; Hintemann et al. 2022a). Mittel- und langfristig wird die zunehmende Digitalisierung – verbunden mit den weiteren Ausbauplänen für Cloudinfrastrukturen in Deutschland – voraussichtlich zu deutlich höheren Energiebedarfen in den Rechenzentren führen als im vorliegenden TAB-Bericht erwartet. So hat allein Google Investitionen von 1 Mrd. Euro in Deutschland angekündigt (tagesschau.de 2021a). Auch Amazon will seine Cloudkapazitäten in Deutschland deutlich ausbauen (Jung 2022).

Energetische Einsparpotenziale in der IKT (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 3 im TAB-Bericht)

Die Darstellung der möglichen energetischen Einsparpotenziale zum Energiebedarf der digitalen Infrastrukturen im TAB-Bericht sind weiterhin aktuell. Allerdings haben sich die ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen in den vergangenen 2 Jahren teilweise deutlich verändert. Außerdem liegen zusätzliche Erkenntnisse zur energetischen Bewertung von Glasfaser- und 5G-Netzinfrastrukturen vor.

Relevante Entwicklungen seit 201

- › Die Preise an den Strombörsen in Mitteleuropa sind im Jahresverlauf 2021 sehr deutlich gestiegen und liegen Anfang 2022 auf einem Niveau, das etwa dreimal höher ist als Anfang 2021.
- › Schon 2022 ist die Höhe der EEG-Umlage in Deutschland deutlich gesunken. Während sie in den Vorjahren zwischen 6 und 7 Eurocent pro kWh lag, beträgt sie 2022 3,723 Eurocent pro kWh. Ab Juli 2022 soll die EEG-Umlage ausgesetzt werden.
- › Die Preise für Erdöl und Erdgas sind deutlich angestiegen. Damit verändern sich insbesondere die Rahmenbedingungen für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren.
- › Zum Energiebedarf von Glasfaserinfrastrukturen und Mobilfunkinfrastrukturen gibt es neue Erkenntnisse.

Die steigenden Energiepreise erhöhen die Anreize, digitale Infrastrukturen möglichst energieeffizient zu betreiben. Da der Betrieb von Rechenzentren bisher nicht von der EEG-Umlage befreit war, reduziert die geplante Abschaffung der EEG-Umlage den von der deutschen Rechenzentrumsbranche angeführten Wettbewerbsnachteil durch hohe Stromkosten im europäischen Vergleich (Bitkom 2020) deutlich. Für die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren verbessern sich die Rahmenbedingungen deutlich. Die Preise für die in der Wärmeversorgung hauptsächlich genutzten Energieträger Öl und Gas steigen an und es wird angestrebt, die Nutzung dieser Energieträger so schnell wie möglich zu reduzieren. Mit der Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) soll noch 2022 der Aus- und Umbau verstärkt gefördert werden (Bundesregierung 2022). Zudem strebt sowohl die EU-Kommission (2020) als auch die Ampelkoalition (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021) an, in Zukunft die Abwärmenutzung aus Rechenzentren deutlich auszubauen.

Selbst wenn zu erwarten ist, dass künftig mehr Abwärme aus Rechenzentren genutzt werden kann und dies auch wirtschaftlich möglich ist (Clausen et al. 2021), bleiben die im TAB-Bericht genannten Herausforderungen prinzipiell bestehen. Gezielte Anreize zur Wärmenutzung aus Rechenzentren sowie die auch im Koalitionsvertrag (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021) vorgesehene verstärkte Nutzung raumplanerischer Elemente und eine vorausschauende kommunale und regionale Wärmeplanung sind weiterhin geboten.

Aktuelle Studien bestätigen, dass neue Technologien in den Fest- und Mobilfunknetzen deutliche Effizienzpotenziale bieten. So zeigt eine Studie aus der Schweiz, dass die 5G-Technologie eine Reduktion der Treibhausgasemissionen pro GB um 85 % gegenüber bisherigen Mobilfunktechnologien ermöglicht (Bieser et al. 2020). Auch in einer Studie des Umweltbundesamts (Gröger et al. 2021) wurden Effizienzgewinne in dieser Größenordnung errechnet. Diese Studie zeigt auch, dass die Unterschiede in der Energieeffizienz der Datenübertragung zwischen Festnetz und Mobilfunknetz durch die 5G-Technologie deutlich geringer werden. Es ist allerdings anzumerken, dass durch eine Ausweitung der übertragenen Datenmenge der absolute Energiebedarf der Mobilfunknetze trotz der hohen Effizienzgewinne weiter ansteigen kann. Durch mehr Antennen und Basisstationen sowie einen Anstieg des Energiebedarfs pro Basisstation ist ein höherer Energiebedarf im Mobilfunknetz daher wahrscheinlich. Dies räumen auch die Mobilfunknetzbetreiber ein (etno 2022; Hatt/Kolta 2020).

Wie schon im TAB-Bericht dargestellt, weist der Einsatz von Glasfasertechnologie (Fibre to the Building – FTTB/Glasfaseranschluss bis ins Gebäude; Fibre to the Home – FTTH/Glasfaseranschluss bis in die Wohnung) gegenüber kupferbasierten Digital-Subscriber-Line-(DSL)-Technologien ebenfalls deutliche Effizienzvorteile auf (Gröger et al. 2021; Obermann 2022). Wie aktuelle Berechnungen zeigen, würde ein reines Glasfasernetz weniger als halb so viel Strom benötigen wie ein kupferbasiertes DSL-Netz und sogar nur ein Viertel des Stroms des TV-Kabelnetzes (Obermann 2022). Hier ist allerdings zu beachten, dass auch bei einem raschen Ausbau von Glasfaser

die verschiedenen Netze (kupferbasiertes DSL-Netz, TV-Kabelnetz, Glasfasernetz) auf absehbare Zeit parallel betrieben werden, sodass eine absolute Einsparung durch die verstärkte Nutzung von Glasfaseranschlüssen nur zeitverzögert eintreten wird.

Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom in IKT-Infrastrukturen (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 4 im TAB-Bericht)

Die grundsätzlichen technischen Möglichkeiten zur Nutzung regenerativ erzeugten Stroms in digitalen Infrastrukturen sind seit 2019 unverändert. Allerdings nehmen die Bestrebungen zu, digitale Infrastrukturen künftig mit regenerativem Strom zu betreiben. Die Digitalindustrie selbst treibt mit konkreten Initiativen den Betrieb klimaneutraler digitaler Infrastrukturen voran.

Relevante Entwicklungen seit 2019

- › Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene gibt es Bestrebungen, den Betrieb digitaler Infrastrukturen zukünftig mit klimaneutral erzeugtem Strom zu realisieren. So fordert die EU-Kommission (2020) bis 2030 einen klimaneutralen Betrieb von Rechenzentren und Telekommunikationsinfrastrukturen. Der Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung sieht vor, dass neue Rechenzentren in Deutschland ab 2027 klimaneutral betrieben werden sollen (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021).
- › Es existieren Bestrebungen zu konkretisieren, was unter einem klimaneutralen Betrieb von digitalen Infrastrukturen verstanden werden soll.

Die Europäische Kommission (EK 2020) hat 2020 das Ziel verkündet, dass Rechenzentren und Telekommunikation in Europa bis 2030 klimaneutral sein sollen. In Deutschland sollen zudem laut Koalitionsvertrag der Ampelregierung neue Rechenzentren ab 2027 klimaneutral betrieben werden (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021). Was konkret mit klimaneutral gemeint ist, wird aktuell noch diskutiert. Die Spannweite der Möglichkeiten reicht vom Ausgleich der Treibhausgasemissionen durch Zertifikate über Ökostromverträge und Power Purchase Agreements bis hin zur Eigenstromerzeugung. Inwieweit in Deutschland mit dem vorhandenen und bis 2030 abzu-sehenden Energiemix überhaupt ein realer klimaneutraler Betrieb möglich ist, wurde bereits im TAB-Bericht thematisiert und ist zunehmend Gegenstand von Diskussionen (Ostler 2021; Reveman 2022).

Im Rahmen des Climate Neutral Data Centre Pacts (2021) hat ein Zusammenschluss großer Rechenzentrumsbetreiber und entsprechender Verbände einen Vorschlag zur Selbstverpflichtung vorgelegt, um das Ziel der Klimaneutralität von Rechenzentren bis 2030 in Europa zu erreichen. Darin sind unter anderem Zielwerte für die Versorgung von Rechenzentren mit regenerativ erzeugtem oder CO₂-freiem Strom (inklusive Strom aus Kernenergie) vorgegeben. Die Selbstverpflichtung beinhaltet aber auch weitere Maßnahmen z. B. zur Verbesserung der Energieeffizienz, zur Senkung des Wasserverbrauchs, zur Kreislaufwirtschaft und zur Abwärmenutzung.

Viele Unternehmen der Digitalwirtschaft verfolgen eigene Klimaschutzziele und gleichen die von ihnen erzeugten Treibhausgasemissionen aus. Dazu gehören insbesondere die großen internationalen Cloudanbieter (Jahn/Kerkmann 2022) und die Betreiber von Telekommunikationsinfrastrukturen (z. B. Deutsche Telekom 2022; Telefonica 2022; Vodafone Group PLC 2020). Hinsichtlich des Betriebs der Rechenzentren mit neutral erzeugtem Strom hat aktuell Google sehr anspruchsvolle Ziele. Bis 2030 sollen die Google-Rechenzentren zeitgleich (24/7) mit regional erzeugtem klimaneutralem Strom versorgt werden (Google 2020).

Energiebedarf von Blockchainanwendungen am Beispiel von Kryptowährungen (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 5.1 im TAB-Bericht)

Der Energiebedarf für das Mining von Kryptowährungen hat sich seit 2019 noch einmal deutlich erhöht. Allein für das Bitcoin-Mining führen aktuelle Berechnungen zu dem Ergebnis, dass sich der Energiebedarf gegenüber 2019 mehr als verdoppelt hat und im Frühjahr 2022 bei über 100 Mrd. kWh/Jahr liegt (CCAF o. J.; Digiconomist o. J. a).

Relevante Entwicklungen seit 2019

- › Der Bitcoin-Kurs hat sich sehr volatil entwickelt. Im Vergleich zu Anfang 2020 (1.4.2020) hatte er sich mehr als verdreifacht (16.6.2022), zwischenzeitlich (12.11.2021) erhöhte er sich um mehr als den Faktor 8. Aktuell ist ein deutlicher Kurseinbruch festzustellen. Innerhalb einer Woche (9.6. bis 16.6.2022) ist der Kurs um etwa 30 % gefallen.
- › 2021 stieg China aus dem Kryptomining aus. Sowohl das Kryptomining als auch Aktivitäten, die mit dem Handel von Kryptowährungen verbunden sind, wurden verboten (tagesschau.de 2021b).
- › Als Reaktion auf den Ausstieg Chinas aus dem Kryptomining brach der Kurs des Bitcoins kurzfristig ein und der Energiebedarf für das Mining war vorübergehend deutlich gesunken. Die Rechenkapazitäten wurden jedoch rasch in anderen Weltregionen (insbesondere Kasachstan und Nordamerika) wieder aufgebaut (Rauchs 2021), sodass der Rückgang durch den Ausstieg Chinas mittlerweile mehr als ausgeglichen ist.

Die grundsätzlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen des TAB-Berichts zum Themenfeld »Energiebedarf von Blockchainanwendungen/Kryptowährungen« sind auch aus aktueller Sicht (Juni 2022) gültig. Aufgrund der Marktentwicklungen und auf Basis aktueller Untersuchungen können einige weitere Konkretisierungen der Ergebnisse und Schlussfolgerungen vorgenommen werden, die im Folgenden skizziert werden.

Distributed Ledger Technologien und spezielle die Blockchaintechnologie unterstützen eine große Zahl möglicher Anwendungen in fast allen Bereichen der Wirtschaft (Alladi et al. 2019; BSI o. J. ; Bundesnetzagentur 2021; Cong/He 2019; Dimitrov 2019; Dujak/Sajter 2019; Saberi et al. 2019). Bislang setzen allerdings noch verhältnismäßig wenige Unternehmen die Blockchaintechnologie ein. Befragungen des Bitkom zeigen, dass der Anteil der Unternehmen, die aktuell die Technologie nutzen bzw. den Einsatz planen, im mittleren einstelligen Prozentbereich liegt (Berg 2019, 2020 u. 2021).³ Es zeigt sich der Trend, dass größere Unternehmen die Blockchain-technologie, ähnlich wie andere digitale Technologien, deutlich häufiger nutzen (Bitkom Research 2021).

Die Anzahl der Kryptowährungen, ihre Nutzung und ihre Marktkapitalisierung hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen⁴ (Wirtschaftswoche 2022). Insbesondere die Investitionen in den sogenannten DeFi-Sektor stiegen exponentiell an. Decentralized Finance (DeFi, dezentralisierte Finanzmärkte) ist ein Sammelbegriff für Finanzdienstleistungen, die öffentliche Blockchains nutzen. Die Mehrheit der DeFi-Angebote nutzt die Ethereum-Plattform⁵.

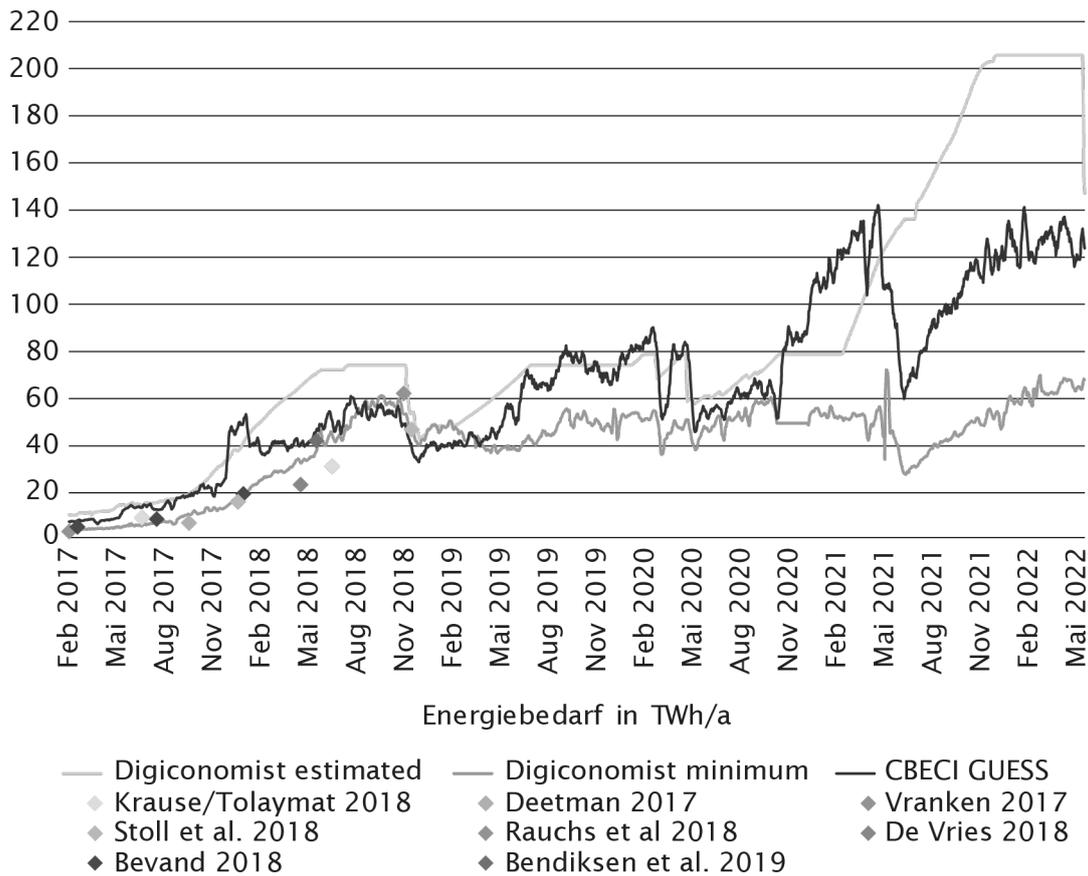
Berechnungen zum jährlichen Stromverbrauch des Bitcoin-Minings zeigen aktuell Ergebnisse zwischen etwa 60 und 200 TWh/a (Abb. A.2). Auch die Internationale Energieagentur IEA geht davon aus, dass 2021 durch das Bitcoin-Mining ein Energiebedarf von ca. 100 TWh verursacht wurde (IEA 2021). Der zeitweise Rückgang des Energiebedarfs 2021 ist auf den Ausstieg Chinas aus dem Kryptomining und den damit verbundenen Stilllegungen von Miningkapazitäten zurückzuführen. Das chinesische Verbot des Handels mit Kryptowährungen hatte auch Kurseinbrüche zur Folge. Die Entwicklungen führten dazu, dass sich die Hashrate im Bitcoin-Netzwerk von Anfang Mai 2021 bis Anfang Juni 2021 mehr als halbierte. Anfang 2022 war die Hashrate allerdings wieder auf dem Niveau von Anfang Mai 2021 (Blockchain.com o. J.). Dies ist auf den raschen Aufbau von Rechenkapazitäten in anderen Weltregionen (insbesondere Kasachstan und Nordamerika) zurückzuführen (Rauchs 2021).

³ 2017 nutzten 2 % der befragten Unternehmen Blockchaintechnologien, 2019 lag der Wert bei 6 %, 2021 bei 4 %. Der Rückgang 2021 kann auf die geringe Stichprobengröße (ca. 600 befragte Unternehmen) zurückzuführen sein.

⁴ <https://coinmarketcap.com/de> (14.6.2022)

⁵ <https://defipulse.com> (14.6.2022)

Abb. A.2 Berechnungen des jährlichen Stromverbrauchs des Bitcoin-Netzwerks



Quellen: Digiconomist o. J. a; CCAF o. J. ; Bendiksen/Gibbons 2019; Stoll et al. 2019; Rauchs et al. 2018; Vries 2018; Krause/Tolaymat 2018; Bevand 2017; Deetman 2017; Vranken 2017

Auch der Energiebedarf durch das Mining weiterer auf dem Proof-of-Work-Konsensmechanismus⁶ beruhenden Kryptowährungen ist in den vergangenen 2 Jahren angestiegen. So wird der jährliche Strombedarf durch Ethereum, der Blockchain mit dem nach Bitcoin zweitgrößten Stromverbrauch (Gallersdörfer et al. 2020), aktuell (Mai 2022) auf etwa 15 bis 100 TWh/a geschätzt (Digiconomist o. J. b).

Die Entwicklungen der vergangenen 2 Jahre bestätigen die Darstellung der Handlungsoptionen bei Kryptowährungen zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen im TAB-Bericht. Relevant für den teilweise sehr hohen Energiebedarf von Blockchainanwendungen ist praktisch ausschließlich die Verwendung des Proof-of-Work-Konsensmechanismus im Rahmen von Kryptowährungen. Eine nationale oder europäische regulative Einschränkung des Kryptominings bzw. der Verwendung des Proof-of-Work-Konsensmechanismus ist – wie die aktuellen Verhandlungen auf EU-Ebene zeigen – problematisch in der Umsetzung (Livshits 2022) und könnte gegebenenfalls nur geringe Wirkung haben, wie das Beispiel China zeigt. Aus aktueller Sicht scheint es auf europäischer Ebene geboten, auf Basis einer Analyse der Auswirkungen von regulatorischen Eingriffen auf technische und ökonomische Entwicklungen eine gemeinsame Strategie zu entwickeln, mit der der Energiebedarf durch Kryptominning reduziert werden kann.

⁶ Der Proof-of-Work-Konsensmechanismus ist eine Methode zur Validierung neuer Transaktionen in einer Blockchain (siehe Kap. 5.1 im TAB-Bericht).

Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 5.2 im TAB-Bericht)

Die COVID-19-Pandemie hat die Intensität der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung besonders während der Zeiten mit Maßnahmen zur Kontaktbeschränkung beeinflusst (ARD/ZDF o. J.; Schramm 2021).

Relevante Entwicklungen seit 2019

- › Die COVID-19-Pandemie hat während der Zeiten der Kontaktbeschränkungen zu einem Anstieg der täglichen Mediennutzungszeit um 10 bis 15 % geführt.
- › Pandemiebedingt wurden mehr digitale Geräte von Konsumenten gekauft. Diese wurden allerdings nicht nur zur privaten Internet- und digitalen Mediennutzung, sondern auch für Homeoffice und -schooling genutzt.
- › Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass während der Zeiten mit Maßnahmen zur Kontaktbeschränkung der Energiebedarf der digitalen Geräte in Haushalten durch die private Internet- und digitale Mediennutzung um etwa 10 bis 15 % höher lag als vor der Pandemie. Dauerhaft wird sich jedoch voraussichtlich nur eine geringe Erhöhung des Energiebedarfs durch den privaten Medien- und Internetkonsum ergeben.

Die COVID-19-Pandemie hat das Nutzungsverhalten beim privaten Internet- und digitalen Medienkonsum besonders während der Zeiten mit Kontaktbeschränkungen deutlich beeinflusst, zum einen auf der Ebene des medialen Konsums und zum anderen in Bezug auf das Kaufverhalten bei elektronischen Unterhaltungs-, Kommunikations- und Informationsgeräten. Beide Entwicklungen nehmen Einfluss auf den Energieverbrauch in den Haushalten. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings auch, dass insbesondere während der Zeiten mit Kontaktbeschränkungen viele Menschen zusätzlich von zuhause aus arbeiteten. Dadurch ist der private Internet- und digitale Medienkonsum nicht mehr klar von der beruflichen oder schulischen Nutzung abzugrenzen.

Absatzentwicklungen und Auswirkungen auf die Ausstattungsbestände in den Haushalten

Die COVID-19-Pandemie hat insbesondere 2020 für einen Verkaufsschub bei Fernsehgeräten, Videokonsolen, Computern, der Computerperipherie und Smartphones geführt. Während bei Fernsehgeräten die Absatzzahlen 2018 (-3,2 %) und 2019 (-4,7 %) rückläufig waren, stiegen sie 2020 um 11,2 %. Bei Videokonsolen stieg der Absatz 2020 um 17,6 %, während er 2018 (-9,4 %) und 2019 (-25,9 %) ebenfalls rückläufig war. Deutlich angestiegen sind außerdem die Absatzzahlen bei stationären PCs (10,7 %), bei mobilen PCs (23,9 %) und bei Tablets (12,9 %). Auch hier waren die Absatzzahlen in den vorherigen Jahren eher rückläufig. Besonders stark war 2020 der Anstieg beim Absatz von Monitoren (59,7 %). Der Absatz bei Smartphones stieg 2020 um 1,8 %, während dieser im Jahr zuvor um 4,2 % sank (gfu et al. 2017; 2018 u. 2019; gfu/GfK 2020).

Der erhöhte Absatz von elektronischen Geräten macht sich gemäß den Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) des Statistischen Bundesamts auch in den Ausstattungsbeständen der Haushalte bemerkbar (Tab. 1).

Tab. A.1 Anzahl der Gebrauchsgüter je 100 Haushalte (Ausstattungsbestand)

	2019	2020	2021
Flachbildfernseher	147,0	151,4	154,1
Spielekonsolen	51,9	51,9	55,2
stationäre PCs	54,2	53,8	54,9
mobile PCs	104,7	104,6	109,5
Tablets	64,6	69,0	73,5
Smartphones	149,2	155,5	158,5

Quelle: Destatis 2021, S. 15

Der Ausstattungsbestand bei Monitoren ist in den LWR nicht erfasst, dürfte sich jedoch ebenfalls entsprechend der Absatzzahlen deutlich erhöht haben. Die Ergebnisse der LWR machen zudem deutlich, dass der Ausstattungsbestand bei elektronischen Geräten vor allem erweitert und nicht ausgetauscht wurde, was auf ein erhöhtes Konsumverhalten zurückzuführen ist.

Der starke Anstieg der Absatzzahlen im Jahr 2020 hat sich jedoch bereits im Jahr 2021 wieder relativiert und ist seitdem auch teilweise wieder rückläufig (gfu/GfK 2021): Reduziert hat sich 2021 der Absatz bei Fernsehgeräten (-19,7 %), bei stationären PCs (-11 %), bei mobilen PCs (-12,3 %), bei Monitoren (-5,7 %) und bei Smartphones (-4,4 %). Weiter gering gestiegen sind hingegen die Absätze bei Videokonsolen (um 5,1 %) und bei Tablets (19,2 %). Insbesondere der mediale Konsum ist im Zusammenhang mit Kontaktbeschränkungen stark angestiegen, was auch durch einen extremen Anstieg des Absatzes von Streamingboxen bzw. -sticks im Jahr 2021 bestätigt wird (128,6 %).

Entwicklungen des Internet- und digitalen Medienkonsums in den Haushalten

Die COVID-19-Pandemie wirkt sich tiefgreifend auf das Alltagsleben der Menschen aus. Entsprechend von Daten der ARD/ZDF-Massenkommunikation Langzeitstudie⁷ sowie von Seven One Media (2020 u. 2021) wird deutlich, dass die Menschen einerseits informiert sein wollen und andererseits einen starken Bedarf nach Unterhaltung und Ablenkung haben, den sie bevorzugt mit Bewegtbildangeboten decken. Die Ergebnisse von ARD/ZDF sowie von Seven One Media sind jedoch bezüglich der Nutzungszeiten nicht deckungsgleich, was auf unterschiedliche Erfassungsmethoden, Stichprobengrößen und Abgrenzungsverfahren zurückführbar sein könnte. Beide Ergebnisse werden hier kurz dargestellt.

Gemäß der ARD/ZDF-Massenkommunikation Langzeitstudie stieg die gesamte tägliche Mediennutzung zwischen Januar 2020 und April 2020⁸ insgesamt von 6,7 auf 7,3 Stunden um mehr als 30 Minuten deutlich an. Insbesondere die Videonutzung nahm in diesem Zeitraum zu. Die Sehdauer beim linearen Fernsehen stieg von täglich 148 auf 162 Minuten um knapp 10 %. Das Streamen über Dienste wie Netflix und Amazon erhöhte sich pro Tag von 25 auf 34 Minuten um 36 %. Die Nutzung des nicht medialen Internets (z. B. Messengerdienste und Onlineshopping) erhöhte sich ebenfalls von 56 auf 62 Minuten pro Tag um 11 %; die Nutzung von Onlinegames von 16 auf 26 Minuten täglich um 62 %. Bei anderen Medien wie Audioformaten blieben die Nutzungsdauern während der betrachteten Zeitspanne in der Summe hingegen konstant (Eimeren et al. 2021, S. 539).

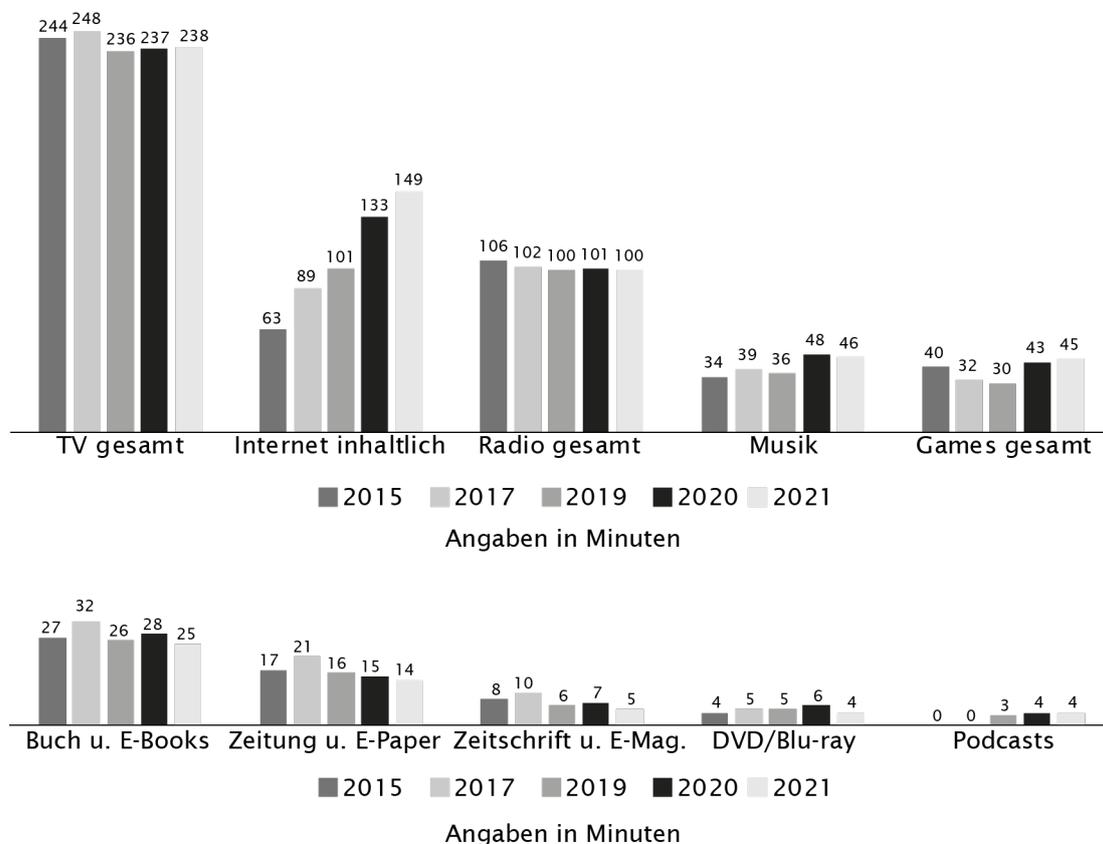
Seven One Media (2020, S. 62 ff.) stellt dagegen eine deutlich intensivere Medien- und Internetnutzung während der Zeit mit Kontaktbeschränkungen dar. Die Untersuchung fokussierte in der Darstellung aber vor allem auf die Bewegtbildnutzung, die Nutzung sozialer Medien sowie die Kommunikation im Allgemeinen. Entsprechend dieser Daten stieg die Nutzungsdauer von Bewegtbild von Anfang bis Ende März 2020 insgesamt um 15 % von 287 auf 330 Minuten täglich. Bezogen auf die einzelnen Formate stiegen die täglichen Nutzungsdauern beim klassischen/linearen Fernsehen von 229 auf 260 Minuten um 14 %, bei kostenlosen Onlinevideos von 30 auf 34 Minuten um 13 % und bei Streaming-Angeboten von 23 auf 31 Minuten um 34 %. Die Nutzungsintensität

⁷ <https://www.ard-zdf-massenkommunikation.de> (14.6.2022)

⁸ Die von Bund und Ländern beschlossenen bundesweiten Kontaktbeschränkungen traten am 22.3.2020 in Kraft.

sozialer Medien stieg bei Facebook um 22 %, bei Instagram um 26 % und bei Snapchat um 32 %. Die Kommunikation über Telefon und digitale Plattformen nahm bezogen auf die Nutzungsdauer um 12 % zu und die inhaltliche Internetnutzung um 17 %.

Abb. A.3 Durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer Medienangebote (Angaben in Minuten)



Quelle: Seven One Media 2021, S. 12

Auch wenn die konkreten Zahlen zu den Nutzungszeiten in den beiden Untersuchungen voneinander abweichen, ist der generelle Trend sehr ähnlich. Der Anstieg der Nutzungszeiten während der Zeit mit Kontaktbeschränkungen lag beim linearen Fernsehen zwischen 10 bis 14 %, beim Streaming zwischen 34 und 36 % sowie beim inhaltlichen Internetkonsum zwischen 11 und 12 %.

Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass die Kontaktbeschränkungen zu einer deutlich höheren privaten Internet- und digitalen Mediennutzung geführt haben. Diese längeren Nutzungszeiten scheinen jedoch ein temporärer Effekt gewesen zu sein. So sind die Nutzungszeiten in einigen Bereichen bereits wieder rückläufig oder sie pegeln sich auf einem stabilen Niveau ein, was auf eine Sättigungstendenz hindeutet (Abb. A.3) (Seven One Media 2021, S. 19 ff.).

Auswirkungen auf den Energieverbrauch

Je nach Endgerät und der jeweiligen Anwendung sind Ausstattungsraten in den privaten Haushalten und die Nutzungszeiten während der Pandemie unterschiedlich stark angestiegen. In Summe sind auch die täglichen Nutzungszeiten der TV-Geräte und -Peripherie (Set-Top-Boxen, Konsolen, etc.) angestiegen. Es ist anzunehmen, dass die zeitweise Erhöhung der Nutzungszeiten um 10 bis 15 % zu einer Erhöhung des Energiebedarfs der Gerätenutzung in den privaten Haushalten in der gleichen Größenordnung geführt hat. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Geräte zur Nutzung von Unterhaltungsmedien zwar eindeutig dem privaten Internet- und digitalen Medienkonsum zugeordnet werden können. Bei Computern, Tablets und Computerperipherie ist dies

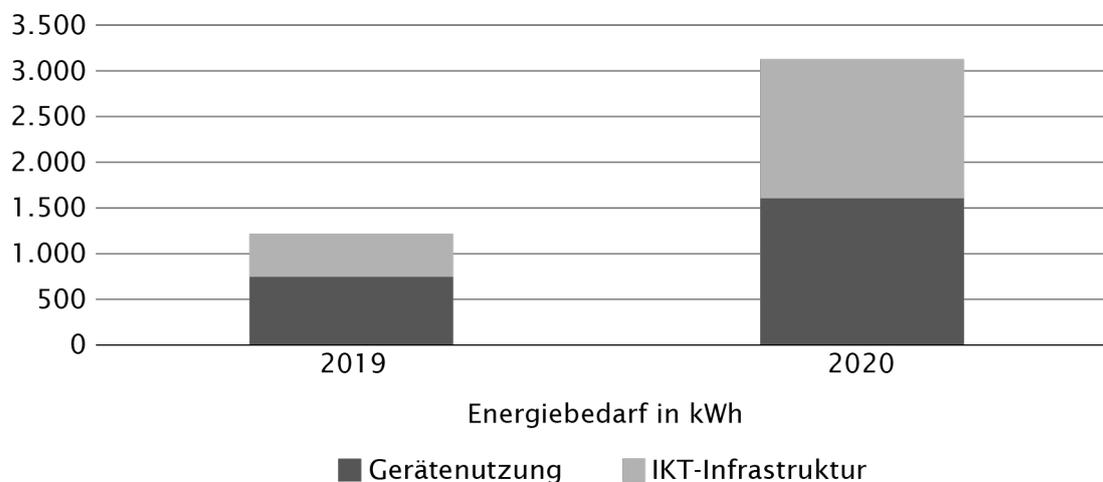
jedoch nicht möglich. Diese Geräte werden sowohl für den privaten Internet- und Medienkonsum als auch für Homeoffice und -schooling genutzt.

Im TAB-Bericht wurde beispielsweise der Energiebedarf von stationären/mobilen PCs anhand einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 3,6 Stunden abgeschätzt. In der COVID-19-Pandemie haben Homeoffice und -schooling jedoch dazu geführt, dass solche Geräte teilweise deutlich länger betrieben wurden.

Exemplarisch lassen sich die möglichen Auswirkungen auf den Energiebedarf anhand eines 5-Personen-Haushalts mit sehr intensiver Nutzung digitaler Medien für Beruf, Schule und privaten Konsum darstellen. Die Abbildung A.4 zeigt für einen konkreten Haushalt in Baden-Württemberg, wie sich der Energiebedarf durch die digitale Gerätenutzung 2020 gegenüber 2019 erhöhte (Schramm 2021, S. 94).

Die Berechnungen zeigen, dass der Energiebedarf in diesem Haushalt von 1.213 auf 3.132 kWh/a um das Zweieinhalbfache anstieg. Etwa die Hälfte des Energiebedarfs ist auf die erhöhte Nutzung von Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren zurückzuführen. Dies ist vermutlich in erster Linie durch den erhöhten Datenverkehr von Videokonferenzen beim Homeoffice bzw. -schooling bedingt.

Abb. A.4 Veränderungen des Energiebedarfes durch die COVID-19-Pandemie in einem Beispielhaushalt mit intensiver Mediennutzung



Eigene Darstellung

Insgesamt sind langfristige Abschätzungen zur veränderten (privaten) Internet- und digitalen Mediennutzung sowie deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch zum aktuellen Zeitpunkt schwierig. Die noch nicht beendete Pandemie hat Routinen und Verhaltensweisen verändert, die zu einem intensivierten Konsum von Unterhaltungsmedien sowie einer erhöhten Nutzung von inhaltlichen Medien im Rahmen des Homeschooling und -office geführt haben. Außerdem wurden deutlich mehr Neugeräte als in den vorherigen Jahren angeschafft.

Smartbuildings (Aktualisierung und Ergänzung zu Kapitel 5.3 im TAB-Bericht)

Gegenüber dem Stand des dem TAB-Bericht zugrunde liegenden Gutachtens von 2019 hat sich der Handlungsdruck im Gebäudesektor nochmals deutlich verschärft. Aktuell ist ein enormer Preisanstieg bei fossilen Energieträgern zu verzeichnen. Gleichzeitig bleibt der Gebäudesektor aufgrund des hohen Gas- und Ölverbrauchs für die Wärmeerzeugung einer der Hauptemittenten von Treibhausgasen und damit ein zentrales Handlungsfeld der Klimapolitik.

Dies erhöht die Dringlichkeit, im Gebäudebestand rasch Energieeffizienz- sowie Sanierungsmaßnahmen umzusetzen. Intelligentes Energiemanagement mit Smartbuildingtechnik kann dabei eine entscheidende Rolle spielen, da es in kurzer Zeit zu Nettoeinsparungen von fossilen Energieträgern führt und die Technik sich gut mit baulichen Sanierungsmaßnahmen kombinieren lässt. Zudem trägt sie mittelfristig zur Systemintegration erneuerbarer Energien bei und unterstützt die Sektorenkopplung (z. B. durch »power to heat«).

Seit der ersten Fassung des TAB-Berichts sind vor allem neue Erkenntnisse sowie Abschätzungen zu Energieeinsparungen und Emissionsminderungen durch Smartbuildingtechnik im Wohn- sowie im Nichtwohngebäudesektor hinzugekommen (Beucker/Hinterholzer 2020 u. 2021; Hintemann et al. 2021).

Relevante Entwicklungen seit 2019

- › Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) besteht seit 2021 ein noch höherer Handlungsbedarf, den fossilen Energieverbrauch für das Heizen und die Warmwassererzeugung in Gebäuden zu senken. Nach den Zielen des KSG soll der Gebäudesektor bis 2045 nahezu klimaneutral werden. Für 2030 wurde ein Emissionsziel von maximal 67 Mio. t CO₂-Äquivalenten formuliert. Gleichzeitig hat der Gebäudesektor nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA/BMWK 2022) die Zielvorgaben im Jahr 2021 erneut verfehlt. Anstelle der anvisierten 113 Mio. t CO₂-Äquivalente wurden demnach 115 Mio. t emittiert.
- › Seit dem Inkrafttreten des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)⁹ im Jahr 2019 werden Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor bepreist und erhöhen sukzessive die Heiz- und Warmwasserkosten. Ab 2023 soll, in Abhängigkeit des Sanierungszustands eines Gebäudes, der CO₂-Preis zwischen Mieter und Vermieter aufgeteilt werden (BMWSB 2022). Damit wird der Verbrauch fossiler Energie in Gebäuden sowohl für Mieter als auch Vermieter teurer.
- › Neben der CO₂-Bepreisung haben die wirtschaftliche Erholung nach der Hochphase der COVID-19-Pandemie sowie der Krieg in der Ukraine zu einem deutlichen Preisanstieg bei Erdgas, einem der wichtigsten Energieträger im Gebäudesektor, geführt. Schon vor dem Beginn des Krieges sind 2021 die Kosten für Erdgas um 13 % und die für Erdöl um 44 % gestiegen (DMB o. J.). Für 2022 und 2023 werden bedingt durch die Verknappung der Energieträger noch weitaus höheren Preissteigerungen von derzeit 119 % vorausgesagt (co2online 2022).

Durch die neuen Erkenntnisse werden die grundsätzlichen Schlussfolgerungen im TAB-Berichts nicht verändert. Die seitdem erschienenen Studien bzw. Publikationen stützen und verstärken teilweise die bereits im ursprünglichen Gutachten gemachten Aussagen zu den potenziellen Energieeinsparungen, die durch den Einsatz von Smartbuildingtechnik im Gebäudesektor erzielt werden können.

Sie bestärken damit die im Gutachten gemachten Aussagen zu den hohen Minderungspotenzialen für fossile Energien und Treibhausgase, die aus dem Einsatz von Smartbuildingtechnik im Gebäudesektor resultieren können. Im Vergleich zum Mehrverbrauch an Strom durch den Technikeinsatz überwiegen aus ökobilanzieller Sicht eindeutig die Effekte aus der Einsparung fossiler Energien (Beucker et al. 2016; Beucker/Hinterholzer 2020).

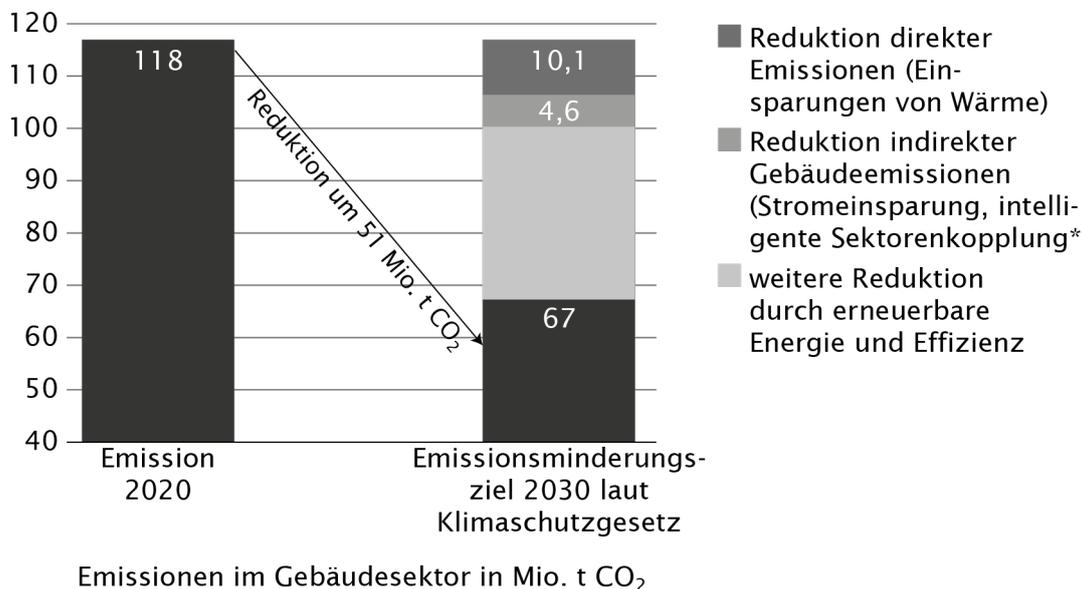
In einer im Jahr 2021 erstellten Studie wurden Klimaschutzpotenziale berechnet, die in verschiedenen Einsatzfeldern und -szenarien von Smartbuildingtechnik bzw. Gebäudeautomation bis zu den Zielzeiträumen des Klimaschutzgesetzes (2030 und 2045) erreicht werden können (Beucker/Hinterholzer 2021). Der Berechnung wurde ein differenziertes Modell für den Wohn- und den Nicht-Wohngebäudesektor zugrunde gelegt. Demnach können durch einen breiten Einsatz von Smartbuildingtechnik der Effizienzklasse A nach DIN EN 15232 »Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement« kurz- bis mittelfristig (bis 2030) bis zu 14,7 Mio. t CO₂-Emissionen eingespart werden (Abb. A.5). Ein Anteil von 10,1 Mio. t wird direkt durch die effizientere Bereitstellung von Heizung und Warmwassererzeugung und die damit verbundene Reduktion an fossilen Brennstoffen (vor allem Erdgas) eingespart. Hinzu kommt eine Reduktion von 4,6 Mio. t indirekter Gebäudeemissionen. Dies illustriert das große Potenzial für die Unterstützung der intelligenten Sektorenkopplung im Gebäudesektor, indem z. B. Strom aus PV oder Wind gespeichert wird (etwa in Form von Warmwasser [Power to Heat]). Diese Emissionsminderung entspricht rund 30 % des im Klimaschutzgesetz formulierten Reduktionsziels für den Gebäudesektor.

Vergleichbare Ergebnisse zeigt eine Analyse für das Bundesland Hessen, in der die CO₂-Minderungspotenziale aus dem Einsatz von Smartbuildingtechnik in Wohngebäuden abgeschätzt werden. Demnach können bis 2030 durch einen reduzierten Verbrauch fossiler Energie (vor allem Erdgas) sowie die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien bis 15,3 % der CO₂-Emissionen in Privathaushalten eingespart werden (Hintemann et al. 2021).

⁹ Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG)

Smartbuildingtechnik kann somit, neben baulichen Maßnahmen wie Dämmung und der Dekarbonisierung von Energieträgern einen erheblichen Beitrag zur Energiewende im Gebäudesektor leisten. Ein gerade in der aktuellen Situation wesentlicher Vorteil ist, dass die Installation von Smartbuildingtechnik im Gebäudebestand im Allgemeinen wesentlich schneller zu realisieren ist als bauliche Maßnahmen, die teils Instandhaltungszyklen von 20 bis 30 Jahren (etwa für Fassaden und Dächer) unterliegen.

Abb. A.5 Beitrag von Smartbuildingtechnik zur Erreichung der Emissionsminderungsziele im Gebäudesektor



Quelle: nach Beucker/Hinterholzer 2021

1 Einleitung

Aktuell findet ein tiefgreifender Umbruch in vielen Lebens- und Wirtschaftsbereichen statt, der durch die allgegenwärtige Digitalisierung angetrieben wird. Welche Auswirkungen diese Entwicklung auf die Erreichung umwelt- bzw. klimapolitischer Ziele hat, ist derzeit eine offene Frage. Auf der einen Seite stehen enorme Potenziale der Digitalisierung zur Einsparung von Rohstoffen und Energie sowie zur Reduktion von Schadstoff- und Klimagasemissionen durch Effizienzsteigerungen in vielen Bereichen. Auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, dass die Herstellung, der Betrieb und die Entsorgung von Geräten, Komponenten bzw. Produkten der IKT große Mengen Energie und Ressourcen verbrauchen sowie weitere Umweltwirkungen verursachen.

Für eine Gesamtbilanz müssen darüber hinaus noch indirekte Effekte berücksichtigt werden. So führt etwa der Reboundeffekt dazu, dass eine Effizienzsteigerung oft mit einer vermehrten Nutzung einhergeht, was deren Einsparungen mindert bzw. sogar in ihr Gegenteil verkehren kann. Auch durch die Digitalisierung induziertes Wirtschaftswachstum und Verschiebungen bei Wirtschaftssektoren, vor allem ein Wachstum des Dienstleistungssektors zulasten produzierender Sektoren, gehören in diese Kategorie.

Wie die Bilanz der Digitalisierung hinsichtlich bestehender Umwelt- und Nachhaltigkeitsziele ausfällt, ist in der Fachdiskussion umstritten. Stimmen, die den möglichen positiven Beitrag betonen (etwa GeSI/ Deloitte 2019), stehen andere gegenüber, die eher skeptisch sind (The Shift Project 2019). Um einen positiven Beitrag erreichen zu können, ist es unabdingbar, dass der Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen, der in den letzten Jahren global stark zugenommen hat, zu bremsen (Lange et al. 2020).

Eine kritische Betrachtung der Energieverbräuche von IKT-Infrastrukturen ist auch deshalb von Relevanz, weil angesichts der mit der Digitalisierung assoziierten bzw. in Aussicht gestellten enormen Nutzenpotenziale ggf. die Gefahr besteht, dass damit einhergehende negative Umweltauswirkungen bei Anwendern, Forschenden und nicht zuletzt auch bei politischen Akteuren zunehmend aus dem Blickfeld geraten könnten. Zwar wird der Strombedarf von digitalen Produkten oder Dienstleistungen aktuell intensiv im Kontext der Kryptowährungen diskutiert, davon abgesehen ist er jedoch kein virulentes Thema gesellschaftlicher bzw. politischer Debatten.

Vor diesem Hintergrund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages das TAB beauftragt, den Wissensstand zu den IKT-bedingten Energieverbräuchen zu erheben und zusammenfassend darzustellen. Es sollten bisher noch nicht genutzte Einsparpotenziale identifiziert sowie Hemmnisse zu deren Umsetzung analysiert werden. Schließlich sollten Konzepte und Ideen für eine bessere Einbindung von IKT-Infrastrukturen in ein zunehmend durch dezentrale und volatile Stromerzeugung geprägtes Energiesystem dargestellt und diskutiert werden.

Aufbau des Berichts

Der aktuelle Wissensstand zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen wird im folgenden Kapitel 2 zusammengetragen. Basierend auf modellgestützten Berechnungen werden anschließend Szenarien für die weitere Entwicklung bis 2030 entwickelt und diskutiert. In Kapitel 3 wird zunächst ein breitangelegter Überblick über technologische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen gegeben. Einige dieser Optionen, die ein besonders hohes Einsparpotenzial aufweisen bzw. bei denen wirksame Handlungsmöglichkeiten bestehen, werden detaillierter dargestellt. In Kapitel 4 wird der Frage nachgegangen, welche Möglichkeiten für die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in IKT-Infrastrukturen existieren. In Kapitel 5 werden drei Vertiefungsthemen behandelt: Die Blockchaintechnologie, die private Internet- und digitale Mediennutzung sowie die Einsparmöglichkeiten im Gebäudebereich durch digitales Energiemanagement (Smarthome bzw. Smartbuilding). Der Bericht endet mit einigen Schlussbetrachtungen (Kapitel 6).

Zusammenarbeit mit Gutachtern

Zur fachlichen Fundierung wurde ein Gutachten vergeben:

- › Energiebedarf der IKT-Infrastruktur: Stand, Trends und Einsparpotenziale. Prof. Dr. Klaus Fichter, Dr. Ralph Hintemann, Dr. Jens Clausen, Dr. Severin Beucker, Stefanie Schramm; Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin

Es bildet eine wesentliche Grundlage für den vorliegenden Bericht. An dieser Stelle sei der Gutachterin und den Gutachtern für die Bereitschaft zur Kooperation und Kommunikation sowie die herausragende Qualität des vorgelegten Gutachtens herzlich gedankt. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials sowie dessen Zusammenführung mit eigenen Recherchen und Analysen tragen die Verfasser Dr. Reinhard Grünwald und Dr. Claudio Caviezel. Dank gebührt auch Carmen Dienhardt und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die sorgfältige redaktionelle Bearbeitung und Layoutgestaltung des Berichts.

2 Wissensstand und Szenarien zu den IKT-bedingten Energiebedarfen

Der Wissensstand zum aktuellen und für die Zukunft prognostizierten Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen wird im Folgenden zusammengefasst und bewertet. Nach der Abgrenzung, was im vorliegenden Bericht als IKT-Infrastrukturen verstanden wird, erfolgt eine Vorstellung der verwendeten Methodik. Im Anschluss werden verschiedene Prognosen des weltweiten Energiebedarfs der IKT vorgestellt und diskutiert. Mittels eines modellbasierten Ansatzes werden sodann für Deutschland die aktuellen und bis 2030 erwartbaren Energieverbräuche der IKT-Infrastrukturen berechnet.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren – sofern nicht durch weitere Quellenangaben kenntlich gemacht – auf Kapitel 1 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019, S. 13 ff.).

2.1 Abgrenzung und Methodik

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden als IKT-Infrastrukturen die Telekommunikationsnetzwerke (Kernnetz und Zugangsnetze) sowie die Rechenzentren betrachtet (Abbildung 2.1). Zugangsnetze verbinden Hausanschlüsse und mobile Endgeräte mit dem Kernnetz. Das Kernnetz leitet die Daten überregional weiter und verbindet die einzelnen Netzknoten. Zugangsnetze lassen sich in die Sparten Festnetz (d. h. kabelgebundene Infrastruktur) und Mobil (d. h. Mobilfunkbasisstationen und deren Datenanschlüsse) unterteilen. Zwischen den Infrastrukturen für die Dienste Telekommunikation und Datenverkehr wird nicht mehr unterschieden, da diese spätestens mit der Umstellung der klassischen Analog-/ISDN-Telefonie auf Voice over IP (VoIP, also Sprachübermittlung über das Internet) miteinander verschmolzen sind.¹⁰

Nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts sind die Netzwerke in Unternehmen und privaten Haushalten sowie die dazugehörigen Endgeräte. Lediglich in Kapitel 2.2, in dem ein Überblick über internationale Studien zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen gegeben wird, wird kurz auf die Endgeräte eingegangen, um ein Gesamtbild der IKT-bedingten Energiebedarfe zu ermöglichen. Außerdem wird der Energiebedarf von Endgeräten im Vertiefungskapitel 4.2 im Rahmen der privaten Internet- und digitalen Mediennutzen eingehender untersucht.

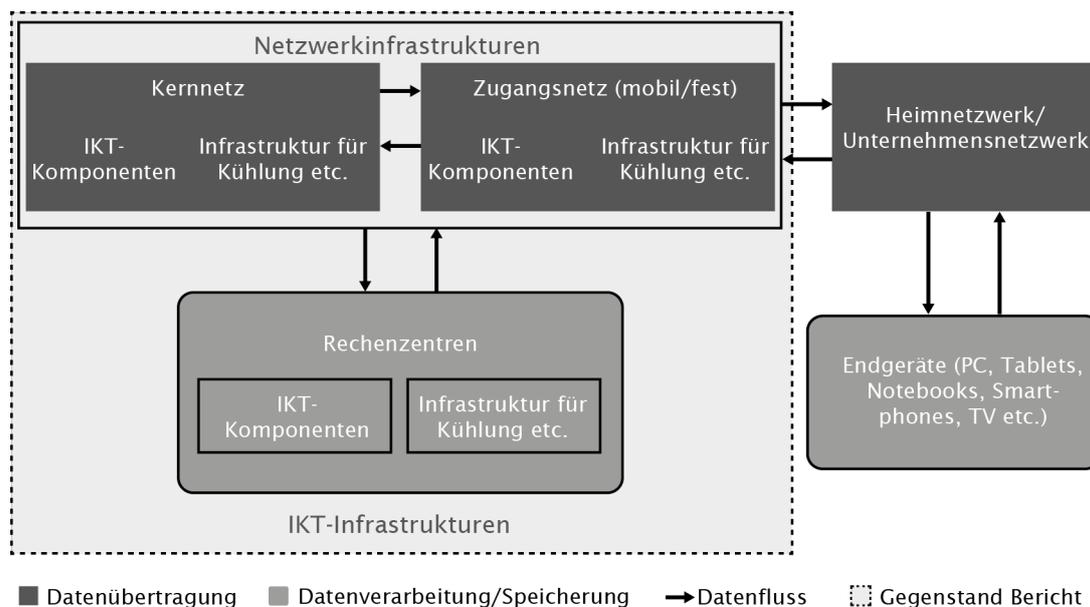
Methodisch beruht die Analyse zum einen auf umfangreichen Literaturrecherchen. Berücksichtigt wurden sowohl wissenschaftliche Literatur als auch weitere Materialien (z. B. Unternehmensberichte) und Beiträge in Zeitschriften und Zeitungen. Zum anderen wurden von den Gutachtern des Borderstep Instituts umfangreiche Modellrechnungen vorgenommen. Die Modelle basieren auf Daten zu Ausstattung, Nutzungsmustern und Energiebedarfen der verschiedenen Elemente der IKT-Infrastrukturen. Die Ergebnisse der Literaturrecherchen und der Modellierung wurden durch Gespräche mit Fachleuten und im Rahmen eines Expertenworkshops¹¹ validiert.

Um den Energiebedarf der IKT-Infrastruktur ganzheitlich zu ermitteln, muss nicht nur die Nutzungsphase, sondern auch die Herstellung einschließlich der Gewinnung der benötigten Rohstoffe, der Transport und die Entsorgung der einzelnen Komponenten einbezogen werden. Da allerdings IKT-Infrastrukturen in der Regel durchgehend 24 Stunden am Tag und 365 Tage im Jahr betrieben werden, entsteht der Löwenanteil des Energiebedarfs – bei Rechenzentren beispielsweise in der Regel über 90% (Schödwel et al. 2018, S. 30 f.) – durch den Stromverbrauch während der Nutzungsphase. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Fokus daher auf die elektrischen Energiebedarfe bei der Nutzung von IKT-Infrastrukturen gelegt.

¹⁰ Die Umstellung der klassischen Analog-/ISDN-Telefonanschlüsse auf IP-basierte Telefonzugänge ist mit Stand Ende 2019 weitgehend abgeschlossen (Bundesnetzagentur 2019b, S. 32 f.).

¹¹ Der Expertenworkshop fand am 1. Oktober 2019 in Berlin statt. Die Liste der Teilnehmer ist in Kap. 8.2 aufgeführt.

Abb. 2.1 IKT-Infrastrukturen als Teils des IKT-Systems – vereinfachte Darstellung



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 15

Bei IKT-Endgeräten ist das Verhältnis umgekehrt: Moderne Endgeräte wie Laptops, Smartphones und Tablets benötigen bei der Nutzung nur noch sehr wenig Strom. Dafür wird verhältnismäßig viel Energie für ihre Herstellung aufgewendet. Beispielsweise erfordert die Herstellung eines Smartphones oder eines mobilen PCs unter plausiblen Annahmen etwa 10-mal so viel Energie, wie bei der Nutzung der Geräte verbraucht wird (Kap. 5.2.2.5). Da die Endgeräte nicht in Deutschland hergestellt werden, wird diese Umweltwirkung nicht in nationalen Energie- und Ökobilanzen berücksichtigt.

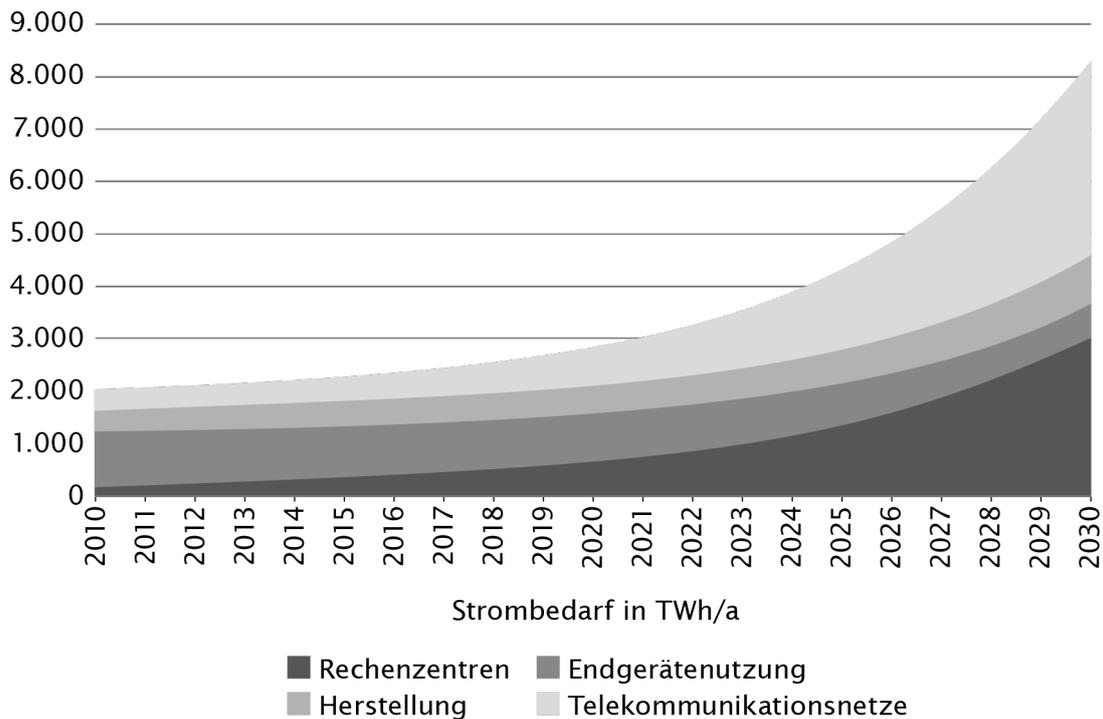
Dieser Umstand weist auf einen wichtigen Aspekt hin: Die Auswirkungen der Produktion und Nutzung von IKT-Geräten entstehen vielfach über nationale Grenzen hinweg. So induziert etwa die Nutzung eines Smartphones oder eines Tablets etwa die 10-fache Energiemenge des Eigenbedarfs in den Netzen und Rechenzentren (Borderstep Institut 2019, S. 16). Da insbesondere die auf Smartphones und Tablets genutzten Angebote häufig von internationalen Cloudanbietern zur Verfügung gestellt werden, wird ein erheblicher Teil des durch die Nutzung dieser Geräte in den IKT-Infrastrukturen induzierten Energiebedarfs im Ausland verursacht. Dies wird im Rahmen des vorliegenden Berichts (in Kapitel 2.3.4) berücksichtigt.

2.2 Überblick Energiebedarf der IKT weltweit

In jüngster Zeit hat das Thema Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen öffentliche Aufmerksamkeit erregt, da in einer vielbeachteten in der renommierten Zeitschrift »Nature« publizierten Studie (Jones 2018) ein drastischer Anstieg prognostiziert wurde. Der Beitrag basiert auf den Ergebnissen einer Studie der Huawei-Forscher Andrae und Edler (2015), die den gesamten IKT-bedingten Strombedarf (inklusive Herstellung und Endgerätenutzung) weltweit bis 2030 in drei Szenarien bestimmt haben. In Abbildung 2.2 ist die von Andrae und Edler (2015) erwartete Entwicklung des Strombedarfs (im »expected scenario«) dargestellt. Gemäß dieser Prognose würde sich der Strombedarf der gesamten IKT zwischen 2010 und 2030 weltweit vervierfachen.

Besonders stark wachsen nach der Prognose von Andrae und Edler die Strombedarfe der IKT-Infrastrukturen: Der Strombedarf der Rechenzentren würde um den Faktor 15 ansteigen, derjenige der Telekommunikationsnetze um den Faktor neun. Der Strombedarf der Endgerätenutzung weltweit geht – trotz steigender Gerätezahlen – deutlich von 1.046 auf 670 TWh/a zurück. Dafür steigt der Strombedarf für die Herstellung der Geräte von 387 auf 903 TWh/a an, womit der Rückgang in der Nutzungsphase mehr als ausgeglichen wird. Insgesamt wäre damit die IKT im Jahr 2030 mit 8.265 TWh für 21 % des weltweiten Strombedarfs verantwortlich (Andrae/Edler 2015, S. 138).

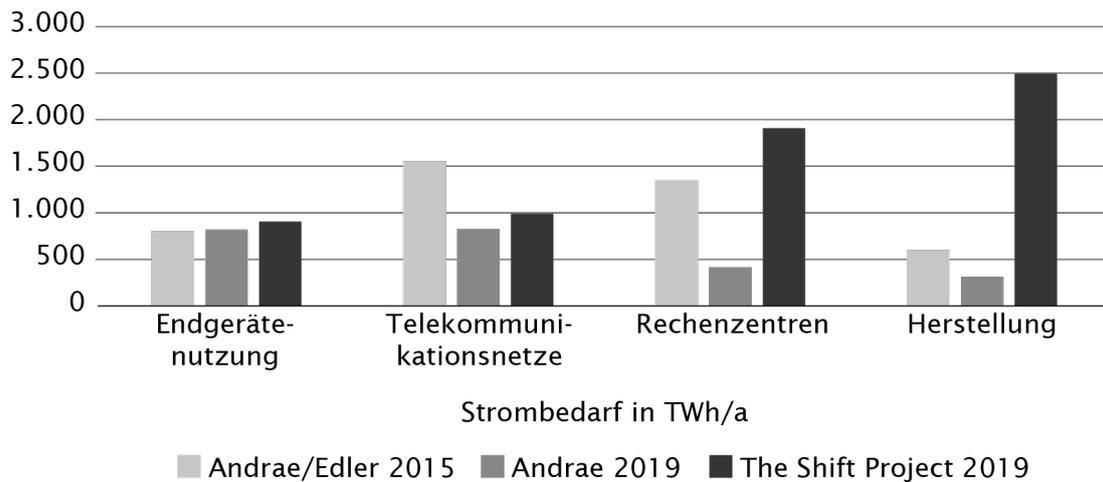
Abb. 2.2 Erwartete Entwicklung des Strombedarfs der gesamten IKT weltweit gemäß Andrae & Edler (2015)



Quelle: Andrae/Edler 2015, S. 137

Im Nachgang zur Veröffentlichung von Andrae und Edler (2015) wurden etliche Studien zu dieser Thematik erstellt, die jedoch kein einheitliches Bild abgeben. Auf der einen Seite stehen die Autoren, die in ihren Untersuchungen ebenfalls einen sehr hohen Anstieg des weltweiten IKT-bedingten Energiebedarfs vorhersagen. Belkhir und Elmegli (2018) prognostizieren einen möglichen Anstieg des Anteils der weltweit durch IKT verursachten CO₂-Emissionen von etwa 1 % im Jahr 2007 auf 16 % im Jahr 2040 (dabei wurde angenommen, dass die globalen CO₂-Emissionen ab 2016 nicht weiter anwachsen). 2019 nahmen sowohl die französische Non-Profit-Organisation The Shift Project (2019) als auch Andrae (2019) selbst auf Grundlage des Modells von Andrae und Edler (2015) Neuberechnungen mit aktualisierten Eingangsdaten vor. Dabei gelangten die Autoren zu teilweise völlig unterschiedlichen Ergebnissen (Abb. 2.3). So weichen die Resultate für den im Jahr 2025 erwarteten Strombedarf von Rechenzentren um mehr als einen Faktor 4 voneinander ab, diejenigen für die Produktion der Geräte sogar um mehr als einen Faktor 6. Die deutlichen Abweichungen in den Prognoseergebnissen lassen sich zum Teil durch den verwendeten Berechnungsansatz erklären. Für die Projektion der zeitlichen Entwicklung werden Annahmen hinsichtlich der Verbesserung der Effizienz und der Steigerung der Nutzung getroffen. Die resultierenden Formeln haben exponentiellen Charakter, wodurch schon eine kleine Änderung in den Eingangsdaten zu erheblichen Veränderungen insbesondere der langfristigen Entwicklungen führen kann.

Abb. 2.3 Strombedarf der IKT 2025



Eigene Darstellung

Es gibt aber auch einige internationale Studien, die zum Ergebnis hatten, dass sich der weltweite IKT-bedingte Energiebedarf in Zukunft nicht wesentlich erhöhen wird. So haben etwa schwedische Forscher der Telekommunikationsunternehmen Ericsson und Telia (Malmodin/Lunden 2016, 2018)¹² im Gegensatz zu Andrae und Edler (2015) eine leichte Abnahme des Energiebedarfs im Zeitraum von 2010 bis 2015 ermittelt. Diese Diskrepanz wird von (Malmodin/Lunden 2018, S. 26 f.) auf Unzulänglichkeiten in den Modellen und Eingangsdaten von Andrae und Edler (2015) zurückgeführt. Auch im Rahmen einer Serie von Studien der Global e-Sustainability Initiative (GeSI) – ein Zusammenschluss internationaler IKT-Unternehmen und Verbände – wird inzwischen kein weiterer Anstieg des CO₂-Fußabdrucks des IKT-Sektors vorhergesagt.¹³

Tab. 2.1 CO₂-Fußabdruck des IKT-Sektors gemäß den GeSI-Berichten

Quelle	Berichtsjahr	Ausgangsjahr 2002	Prognosejahr 2020	Prognosejahr 2030
GeSI/The Climate Group 2008	2008	0,53	1,4	
GeSI/The Boston Consulting Group 2012	2012		1,27	
GeSI/Accenture Strategy 2015	2015			1,25
GeSI/Deloitte 2019	2019			0,9

Alle Werte in Mrd. t CO_{2e}

Eigene Zusammenstellung

¹² Malmodin und Lunden betrachten nicht nur den elektrischen, sondern den gesamten Energiebedarf des IKT-Sektors einschließlich beispielsweise Wärmebedarf der Büros der Netzbetreiber und Dienstreisen der Mitarbeiter.

¹³ Für den Energiebedarf enthalten die GeSI-Berichte keine expliziten Zahlen, die Entwicklung kann aber in etwa proportional zu den CO₂-Emissionen angenommen werden.

Wie in der Übersicht in Tabelle 2.1 dargestellt, wurde laut GeSI/The Climate Group (2008, S. 14) noch ein Anstieg der CO₂-Emissionen von 2002 bis 2020 von 0,53 auf 1,4 Mrd. t CO_{2e} erwartet. 2012 wurde die Prognose für 2020 auf 1,27 Mrd. t CO_{2e} reduziert (GeSI/The Boston Consulting Group 2012, S. 11). Eine Ausweitung des Prognosehorizonts in einer Folgestudie auf 2030 erbrachte für das Jahrzehnt nach 2020 keinen weiteren Anstieg (GeSI/Accenture Strategy 2015, S. 10). Im vorerst letzten Bericht dieser Serie wird für 2030 sogar nur noch von 0,9 Mrd. t CO_{2e} ausgegangen (GeSI/ Deloitte 2019, S. 18).

2.3 Status quo: Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland

2.3.1 Methodische Grundlagen

Rechenzentren sind sehr komplexe technische Gebilde, in denen vielfältige IKT-Anwendungen auf Software und Hardware realisiert werden. Zum Betrieb der eigentlichen IKT-Komponenten wie Server, Datenspeichersysteme und Netzwerktechnik ist zusätzlich eine umfangreiche gebäudebezogene Infrastruktur notwendig. Diese dient u. a. dazu, die IKT-Geräte zu kühlen, eine USV zu gewährleisten, unberechtigten Zutritt zu vermeiden und vor Bränden zu schützen. Einsatzzweck, Größe und Aufbau von Rechenzentren können sehr unterschiedlich sein. Viele kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und andere kleinere Organisationen betreiben kleine Serverräume als Rechenzentren für ihre unternehmensinternen Anwendungen. Daneben existiert auch eine Vielzahl von IKT-Dienstleistern, die in kleinen oder auch größeren Rechenzentren IKT-Geräte oder -Anwendungen für ihre Kunden betreiben. Das Spektrum der Rechenzentren reicht bis zu Supercomputern in Forschungseinrichtungen oder Hyperscale-Cloudrechenzentren von Internetunternehmen wie Google, Facebook, Microsoft oder Amazon. In den größten Rechenzentren werden auf Flächen von mehreren Fußballfeldern Zehntausende von Servern betrieben. Solche Rechenzentren erreichen oft den Strombedarf einer mittelgroßen Stadt.

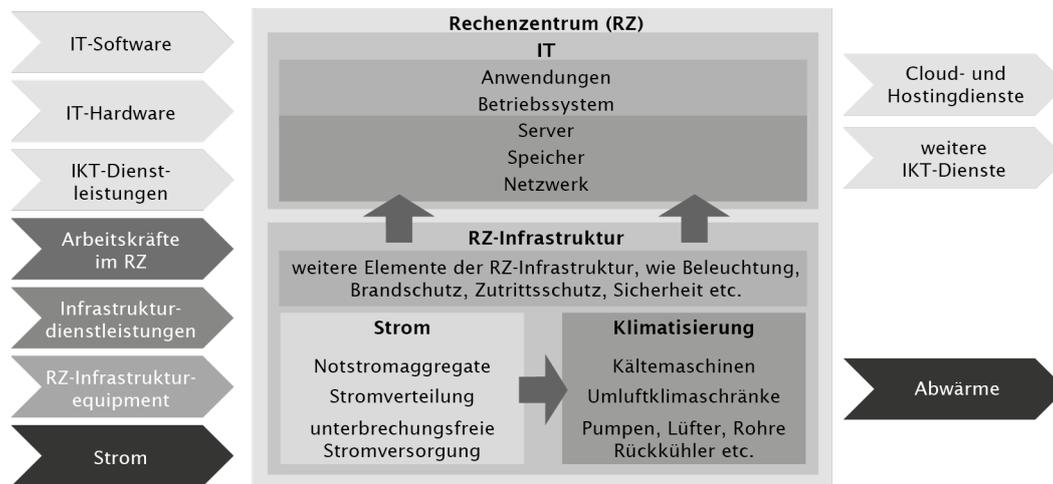
Definition Rechenzentrum

Mit Einführung der Norm DIN EN 50600 im Jahr 2012 existiert eine Definition des Begriffs Rechenzentrum, die zumindest in Europa mehr und mehr Anwendung findet.

Die Norm definiert ein Rechenzentrum wie folgt: Struktur oder Gruppe von Strukturen, die für die zentrale Aufnahme, die Verbindung und den Betrieb von Einrichtungen der Informationstechnik und der Netzwerktelekommunikation, welche Dienste zur Datenspeicherung, Datenverarbeitung und Datenübertragung bereitstellen, bestimmt ist, sowie alle Einrichtungen und Infrastrukturen für die Stromversorgung und die Regelung der Umgebungsbedingungen zusammen mit den notwendigen Niveaus der Ausfallsicherheit und die Sicherung, die zur Bereitstellung der gewünschten Dienstverfügbarkeit benötigt werden.

Diese Definition fasst den Begriff eines Rechenzentrums sehr weit. Beispielsweise müsste ein Großteil der Netzwerkinfrastrukturen von Festnetz und Mobilfunknetz ebenfalls als Rechenzentren betrachtet werden, da auch in den verteilten Strukturen dieser Netze zunehmend Daten gespeichert und verarbeitet werden. Daher werden in diesem Bericht explizit nur solche Einrichtungen gemäß Definition der DIN EN 50600 als Rechenzentren verstanden, in denen die Datenspeicherung bzw. -verarbeitung der wesentliche Zweck ist. Die Abbildung 2.4 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Rechenzentrums und dessen Einbettung in die IKT-Wertschöpfungskette (mittels Input und Output) dar. Energie wird im Rechenzentrum sowohl in der IKT selbst (Server, Speicher, Netzwerk) als auch in der gebäudebezogenen Infrastruktur (Stromversorgung, Klimatisierung etc.) benötigt.

Abb. 2.4 Aufbau eines Rechenzentrums mit Input und Output



Quelle: Hintemann/Clausen 2018a, S. 16

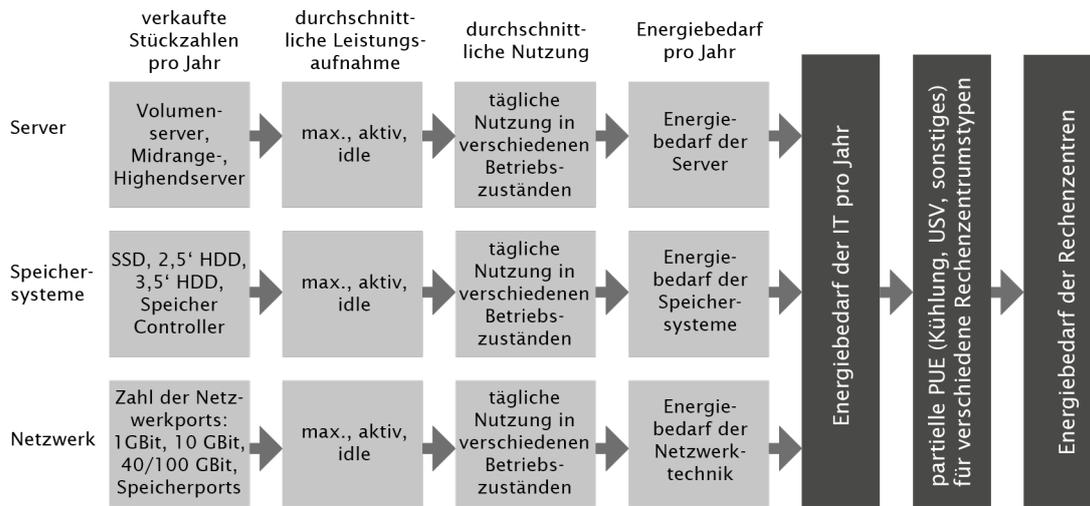
Struktur des Berechnungsmodells und Eingangsdaten

Da es zum Energieverbrauch von Rechenzentren weder amtliche Statistiken noch anderweitige verlässliche Daten gibt, stellt die Bestimmung des nationalen oder gar weltweiten Energiebedarfs der Rechenzentren eine methodische Herausforderung dar.¹⁴ Viele Unternehmen sind äußerst zurückhaltend, was die Veröffentlichung von Betriebsinterna ihrer Rechenzentren angeht, da diese unter Umständen zur kritischen Infrastruktur gezählt werden.

Um den Energiebedarf der Rechenzentren dennoch belastbar abschätzen zu können, ist daher ein modellbasierter Ansatz erforderlich. Dazu werden auf Basis von verfügbaren Daten zu den Verkäufen von IKT-Hardware Hochrechnungen zum Bestand an IKT-Komponenten vorgenommen. Aus den technischen Daten zum Energieverbrauch der Komponenten kann dann für bestimmte Nutzungsmuster (Auslastung der Komponenten im Zeitverlauf) der Energiebedarf der IKT in Rechenzentren ermittelt werden. Hinzu kommt der Energiebedarf für Kühlung, USV und sonstige gebäudebezogene Infrastruktur (Beleuchtung, Brandschutz etc.). Die Struktur dieses Ansatzes ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Dieses methodische Vorgehen wird in zahlreichen nationalen und internationalen Studien angewendet (Hintemann et al. 2010; Hintemann/Hinterholzer 2019; Koomey 2008; Malmodin/Lunden 2018; Prakash et al. 2014a; Shehabi et al. 2016; van Heddeghem et al. 2014).

¹⁴ Hier und im Folgenden ist mit »Energiebedarf« der Strombedarf gemeint.

Abb. 2.5 Struktur des Modells zur Bestimmung des Energiebedarfs von Rechenzentren



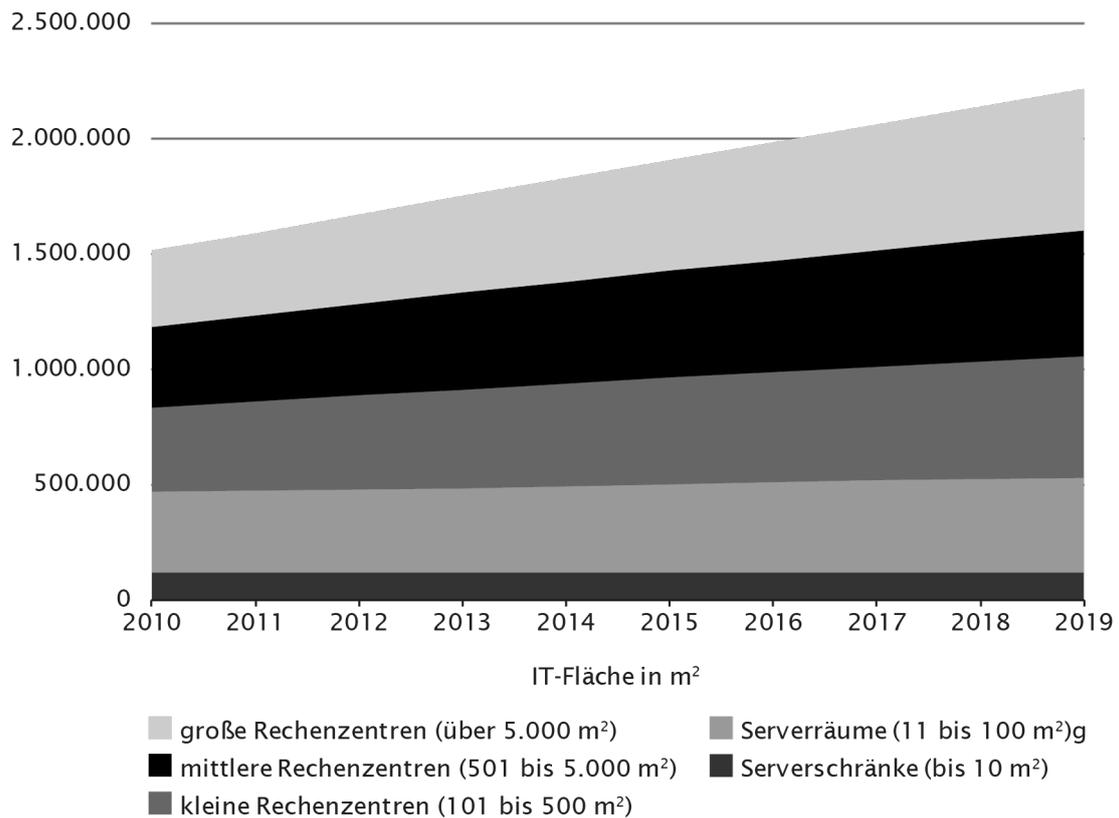
Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 27

Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, dass die notwendigen Eingangsdaten teils schwer zu beschaffen sind bzw. Daten aus unterschiedlichen Quellen stark voneinander abweichen können. So weisen etwa Marktdaten zu den Verkäufen von Servern oder Speichersystemen Differenzen von bis zu 100% auf (Bio by Deloitte/Fraunhofer IZM 2015; Borderstep Institut 2019, S. 26). Auch bei den typischen Nutzungsmustern liegen keine gesicherten Daten vor, sodass diesbezügliche Annahmen in den verschiedenen Studien teilweise deutlich voneinander abweichen. Dessen ungeachtet ist der hier verwendete modellbasierte Ansatz die verlässlichste Methode zur Bestimmung des Energiebedarfs von Rechenzentren. Die in diesem Bericht dargestellten Berechnungen beruhen auf dem vom Borderstep Institut entwickelten Modell, das seit 10 Jahren laufend aktualisiert und validiert wird (Borderstep Institut 2019). Auch die im Jahr 2015 für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) angefertigte Studie zur Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland von Stobbe et al., die im Folgenden als Referenz herangezogen wird, basiert auf diesem Modell.

2.3.2 Bestand an Rechenzentren in Deutschland

Der Bestand an Rechenzentren in Deutschland, wie er sich auf Basis der Berechnungen des Borderstep Instituts darstellt (Hintemann 2017a; Hintemann/Clausen 2014), ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Hierbei wurden Rechenzentren in fünf Größenklassen gemäß den IT-Flächen unterteilt (ein neben der Anzahl der installierten Server bzw. der elektrischen Anschlussleistung übliches Maß für die Größe von Rechenzentren). Es ist festzustellen, dass das Wachstum vor allem in den größeren Rechenzentrumsklassen stattfindet.

Abb. 2.6 Bestand an Rechenzentren in Deutschland nach Größenklassen

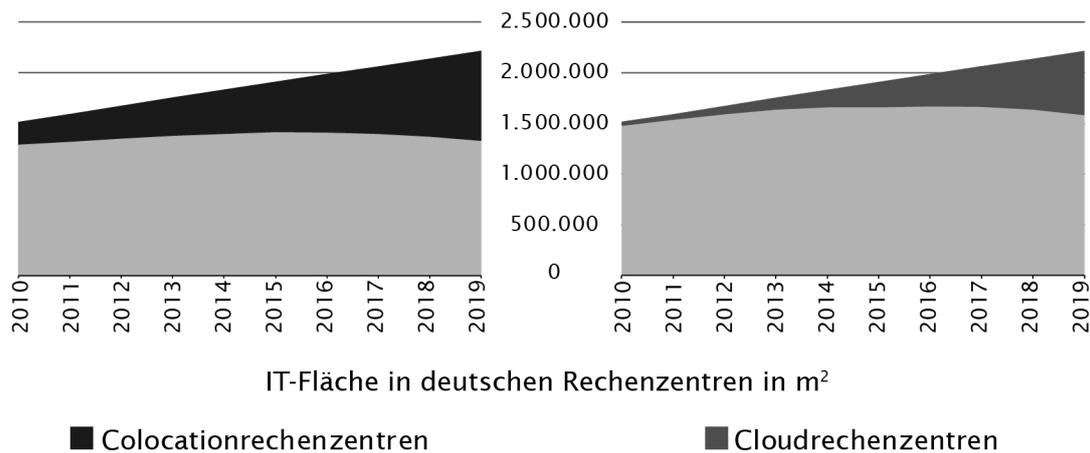


Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 29

Diese Entwicklung hängt eng mit dem Trend zu Colocation- und Cloudrechenzentren zusammen, bei denen es sich zumeist um größere Rechenzentren handelt. Colocationrechenzentren sind Einrichtungen, die ihren Kunden Rechenzentrumsfläche und Versorgungsinfrastruktur bereitstellen. Die eigentlichen IKT-Geräte (Server, Speichersysteme etc.) sind aber im Besitz des Kunden. Es wird geschätzt, dass 2020 mehr als 40% der Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland in Colocationrechenzentren konzentriert sind (Hintemann/Clausen 2018a, 2018b). Ein Wachstumstreiber für Colocationrechenzentren ist die Zunahme an Cloudrechenzentren in Deutschland. Beim Cloudcomputing handelt es sich um den Ansatz, IT-Ressourcen wie Speicherplatz, Rechenleistung oder Anwendungssoftware über das Internet als Dienstleistung zur Verfügung zu stellen. Oft mieten sich internationale Cloudanbieter bei Colocationrechenzentren ein.

In Abbildung 2.7 ist die Entwicklung der Anteile von Colocation- und Cloudrechenzentren in Deutschland dargestellt, wie sie von den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019, S. 28) abgeschätzt wurde.

Abb. 2.7 Anteil von Colocation- und Cloudrechenzentren in Deutschland



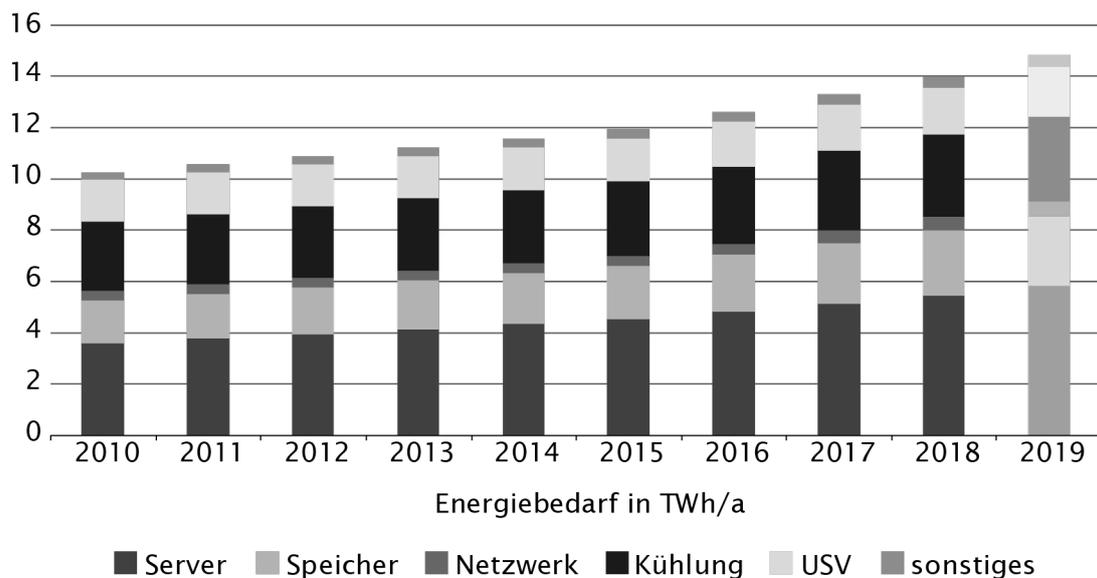
Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 28

2.3.3 Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2019

Zur Berechnung des aktuellen Energiebedarfs der Rechenzentren wurde die Studie zur Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland von Stobbe et al. (2015b) mithilfe aktueller Verkaufszahlen von IKT-Hardware aktualisiert. Durch die voranschreitende Digitalisierung wurde zwischen 2015 und 2019 deutlich mehr IKT-Hardware verkauft als noch 2015 prognostiziert wurde. In Abbildung 2.8 ist die so errechnete Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland zwischen 2010 und 2019 dargestellt. Dieser wird 2019 voraussichtlich knapp 14,9 TWh betragen. Zum Vergleich: Stobbe et al. (2015b) prognostizierten für 2020 noch ein Energiebedarf von 14,3 TWh, der nach aktueller Einschätzung allerdings bereits 2019 überschritten wurde.

Der Anstieg des Energiebedarfs ist ursächlich im Wesentlichen den IKT-Komponenten Server, Speicher und Netzwerktechnik zuzuschreiben. Deren Energiebedarf stieg zwischen 2010 und 2019 um über 60% auf 9,1 TWh/a an. Der Energiebedarf von Kühlung, USV und sonstigen gebäudebezogenen Infrastrukturen blieb dagegen nahezu konstant. Damit verbesserte sich der durchschnittliche Power-Use-Efficiency-(PUE-)Wert der Rechenzentren in Deutschland in diesem Zeitraum von 1,8 auf 1,6. Der PUE-Wert zeigt, wie effizient Energie für IT eingesetzt wird, und gibt das Verhältnis des Gesamtenergiebedarfs eines Rechenzentrums zum Energiebedarf der IKT an.

Abb. 2.8 Energiebedarf der Rechenzentren nach Einzelkomponenten



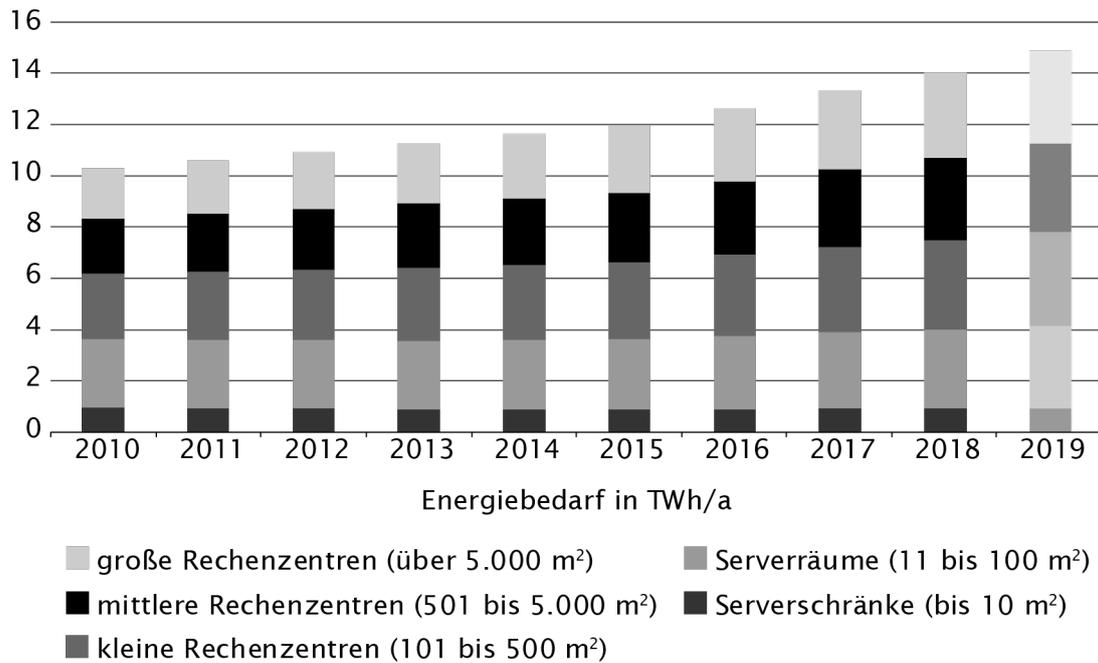
2019: Prognose

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 30

Die Analyse des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland bezüglich der verschiedenen Größenklassen (Abb. 2.9) zeigt, dass der Anstieg in den letzten Jahren vor allem in den Segmenten der Rechenzentren mit einer IT-Fläche von mehr als 100 m² stattgefunden hat. Der Energiebedarf kleinerer Rechenzentren ist dagegen nahezu konstant geblieben (Borderstep Institut 2019, 32 f.).

In Abbildung 2.10 ist die Entwicklung des Anteils der Colocationrechenzentren am Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland dargestellt. Colocationrechenzentren erweisen sich dabei als wichtiger Treiber für den steigenden Energiebedarf. Allerdings ist deren Energiebedarf im Vergleich zu ihrem Flächenzuwachs (Abb. 2.7) in den letzten Jahren nicht ganz so schnell gestiegen, u. a. da es sich dabei um vergleichsweise moderne und damit energieeffiziente Rechenzentren handelt. Der Energiebedarf von Nichtcolocationrechenzentren ist im betrachteten Zeitraum von 2010 bis 2019 praktisch konstant geblieben.

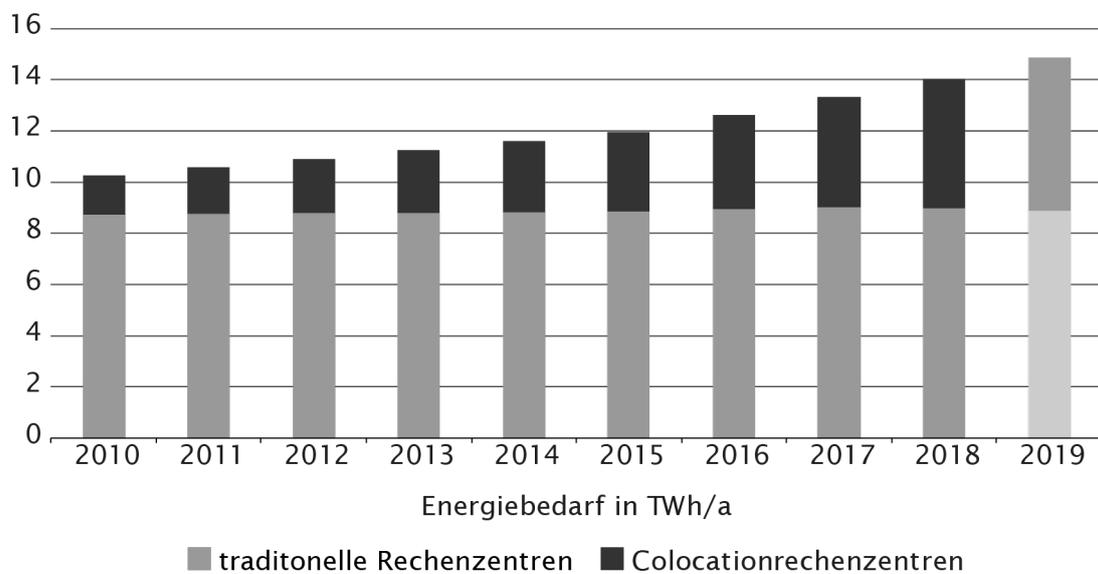
Abb. 2.9 Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland nach Größenklassen



2019: Prognose

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 33

Abb. 2.10 Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland: Anteil der Colocationrechenzentren

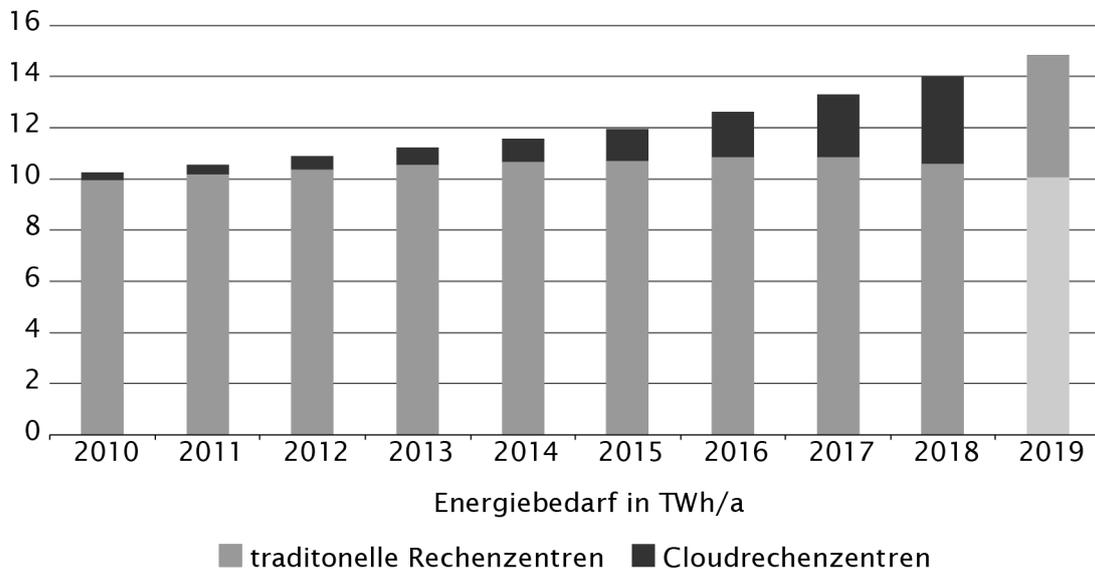


2019: Prognose

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 31

Die Abbildung 2.11 zeigt den Anteil des Energiebedarfs von Cloudrechenzentren am Energiebedarf aller Rechenzentren in Deutschland. Dieser stieg deutlich an, auch wenn bislang keine großen Hyperscale-Cloudrechenzentren in Deutschland errichtet wurden.

Abb. 2.11 Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland: Anteil der Cloudrechenzentren



2019: Prognose

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 32

2.3.4 Abschätzung der aus Deutschland heraus im Ausland induzierten Energiebedarfe von Rechenzentren

Bei der Nutzung von IKT-Dienstleistungen in Deutschland werden nicht nur Ressourcen im Inland beansprucht, sondern wegen der ausgeprägten internationalen Vernetzung des Digitalsektors auch erhebliche Energiebedarfe im Ausland induziert. Die Abschätzung dieser Energiebedarfe ist methodisch sehr schwierig, da die verfügbare Wissens- und Datenbasis hierfür äußerst lückenhaft ist. Weder liegen hinreichend detaillierte Informationen zum grenzüberschreitenden Datenverkehr vor noch sind die Charakteristika von konsumentenbezogenen bzw. geschäftlichen IKT-Anwendungen und deren Energieverbräuche genau genug bekannt. Daher kann im Rahmen dieses Berichts nur eine verhältnismäßig grobe Abschätzung anhand von Plausibilitätsüberlegungen erfolgen.

Es erscheint aufgrund der Struktur der internationalen IKT-Diensteanbieter, die ihre großen Rechenzentren insbesondere in den USA und in anderen europäischen Staaten wie Schweden, Finnland, Dänemark, Irland und den Niederlanden betreiben (Hintemann/Clausen 2018a), plausibel, dass Deutschland eine negative Datentransferbilanz mit dem Ausland aufweist.

Zur Abschätzung des aus Deutschland heraus im Ausland induzierten Energiebedarfs von Rechenzentren wird zunächst eine Unterscheidung von verschiedenen Anwendungen vorgenommen. Durch das Unternehmen Cisco (2018a, S. 21) publizierte Daten geben Aufschluss darüber, welche Anwendungen welche Anteile der Kapazitäten von Rechenzentren nutzen. Dabei belegen Geschäftsanwendungen aktuell etwa drei Viertel der Kapazitäten von Rechenzentren. Diese werden unterschieden in Rechenanwendungen (Compute), Anwendungen zur Zusammenarbeit (Collaboration), Datenbank-, Analyse- und Internet of Things (IOT; Internet der Dinge)¹⁵-Anwendungen sowie Enterprise Resource Planning (ERP; Ressourcenplanung für Unternehmen)¹⁶ und anderen Geschäftsanwendungen. Der Anteil der Konsumenten Anwendungen lag 2016 bei 24% und steigt voraussichtlich bis

¹⁵ Bezeichnet die Vernetzung von realen (Alltags-)Gegenständen untereinander und mit der virtuellen Welt.

¹⁶ beispielsweise Warenwirtschaftssysteme

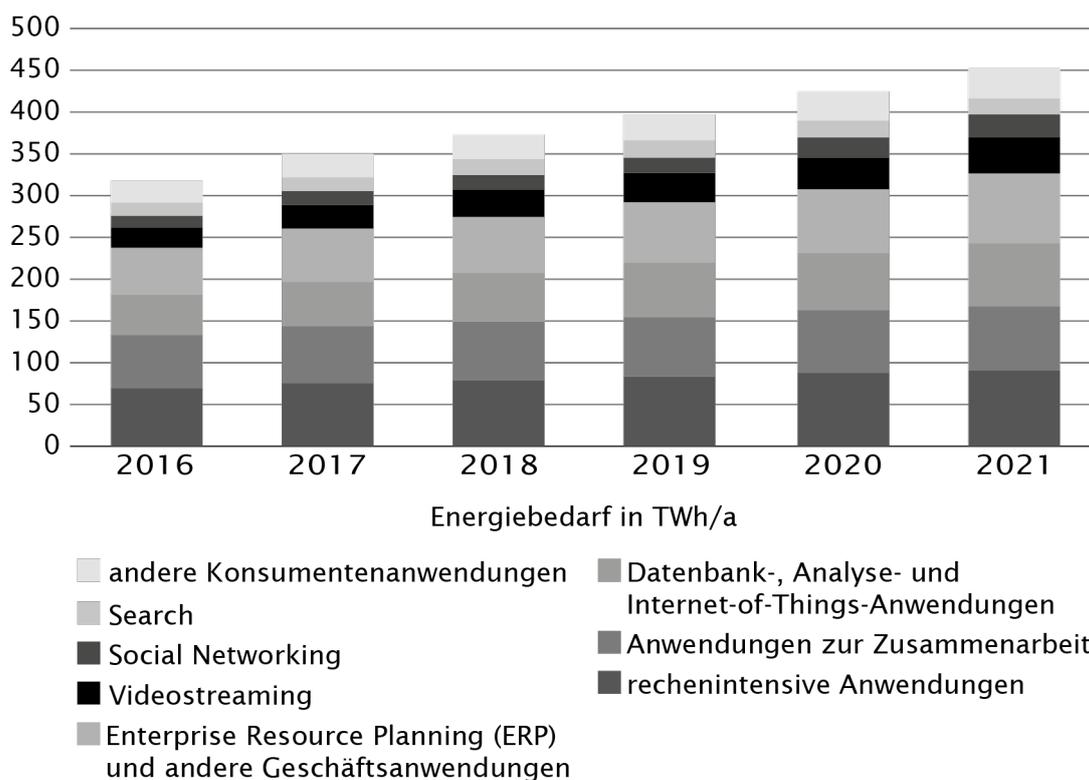
2021 auf 27% an. Hier wird zwischen Videostreaming, Social Networking, Suche und andere Konsumenten- anwendungen unterschieden. Diese Aufteilung wurde verwendet, um den von Hintemann und Hinterholzer (2019) errechneten weltweiten Energiebedarf der Rechenzentren den verschiedenen Anwendungsarten zuzuordnen (Abb. 2.12).

Wachstumstreiber sind insbesondere die Konsumenten- anwendungen, vor allem die Bereiche Social Net- working und Videostreaming. Beispielsweise stieg der Energiebedarf für Videostreaming laut Prognose im Zeitraum von 2016 bis 2021 um 80% von 24 auf 43 TWh/a. Im Bereich der Unternehmensanwendungen wächst etwa der Sektor Enterprise Resource Planning (ERP) und andere Geschäftsanwendungen deutlich an. Der Energiebedarf stieg hier um etwa 50% von 57 auf 84 TWh/a.

Für eine grobe Abschätzung der im Ausland induzierten Energieverbräuche werden im Folgenden nur Kon- sumenten- anwendungen betrachtet. Geschäftsanwendungen spielen aus zwei Gründen eine vernachlässigbare Rolle: Erstens beträgt der Anteil von Geschäftsanwendungen am Internetverkehr in Deutschland lediglich 22% (Cisco 2018c, 2018d) und zweitens wird davon ausgegangen, dass internetbasierte Geschäftsanwendungen über- wiegend im Inland verbleiben. Für diese These spricht, dass über 70% der Unternehmen in Deutschland angeben, Clouddienste nur zu nutzen, wenn die Rechenzentren der Anbieter in Deutschland stehen (Bitkom/ KPMG 2019, S. 5).

Bei den Anwendungen für die Bereiche Social Networking und Suche lag der Stromverbrauch in den Re- chenzentren im Jahr 2019 weltweit bei jährlich 40 TWh (Abb. 2.12). Zwar ist auch Videostreaming ein wesentli- cher Verbrauchstreiber (Cook et al. 2017, S. 19), allerdings ist die Bestimmung des Ortes, an dem der Energiebe- darf für Videostreaming entsteht, sehr schwierig. Hier werden Content Delivery Networks (CDN) eingesetzt, die es ermöglichen, große Mediendateien über ein Netz von regional verteilten Servern effizient zu verbreiten.

Abb. 2.12 Aufteilung des Energiebedarfs der Rechenzentren weltweit auf verschiedene Anwendungen



Quelle: nach Borderstep Institut 2019, S. 35

Daher konnten für die im Ausland induzierten Energiebedarfe der Rechenzentren nur die Bereiche Social Networking und Suche herangezogen werden. Der ermittelte Wert ist somit eher als untere Grenze anzusehen. Hierbei wurde angenommen, dass diese Dienste sämtlich im Ausland erbracht werden, denn die relevanten großen Anbieter betreiben den Großteil ihrer Rechenzentren außerhalb Deutschlands (Cook et al. 2017, S. 86 ff.). Entsprechend dem Anteil Deutschlands am weltweiten Internetverkehr von privaten Konsumenten von 2,7% (2017) (Borderstep Institut 2019, S. 35)¹⁷ würde der im Ausland induzierte Energiebedarf im Jahr 2019 etwa 1,1 TWh betragen. Auf Basis dieser Überlegungen schätzen die Gutachter des Borderstep Instituts (2019, S. 36 f.) den Energiebedarf, der durch die Internetnutzung in Deutschland zusätzlich im Ausland induziert wird, auf mindestens rund 10% des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland (im Jahr 2019 also etwa 1,5 TWh).

2.4 Status quo: Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland

2.4.1 Methodische Grundlagen

Wie bereits erwähnt, gibt es ein separates Telefonnetz heute praktisch nicht mehr. Die existierenden Fest- und Mobilnetze sind quasi Deckungsgleich mit dem Internet und befördern Telefongespräche durch VoIP mit. Das Festnetz mit seinen Zugangsnetzen basiert heute hauptsächlich auf verschiedenen Varianten der kupferbasierten DSL-Technik (Asymmetric Digital Subscriber Line – ADSL, Very High Speed Digital Subscriber Line – VDSL/digitaler Teilnehmeranschluss für sehr hohe Geschwindigkeiten etc.), auf dem TV-Kabelnetz mit Kupferkoaxialkabeln (Data Over Cable Service Interface Specification – DOCSIS) sowie auf einer in Deutschland nur langsam wachsenden Zahl direkter Glasfaseranschlüsse (FTTH/FTTB). Hinzu kommen Aggregations- und Kernnetze mit ihren Netzknoten. In ihrem Jahresbericht dokumentiert die Bundesnetzagentur (2019a, S. 52) für das Jahr 2018 noch ca. 4,7 Mio. klassische analoge und ISDN-Anschlüsse, 25,5 Mio. DSL/VoIP-Anschlüsse, 7,6 Mio. Anschlüsse über das Kabelnetz und 1,0 Mio. FTTH/FTTB-Glasfaseranschlüsse. Im Bereich des Mobilfunks gibt es in Deutschland (drittes Quartal 2019) ca. 143 Mio. Teilnehmer/innen. Diese Zahl entspricht den aktiven SIM-Karten der drei Mobilfunknetzbetreiber in Deutschland (Deutsche Telekom 46,2 Mio., Vodafone 50,7 Mio. sowie Telefónica 46,0 Mio.) (Bundesnetzagentur 2020c). Alle anderen Mobilfunkanbieter kooperieren mit einem der Funknetzbetreiber.

Zur Abschätzung des aktuellen Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze wird im Folgenden der modellbasierte Ansatz verwendet, der auch in der Studie von Stobbe et al. (2015b) genutzt wurde. Aufgrund der unterschiedlichen Infrastrukturen von Fest- und Mobilfunknetz sind deren Energiebedarfe getrennt zu ermitteln.

Für das Mobilfunknetz (siehe Stobbe et al. 2015b, S. 96 ff.) wurde der Bestand an Basisstationen der Funkgenerationen 2G bis 5G aus den verfügbaren Marktdaten ermittelt bzw. geschätzt, ebenso wie der Bestand an Hardware für das Mobilfunk-Kernnetz. Zusammen mit Daten bzw. Annahmen zur Leistungsaufnahme der verschiedenen Geräte kann dann der Energiebedarf errechnet werden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass kein lastadaptiver Betrieb der Infrastrukturkomponenten stattfindet, sondern dass diese permanent (24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr) aktiv sind.

Ganz analog erfolgte die Berechnung beim Festnetz (Stobbe et al. 2015b, S. 106 ff.), sowie beim Breitbandkabelnetz (Stobbe et al. 2015b, S. 111 ff.), wo der Bestand der verschiedenen Anschlussarten (Festnetz: analog/ISDN, ADSL, VDSL, FTTH/FTTB; Breitbandkabelnetz: TV-Kabel, HFC-Kabel) ermittelt wurde, der zusammen mit den energetischen Eigenschaften der Geräte als Eingangsgröße zur Berechnung der Energiebedarfe diente.

Dass diese Vorgehensweise zu sehr realitätsnahen Ergebnissen führt, lässt sich anhand einer Plausibilitätsprüfung zeigen. 2017 wurden in den deutschen Telekommunikationsnetzen insgesamt 40,4 EB an Daten übertragen (davon 39 EB im Festnetz und 1,4 EB mobil; Bundesnetzagentur 2019b, S. 30, 42). Für die Energieintensität ihrer in Deutschland betriebenen Netze gibt beispielsweise die Deutsche Telekom (Deutsche Telekom 2018, S. 144) einen Wert von 142 kWh/TB an. Insgesamt wurden in den Netzen der Telekom etwa 26,5 EB an IP-Daten (u. a. IP-Telefonie, Internet, IP-TV) im Jahr 2017 übertragen. Nimmt man an, dass auch die Netze der anderen Betreiber mit ähnlicher Energieintensität betrieben werden, errechnet sich für die gesamte IP-Datenübertragung

¹⁷ Unter Bezugnahme auf das Cisco VNI Forecast Highlights Tool (www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html#; 9.3.2021). Die Daten für 2017 sind nicht mehr online verfügbar.

in Deutschland für 2017 ein Energiebedarf von 5,7 TWh. Aus der Studie von Stobbe et al. (2015b, S. 43, Abb. 3.5) lässt sich ein Energiebedarf von etwa 6,4 TWh für alle Telekommunikationsnetze in Deutschland für 2017 ableiten. Da in dieser Studie auch Nicht-IP Datenübertragung berücksichtigt werden, kann eine recht gute Übereinstimmung festgestellt werden.

Eine überschlagsmäßige Abschätzung des Anteils der Mobilfunknetze am Energiebedarf wurde mit Angaben aus den Nachhaltigkeitsberichten von Vodafone vorgenommen: Danach wurden 2017 etwa 2,7 EB an Daten über das Vodafone Mobilnetz übertragen (Vodafone 2017, S. 17). Für die hierfür aufgewendete Energie werden 5.561 GWh (total) sowie nur für die Basisstationen 3.651 GWh angegeben (Vodafone 2019, S. 30). Daraus errechnet sich eine Energieintensität von 2.060 kWh/TB insgesamt bzw. 1.350 kWh/TB, wenn nur die Basisstationen berücksichtigt werden. Gemäß Bundesnetzagentur (2019a, S. 56) wurden in den deutschen Mobilfunknetzen 2017 insgesamt etwa 1,4 EB an Daten übertragen. Damit ergibt sich ein Energiebedarf der Mobilfunknetze zwischen 1,87 TWh (nur Basisstationen) und 2,86 TWh (gesamter Energiebedarf), wenn man annimmt, dass die Energieintensität aller Netzbetreiber derjenigen von Vodafone entspricht. Stobbe et al. (2015b, S. 106) gehen für 2017 von einem Energiebedarf der Mobilfunknetze in Deutschland 1,93 TWh aus (interpoliert). Auch hier kann somit festgestellt werden, dass die Modellierung plausible Ergebnisse liefert.

2.4.2 Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland 2019

Im Folgenden wird auf Grundlage der von Stobbe et al. (2015b) verwendeten Methodik eine aktualisierte Abschätzung des Energiebedarfs des Mobilfunk-, des Fest- sowie des Breitbandkabelnetzes vorgenommen. Dabei wird jeweils die aktuelle Marktentwicklung mit der 2015 prognostizierten Entwicklung verglichen und es werden entsprechende aktualisierte Annahmen für die Berechnungen getroffen.

Energiebedarf des Mobilfunknetzes in Deutschland

Beim Mobilfunk vollzog sich die tatsächliche Marktentwicklung seit 2015 in einigen Punkten anders als in Stobbe et al. (2015b) angenommen. Auf Basis der beobachteten Marktdynamik¹⁸ wurden für die hier vorgenommene Aktualisierung folgende Annahmen getroffen (Tab. 2.2): Zwar entwickelt sich die Gesamtzahl der Mobilfunkanlagen wie in der Prognose von 2015 erwartet. Die Zahl der UMTS-(3G-)Mobilfunkanlagen sinkt aber deutlich schneller als erwartet auf 10.000 im Jahr 2020. Außerdem steigt die Zahl der 5G-Mobilfunkanlagen deutlich langsamer und beträgt im Jahr 2020 erst etwa 1.000. Damit erhöht sich die Zahl der 4G-Mobilfunkanlagen deutlich.

Insgesamt führt die Änderung der Annahmen dazu, dass sich der Energiebedarf des Mobilfunknetzes gegenüber der Prognose von Stobbe et al. (2015b) im Jahr 2020 von 2,423 TWh/a auf 2,487 TWh/a leicht erhöht. Als Jahresenergiebedarf für das Jahr 2019 lässt sich durch lineare Interpolation ein Wert von 2,292 TWh/a im deutschen Mobilfunknetz ermitteln.

¹⁸ Diese Annahmen wurden von den Gutachtern des Borderstep Instituts durch Rückfragen bei einem Mobilfunkbetreiber im August 2019 verifiziert.

Tab. 2.2 Energiebedarf der Mobilfunknetze in Deutschland

	Angaben aus Stobbe et al. 2015b				Daten aktualisiert Borderstep (2019)
<i>Bestand an Mobilfunkanlagen</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2020</i>
2G-Mobilfunkanlagen	65.000	45.000	45.000	30.000	45.000
3G-Mobilfunkanlagen	47.000	45.000	45.000	30.000	10.000
4G-Mobilfunkanlagen	1.000	30.000	67.500	90.000	131.500
5G-Mobilfunkanlagen	0	0	30.000	67.500	1000
gesamt	113.000	120.000	187.500	217.500	187.500
<i>Leistungsaufnahme in W</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2020</i>
2G-Mobilfunkanlagen	850	780	690	600	690
3G-Mobilfunkanlagen	800	780	690	600	690
4G-Mobilfunkanlagen	750	750	690	600	690
5G-Mobilfunkanlagen	-	-	600	600	600
PUE-Faktor	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Mobilfunk Kernnetz</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2020</i>
Bestand RAN	113.000	120.000	187.500	217.500	187.500
Anzahl Netzknoten	4	4	4	4	4
Nutzeranzahl pro Netzknoten	100	100	100	100	100
elektrische Leistungsaufnahme pro Netzknoten (in W)	0,4	0,6	0,8	1,1	0,8
PUE-Faktor	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Nutzungsmuster (alle)</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2020</i>
365 Tage pro Jahr	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv
Stunden pro Tag	24	24	24	24	24
<i>Energiebedarf in TWh/a</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2020</i>
2G-Mobilfunkanlagen	0,814	0,485	0,405	0,221	0,408
3G-Mobilfunkanlagen	0,554	0,485	0,405	0,221	0,091
4G-Mobilfunkanlagen	0,011	0,311	0,608	0,662	1,192
5G-Mobilfunkanlagen	-	-	0,235	0,497	0,008
Mobilfunk Kernnetz	0,266	0,372	0,77	1,178	0,788
gesamt Mobilfunk	1,645	1,654	2,423	2,778	2,487

Quelle: nach Borderstep Institut 2019, S. 43 auf Basis von Stobbe et al. 2015b, S. 97

Energiebedarf des Festnetzes in Deutschland

Der Energiebedarf des Festnetzes wird aus der Zahl der Anschlüsse mit dem jeweiligen Anschlusstyp (Analog/ISDN, ADSL, VDSL, FTTH/FTTB) bestimmt. Hinzu kommt der dadurch ausgelöste Energiebedarf des Kernnetzes (Tab. 2.3). Wie beim Mobilfunknetz wurde auch hier eine Aktualisierung der tatsächlichen Marktentwicklung vorgenommen und mit der von Stobbe et al. (2015b) prognostizierten Entwicklung verglichen.

Grundlage hierfür sind die Angaben der Bundesnetzagentur (2019a, S. 52). Demnach gab es 2018 noch ca. 4,7 Mio. klassische analoge und ISDN-Anschlüsse, 25,5 Mio. DSL/VoIP-Anschlüsse und 1 Mio. FTTH/FTTB-Glasfaseranschlüsse. Die Zahl der VDSL-Anschlüsse betrug 12,6 Mio., also ca. 50% der DSL-Anschlüsse insgesamt (Bundesnetzagentur 2019a, S. 49).

Schreibt man die Marktentwicklung auf Basis dieser Zahlen fort, so kann abgeschätzt werden, dass 2020 ca. 18 Mio. VDSL-Anschlüsse, 8 Mio. ADSL-Anschlüsse sowie 1,6 Mio. FTTH/FTTB-Glasfaseranschlüsse vorhanden sein werden. Sinkt der Bestand an klassischen analogen und ISDN-Anschlüssen weiter wie in den vorangegangenen Jahren, so kann für 2020 ein Bestand von nahezu null angenommen werden.

Im Unterschied zu den Prognosen aus 2015 nimmt somit die Zahl der DSL-Anschlüsse stärker zu. Sie lag 2018 insgesamt schon höher als 2015 für 2020 prognostiziert. Auch die Zahl der FTTH/FTTB-Glasfaseranschlüsse ist 2018 bereits höher als der von Stobbe et al. (2015b) für 2020 prognostizierte Wert.

Auf Basis dieser Annahmen errechnet sich für 2020 ein mit insgesamt 2,719 TWh/a um 10% höherer Jahresenergiebedarf des Festnetzes in Deutschland. Interpoliert man die Entwicklung zwischen 2015 und 2020 (linear) so ergibt sich für 2019 ein Jahresenergiebedarf von 2,629 TWh/a.

Tab. 2.3 Energiebedarf des Festnetzes in Deutschland

	Angaben aus Stobbe et al. (2015b)				Daten aktualisiert (Borderstep 2019)
	2010	2015	2020	2025	2020
<i>Anschlüsse in Mio.</i>					
analog/ISDN	30,473	15,703	0	0	0
ADSL	22,77	18,8	7,35	0	8
VDSL	0,23	4,7	17,15	25	18
FTTH/FTTB	0,14	0,4	0,805	3	1,6
gesamt	23,14	23,9	25,305	28	27,6
<i>Leistungsaufnahme Zugangnetz</i>					
analog/ISDN-Anschluss (in W)	3	3	3	3	3
ADSL-Anschluss (in W)	2	2	2	2	2
VDSL-Anschluss (in W)	5	5	5	5	5
FTTH/FTTB-Anschluss (in W)	6	6	6	6	6
PUE-Faktor (Aufschlagsfaktor für Kühlungs- und Stromversorgungsinfrastruktur)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Leistungsaufnahme Kernnetz</i>					
Anzahl Netzknoten	4	4	4	4	4
elektrische Leistungsaufnahme pro Netzknoten pro Nutzer (in W)	0,4	0,6	0,8	1,1	0,8

	Angaben aus Stobbe et al. (2015b)				Daten aktualisiert (Borderstep 2019)
	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>PUE-Faktor</i>	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Nutzungsmuster (alle)</i>	2010	2015	2020	2025	2020
365 Tage pro Jahr	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv
Stunden pro Tag	24	24	24	24	24
<i>Energiebedarf in TWh/a</i>	2010	2015	2020	2025	2020
analog/ISDN-Netze	1,347	0,651	0	0	0,000
ADSL-Zugangsnetz	0,671	0,52	0,192	0	0,216
VDSL-Zugangsnetz	0,017	0,325	1,119	1,533	1,214
FTTH/FTTB Zugangsnetz	0,012	0,033	0,063	0,221	0,129
Festnetz Kernnetz	0,545	0,741	1,039	1,516	1,161
gesamt Festnetz	2,592	2,27	2,413	3,27	2,719

Quelle: nach Borderstep Institut 2019, S. 45 auf Basis von Stobbe et al. 2015b, S. 106

Energiebedarf des Breitbandkabelnetzes in Deutschland

Für die Berechnung des Energiebedarfs des Breitbandkabelnetzes werden zwei Anschlusstypen (TV-Kabel, HFC-Kabel) unterschieden (Tab. 2.4).¹⁹ Hinzu kommt wieder der assoziierte Energiebedarf des Kernnetzes. Gegenüber der Studie aus dem Jahr 2015 verlief die Entwicklung der HFC-Anschlüsse deutlich langsamer. Die Bundesnetzagentur (2019a, S. 52) gibt für 2018 7,63 Mio. HFC-Anschlüsse bei einer Steigerung von ca. 0,4 Mio. p. a. an. Nach einer im Auftrag der Landesmedienanstalten durchgeführten Erhebung gab es 2018 insgesamt etwa 17,5 Mio. Kabelanschlüsse (Kantar/ die mediananstalten - ALM 2019, S. 11).

Auf Basis dieser Entwicklung wird abgeschätzt, dass sich die Zahl der Kabelanschlüsse insgesamt bis zum Jahr 2020 nur auf 18,5 Mio. erhöhen wird und nicht wie 2015 angenommen auf 19 Mio. Die Zahl der HFC-Kabelanschlüsse wird bei Fortschreibung der Wachstumsraten bis 2020 nur auf 8,5 Mio. steigen. Dafür bleibt die Zahl der TV-Kabelanschlüsse mit 10 Mio. auf einem deutlich höheren Niveau als 2015 prognostiziert. Insgesamt ergibt sich mit 2,236 TWh/a im Jahr 2020 ein minimal geringerer Energiebedarf als im Jahr 2015 prognostiziert (2,268 TWh/a). Für 2019 ergibt sich durch Interpolation ein Jahresenergiebedarf von 2,198 TWh/a.²⁰

¹⁹ Mit der vollständigen Umstellung des TV-Kabels auf digitale Signale Mitte 2019 (www.verbraucherzentrale.de/wissen/digitale-welt/fernsehen/analoges-kabelfernsehen-bis-2019-abgeschaltet-was-jetzt-wichtig-ist-23763; 17.3.2021) verschwimmt diese Unterscheidung, denn der digitale TV-Übertragungsstandard DVB-C ist ebenfalls IP-basiert (https://de.wikipedia.org/wiki/Internet_Protocol_Television; 17.3.2021).

²⁰ Berücksichtigt man nur das für die IP-Datenübertragung genutzte HFC-Kabel und klammert damit die TV-Datenübertragung aus, so errechnen sich 0,956 TWh/a für 2019.

Tab. 2.4 Energiebedarf des Kabelnetzes

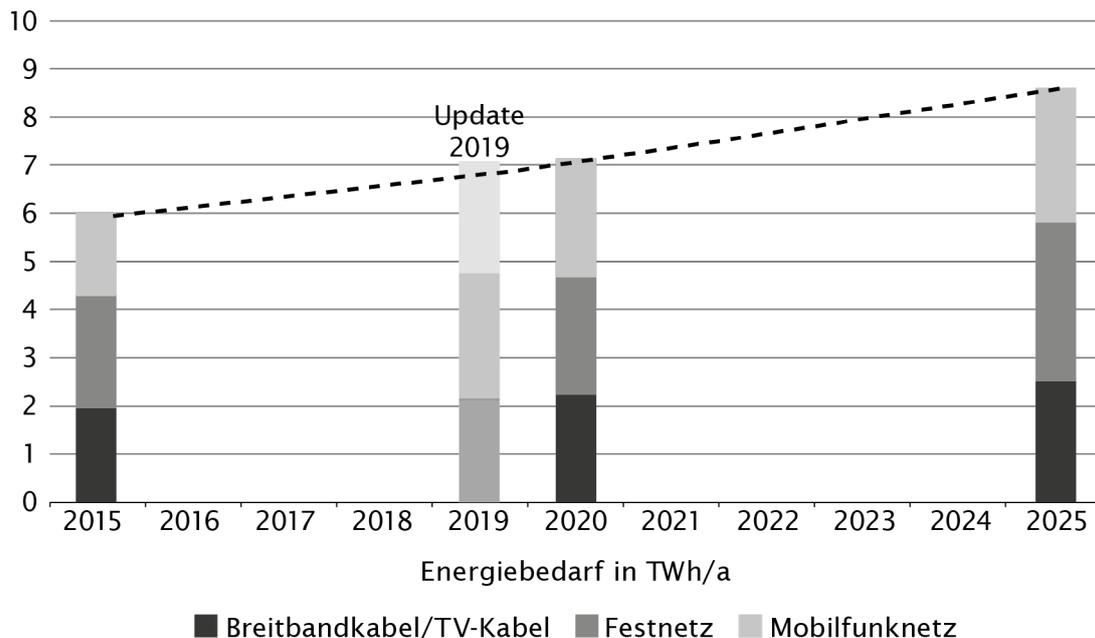
	Originaldaten der Studie zur Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs (Stobbe et al. 2015b)				Daten aktualisiert Borderstep 2019)
	2010	2015	2020	2025	2020
<i>Anschlüsse in Mio.</i>					
TV-Kabel	17	11,7	6,4	0	10
HFC-Kabel (Breitband)	2,8	6,3	12,6	20	8,5
gesamt	19,8	18	19	20	18,5
<i>Leistungsaufnahme Zugangsnetz</i>					
TV-Kabel/HFC-Anschluss (in W)	6	6	6	6	6
PUE-Faktor	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Leistungsaufnahme Kernnetz</i>					
Anzahl Netzknoten	4	4	4	4	4
elektrische Leistungsaufnahme pro Netzknoten pro Nutzer (in W)	0,4	0,6	0,8	1,1	0,8
PUE-Faktor	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5
<i>Nutzungsmuster (alle)</i>					
365 Tage pro Jahr	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv	aktiv
Stunden pro Tag	24	24	24	24	24
<i>Energiebedarf in TWh/a</i>					
Breitbandkabel Zugangsnetz	1,75	1,493	1,487	1,472	1,459
Breitbandkabel Kernnetz	0,467	0,558	0,78	1,083	0,778
gesamt	2,217	2,051	2,268	2,554	2,236

Quelle: nach Borderstep Institut 2019, S. 47 auf Basis von Stobbe et al. 2015b, S. 111

2.4.3 Energiebedarf der Telekommunikationsnetze gesamt

In Abbildung 2.13 sind die Ergebnisse der aktualisierten Berechnung der Energiebedarfe der Telekommunikationsnetze in Deutschland im Vergleich zu den Prognosen von Stobbe et al. (2015b) zusammenfassend dargestellt. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, ist der Energiebedarf – wie im Jahr 2015 prognostiziert – angestiegen. Der tatsächliche Anstieg war sogar etwas stärker als prognostiziert. Für das Jahr 2019 ergibt sich in der Summe ein Jahresenergiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland von 7,119 TWh/a.

Abb. 2.13 Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland



Vergleich der aktuellen Berechnungen mit den Ergebnissen von Stobbe et al. (2015b)

Quellen: Borderstep Institut 2019, S. 48

Mit den Daten der Bundesnetzagentur zum Datenvolumen in Deutschland lässt sich nun die Energieintensität der Netze errechnen. Für die Mobilfunknetze wird für das Jahr 2018 ein Datenvolumen von 1.993 Mio. GB angegeben (Bundesnetzagentur, 2019a, S. 96). Für den Jahresenergiebedarf des Mobilfunknetzes für 2018 erhält man durch Interpolation aus den in Kapitel 2.4.2.1 errechneten Werten 2,154 TWh. Somit ergibt sich eine Energieintensität von 1.081 kWh/TB im Mobilfunknetz im Jahr 2018.

Für das gesamte Festnetz inklusive HFC-Breitbandkabelnetz gibt die Bundesnetzagentur ein Datenvolumen von 45 Mrd. GB in Deutschland im Jahr 2018 an (Bundesnetzagentur 2019a, S. 51)²¹. Mit dem hier bestimmten Energiebedarf dieser Netze von 3,429 TWh im Jahr 2018 ergibt sich so eine Energieintensität von rund 76 kWh/TB.

Im internationalen Vergleich liegt dieser Wert eher im oberen Bereich. Folgt man einer Metaanalyse von Aslan et al. (2018) zu 14 international durchgeführten Studien, so lag im Jahr 2015 die Energieintensität der Datenübertragung im Festnetz typischerweise bei ca. 60 kWh/TB. Für den betrachteten Zeitraum von 2010 bis 2015 stellen sie weiterhin fest, dass sich die Energieintensität etwa alle 2 Jahre halbiert hat, was gut mit ähnlichen Entwicklungen in anderen Bereichen der Informatik korrespondiert (Stichwort Mooresches Gesetz, siehe Glossar). Geht man davon aus, dass sich diese Entwicklung fortsetzt, läge die Energieintensität im Festnetz im Jahr 2019 bei etwa 15 kWh/TB. Dieser Sachverhalt könnte möglicherweise damit erklärt werden, dass der Verbreitungsgrad von Glasfasertechnologien im Zugangnetz in Deutschland (FTTH/FTTB-Glasfaseranschlüsse) deutlich geringer ist als in anderen Ländern (dazu auch Kapitel 3.1.1).

²¹ In diesem Wert ist das über ein geschlossenes Datennetz verursachte Datenvolumen des internetbasierten Fernsehangebots der Deutschen Telekom nicht enthalten

2.5 Szenarien bis zum Jahr 2030

Im Folgenden werden modellgestützte Szenarien für den künftigen Energiebedarf der Rechenzentren sowie der Telekommunikationsnetze entwickelt. Die Basis der Modellierung sind nach wie vor Annahmen zur Markt- bzw. Technologieentwicklung sowie zu den Nutzungsmustern von Komponenten bzw. Geräten.

2.5.1 Rechenzentren

Für den Bereich der Rechenzentren werden mögliche Entwicklungspfade in vier Szenarien dargestellt, in einem Trendszenario sowie in drei weiteren Szenarien, die sich davon in relevanten Aspekten unterscheiden:

- › das *Trendszenario* beschreibt eine Fortführung der Entwicklung wie sie derzeit beobachtet wird. Das wesentliche Charakteristikum ist ein starker Trend weg von traditionellen und hin zu Cloudservern;
- › das *Mehr-Edge-Szenario* beschreibt eine Entwicklung, die eine gewisse Verlagerung von Rechenkapazität an die Ränder des Netzwerks vorsieht;
- › Das *Worst-Case-Szenario* geht davon aus, dass die bisherige Steigerungsrate der Energieeffizienz nicht aufrechterhalten werden kann;
- › im *Best-Case-Szenario* dagegen werden Maßnahmen, die die Energieeffizienz steigern, prioritär umgesetzt.

Grundannahmen

Für alle dargestellten Szenarien werden folgende Grundannahmen getroffen:

- › Ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland ist die Frage, wie viele Rechenzentren künftig in Deutschland betrieben werden. Aufgrund der hohen Strompreise und der langen Genehmigungsprozesse weichen insbesondere große internationale Cloudanbieter oft auf Standorte im Ausland aus. Denkbar wäre eine Entwicklung, dass die Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland in Zukunft drastisch reduziert werden und Deutschland aus dem Ausland mit Rechenzentrumsdienstleistungen versorgt wird. Eine solche Entwicklung könnten negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit und die Souveränität Deutschlands haben (Hintemann/Clausen 2018a). Es wird daher davon ausgegangen, dass in einem solchen Fall politisch gegengesteuert und die Ansiedlung von Rechenzentren gefördert würde. Für die dargestellten Szenarien wird folglich unterstellt, dass der Anteil Deutschlands am europäischen Rechenzentrumsmarkt konstant bleibt.
- › Als eine wesentliche Entwicklung im Bereich der Rechenzentren ist die zunehmende Nutzung von Cloud-dienstleistungen zu sehen. Auf Basis der Prognosen von Cisco für das Jahr 2021 lässt sich ermitteln, dass in diesem Jahr weltweit ca. 80% aller Server als Cloudserver betrieben werden (Cisco 2018a). Auch wenn davon auszugehen ist, dass deutsche Unternehmen weiterhin verhältnismäßig zurückhaltend mit der Nutzung von Clouddiensten sein werden, ist der Trend zum Cloudcomputing sehr stark. Für die Entwicklung bis zum Jahr 2030 wird daher davon ausgegangen, dass sich dieser Trend fortsetzt und der Anteil traditioneller IT-Anwendungen in den Rechenzentren auf 10% zurückgeht.
- › Eng verbunden mit der Nutzung von Clouddiensten ist der Trend zu Hyperscale-Cloudrechenzentren. Cisco geht davon aus, dass bis 2021 mehr als die Hälfte aller Server weltweit in ca. 600 Hyperscale-Cloudrechenzentren installiert sein werden (Cisco 2018a, S. 3). Wie bereits dargestellt, werden sehr große Hyperscale-Rechenzentren in Deutschland bislang nur selten errichtet. Dennoch wird für die Szenarien davon ausgegangen, dass insgesamt auch in Deutschland weiterhin ein Trend zu großen und damit auch oft sehr effizient zu betreibenden Rechenzentren besteht.
- › Parallel dazu werden in Zukunft aber auch immer mehr kleinere Edge-Rechenzentren aufgebaut. Gegenwärtig sind verlässliche Daten zum Wachstum des Segments von Edge-Rechenzentren allerdings kaum verfügbar. Das Marktforschungsunternehmen Transparency Market Research (TMR) geht für das Jahr 2025 von

einem weltweiten Marktvolumen von 15 Mrd. US-Dollar für Micro-Rechenzentren aus (TMR 2018). Damit lässt sich ein Marktvolumen der Micro/Edge-Rechenzentren von etwas weniger als 10% des Gesamtmarktes abschätzen. Wenn unterstellt wird, dass Edge-Rechenzentren aufgrund der geringen Größe meist etwas ineffizienter betrieben werden als große Rechenzentren, so wird der Anteil der Edge-Rechenzentren am Energiebedarf bei ca. 10% liegen.

- › Eine entscheidende Frage für den zukünftigen Energiebedarf der Rechenzentren ist, welche weitere Entwicklung die Energieeffizienz nehmen wird. Gemäß Koomeys Gesetz hat sich die Energieeffizienz der Computer in der Vergangenheit mit einer konstanten Wachstumsrate verbessert. Die Anzahl der Rechenschritte pro verbrauchter kWh verdoppelte sich alle 1,57 Jahre (Koomey et al. 2011, S. 48). Diese Effizienzsteigerung ist im Wesentlichen auf die Miniaturisierung zurückzuführen. Koomeys Gesetz ist daher eng mit Mooreschem Gesetz verknüpft, das die Tatsache beschreibt, dass sich in der Vergangenheit die Rechenleistung von Mikroprozessoren alle etwa 1,5 Jahre verdoppelt hat. Viele Experten gehen aber davon aus, dass sich diese Leistungssteigerungen in Zukunft nicht mehr fortsetzen lassen werden, da die Möglichkeiten zur Miniaturisierung von Bauelementen an physikalische Grenzen stoßen (Li et al. 2019).

Trendszenario

Im Trendszenario werden die zuvor dargestellten absehbaren Entwicklungen im Rechenzentrumsbereich eintreten. Die Energieeffizienz wird weiter wie in der Vergangenheit deutlich ansteigen. Es wird zu einer Konzentration von Servern in großen, effizienten Rechenzentren kommen. Der Anteil von Nichtcloudrechenzentren wird deutlich zurückgehen und 2030 nur noch ca. 10% der Rechenzentrumskapazitäten ausmachen. Es werden zunehmend Edge-Rechenzentren aufgebaut. Bei Fortschreibung des zuvor dargestellten Trends zu Edge Computing werden sich bis 2030 knapp 20% der Rechenzentrumskapazitäten in Edge-Rechenzentren befinden.

Mehr-Edge-Szenario

Im Mehr-Edge-Szenario steigt die Zahl der Edge-Rechenzentren insbesondere aufgrund der Einführung autonomen Fahrens und vermehrten Industrie 4.0 Anwendungen deutlich stärker an als im Trendszenario. Bis zum Jahr 2030 befinden sich fast 40% der Rechenzentrumskapazitäten in Edge-Rechenzentren. Aufgrund deren vergleichsweise geringeren Effizienz erhöht sich entsprechend der Energiebedarf der Rechenzentren im Vergleich zum Trendszenario.

Worst-Case-Szenario

Im Worst-Case-Szenario wird davon ausgegangen, dass sich die Energieeffizienz der IKT durch das Ende des Mooreschen Gesetzes nur langsamer als in der Vergangenheit steigern lässt. Die Transformation von Rechenleistung in effiziente Cloudrechenzentren findet langsamer als im Trendszenario statt. Edge-Rechenzentren werden verhältnismäßig ineffizient betrieben. Damit steigt die Menge an installierter Hardware und sinkt die durchschnittliche Effizienz der Geräte. Insgesamt steigt sowohl der Energiebedarf aufseiten der IKT-Hardware der Rechenzentren als auch der der Infrastrukturen für Kühlung, Klimatisierung und Stromversorgung an.

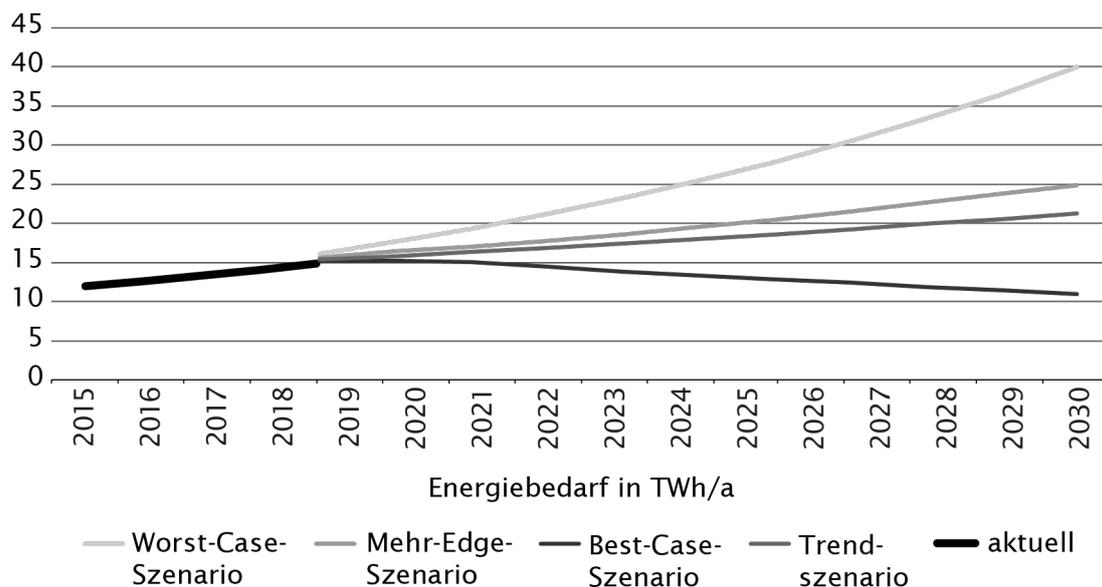
Best-Case-Szenario

Im Best-Case-Szenario wird in der Zukunft ein stärkerer Anstieg der Energieeffizienz erreicht. Mögliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung werden konsequent genutzt. Es erfolgt eine deutliche Konzentration von Rechenleistung in hocheffizienten Großrechenzentren. Auch in kleineren Rechenzentren und Edge-Rechenzentren wird durch die Nutzung von Flüssigkühlung und freier Kühlung (Kap. 3.1.2) die Energieeffizienz deutlich gesteigert. Im Effizienzzenario sinkt die Zahl der Geräte, weil diese besser ausgelastet und die Rechenleistung noch stärker verdichtet wird. Auch die Infrastruktur für Kühlung, Klimatisierung und Stromversorgung benötigt deutlich weniger Energie.

Ergebnisse

Mithilfe des Borderstep-Modells (Kap. 2.3.1) ergeben sich die in Abbildung 2.14 dargestellten möglichen Entwicklungen für den Energiebedarf der Rechenzentren bis zum Jahr 2030. Im Trendfall wird der Energiebedarf der Rechenzentren weiter bis auf 21 TWh/a ansteigen. Für den Best Case ist ein Absinken des Energiebedarfs auf ca. 11 TWh/a möglich. Damit würde fast das Niveau aus dem Jahr 2010 erreicht. Im Worst Case steigt der Energiebedarf bis auf 40 TWh/a an. Das wäre eine Vervielfachung des Energiebedarfs von 2010 bis 2030. Ein starkes Wachstum im Segment der Edge-Rechenzentren kann dazu führen, dass sich der Energiebedarf der Rechenzentren bis auf 25 TWh/a im Jahr 2030 erhöht, das wären 4 TWh/a mehr als im Trendfall.

Abb. 2.14 Szenarien zum Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland bis 2030



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 53

2.5.2 Telekommunikationsnetze

Für die Szenarien der künftigen Entwicklung des Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze in Deutschland ist der bei den Rechenzentren gewählte Ansatz über eine Prognose der Hardwareausstattung und deren Nutzung mangels verfügbarer belastbarer Eingangsdaten nicht gangbar. Daher wird der Energiebedarf hier aus den beiden Parametern Datenvolumen und Energieintensität (d. h. benötigte kWh für den Transport von einem Terabyte Datenvolumen) ermittelt. Für die Abschätzung dieser Werte und ihrer künftigen Entwicklung müssen diverse Annahmen getroffen werden, die im Folgenden dargestellt werden.

Energieintensität der Datenübertragung

Für eine Abschätzung der Energieintensität von Telekommunikationsnetzen wurden die CSR²²-, Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsberichte der großen Telekommunikationsunternehmen weltweit gesichtet. Nutzbare Informationen fanden sich in den Berichten von AT&T (USA), Nippon Telegraph & Telephone (Japan), Deutsche Telekom (Deutschland), Telefónica (Spanien) und Vodafone (Großbritannien). Außerdem konnten Daten aus dem finnischen Mobilfunknetz verwendet werden (Pihkola et al. 2018). Eine Analyse der verfügbaren Daten durch die Gutachter des Borderstep Instituts zeigt, dass in der Vergangenheit jährliche Verbesserungen der Energieintensität zwischen 15 und 70% realisiert werden konnten. Die Energieintensitäten von Fest- und Mobilfunknetz gleichen

²² Corporate Social Responsibility, übersetzt etwa unternehmerische Gesellschaftsverantwortung

sich dabei immer mehr aneinander an, da die Mobilfunkgenerationen 4G und insbesondere 5G beträchtliche Steigerungen beim Datendurchsatz ohne entsprechenden Mehrverbrauch an Energie aufweisen. Für den Zeitraum ab 2024 wird von vergleichbaren Energieintensitäten ausgegangen. Aus diesem Grunde wird für die im Folgenden aufgestellten Szenarien nicht zwischen Mobilfunk- und Festnetz unterschieden.

Für die Schätzung der aktuellen Energieintensität der Datenübertragung wurde der von der Telekom (in Deutschland) für 2017 angegebene Wert von 142 kWh/TB (Deutsche Telekom 2018, S. 180) mit einem Abschlag von etwa 10 % pro Jahr extrapoliert, um für 2020 einen Wert von etwa 105 kWh/TB zu erhalten.²³

Datenvolumen

Auch die Prognose, wie sich das Datenvolumen im deutschen Internet zukünftig entwickeln wird, ist sehr stark von den getroffenen Annahmen abhängig. Die Entwicklung seit 2010 ist in den Berichten der Bundesnetzagentur gut dokumentiert (Bundesnetzagentur 2015 und 2019a). Die Abbildung 2.15 zeigt das summierte Datenvolumen von Fest- und Mobilnetz.

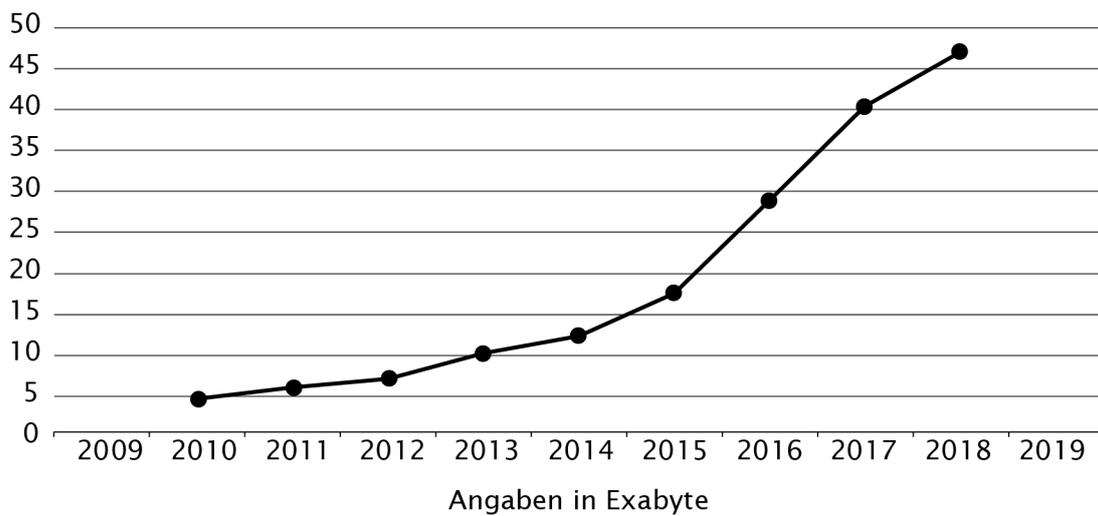
Prognosen für die zukünftige Entwicklung nehmen üblicherweise an, dass das exponentielle Wachstum des Datenvolumens, wie es in den letzten Jahren beobachtet wurde, auch in Zukunft anhält. So geht beispielsweise die oft zitierte Prognose von Cisco für den Zeitraum 2017 bis 2022 von einer jährlichen Steigerung des IP-Datenvolumens in Westeuropa von 22 % aus (Cisco 2018b). Das exponentielle Wachstum kann sich allerdings nicht dauerhaft fortsetzen. Die entscheidende Frage lautet, wann sich der Anstieg wieder abflachen wird. Dazu werden nachfolgend einige Überlegungen angestellt.

In der Prognose von Cisco ist der wesentliche Treiber für das Datenvolumen Videostreaming, das 2022 insgesamt einen Anteil von 82 % am Datenverkehr ausmachen soll (Cisco 2018b). Womersley (2017, S. 16f) nimmt daher Video als Maßstab, um ein plakatives Szenario zu konstruieren. Er trifft folgende Szenarioannahmen:

- › 80 % einer Weltbevölkerung von 7 Milliarden Menschen schauen Videos,
- › davon schaut jeder 16 Stunden pro Tag unablässig Videos,
- › die Videos werden in 4K-Auflösung übertragen (3.840 x 2.160 Pixel),
- › die Videokompressionstechnologie macht bis 2030 Fortschritte um einen Faktor 3,
- › der Zugriff auf 70 % der auf mobilen Geräten genutzten Daten erfolgt über WLAN und Festnetz,
- › ein bestimmter Anteil der Personen nutzt mehrere Geräte gleichzeitig.

²³ Tatsächlich verläuft die Entwicklung wohl zumindest in Deutschland deutlich schneller. So gibt die Telekom für 2019 nur noch 74 kWh/TB an, wohingegen konzernweit 120 kWh/TB angegeben werden (Deutsche Telekom 2020, S. 69).

Abb. 2.15 Datenvolumen im deutschen Internet

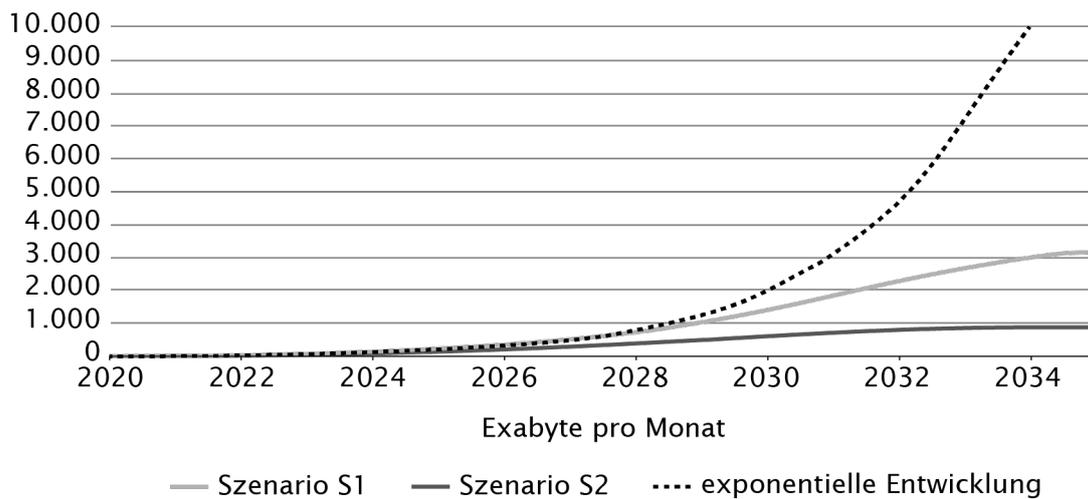


Quelle: Bundesnetzagentur 2015, S. 28 und 40; 2019a, S. 51 und 57

In diesem Szenario ergäbe sich ein weltweites Datenvolumen von 3.150 Exabyte pro Monat. Das wären 315-mal so viel wie heute (S1 in Abbildung 2.16). In einem zweiten Szenario reduziert Womersley (2017) die Nutzungannahmen: jede Person schaut nur 6 Stunden Videos pro Tag und nur die Hälfte dieser Videos sind in 4K-Qualität. Hier ergibt sich ein weltweites Datenvolumen 890 Exabyte pro Monat, was immer noch einer Steigerung um das 89-Fache im Vergleich zu heute entspricht (S2). Die Abbildung 2.16 stellt die zwei Szenarien von Womersley im Vergleich zu einer exponentiellen Entwicklung des weltweiten Datenvolumens dar. Abweichungen von der exponentiellen Wachstumskurve müssten demzufolge im Zeitraum von etwa 2025 bis 2028 erkennbar werden.

Es stellt sich ferner die Frage, ob neben dem Videostreaming künftig neue Anwendungen wie das Internet of Things (IoT), autonomes Fahren, Smart Farming oder Industrie 4.0-Anwendungen ein hohes Datenvolumen in den Telekommunikationsnetzen erzeugen. Bei den IoT-Anwendungen scheinen die meisten keine großen Datenströme zu erzeugen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Sensoren, die lediglich alle paar Sekunden oder seltener eine Nachricht generieren (Mocnej et al. 2017). Eine Ausnahme sind bilderzeugende Geräte wie z. B. Überwachungskameras, die mit einem erheblichen Datenvolumen einhergehen. Cisco erwartet, dass allein das Volumen von Videos aus Überwachungssystemen bis 2022 auf ca. 2 % des Videovolumens ansteigen wird (Cisco 2018b, S. 13 f.).

Abb. 2.16 Varianten des Wachstums des Datenverkehrs



Quelle: Womersley 2017, S. 18

Auch das autonome Fahren erzeugt aufgrund zahlreicher Kameras, Radar- und Lidarsystemen²⁴ in den Fahrzeugen in großem Umfang Bild- und Videodaten. Dmitriev (o. J.) beispielsweise schätzt die generierte Datenmenge pro Auto auf zwischen 400 und 5.000 TB pro Jahr. Dabei bleibt jedoch unklar, welcher Anteil dieser Daten künftig über die Telekommunikationsnetze zwischen Auto und Rechenzentren ausgetauscht werden. Das Unternehmen Waymo etwa gab 2017 hierzu bekannt, seine autonomen Fahrzeuge zur Erhöhung der Sicherheit gegen Hackerangriffe nur gelegentlich mit dem Internet zu verbinden (Condliffe 2017). In einem aktuellen Praxisbeispiel gab ein Nutzer den Datentransfer seines Tesla S im vollständig autonomen Betrieb gemittelt über 21 Tage mit 142 MB pro Tag (Upload) und nochmal etwa 50% davon als Download an (Tesla Motorclub Blog 2018), was in der Summe einem Datenvolumen von ca. 75 GB pro Jahr entsprechen würde. Um einen Eindruck von der Größenordnung zu erhalten, wird für eine Beispielrechnung angenommen, dass 40 Mio. voll autonom fahrende Autos in Deutschland zugelassen seien (vermutlich kaum vor 2035 realistisch). Unter diesen Annahmen würde sich ein kumuliertes Datenvolumen von ca. 3 Exabyte pro Jahr ergeben. Dies ist verglichen mit dem schon heute in Deutschland erreichten Datenvolumen von 45 Exabyte/a ein überschaubarer Beitrag. Das Beispiel des autonomen Fahrens macht deutlich, dass das Wachstum des globalen Datenbestandes nicht unbedingt gleichbedeutend mit dem Wachstum des globalen Datenverkehrs ist. Dies gilt analog auch für Industrie 4.0-Anwendungen. Hier wird erwartet, dass die Datenverarbeitung zum großen Teil am Entstehungsort der Daten erfolgt und der Großteil der Daten daher nicht über die Zugangs- und Kernnetze transportiert wird. Allerdings muss betont werden, dass Prognosen zum Datenverkehr bei neuen und sich dynamisch entwickelnden Technologiefeldern mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Betrachtete Szenarien

Auf Basis der dargestellten Überlegungen werden im Folgenden vier Szenarien zur künftigen Entwicklung des Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze definiert. Diese unterscheiden sich in den Annahmen, die zum zukünftigen Volumen des Datenverkehrs und zur weiteren Entwicklung der Energieeffizienz getroffen werden.

Beim Datenverkehr werden zwei mögliche Entwicklungspfade herangezogen. Zum einen der Fall, dass das transportierte Datenvolumen mit den bisherigen Raten weiterwächst. Hierfür wurde ein jährliches Wachstum von 21% bis zum Jahr 2030 angenommen. Zum anderen wurde gemäß den zuvor dargestellten Überlegungen von Womersley (2017) eine Entwicklung modelliert, die vor allem durch verstärkten Einsatz von Edge Computing zu einer Abnahme der Wachstumsraten beim Datenverkehr in Deutschland führt. Die Annahme ist hier, dass das jährliche Wachstum bis zum Jahr 2030 auf 10% absinkt.

²⁴ Lidar (light detection and ranging) ist eine Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung (ähnlich dem auf Funkwellen basierenden Radar)

Auch hinsichtlich der Energieeffizienz wurden zwei alternative Entwicklungspfade einbezogen: Der eine ist, dass die Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz der Datenübertragung weiterhin hoch bleiben. Dies führt zu einer angenommenen Verbesserung der Energieintensität der Datenübertragung auf 20 kWh/TB bis zum Jahr 2030. Die zweite angenommene Möglichkeit ist, dass die Verbesserung der Energieintensität aus dem Fokus gerät und diese somit nur auf 40 kWh/TB im Jahr 2030 sinkt.

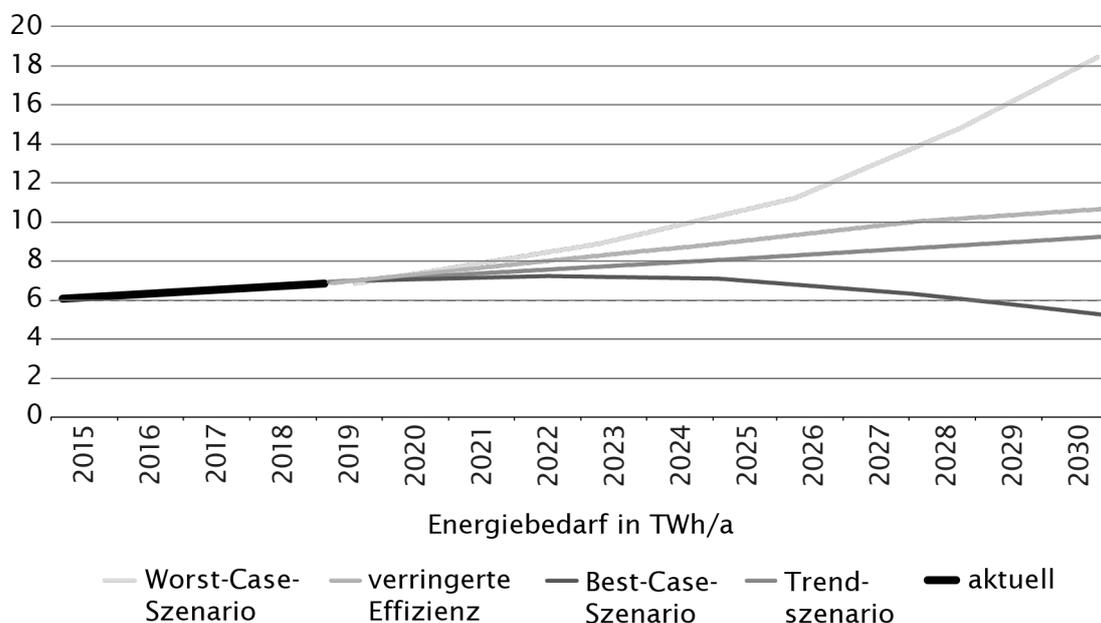
Diese Alternativen werden zu folgenden vier Szenarien kombiniert:

- › *Trendszenario*: Das Datenvolumen wächst jährlich um 21 % an. Die Energieintensität verbessert sich bis zum Jahr 2030 auf 20 kWh/TB.
- › *Best-Case-Szenario*: Das Wachstum des Datenvolumens beträgt im Jahr 2030 nur noch 10% pro Jahr. Die Energieintensität verbessert sich auf 20 kWh/TB im Jahr 2030.
- › *Worst-Case-Szenario*: Das Datenvolumen wächst jährlich um 21 %. Die Energieintensität verbessert sich bis zum Jahr 2030 nur auf 40 kWh/TB.
- › *Szenario »Verringerte Effizienz«*: Das Wachstum des Datenvolumens erreicht 2030 nur noch 10% pro Jahr. Die Energieintensität der Telekommunikationsnetze beträgt im Jahr 2030 40 kWh/TB.

Ergebnisse

In Abbildung 2.17 sind die Ergebnisse für die vier Szenarien dargestellt. Der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland wird sich im Trendfall bis zum Jahr 2030 weiter auf 9,3 TWh/a erhöhen. Im Worst Case ist sogar ein Anstieg bis auf 19 TWh/a möglich. Bei sinkenden Wachstumsraten für das Datenvolumen im Internet (Best Case) und dennoch stark ansteigender Energieeffizienz ist eine Abnahme des Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze bis auf 5 TWh/a im Jahr 2030 möglich. Für den Fall, dass ein nicht mehr so stark wachsendes Datenvolumen zu einer Verringerung der Anstrengungen zur Effizienzverbesserungen führt, errechnet sich ein Energiebedarf von 10,5 TWh/a im Jahr 2030.

Abb. 2.17 Szenarien zum Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland bis 2030



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 59

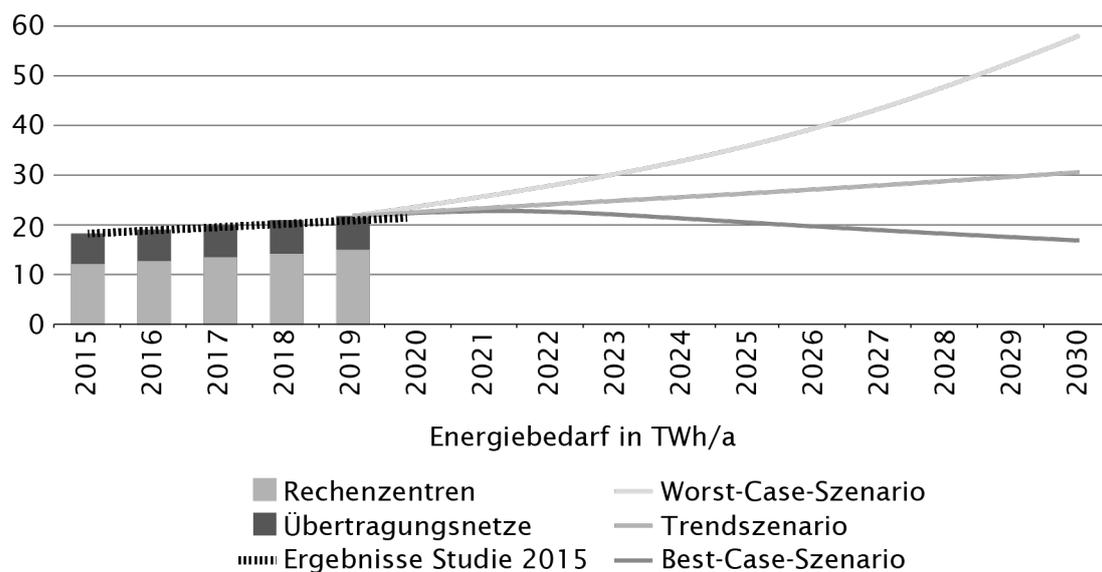
2.6 Zwischenfazit

Derzeit liegt kein gesicherter Kenntnisstand zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen vor. Internationale Studien zum aktuellen Stand sowie zur prognostizierten Entwicklung zeigen teilweise deutlich unterschiedliche Ergebnisse. In einigen Studien wird ein drastischer Anstieg des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen bis 2030 vorausgesehen, etwa eine Verzehnfachung oder mehr (bezogen auf 2010, siehe Kapitel 2.2). Allerdings kommen diese Ergebnisse durch meist sehr vereinfachende Annahmen zustande, insbesondere wird vielfach ein anhaltendes exponentielles Wachstum zugrunde gelegt. Auf Grundlage der von den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019) vorgenommenen Modellierung ist eine solche Entwicklung eher unwahrscheinlich.

Auf Basis dieser Analyse wurde für Deutschland zwischen 2015 und 2019 ein Anstieg des jährlichen Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen um fast 4 TWh ermittelt. Dieser Wert liegt etwas höher, als er von Stobbe et al. (2015b, S. 33) zum IKT-bedingten Energiebedarf prognostiziert wurde. Die mögliche zukünftige Entwicklung wurde anhand von drei Szenarien modelliert (Abb. 2.18). Im *Trendszenario* steigt der Energiebedarf von aktuell 21,7 TWh/a auf 30,6 TWh/a im Jahr 2030. Im Vergleich zum Jahr 2015 wäre das ein Anstieg um 70% (80% gegenüber 2010). Im *Worst-Case-Szenario* ist bis 2030 sogar ein Anstieg auf 58,5 TWh/a denkbar. Damit würde sich der Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland im Vergleich zum Jahr 2015 um mehr als den Faktor 3,2 erhöhen (Faktor 3,5 gegenüber 2010). Bei Ausschöpfung der Effizienzpotenziale (*Best-Case-Szenario*) wäre im Vergleich zum aktuellen Energiebedarf auch eine Stabilisierung und langfristig leichte Absenkung möglich. In diesem Fall würde 2030 wieder das Niveau des Energiebedarfs von 2010 erreicht.

Insgesamt betrachtet ist der Wissensstand zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen lückenhaft und teilweise widersprüchlich. Daher besteht ein erheblicher Forschungsbedarf. Angesichts der beträchtlichen Höhe der Energiebedarfe, ist eine genaue und möglichst regelmäßige Ermittlung des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen möglichst unter Einbezug von realen Daten aus Unternehmen wünschenswert. Es wäre etwa denkbar, dass die Bundesnetzagentur mit der Erhebung dieser Daten betraut werden könnte.

Abb. 2.18 Szenarien zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland bis 2030



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 61

3 Energetische Einsparpotenziale in der IKT

Wie in Kapitel 2 dargelegt, hängt der künftige Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen maßgeblich von der weiteren Entwicklung der Energieeffizienz ab. Durch Effizienzverbesserungen ist es in der Vergangenheit gelungen, den Anstieg des Energieverbrauchs im Verhältnis zum rasanten Wachstum in der IKT-Branche in Grenzen zu halten. Ob dies auch weiterhin gelingen kann, ist ungewiss. Die bisher erzielten Steigerungsraten der Energieeffizienz bei IKT-Komponenten werden aufgrund des vorhergesagten Endes des Mooreschen Gesetzes (siehe Glossar) nur noch schwer zu erreichen sein (Theis/Wong 2017; Waldrop 2016). Hierzu notwendig wären neue technologische Ansätze bis hin zur Abkehr von den klassischen Computerarchitekturen, die sich derzeit allerdings noch in einem frühen Forschungsstadium befinden (Kap. 3.1.1). Auch im Bereich der gebäudeseitigen Infrastrukturen in Rechenzentren (Kühlung, Stromversorgung) sind mittelfristig keine größeren Effizienzgewinne mehr zu erwarten. So erreichen neu gebaute Rechenzentren typische PUE-Werte im Bereich von 1,3, d.h. für die Gebäudeinfrastruktur muss eine Strommenge in Höhe von 30% des Verbrauchs für die IKT-Komponenten zusätzlich aufgewandt werden.²⁵ Dieser Wert betrug vor 20 Jahren noch 2,0, sprich die Gebäudeinfrastruktur und die IKT-Komponenten verbrauchten jeweils gleich viel Energie (Hintemann/Clausen 2018b; Koomey 2008; Stobbe et al. 2015b). Je kleiner der Energiebedarf der gebäudeseitigen Infrastrukturen gemessen am Gesamtenergieverbrauch ist, desto geringer fallen auch die in diesem Bereich künftig realisierbaren Energieeinsparungen aus.²⁶

Für Deutschland zeigt die Analyse in Kapitel 2, dass eine Stabilisierung und ggf. sogar leichte Absenkung des Energiebedarfs der IKT-Strukturen bis 2030, wenn überhaupt, nur bei einer konsequenten Ausschöpfung noch vorhandener Energieeffizienzpotenziale erreichbar ist (Best-Case-Szenario). Ziel dieses Kapitels ist es daher, bestehende technische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie in den IKT-Infrastrukturen zu identifizieren und darzustellen. Dies schließt auch Konzepte der Sektorkopplung unter Einbezug der IKT-Infrastrukturen ein. Die Optionen mit den größten Einsparpotenzialen und Handlungsbedarfen werden ermittelt. Anhand von vier ausgewählten Optionen werden Treiber und Hemmnisse der Diffusion und Erschließung der Potenziale eingehender analysiert.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren – sofern nicht durch weitere Quellenangaben kenntlich gemacht – auf den Kapiteln 2 und 3 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019, S. 62 ff.).

3.1 Technologische und organisatorische Optionen zur Energieeinsparung in IKT-Infrastrukturen

Das komplexe Gesamtsystem der IKT-Infrastrukturen (Abb. 3.1) weist vielfältige Potenziale zur Einsparung von Energie auf. Innerhalb der einzelnen Systembereiche (Hardware, Software, Management) bestehen jeweils technologische Optionen zur Verringerung des Energiebedarfs von IKT-Infrastrukturen. Systemübergreifend können Energieeffizienzpotenziale auch durch organisatorische Verbesserungen oder neue Netzwerkarchitekturen erschlossen werden. Darüber hinaus existieren auch Ansätze der Sektorkopplung. Deren Ziel ist es, durch die energetische Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Kraftstoffe Effizienzpotenziale zu erschließen, die durch sektorspezifische Strategien allein nicht erreicht werden können.

Im Rahmen der für das Gutachten des Borderstep Instituts (2019, S. 67 ff.) durchgeführten Recherchen wurden über 60 technologische und organisatorische Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen identifiziert. Die Optionen lassen sich weitgehend überschneidungsfrei jeweils einem der folgenden vier Technologie- bzw. Handlungsfelder zuordnen:

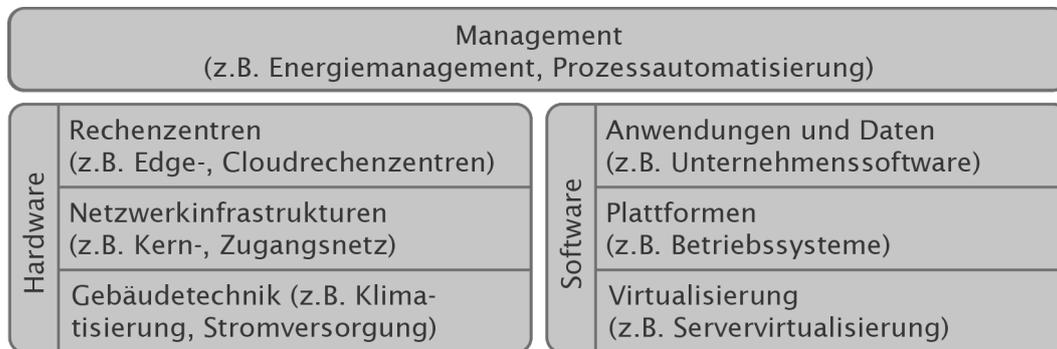
1. IKT-Hardware
2. Klimatisierung und Kühlung

²⁵ Die weltweit effizientesten Rechenzentren erreichen sogar PUE-Werte im Bereich von 1,1 (z. B. <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency>, 15.3.2022)

²⁶ Deutliche Potenziale für Effizienzsteigerungen bestehen allerdings noch im Rechenzentrumsbestand. So lag die durchschnittliche PUE in Deutschland im Jahr 2019 bei 1,6 (Kap. 2.3.3), also deutlich höher als die heute in Neubauten erreichten Werte.

3. Stromversorgung
4. Management, Netzwerkarchitekturen und Software

Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Gesamtsystems von Hardware, Software und Management von IKT-Infrastrukturen



Quelle: nach Borderstep Institut (2019, S. 62)

Die Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen befinden sich in verschiedenen Entwicklungsstadien. Einige davon werden bereits massenhaft eingesetzt, für andere existieren Nischenmärkte oder Pilotanwendungen. Außerdem befinden sich etliche noch im Forschungsstadium. Einige der Optionen stammen aus anderen Anwendungsgebieten und werden in IKT-Infrastrukturen bislang noch nicht eingesetzt. Nachfolgend werden alle identifizierten Einsparoptionen überblicksartig vorgestellt. Dazu wurde für jedes der vier zuvor genannten Technologie- bzw. Handlungsfelder ein Technologieradar entwickelt. Technologieradare erlauben es, den aktuellen Entwicklungsstand und das Einsatzgebiet gleichzeitig für eine größere Anzahl von Optionen anschaulich darzustellen.

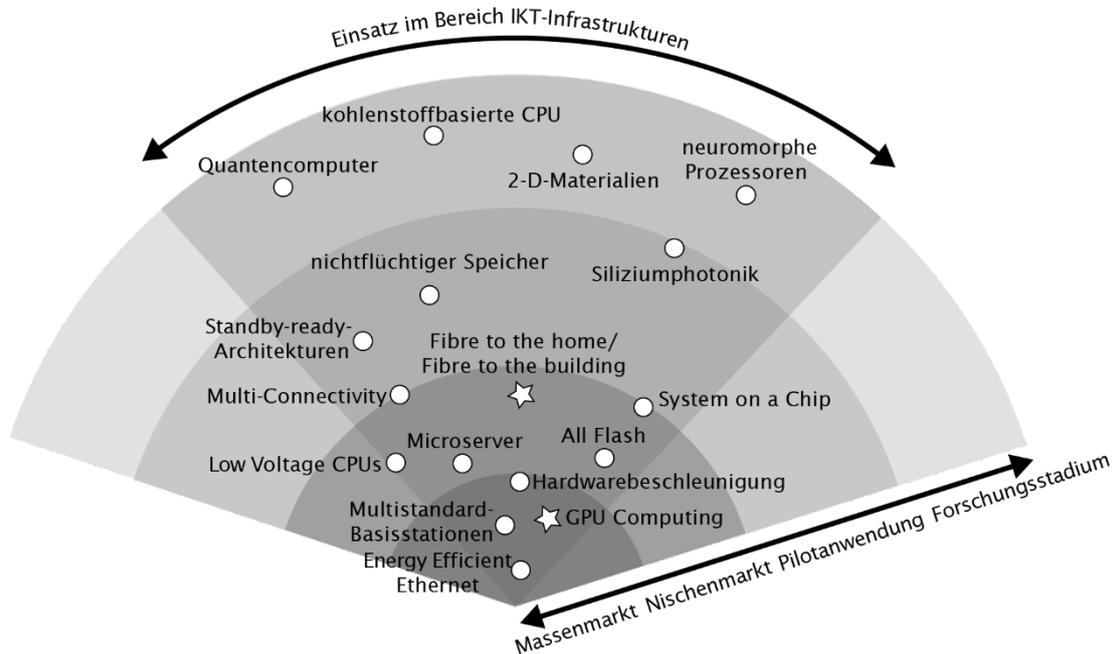
Die vier Technologieradare wurden auf einem Expertenworkshop²⁷ mit Fachleuten diskutiert und teilweise überarbeitet. Im Rahmen des Workshops wurden darüber hinaus Optionen mit hohen Energieeinsparpotenzialen und/oder politischen Handlungsbedarfen identifiziert. Diese Optionen sind in den Technologieradaren mit einem Stern gekennzeichnet und werden in Kapitel 3.1 kurz vorgestellt. Die vier wichtigsten Optionen mit den größten Einsparpotenzialen und/oder den dringlichsten politischen Handlungsbedarfen werden ausführlich in Kapitel 3.2 behandelt. Alle anderen Einsparoptionen werden im Glossar beschrieben. Optionen, die sich bereits im Massenmarkt befinden, wurden in den Technologieradaren nur dargestellt, wenn eine weitere Verbreitung zu einer deutlichen Absenkung des Energiebedarfs beitragen könnte.

²⁷ Der Expertenworkshop fand am 1. Oktober 2019 in Berlin statt. Die Liste der Teilnehmer ist in Kap. 8.2 aufgeführt.

3.1.1 IKT-Hardware

Im Handlungsfeld IKT-Hardware wurden insgesamt 17 technologische Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz identifiziert (Abb. 3.2).

Abb. 3.2 Technologieradar für das Handlungsfeld IKT-Hardware



CPU = Central Processing Unit; GPU = Graphics Processing Unit

☆ Optionen mit hohen Einsparpotenzialen und/oder politischen Handlungsbedarfen. Diese Optionen werden in Kap. 3.1 behandelt, alle übrigen werden im Glossar erläutert.

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 68

Auf dem Expertenworkshop wurde für zwei dieser Optionen ein hohes Energieeinsparpotenzial identifiziert (GPU Computing und Fibre to the Home/Fibre to the Building, nachfolgend). Hohe politische Handlungsbedarfe wurden für keine der Optionen gesehen. Dies deckt sich mit Erkenntnissen aus der Diffusionsforschung. Demnach weist die Diffusion von Innovationen im Bereich der IKT-Hardware meist eine intrinsisch hohe Dynamik auf. Das bedeutet, dass sich oft schon nach kurzer Zeit hohe Marktanteile der Innovationen feststellen lassen (Fichter/Clausen 2013). Eine Unterstützung der Verbreitung solcher Innovationen durch politische Maßnahmen ist daher nur selten notwendig. Ein Bedarf für weitere Forschungsförderung wurde für solche Technologien identifiziert, mit denen mittel- bis langfristig weitere Effizienzsteigerungen auch nach einem möglichen Ende der Entwicklung, die durch das Mooresche Gesetz beschrieben wird, ermöglicht werden könnten. Hierbei handelt es sich vor allem um folgende Technologien: Quantencomputer, kohlenstoffbasierte CPUs, 2-D-Materialien, neuromorphe Prozessoren und Siliziumphotonik (siehe Glossar), die sich meist noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden.

GPU Computing

Beim GPU (Graphics Processing Unit) Computing werden Grafikprozessoren zur Beschleunigung von rechenintensiven Anwendungen eingesetzt. Diese werden auf den Grafikprozessor ausgelagert, während der übrige Programmcode wie gewohnt auf herkömmlichen CPUs läuft. Da Grafikprozessoren Tausende Rechenoperationen parallel verarbeiten, können so bestimmte Anwendungen um ein Vielfaches schneller und energieeffizienter ausgeführt werden.

Bislang wird GPU Computing vor allem zur Steigerung der Verarbeitungsgeschwindigkeit bei sehr großen Rechenlasten in wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Anwendungen, im Bereich der künstlichen Intelligenz (Ostler 2019b) oder im Kontext einiger Kryptowährungen (Kap. 5.1) eingesetzt. Im Hinblick auf eine energieeffiziente Optimierung des Aufbaus von Rechenzentren mithilfe von Grafikprozessoren besteht laut den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019, S. 75) allerdings noch Forschungsbedarf.

Fibre to the home/Fibre to the building (FTTH/FTTB)

Die Nutzung von Glasfasern bis in die Wohnung bzw. ins Haus der Kunden (»Fibre to the home/Fibre to the building« oder auch direkter Glasfaseranschluss) kann aufgrund der höheren Übertragungskapazitäten den Energiebedarf *pro übertragener Datenmenge* (in kWh/TB) gegenüber Kupfertechnologien (DSL/VDSL) deutlich verbessern. In Deutschland ist der Ausbau von direkten Glasfaseranschlüssen noch gering und lag Ende 2019 bei ca. 4 % der Breitbandanschlüsse (Bundesnetzagentur 2020a, S. 48).

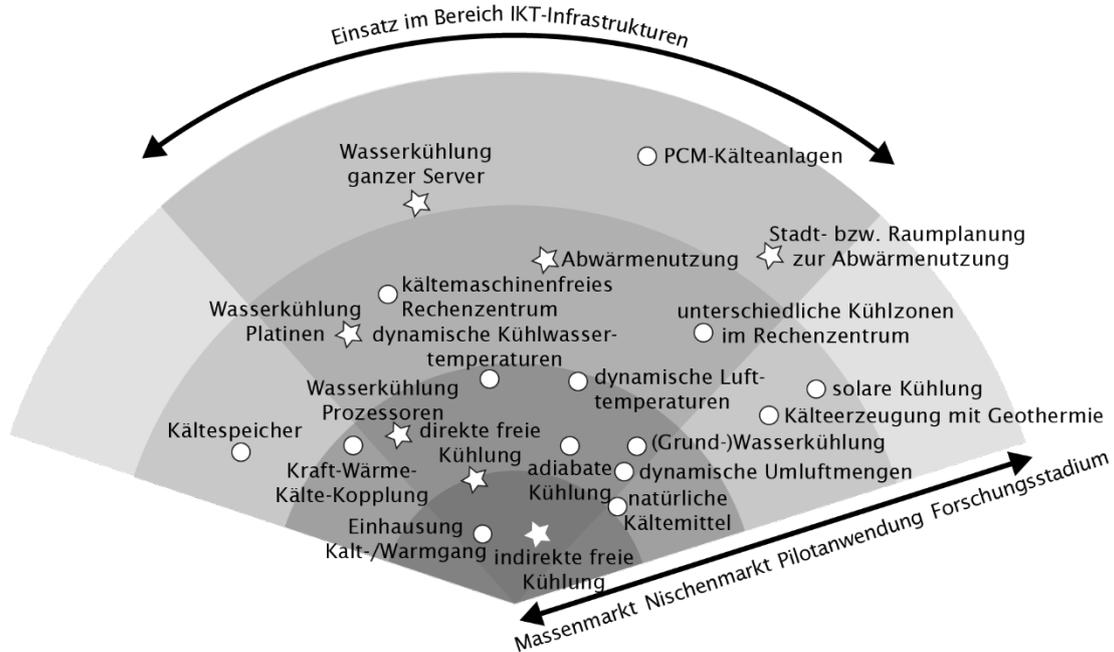
Zu betrachten ist allerdings auch der Energiebedarf *pro Anschluss*. Da die Technikkomponenten der Übertragungsnetze nicht nur während der tatsächlichen Datenübertragung, sondern rund um die Uhr mit Strom versorgt werden müssen, nimmt der Energiebedarf der Zugangsnetze mit steigender Anzahl der Anschlüsse (Nutzer) tendenziell zu. Bezogen auf den Energiebedarf pro Anschluss gehen Stobbe et al. (2015b, S. 110) davon aus, dass die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme eines direkten Glasfaseranschlusses mit 6 W sogar über jener eines kupferbasierten VDSL-Breitbandanschlusses (5 W) liegt.²⁸ Dieser Wert gilt allerdings für eine Punkt-zu-Punkt-Glasfaserverbindung zwischen Vermittlungsstelle und Endkunde, wie sie bei sehr großen Anschlussbandbreiten (z. B. bei Geschäftskunden) eingesetzt wird. Bei privaten Teilnehmeranschlüssen mit niedriger Bandbreite erlaubt es die hohe Übertragungskapazität der Glasfaser dagegen, dass das optische Datensignal in Kundennähe aufgeteilt und über passive optische Komponenten, die keine Energie mehr benötigen, an mehrere Nutzer verteilt wird. Dadurch lässt sich die elektrische Leistungsaufnahme pro Anschluss deutlich reduzieren, wobei der genaue Wert von der jeweiligen technischen Realisierung abhängt (Stobbe et al. 2015b, S. 109). In einer aktuellen Studie schätzen Köhn et al. (2020, S. 6), dass die Leistungsaufnahme eines direkten Glasfaseranschlusses im Vergleich zu einem kupferbasierten VDSL-Anschluss rund 5-mal geringer ist. Durch den Glasfaserausbau insbesondere im Privatkundenbereich ließe sich somit die Energieeffizienz des Breitbandnetzes deutlich steigern.

3.1.2 Kühlung und Klimatisierung

Von den im Handlungsfeld Kühlung und Klimatisierung identifizierten 21 technologischen oder organisatorischen Energieeinsparoptionen sind bereits viele am Markt verfügbar oder werden zumindest in Pilotprojekten getestet (Abb. 3.3). Mit Blick auf die Energieeffizienz ist deren Verbreitung allerdings noch unzureichend. Einige der Optionen stammen aus anderen Anwendungsbereichen und wurden in IKT-Infrastrukturen bisher nicht eingesetzt. Gründe hierfür sind u. a. die aktuell noch fehlende Wirtschaftlichkeit (z. B. Kältespeicher) oder Befürchtungen, dass die Technologien die Verfügbarkeitsanforderungen an IKT-Infrastrukturen nicht erfüllen könnten (z. B. natürliche Kältemittel).

²⁸ Diese Abschätzung berücksichtigt, dass in der Praxis die Netzwerkkonfiguration in Bezug auf den Energiebedarf meist nicht optimal ist, sodass beispielsweise Netzteile im ineffizienten Teillastbetrieb laufen (Stobbe et al. 2015b, S. 109).

Abb. 3.3 Technologieradar für das Handlungsfeld Kühlung und Klimatisierung



PCM = Phase-Change-Material

☆ Optionen mit hohen Einsparpotenzialen und/oder politischen Handlungsbedarfen. Diese Optionen werden in Kap. 3.1 behandelt, alle übrigen werden im Glossar erläutert.

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 71

Auf dem Expertenworkshop wurden für die folgenden Optionen hohe Einsparpotenziale bzw. Handlungsbedarfe ermittelt.

Direkte und indirekte freie Kühlung

Zur Kühlung von Rechenzentren werden häufig strombetriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt, die ähnlich wie Kühlschränke bzw. Klimaanlage funktionieren. Eine energieeffizientere Art der Kühlung stellt die freie Kühlung dar, bei der Außenluft genutzt wird. Bei der *direkten* freien Kühlung wird die Außenluft mithilfe von Lüftern durch das Rechenzentrum geleitet. Filter- und Regelungstechnik sowie ggf. eine Be- bzw. Entfeuchtung sind nötig, um eine ausreichende und gleichbleibende Qualität der verwendeten Luft sicherzustellen. Bei günstigen Bedingungen können so im Vergleich mit konventionellen Kühlanlagen Energieeinsparungen von bis zu 80% realisiert werden (laut Herstellerangaben; Petschke 2019). Bei der *indirekten* freien Kühlung wird ein Kühlmittel (z. B. Wasser-Glykol-Gemisch) mithilfe eines Wärmetauschers an der Außenluft gekühlt und dann zur Kühlung der warmen Innenluft benutzt. Hier spielt die Qualität der Außenluft keine Rolle, allerdings sinkt im Vergleich zur direkten freien Kühlung das Energieeinsparpotenzial aufgrund der Übertragungsverluste an den Wärmetauschern (Geißler/Ostler 2018a; Schönfelder/Ostler 2020).

Für den Einsatz freier Kühlung sind niedrige Außentemperaturen günstig. Bei zu hohen Temperaturen (z. B. im Sommer) muss je nach erforderlicher Kühlleistung zusätzliche Kälte mithilfe von Kältemaschinen erzeugt werden. Laut Herstellerangaben (Petschke 2019) benötigt ein Rechenzentrum im Volllastbetrieb eine Kühlwassertemperatur von 10 °C. Bei indirekter freier Kühlung sind dafür Außentemperaturen von unter 7 °C erforderlich, die es beispielsweise in Frankfurt am Main während etwa 3.000 Stunden pro Jahr gibt. Durch den Einsatz von dynamischen Kühlwassertemperaturen kann die jährliche Einsatzstundenzahl der freien Kühlung ggf. gesteigert werden. So reichen zur Kühlung eines Rechenzentrums in Teillastbetrieb bereits Kühlwassertemperaturen von 16 °C aus. Die dafür notwendigen Außentemperaturen von unter 13 °C herrschen in Frankfurt an ca. 5.300 Stunden pro Jahr.

Sowohl Lösungen zur direkten als auch zur indirekten freien Kühlung werden am Markt bereits angeboten. Während die indirekte freie Kühlung bereits vielfach angewendet wird und bei Neubauten von Rechenzentren ab ca. 50 kW Stromleistungsaufnahme auch Standard ist, wird die noch energieeffizientere direkte freie Kühlung aufgrund von Befürchtungen, dass verschmutzte Luft ins Rechenzentrum gelangen und dort an sensiblen Bauteilen Schaden anrichten könnte, nur selten eingesetzt. Im Rechenzentrumsbestand wäre eine Modernisierung unter Umständen energetisch sinnvoll, scheitert aber am notwendigen Umbaubedarf. Umbauten verursachen Stillstandszeiten, die von den Rechenzentrumsbetreibern wenn möglich vermieden werden. Anreize für die Modernisierung älterer Rechenzentren und den verstärkten Einsatz von indirekter oder direkter freier Kühlung könnten beispielsweise durch strenge Energieeffizienzvorgaben im Rahmen der öffentlichen Beschaffung gesetzt werden. Ein weitergehender Vorschlag wäre, regulatorische Mindestanforderungen an die Energieeffizienz der Kühltechnik von Rechenzentren zu stellen (z. B. im Rahmen der Ökodesign-Vorschriften der Europäischen Union).

Abwärmenutzung sowie Stadt- bzw. Raumplanung zur Abwärmenutzung

Die in Rechenzentren eingesetzte elektrische Energie wird vollständig in Wärmeenergie umgewandelt, die mit großem technischem Aufwand abgeführt werden muss und heute in der Regel ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Die abgeführte Wärme aus Rechenzentren stellt jedoch eine Energiequelle dar, die im Sinne der Sektorkopplung zur Speisung von Wärmenetzen genutzt werden könnte. Aufgrund der in diesem Bereich bestehenden hohen Energieeinsparpotenziale und politischen Handlungsbedarfe wird das Thema der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Kapitel 3.2.1 vertieft behandelt.

Flüssigkeitskühlung von Prozessoren, Platinen oder ganzen Servern

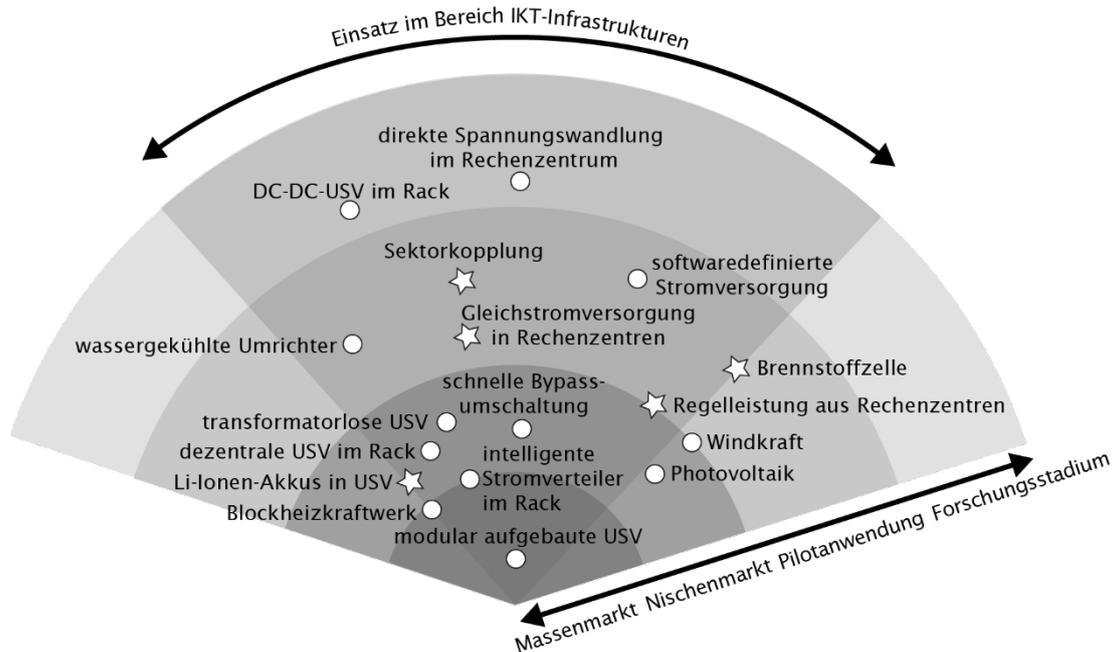
Vor allem Prozessoren haben einen enormen Kühlbedarf, da sie eine hohe elektrische Leistungsaufnahme haben und die gesamte aufgenommene elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Moderne CPUs weisen mittlerweile eine höhere Wärmeleistung pro Fläche auf als gängige Herdplatten (Pawlik/Büttner 2017).²⁹ Bei der klassischen Luftkühlung müssen daher immer größere Luftmengen transportiert werden. Damit steigt der Energiebedarf für die Ventilatoren. Die Kühlung mit Wasser oder anderen Flüssigkeiten, die eine wesentlich höhere Wärmemenge aufnehmen können als Luft, stellt daher eine alternative Kühltechnik mit deutlich höherer Energieeffizienz dar. Das Thema Flüssigkeitskühlung von Prozessoren, Platinen oder ganzen Servern wird in Kapitel 3.2.2 ausführlicher behandelt.

3.1.3 Stromversorgung

Im Handlungsfeld Stromversorgung wurden insgesamt 17 technologische oder organisatorische Energieeinsparoptionen identifiziert. Viele dieser Optionen sind am Markt bereits verfügbar, werden aber zur Verbesserung der Energieeffizienz der IKT-Infrastrukturen noch nicht breit eingesetzt (Abb. 3.4). Einige der Optionen stehen mit der Nutzung von erneuerbaren Energien im Zusammenhang.

²⁹ Beispielsweise weist Intels Serverprozessor Xeon E5-2600 v4 eine Wärmeleistung von 31 W/cm² auf. Eine moderne Induktionsherdplatte besitzt bei einem Durchmesser von 18 cm und einer Leistung von 2 kW lediglich 8 W/cm² (Pawlik/Büttner 2017).

Abb. 3.4 Technologieradar für das Handlungsfeld Stromversorgung



DC = Gleichstrom; USV = unterbrechungsfreie Stromversorgung

☆ Optionen mit hohen Einsparpotenzialen und/oder politischen Handlungsbedarfen. Diese Optionen werden in Kap. 3.1 behandelt, alle übrigen werden im Glossar erläutert.

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 72

Von den Experten wurden für die nachfolgend diskutierten Optionen hohe Einsparpotenziale und Handlungsbedarfe gesehen. Große Bedeutung wurde außerdem möglichen Konzepten zur direkten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen (vor allem Windkraft und Photovoltaik) für den Betrieb von IKT-Infrastrukturen zugemessen. Diese spezielle Thematik wird in Kapitel 4 vertieft behandelt.

Lithium-Ionen-Akkus für die unterbrechungsfreie Stromversorgung

Anlagen für die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) basieren heute meist auf Blei-Säure-Akkus, wie sie u. a. auch als Autobatterien eingesetzt werden. Alternativ könnten Lithium-Ionen-Akkus verwendet werden, die gegenüber Blei-Säure-Akkus eine Reihe von Vorteilen aufweisen: Durch die höhere Energiedichte reduziert sich die Aufstellfläche um rund 50%, zudem ist die kalendarische Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkus mit 12 bis 15 Jahren fast doppelt so hoch wie die von Blei-Säure-Akkus. Aufgrund der höheren Temperaturbeständigkeit von Lithium-Ionen-Akkus sinkt außerdem der Kühlbedarf für die USV (Breiter/Ostler 2018). Schließlich weisen Lithium-Ionen-Akkus auch eine höhere Zykluslebensdauer als Blei-Säure-Akkus auf, sodass sie oft ge- und entladen werden können. Dadurch eignen sie sich zum Abfangen von Lastspitzen im Rechenzentrum sowie ggf. zur Bereitstellung von Primärregelleistung (Kap. 3.2.4).

Nachteile gegenüber Blei-Säure-Akkus sind vor allem die deutlich höheren Kosten von Lithium-Ionen-Akkus sowie ein höheres Brand- und Explosionsrisiko, das Schutzmaßnahmen wie eine kontinuierliche Überwachung wichtiger Betriebsparameter notwendig macht (Gentsch et al. 2020). Lithium-Ionen-Akkus werden daher in Rechenzentren bislang nur selten eingesetzt. Die Verbreitung der Technologie könnte beispielsweise durch Informationsangebote oder die Förderung von Vorhaben unterstützt werden, die als Best-Practice-Beispiele dienen. Auch wäre eine Berücksichtigung in Ausschreibungen der öffentlichen Hand zum Bau oder Betrieb von Rechenzentren denkbar.

Brennstoffzelle

In Brennstoffzellen wird die in Energieträgern wie Wasserstoff, Methan oder Methanol gebundene chemische Energie in Strom umgewandelt, als Nebenprodukt entsteht Wärme. Der Einsatz von Brennstoffzellen in IKT-Infrastrukturen bietet einige Vorteile: Durch Verwendung von Wasserstoff oder Methan aus regenerativer Erzeugung können Rechenzentren mit CO₂-neutralem Strom betrieben werden. In Verbindung mit Power-to-Gas-Anlagen besteht die Möglichkeit, Rechenzentren mit Strom aus volatilen Stromquellen (Windkraft, Photovoltaik) zu versorgen. Werden ausreichende Brennstoffreserven vorgehalten, können Brennstoffzellen auch eine Notstromversorgung über längere Zeiträume gewährleisten, sodass auf dieselbetriebene Notstromaggregate verzichtet werden kann (Ostler 2019a). Die in der Brennstoffzelle anfallende Wärmeenergie kann zum Antrieb einer wärmegetriebenen Kältemaschine eingesetzt werden (siehe solare Kühlung im Glossar). Wird schließlich der für den Betrieb der Brennstoffzelle benötigte Sauerstoff aus der Luft gewonnen, entsteht sauerstoffreduzierte Luft, die zum Zwecke des Brandschutzes in das Rechenzentrum eingeleitet werden kann (Exler/Ostler 2016).

Brennstoffzellen für die Energieversorgung von Industrieanlagen oder großen Gebäuden sind am Markt bereits verfügbar. Der Einsatz in Rechenzentren oder zur Versorgung von mobilen Mobilfunkstandorten, die temporär etwa bei Großveranstaltungen oder zur Schließung von abgelegenen Funklöchern eingesetzt werden, wird gegenwärtig in Pilotprojekten erprobt (Jodl 2019; Müller/Ostler 2016; Ostler 2019a). Eine Verbreitung der Technologie im Bereich der IKT-Infrastrukturen ist aber erst dann zu erwarten, wenn ihre technische, ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber bestehenden Lösungen nachgewiesen werden kann. So hängen die mit dem Einsatz von Brennstoffzellen ggf. erzielbaren Energieeffizienzgewinne aufgrund von Umwandlungsverlusten von der jeweiligen Ausgestaltung des Gesamtsystems ab. Die politische Unterstützung entsprechender Pilot- und Demonstrationsprojekte bietet hier einen Ansatz, den Aufbau der Wissensbasis zur Bewertung der Technologie voranzubringen.

Sektorkopplung

Durch die energetische Verzahnung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Kraftstoffe sind Effizienzpotenziale erschließbar, die durch sektorspezifische Strategien allein nicht erreicht werden können. Dies ist das Konzept der Sektorkopplung. Auch IKT-Infrastrukturen können auf verschiedene Weise mit dem Strom- und/oder Wärmesektor gekoppelt werden. Möglichkeiten hierzu bestehen beispielsweise in der Abwärmenutzung (Kap. 3.2.1), der Bereitstellung von Regelleistung aus Rechenzentren (Kap. 3.2.4), der Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen (vor allem Windkraft und Photovoltaik; Kap. 4) oder in der Anpassung der Rechenlast in Rechenzentren an die Stromverfügbarkeit (lastadaptive Rechenzentren; Kap. 3.1.4). Solche Ansätze werden bislang aber meist nur im Rahmen von Pilotprojekten erprobt. Ein wesentliches Hemmnis für deren Umsetzung ist, dass Geschäftsmodelle unter Einbezug von Ansätzen der Sektorkopplung für Betreiber von IKT-Infrastrukturen oft wenig attraktiv sind, da der Nutzen oft bei anderen Akteuren entsteht (z. B. beim Stromnetzbetreiber), Vergütungsmodelle erst ausgearbeitet werden müssen und die Umsetzung entsprechender Vorhaben mit einem hohen Koordinierungsaufwand verbunden ist. Ansätze zur Förderung von Ansätzen der Sektorkopplung unter Einbezug der IKT-Infrastrukturen werden in den zuvor genannten Kapiteln diskutiert.

Gleichstromversorgung in Rechenzentren

Die Geräte und Anlagen in Rechenzentren (Server, Netzwerktechnik, Ventilatoren etc.) werden heute üblicherweise mit Wechselstrom betrieben. Dieser Strom wird zur Gewährleistung einer USV jedoch nicht direkt aus dem Versorgungsnetz, sondern aus einem an Akkus angeschlossenen Gleichstromsystem bezogen. Dazu sind mehrere Stromumwandlungsprozesse nötig, die jeweils mit Verlusten verbunden sind. Würden die Geräte und Anlagen im Rechenzentrum hingegen direkt mit Gleichstrom versorgt, könnten die Umwandlungsverluste stark reduziert werden. Die Gleichstromversorgung von Rechenzentren wird in Kapitel 3.2.3 vertieft behandelt.

Regelleistung aus Rechenzentren

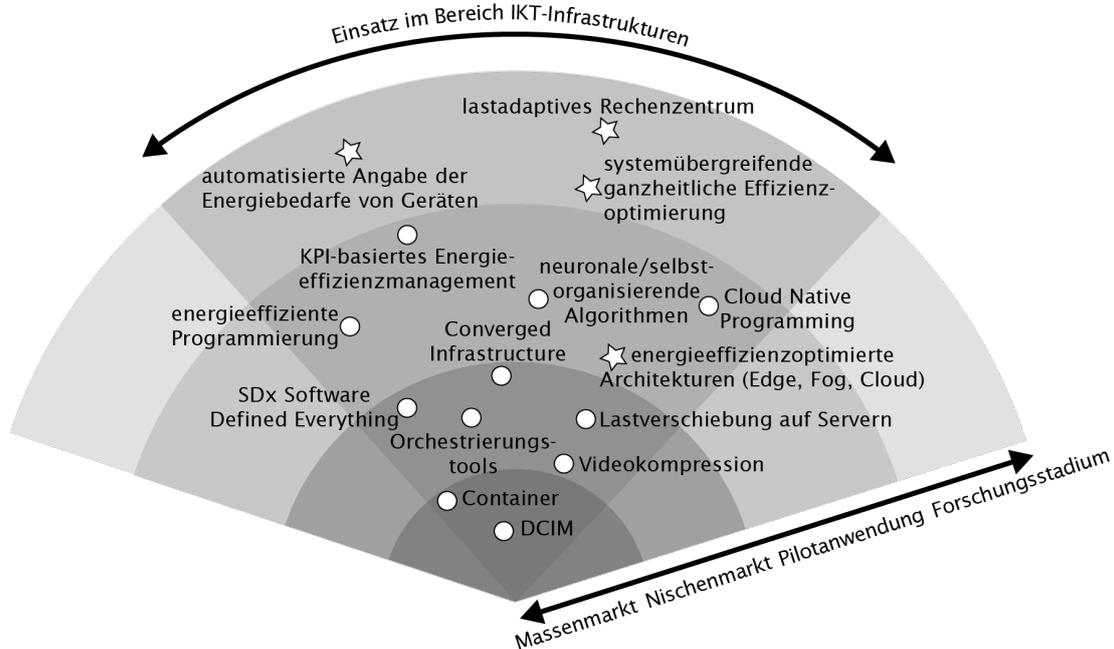
Die in Rechenzentren vorhandenen Notstromaggregate und Akkus der USV bieten Potenziale für die Bereitstellung von Regelleistung, die von Übertragungsnetzbetreibern für einen stabilen Netzbetrieb benötigt wird. Die Bereitstellung von Regelleistung führt zwar nicht zu Energieeinsparungen im Rechenzentrum, unterstützt jedoch

die mit der Energiewende eingeleitete Transformation des Stromsystems weg von konventionellen Großkraftwerken hin zu Erzeugungsanlagen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden und deren Einspeisung vielfach volatil ist. Das Potenzial zur Bereitstellung von Regelleistung in Rechenzentren wurde bisher jedoch noch kaum ausgeschöpft. Das Thema wird in Kapitel 3.2.4 ausführlicher behandelt.

3.1.4 Management, Netzwerkarchitekturen und Software

Für das Handlungsfeld Management, Netzwerkarchitekturen und Software wurden 15 technologische oder organisatorische Energieeinsparoptionen identifiziert (Abb. 3.5). Für viele der identifizierten Optionen lässt sich ähnlich wie bei der IKT-Hardware (Kap. 3.1.1) eine hohe Diffusionsdynamik feststellen, sodass eine Unterstützung durch politische Maßnahmen in der Regel nicht notwendig ist. Hohe Einsparpotenziale wurden vor allem für die im Folgenden beschriebenen übergreifenden Lösungen identifiziert.

Abb. 3.5 Technologieradar für das Handlungsfeld Management, Netzwerkarchitekturen und Software



DCIM = Datacenter-Infrastructure-Management; KPI = Key-Performance-Indikatoren; SDx = Software Defined Everything

☆ Optionen mit hohen Einsparpotenzialen und/oder politischen Handlungsbedarfen. Diese Optionen werden in Kap. 3.1 behandelt, alle übrigen werden im Glossar erläutert.

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 70

Systemübergreifende ganzheitliche Optimierung

In Bezug auf die Energieeffizienz von IKT-Infrastrukturen werden Verbesserungen bislang zumeist auf der Ebene der einzelnen Systemelemente (IKT-Hardware, Kühlung, Stromversorgung) erreicht (Kap. 3.1.1 bis 3.1.3). Eine systemübergreifende ganzheitliche Optimierung bietet jedoch deutliche zusätzliche Einsparpotenziale.

Heute bereits verfügbare Datacenter-Infrastructure-Management-(DCIM-)Lösungen können hier von Nutzen sein. Diese Softwareprodukte ermöglichen u. a. die Überwachung und Analyse wichtiger Leistungs- und Um-

weltparameter im Rechenzentrum (z. B. Stromverbrauch einzelner Geräte, Temperaturverteilung, Luftströmungen) (Galler/Ostler 2014). Diese Informationen unterstützen die Entscheidungsfindung bei der Umsetzung von Prozessoptimierungen und Energieeffizienzmaßnahmen aus einer systemübergreifenden Perspektive.

Ein weiterer Ansatz, der verfolgt wird, ist die Übertragung von ERP-Mechanismen auf IKT-Infrastrukturen. ERP-Systeme verknüpfen, analysieren und steuern geschäftsprozessorientiert die Ressourcen innerhalb eines Unternehmens, beispielsweise das Lager-, Transport- und Personalmanagement in einem Logistikunternehmen. Ziel ist u. a., durch Prozessautomatisierung einen effizienteren Ressourceneinsatz zu ermöglichen. Mithilfe von ERP-Lösungen für Rechenzentren kann der Betrieb auch im Hinblick auf die Ressource Energie optimiert werden, etwa indem eine hohe Auslastung der IKT-Infrastrukturen angestrebt wird.

Durch die prozessorientierte Sichtweise und die Übernahme von Steuerungsfunktionen gehen ERP-Lösungen deutlich über die infrastrukturorientierten Überwachungs- und Analysefunktionen von DCIM-Lösungen hinaus. Die Umsetzung von ERP-Lösungen für IKT-Infrastrukturen ist allerdings sehr komplex. Eine Herausforderung besteht in der Gewährleistung der Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit von Rechenzentren, in denen ERP-Lösungen steuernd in den Betrieb eingreifen. Für ERP-Lösungen zur ganzheitlichen Optimierung von IKT-Infrastrukturen auch hinsichtlich der Energieeffizienz besteht daher noch ein hoher Bedarf an Forschung, Entwicklung und Standardisierung.

Serverkonsolidierung durch Lastverschiebung im Rechenzentrum

Da die IKT-Ressourcen in einem Rechenzentrum in der Regel so dimensioniert sind, dass Lastspitzen abgedeckt werden können, laufen die Server in Zeiten schwacher Auslastung in einem ineffizienten Teillastbetrieb. Hier bietet die Serverkonsolidierung eine Möglichkeit für Energieeinsparungen. Dazu wird die Rechenlast der Server im Teillastbetrieb auf einige wenige, dadurch aber voll ausgelastete Server konzentriert, während die dann nicht mehr benötigten Server temporär in den Standby-Modus versetzt oder abgeschaltet werden. Möglich wird dies durch die Technik der Server- oder Containervirtualisierung, durch welche Rechenlast zwischen verschiedenen physischen Servern hin und her geschoben werden kann (siehe Glossar). Hintemann et al. (2014) schätzten anhand von Simulationen und Messungen in einer Testumgebung, dass durch die Serverkonsolidierung in einem durchschnittlichen Rechenzentrum Energieeinsparungen von bis zu 11 % realisierbar sind.³⁰

Technische Lösungen zur Durchführung der Lastverschiebung zwischen Servern sind am Markt verfügbar. Die Nutzung eines solchen Lastmanagements zur Senkung des Energiebedarfs von Rechenzentren erfolgt laut den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019, S. 76) bislang allerdings höchstens in Nischenanwendungen. Die Serverkonsolidierung erhöht die Komplexität und den Aufwand für die Konfiguration und Steuerung des Rechenzentrums. Auch findet eine Serverabschaltung aufgrund von Sorgen, dass es beim Hochfahren der Server zu Problemen kommt, in der Regel nicht statt.

Lastadaptives Rechenzentrum

Ein lastadaptives Rechenzentrum ist in der Lage, seine Rechenlast flexibel an äußere Bedingungen anzupassen. Beispielsweise könnte die Rechenleistung in einem Rechenzentrum, das mit volatilen Strom aus regenerativer Erzeugung betrieben wird, an der aktuellen Stromverfügbarkeit ausgerichtet werden. Eine Möglichkeit zur Steuerung der Lastkurve in Rechenzentren ist die Lastverschiebung zwischen mehreren Rechenzentren innerhalb eines Verbunds mithilfe der Technik der Server- oder Containervirtualisierung. Hierbei wird die Rechenlast softwaregesteuert jeweils in diejenigen Rechenzentren im Verbund verschoben, die aktuell über die besten Betriebsbedingungen verfügen (im obigen Beispiel also mit ausreichend Strom aus regenerativer Erzeugung versorgt werden).

Zu lastadaptiven Rechenzentren wird noch geforscht. Herausforderungen bestehen u. a. im Steuer- und Regelungsaufwand sowie der Kompatibilität von benötigten Softwareelementen in den beteiligten Rechenzentren. Für Anwendungen, die eine schnelle Reaktionszeit erfordern (z. B. Börsen- oder Datenbankanwendungen), können lange Signallaufzeiten (Latenzzeiten), die durch eine hohe räumliche Entfernung oder unzureichende Netzbandbreiten zwischen den beteiligten Rechenzentren verursacht werden, eine Lastverschiebung behindern

³⁰ Das in der Praxis erzielbare Einsparpotenzial hängt vom Grad der Virtualisierung im Rechenzentrum ab. Hintemann et al. (2014) schätzten, dass in einem durchschnittlichen Rechenzentrum auf rund 25 % der physischen Server virtuelle Server betrieben werden.

(Stobbe et al. 2015a, S. 14 f.). Findet die Lastverschiebung über Landesgrenzen hinaus statt, sind zudem rechtliche Anforderungen z. B. in Bezug auf die Verarbeitung von personenbezogenen Daten zu beachten.

In Konzepten, IKT-Infrastrukturen verstärkt direkt mit Strom aus volatiler regenerativer Erzeugung zu versorgen, sind lastadaptive Rechenzentren oft eine Schlüsselkomponente. Diese Thematik wird in Kapitel 4 vertieft.

Energieeffizienzoptimierte Netzwerkarchitekturen (Edge, Fog, Cloud)

Während beim Cloudcomputing Daten zentral in großen Cloudrechenzentren verarbeitet werden, sieht das Edge Computing eine dezentrale Datenverarbeitung in kleineren Rechenzentren sozusagen am Rande des Netzwerks « vor. Das Zusammenspiel zwischen beiden Konzepten wird auch als Fog Computing bezeichnet: Daten werden nahe an ihrem Entstehungsort in kleinen Edge-Rechenzentren vorverarbeitet und (wenn nötig) nur in aggregierter Form zur Weiterverarbeitung oder Speicherung an große Rechenzentren übertragen. Fog Computing wird bislang vor allem mit dem Ziel betrieben, die übertragenen Datenmengen zu reduzieren und durch Verringerung von Übertragungsvorgängen die Latenzzeiten zu optimieren (Luber/Karlstetter 2018). Wichtige Treiber sind das Autonome Fahren sowie Anwendungen bei Industrie 4.0 oder Smart City.

Die Energieeffizienz stand bisher nicht im Fokus des Fog Computing. Dabei ist absehbar, dass ein starker Ausbau verteilter Rechenzentren den Energiebedarf von IKT-Infrastrukturen erhöht, da kleinere Edge-Rechenzentren im Vergleich zu großen Rechenzentren in der Regel weniger energieeffizient ausgelegt und betrieben werden (Kap. 2.5.1). Allerdings kann auch die Energieeffizienz ein Kriterium für den Ausbau und Betrieb künftiger IKT-Infrastrukturen sein (Jalali et al. 2016). An welcher Stelle im Netzwerk Daten verarbeitet werden, würde sich in diesem Fall an den für Rechenoperationen, Datenübertragung und Speicherung notwendigen Energiebedarfen auf den unterschiedlichen Ebenen ausrichten. Hierzu besteht allerdings noch Forschungsbedarf. Um die Entwicklungen in diesem Feld zu fördern, sollte in Fällen, in denen staatliche Einrichtungen Einfluss auf den Aufbau neuer IKT-Infrastrukturen haben (z. B. im Rahmen der öffentlichen Beschaffung), die Energieeffizienz der Lösungen einen hohen Stellenwert einnehmen.

Automatisierte Angabe des Energiebedarfs von Geräten

Es ist schwierig, den Energiebedarf von einzelnen IKT-Dienstleistungen genau zu bestimmen. Hierzu wäre es notwendig, dass die verschiedenen am IT-Gesamtsystem beteiligten Geräte ihren Energiebedarf für bestimmte Aufgaben erfassen und an eine zentrale Managementsoftware übergeben. Auf Grundlage dieser Daten könnte dann der zur Erbringung einzelner IKT-Dienstleistungen nötige Energieeinsatz berechnet werden.

Belastbare Daten zum Energieverbrauch von IKT-Dienstleistungen sind auch deshalb erforderlich, um Transparenz und Vergleichbarkeit herzustellen und es so den Anwendern zu ermöglichen, informierte Nutzungsentscheidungen zu treffen. Eine Möglichkeit dazu bieten Gütesiegel, die von Betreibern bzw. Anbietern von IKT-Infrastrukturen und -Dienstleistungen bislang nur zaghafte genutzt werden. So kann beispielsweise der »Blaue Engel« mittlerweile für die Kategorien »Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb« (Einführung Januar 2019), »Klimaschonende Colocationrechenzentren« (Januar 2020), »Server und Datenspeicherprodukte« (Januar 2020) und »Ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte« (Januar 2020) beantragt werden.³¹ Gemäß der Webseite »Blauer Engel« nutzen derzeit (Stand: November 2020) lediglich drei Betreiber bzw. Anbieter das Gütesiegel »Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb«. Über die Gründe für die geringe Nachfrage kann zwar nur spekuliert werden. Es erscheint jedoch naheliegend, dass Systeme zur automatisierten Messung der Energiebedarfe einzelner IKT-Komponenten die Praktikabilität und damit auch die Akzeptanz entsprechender Gütesiegel bei den Betreibern bzw. Anbietern von IKT-Infrastrukturen und -Dienstleistungen erhöhen könnten.

Systeme zur automatisierten Erfassung des Energiebedarfs für eine bestimmte Leistung wurden bisher vor allem im Bereich der industriellen Fertigung erforscht (z. B. Hacksteiner et al. 2017). Im Bereich der IKT-Infrastrukturen besteht hierzu noch erheblicher Forschungsbedarf sowie die Notwendigkeit, entsprechende Standards zu entwickeln.

³¹ www.blauer-engel.de/de/produktwelt/elektrogeraete/rechenzentren; www.blauer-engel.de/de/produktwelt/elektrogeraete/klimaschonende-colocation-rechenzentren; www.blauer-engel.de/de/produktwelt/elektrogeraete/server-und-datenspeicherprodukte; www.blauer-engel.de/de/produktwelt/elektrogeraete/ressourcen-und-energieeffiziente-softwareprodukte (17.3.2021)

Energieeffiziente Programmierung

Welche IKT-Ressourcen eine bestimmte Anwendung benötigt, hängt auch von der programmtechnischen Umsetzung der jeweiligen Anwendungssoftware ab. Denn die Eigenschaften der Software entscheiden, welche Hardwarekapazitäten vorgehalten bzw. eingesetzt werden und wie viel elektrische Energie letztlich in Rechenzentren, Telekommunikationsnetzen und Endgeräten verbraucht wird (Kasten »Green Software«; Hilty et al. 2015, S. 13). Die energieeffiziente Programmierung zielt darauf ab, Anwendungen so zu gestalten, dass der induzierte Energieverbrauch möglichst niedrig ausfällt. Möglichkeiten dazu bestehen z. B. im Verzicht auf bestimmte Funktionalitäten oder in neuen Konzepten für eine möglichst effiziente Hardwarenutzung. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein erhebliches Umdenken in der Softwareentwicklung, da bisher Kriterien wie etwa Anwendungsgeschwindigkeit (mit der Folge, dass Prozessoren stark ausgelastet werden), plattformübergreifende Programmierung (erfordert ressourcenintensive Laufzeitumgebungen wie z. B. Java) oder ein breites Funktionenspektrum (führt zu aufgeblähten Softwarepaketen) im Vordergrund stehen (Rentrop/Augsten 2018a, 2018b).

Die sich stellenden Herausforderungen sind allerdings noch groß: So fehlt es etwa bereits an standardisierten Nutzungsszenarien als Grundlage von Softwaretests. Erst dadurch wird es möglich, die Energieeffizienz unterschiedlicher Softwareprodukte (verschiedene Software, aber auch unterschiedliche Versionen derselben Software) messbar und untereinander vergleichbar zu machen. Auch gilt es, nichtfunktionale Anforderungen für energieeffiziente Software zu definieren, die dann den Softwareentwicklungsprozess anleiten könnten. Auch über die stärkere Berücksichtigung von Energieeffizienz im Informatikunterricht an Schulen und im Informatikstudium kann die Energieeffizienz gefördert werden. Hier sollten insbesondere Lehrmaterialien entwickelt und zur Verfügung gestellt werden (Hilty et al. 2015, S. 54 ff.).

Green Software

Isoliert betrachtet ist Software ein Produkttyp, der viele Nachhaltigkeitskriterien par excellence erfüllt: Software verbraucht in der Herstellung kaum Energie und materielle Ressourcen, sie kann ohne große Mühe vielfältig werden, sie verschleißt nicht und nach ihrer Ausmusterung müssen weder Abfälle noch Schadstoffe entsorgt werden. Allerdings verkennt diese isolierte Betrachtungsweise, dass Software ihre Funktionalität nur im Zusammenspiel mit der Hardware, auf der sie läuft, entfalten kann. Da die Software steuert, wie die Hardwarekomponenten (Prozessoren, Arbeits- und Datenspeicher, Netzwerktechnik, Computerperipherie) beansprucht werden, übt sie einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Computers aus. In der Praxis macht sich dies u. a. dadurch bemerkbar, dass sich verschiedene Softwareprodukte mit vergleichbarer Funktionalität substanziell im Energieverbrauch unterscheiden können (Kern et al. 2018).

Bei der Entwicklung und Programmierung von Software spielt das Kriterium des Energie- und Ressourcenverbrauchs bei der späteren Nutzung bislang üblicherweise keine wesentliche Rolle. Im Gegenteil: Der Druck auf die Softwarehersteller, mit neuen Softwareprodukten und Updates schneller als mögliche Wettbewerber auf dem Markt zu sein und ständig neue Funktionen anzubieten, führt dazu, dass vorhandene Hardwareressourcen (vor allem Speicherplatz, Rechengeschwindigkeit) immer weiter ausgeschöpft werden. Dies wiederum treibt die Hardwarehersteller an, leistungsfähigere Systeme zu entwickeln, die trotz Effizienzgewinnen tendenziell einen höheren Energieverbrauch im Betrieb aufweisen. Dieser Wettlauf führt auch dazu, dass Hardwarekomponenten sehr schnell veralten und durch neue ersetzt werden müssen, was zusätzlich den Energie- und Ressourceneinsatz in der Herstellung erhöht.

Die Frage, welcher Anteil an den Umweltfolgen der IKT-Nutzung der Software zugeschrieben werden kann bzw. muss, ist schwierig zu beantworten. Erst seit etwa fünf bis zehn Jahren sind verstärkte wissenschaftliche Aktivitäten zu beobachten, die sich dieser Frage widmen (Kern et al. 2018). Pionierarbeit bei der Entwicklung umweltbezogener Nachhaltigkeitskriterien für Softwareprodukte wurde etwa in vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojekten geleistet (Gröger et al. 2018; Hilty et al. 2015). Deren Ergebnisse stellen etwa die Grundlage für das neue Umweltzeichen »Blauer Engel« für ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte dar, das seit Januar 2020 verliehen werden kann.³² Bis heute (Stand Ende Dezember 2020) wurde dieses Umweltzeichen allerdings noch kein einziges Mal verliehen.

³² www.blauer-engel.de/de/produktwelt/elektrogeraete/ressourcen-und-energieeffiziente-softwareprodukte (17.3.2021)

Dies verdeutlicht, dass es noch ein langer Weg zu sein scheint, bis Softwareprodukte routinemäßig im Hinblick auf Ressourcen- und Energieeffizienz optimiert werden. Mittels Maßnahmen, die die Entwicklung und Verbreitung von ressourcen- und energieeffizienten Softwareprodukten unterstützen, ließe sich ein (mutmaßlich) enormes Einsparpotenzial erschließen. In dieser Hinsicht sind verstärkte Forschungs- und Förderaktivitäten, mit denen diese Zielsetzung verfolgt werden kann, ein aussichtsreicher Ansatz.

3.2 Treiber und Hemmnisse für die Realisierung von Einsparpotenzialen

Für eine Analyse von Hemmnissen und Treibern für die Erschließung von Energieeinsparpotenzialen im Bereich der IKT-Infrastrukturen werden im Folgenden vier ausgewählte technologische bzw. organisatorische Optionen vertieft behandelt. Die vier Optionen wurden gemäß den folgenden Kriterien ausgewählt:

- › Sie besitzen ein hohes Energieeinsparpotenzial, sind aber noch wenig verbreitet.
- › Die Technologien bzw. Innovationen sind am Markt bereits verfügbar oder befinden sich zumindest in einem marktnahen Pilotstadium.
- › Für deutsche Akteure bestehen wirksame Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung der weiteren Entwicklung und Anwendung der Optionen.

Die ausgewählten Energieeinsparoptionen sind alle dem Bereich der Rechenzentren zuzuordnen. Die identifizierten Optionen mit hohem Einsparpotenzial im Bereich der Telekommunikationsnetze befinden sich, abgesehen vom Glasfaserausbau, überwiegend in einem frühen Entwicklungsstadium (z. B. energieeffizienzoptimierte Netzwerkarchitekturen) oder sind durch deutsche Akteure in Bezug auf die weitere Entwicklung und Anwendung nur schwer zu beeinflussen (z. B. Videokompression). Die folgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Kapitel 3 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019).

3.2.1 Nutzung von Abwärme aus dem Betrieb von Rechenzentren

Die Nettowärmeerzeugung zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung über Wärmenetze in Deutschland betrug 2019 rund 141 TWh. Über zwei Drittel der eingespeisten Wärmeenergie stammte aus fossilen Energieträgern (43,9% Erdgas, 23,1% Kohle, 0,9% Öl). Der Anteil aus erneuerbaren Energien betrug 16,6%, weitere Anteile stammte die Abwärmenutzung aus der Abfallverbrennung (8,7%) und aus industriellen Produktionsprozessen (6,1%) bei (BDEW 2020).

Die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sowie die Erschließung weiterer Abwärmepotenziale sind wichtige Bausteine der Strategien, den CO₂-Ausstoß der Wärmenetze und damit des Wärmesektors insgesamt zu reduzieren. Dabei wird das theoretische Potenzial für die Abwärmenutzung aus industriellen Anlagen mit 130 bis 200 TWh/Jahr als sehr hoch eingeschätzt (Grote et al. 2015; Pehnt et al. 2010). Allerdings wurden die unter Berücksichtigung des heutigen Standes der Technik betriebswirtschaftlich sinnvoll nutzbaren industriellen Abwärmequellen bereits weitgehend erschlossen. Hemmend wirken hier u. a. die räumliche Entfernung der Abwärmequellen zu bestehenden Wärmenetzen und die Abhängigkeit der Wärmebereitstellung von unternehmerischen bzw. produktionsabhängigen Faktoren, was eine Absicherung der Wärmeleistung durch Back-up-Kraftwerke erforderlich macht (BDEW 2017, S. 14 f.).

Die Abwärme aus Rechenzentren ist eine bisher noch weitgehend unerschlossene Wärmequelle zur Speisung von Wärmenetzen. Da die in Rechenzentren eingesetzte elektrische Energie vollständig in Wärmeenergie umgewandelt wird, steht hier aktuell ein theoretisches Wärmepotenzial von bis zu 15 TWh/Jahr für die Wärmeversorgung zur Verfügung (Kap. 2.3.3).

Potenzieller ökologischer Nutzen

Für eine grobe Abschätzung des theoretischen Potenzial für Emissionsminderungen durch die Abwärmenutzung in Rechenzentren werden folgende vereinfachenden Annahmen getroffen (Borderstep Institut 2019, S. 95 ff.):

- › Bei einem Strombedarf der deutschen Rechenzentren von aktuell rund 15 TWh/Jahr (Kap. 2.3.3) steht dieselbe Energiemenge als Abwärme in Form von Wasser der Temperatur von 30 °C zur Verfügung. Da eine vollständige Nutzung in den Sommermonaten unrealistisch ist, wird angenommen, dass langfristig zwei Drittel dieser Wärmemenge (10 TWh/Jahr) in Wärmenetze eingespeist werden könnten.
- › Die Wassertemperatur wird mittels Wärmepumpen auf die in Deutschland üblichen Vorlauftemperaturen in Wärmenetzen von 90 °C angehoben. Dies erfordert 10 TWh an elektrischer Energie (geschätzte Arbeitszahl Wärmepumpen: 2). Die verfügbare Wärmemenge erhöht sich so auf 20 TWh/Jahr.
- › Durch die (zusätzlich) eingespeiste Wärme werden primär erdgasbasierte Heizungsanlagen in Wohngebäuden ersetzt. Bei einem Emissionsfaktor von 0,2 t CO₂/MWh für Erdgas (BAFA 2019b) können dadurch 4 Mio. t CO₂/Jahr vermieden werden.
- › Der Stromverbrauch der Wärmepumpen würde beim aktuellen deutschen Strommix (Emissionsfaktor ca. 0,4 t CO₂/MWh, UBA 2020) zu CO₂-Emissionen von 4 Mio. t/Jahr führen. Unter der Voraussetzung, dass für die Wärmepumpen Strom aus dem Netz bezogen wird, wären in der Summe daher derzeit keine Emissionsminderungen realisierbar.
- › Bei weiter sinkender CO₂-Intensität des Strommix bzw. falls zum Betrieb der Wärmepumpen regenerativ erzeugter Strom verwendet wird, sind Nettoemissionsminderungen realisierbar. Werden die Wärmepumpen langfristig vollständig mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, sind Emissionsminderungen von 4 Mio. t CO₂/Jahr möglich.

Auch wenn sich durch die Nutzung der Abwärme aus Rechenzentren in Wärmenetzen zwar nicht der Energieverbrauch von IKT-Infrastrukturen reduzieren lässt, so könnten dadurch jedoch CO₂-Einsparungen im Wärmesektor von bis zu 4 Mio. t/Jahr realisiert werden, wenn die Wärmepumpen mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben werden.

Diffusionsstand

Die Nutzung der Abwärme aus Rechenzentren ist in Deutschland noch nicht weit verbreitet. Erste Anwendungen wurden vor rund 10 Jahren durch eine direkte Einleitung warmer Abluft aus Serverräumen in Büroräumlichkeiten realisiert (Fichter et al. 2009, S. 26 ff.). Eine (nicht repräsentative³³) Umfrage des Borderstep Instituts unter deutschen Rechenzentrumsbetreibern von 2017 ergab, dass immerhin rund ein Drittel der (großen) Colocationanbieter die Abwärme in mindestens einem ihrer Rechenzentren nutzte. Bei Rechenzentren im Eigenbetrieb lag dieser Anteil bei 20%. Allerdings wurde die Wärme meist nur zu sehr geringen Anteilen für Heizung und Warmwasserbereitung eingesetzt. Lediglich in einem Rechenzentrum wurde mehr als die Hälfte der Abwärme genutzt (Hintemann/Clausen 2018b, S. 25 u. 32).

Im Vergleich zu Deutschland ist die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren in skandinavischen Ländern und insbesondere in Schweden wesentlich weiter vorangeschritten. Im Großraum Stockholm beispielsweise sind bereits 30 Rechenzentren in Fernwärmenetze eingebunden und weitere sollen folgen (Funke et al. 2019, S. 5). Schweden gilt neben Finnland aufgrund der hohen Verbreitung von Wärmenetzen und der Erfahrungen mit der Nutzung von Abwärme von Industriebetrieben als besonders günstiger Standort für entsprechende Anwendungen (Wahlroos et al. 2017, S. 1228). In Dänemark baut Apple derzeit ein großes Rechenzentrum, dessen Abwärme künftig das gesamte Wärmenetz der nahegelegenen Stadt Viborg (ca. 40.000 Einwohner) versorgen soll (Clausen/Beucker 2019, S. 12 f.).

³³ Die Umfrage hatte einen explorativen Charakter. Die teilnehmenden Personen betrieben insgesamt 328 Rechenzentren. Aufgrund der erreichten hohen Marktabdeckung sind die Umfrageergebnisse gleichwohl aussagekräftig (Hintemann/Clausen 2018b, S. 42).

Herausforderungen und politische Handlungsoptionen

Als wesentliche Gründe für die Nichtnutzung der Abwärme aus deutschen Rechenzentren gelten die mangelnde Wirtschaftlichkeit und das Fehlen geeigneter Abnehmer (Hintemann/Clausen 2018b, S. 33).

Zur Einspeisung in Wärmenetze muss Abwärme niedriger Temperaturen, wie sie in luftgekühlten Rechenzentren anfällt, über Wärmepumpen auf die hierzulande üblichen hohen Vorlauftemperaturen von 90 °C (in älteren Bestandsnetzen teilweise auch darüber) angehoben werden. Eine wirtschaftliche Nutzung der Abwärme ist dadurch bei den in Deutschland gegenwärtig vorherrschenden Kostenstrukturen für Industriekunden nicht möglich, da die Gestehungskosten der Abwärmenutzung (nach Wärmepumpe) bei niedrigen Erdgaspreisen (Stand 2018) meist über jenen der Erdgasverbrennung liegen (Hintemann/Clausen 2018a, S. 49 f.). Hohe Investitionskosten zum Anschluss der Rechenzentren an die Wärmenetze beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit noch weiter. Zwar unterstützen Förderprogramme die Realisierung von Wärmenetzen mit Abwärmenutzung (z. B. die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze [Wärmenetzsysteme 4.0] oder die Förderung im Rahmen des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz; BAFA 2019a, 2019c). Allerdings vermag es die investive Förderung nicht, die Unwirtschaftlichkeit im laufenden Betrieb auszugleichen.

Auch wenn die Wirtschaftlichkeit im Betrieb künftig gegeben sein sollte, wären weitere Anstrengungen nötig, um die Abwärmenutzung in Rechenzentren (und darüber hinaus) voranzutreiben. Um eine klimafreundliche Transformation der Wärmeversorgung voranzutreiben, erscheint eine systematische Gesamtbetrachtung von Wärmequellen, -netzen und -verbrauchern notwendig, an der es jedoch in Deutschland vielerorts noch fehlt, da es bislang keine Verpflichtung für eine kommunale oder überregionale Wärmeplanung gibt. Erste gesetzgeberische Aktivitäten in diese Richtung sind in jüngster Zeit auf Landesebene festzustellen (Maaß 2020, S. 22).³⁴ Wichtige inhaltliche Elemente von kommunalen Wärmenutzungsplänen wären z. B. die umfassende Bestandsaufnahme (Wärme- und Abwärmepotenziale, Versorgungsgebiete, Netzentwicklung) sowie die Definition von Zielen und konkreten Entwicklungsschritten für eine klimaneutrale Wärmeversorgung der Kommune (Bitkom 2019a; DUH 2020). Im Rahmen der Wärmeplanung könnten Kommunen Anreize für die Abwärmenutzung in Rechenzentren setzen, etwa indem spezielle Gebiete für den Bau von Rechenzentren ausgewiesen werden, wenn sich in deren Nähe bedeutende Wärmesenken befinden oder bestehende Infrastrukturen genutzt werden können. Gerade durch den Trend zu kleineren Edge-Rechenzentren könnte künftig eine Vielzahl an dezentralen Abwärmequellen zur Verfügung stehen, die sich (im Unterschied zu industriellen Abwärmequellen) vergleichsweise einfach in städtische Strukturen integrieren ließen (Borderstep Institut 2019, S. 128).

3.2.2 Flüssigkeitsgekühlte Server und Komplettsysteme

Stetig steigende Leistungsdichten bei vielen IT-Komponenten, insbesondere bei CPUs, führen auch dazu, dass die erforderliche Kühlleistung in Rechenzentren kontinuierlich wächst. Bei den heute gängigen Luftkühlungssystemen müssen daher immer größere Luftmengen umgewälzt werden, was zu steigenden Energie- und Ressourcenbedarfen für die Lüftungsanlagen führt. Da Luft ein schlechter Wärmeträger ist, gerät im Hochleistungsbereich die Luftkühlung zunehmend an physikalische Grenzen (Funke et al. 2019, S. 13).

Im Vergleich zu Luft können Flüssigkeiten wesentlich mehr Wärmeenergie pro Volumeneinheit aufnehmen. Für den Wärmetransport müssen folglich geringere Mengen an Kühlmittel bewegt werden. Außerdem ist der Strömungsverlust bei Flüssigkeiten niedriger als bei Gasen. Aus diesen Gründen ist die Kühlung mit Flüssigkeiten nicht nur leistungsfähiger, sondern auch energieeffizienter als die Luftkühlung.

In Bezug auf die technische Umsetzung kann zwischen indirekten und direkten Systemen unterschieden werden (Borderstep Institut 2019, S. 102 f.):

- › Bei der indirekten Flüssigkeitskühlung besteht kein direkter Kontakt zwischen dem flüssigen Kühlmittel (in der Regel Wasser) und den elektronischen Komponenten. Mit der Kühlflüssigkeit werden spezielle Kühlelemente gekühlt, die an die Elektronikkomponenten angebracht werden. Mit solchen Systemen werden typischerweise nur die Prozessoren gekühlt, da sie viel Wärme abgeben und eine einfache Geometrie aufweisen, während andere IT-Komponenten weiterhin mit Luft gekühlt werden.

³⁴ Beispielsweise verpflichtet das im Oktober 2020 novellierte Klimaschutzgesetz von Baden-Württemberg Stadtkreise und große Kreisstädte dazu, bis Ende 2023 kommunale Wärmepläne zu erstellen, und legt dazu auch spezifische inhaltliche Anforderungen fest (§§ 7c bis 7e Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg).

- › Bei der direkten Flüssigkeitskühlung stehen Kühlmittel und Elektronikkomponenten im direkten Kontakt. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, werden nichtleitende (dielektrische) Flüssigkeiten (z. B. Öle oder speziell entwickelte Flüssigkeiten) verwendet. Bei der Immersionskühlung beispielsweise werden Server vollständig in ein dielektrisches Bad eingetaucht.

Potenzieller ökologischer Nutzen

Im Vergleich zur Luftkühlung bietet die Flüssigkeitskühlung eine Reihe von ökologischen Vorteilen:

- › Anstelle von vergleichsweise ineffizienten Lüftungsanlagen mit hohem Stromverbrauch kommen energieeffiziente Pumpensysteme zum Einsatz.
- › Der effizientere Wärmeabfluss erlaubt es, die Server dichter aufzustellen. Dies reduziert den Flächenbedarf der Rechenzentren.
- › Bei der Luftkühlung werden heute typischerweise Zulufttemperaturen von rund 22 °C verwendet (Hintemann/Clausen 2018b, S. 28) und Ablufttemperaturen von 25 bis 35 °C erzeugt. Der effizientere Wärmetransport bei Flüssigkeiten erlaubt hingegen Eintrittstemperaturen von rund 50 °C und Austrittstemperaturen von 55 bis 60 °C. Das höhere Temperaturniveau hat den Vorteil, dass auch im Sommer keine energieintensiven Kältemaschinen für die Rückkühlung des Kühlmediums erforderlich sind, ein Trockenkühlturm reicht dazu in der Regel aus.

Durch den effizienteren Wärmeabfluss und verringerten Geräteeinsatz kann der Energiebedarf für die Kühlung eines Rechenzentrums laut einer groben Abschätzung eines Anbieters entsprechender Lösungen um bis zu 80 % reduziert werden (Thomas Krenn AG o. J.). Dieser Wert hängt allerdings stark von den jeweiligen spezifischen Rahmenbedingungen ab.

Weitere Vorteile ergeben sich daraus, dass flüssigkeitsgekühlte Rechenzentren die Abwärme mit höheren Temperaturen im Vergleich zu luftgekühlten Systemen bereitstellen:

- › Die Abwärme eignet sich gut für Heizzwecke oder zur Warmwasserbereitung in Wohn- oder Geschäftsgebäuden (Funke et al. 2019, S. 13). Alternativ bzw. ergänzend können damit wärmegetriebene Kältemaschinen (siehe solare Kühlung im Glossar) angetrieben, deren Kälte zur Kühlung von Akkus der USV oder im Sommer von Büros verwendet werden kann.
- › Abwärme höherer Temperatur lässt sich deutlich effizienter in Wärmenetze einspeisen, da der erforderliche Temperaturhub auf die Vorlauftemperatur von etwa 90 °C kleiner wird. Im Anwendungsbeispiel aus Kapitel 3.2.1 (Einspeisung von jährlich 10 TWh Abwärme aus Rechenzentren in Wärmenetze) reduziert sich der Energieeinsatz für die Wärmepumpen von 10 auf 3,3 TWh/Jahr. Durch Substitution von erdgasbasierten Heizungen könnten so auch beim aktuellen deutschen Strommix Nettoemissionsminderungen von 1,3 Mio. t CO₂/Jahr realisiert werden. Wird Strom aus regenerativer Erzeugung für die Wärmepumpen eingesetzt, wären Minderungen von 2,7 Mio. t CO₂/Jahr möglich.
- › Die Anschlussfähigkeit an Wärmenetze kann weiter verbessert werden, wenn deren Vorlauftemperaturen herabgesenkt würden. Dänische Wärmenetze der 4. Generation etwa arbeiten mit einer Vorlauftemperatur von 55 bis 60 °C, sodass hier die Abwärme flüssigkeitsgekühlter Rechenzentren direkt eingespeist werden kann. Unter diesen Bedingungen könnten in Deutschland Emissionsminderungen von 2 Mio. t CO₂/Jahr bei Substitution von Erdgasheizungen realisiert werden.

Diffusionsstand

Im Hochleistungsbereich (z. B. bei rechenintensiven wissenschaftlichen Anwendungen) wird die Flüssigkeitskühlung aufgrund der hohen abzuführenden Wärmemengen seit einigen Jahren verstärkt angewendet. Als Pionier gilt das Leibniz-Rechenzentrum in München, das bereits 2011 eine indirekte Wasserkühlung für besonders leistungsintensive Komponenten (CPU, Hauptspeicher etc.) in seine Hochleistungsrechner SuperMUC und CoolMUC in-

stallierte. Das System besitzt eine Kühlleistung von 8 MW, wobei die Abwärme im Winter für die Gebäudeheizung und im Sommer zur Kälteerzeugung verwendet wird (LRZ 2014). 2019 wurde hier der Hochleistungsrechner CoolMUC3 in Betrieb genommen, der vollständig mit Wasser gekühlt wird (Häuslein/Ostler 2019).

Abseits des Hochleistungsbereichs ist die Diffusion der Flüssigkeitskühlung hingegen noch nicht weit vorgeschritten. In einer Umfrage des Borderstep Instituts von 2017 gaben nur 11 % der befragten Betreiber von Rechenzentren im Eigenbetrieb an, wassergekühlte Server einzusetzen. Von den befragten Colocationanbietern nutzte keiner diese Option (Hintemann/Clausen 2018b, S. 31). Ein Grund dafür ist, dass sich die traditionellen Anbieter von Systemen der Flüssigkeitskühlung vor allem auf den Bereich des High Performance Computing fokussieren. Mittlerweile allerdings bieten neue Marktakteure vermehrt auch Lösungen für den Einsatz in Standardrechenzentren an.

Herausforderungen und politische Handlungsoptionen

Technische Herausforderungen bestehen vor allem für die Anbieter von Hardwarekomponenten (CPUs, Speichermodule, Chipsätze etc.), die ihre Produkte so konstruieren müssen, dass eine Flüssigkeitskühlung möglich wird. Dazu wäre auch die Normung und Standardisierung voranzutreiben, da bisher z. B. die Wasseranschlüsse nicht standardisiert sind. Sinnvoll wäre zudem die Entwicklung von Kühllösungen für alle Komponenten eines Rechenzentrums (Netzteile, USV etc.), damit ganz auf eine Luftkühlung verzichtet werden kann. Für einen breiten Einsatz der Flüssigkeitskühlung ist es förderlich, dass das Marktangebot an Produkten, die für einen Einsatz mit Wasserkühlung optimiert sind, vergrößert wird.

Außer im Hochleistungsbereich ist die Luftkühlung die bisher dominierende und für die Betreiber zuverlässigste Kühllösung. Ein Umstieg auf Flüssigkeitskühlung ist aufwendig, da bestehende Server durch flüssigkeitsgekühlte Geräte ausgetauscht werden müssen. Insbesondere ein fließender Übergang ohne Betriebsunterbrechung ist nur mit erheblichem Aufwand möglich, da temporär zwei Kühlsysteme parallel betrieben werden müssen. Aus diesem Grund ist auch eine Erprobung der Technologie nicht ohne Weiteres möglich. Diffusionshemmend wirken zusätzlich mögliche Vorbehalte der Betreiber gegen die (indirekte) Flüssigkeitskühlung, da sie die Verwendung von Wasser in den Servern aufgrund der Kurzschlussgefahr als potenzielles Betriebsrisiko einschätzen. Insofern ist hier auch ein Umdenken bei den Betreibern von Rechenzentren notwendig.

Politisch ließe sich die Verbreitung der Flüssigkeitskühlung durch folgende Maßnahmen unterstützen:

- › Die Normung könnte als Normungsprozess mit öffentlichem Interesse mit staatlicher Unterstützung vorangetrieben werden.
- › Von Branchenverbänden wird zwar verschiedentlich auf die Vorteile der Flüssigkeitskühlung hingewiesen (z. B. Funke et al. 2019, S. 13 ff.). Darüber hinausgehende Aktivitäten von Intermediären zur Unterstützung der Technologie sind aber nicht bekannt. Politische Anstrengung erscheinen daher nötig, um mithilfe von Informationsmaßnahmen die Vorzüge der Flüssigkeitskühlung unter Rechenzentrumsbetreibern, aber auch bei Herstellern und Dienstleistern bekannter zu machen. Die Initiierung und Förderung von Demonstrationsanlagen, die als Best-Practice-Beispiele dienen, könnte dabei helfen, ggf. vorhandene Vorbehalte gegen die Flüssigkeitskühlung abzubauen. Die Technologie könnte außerdem bei Ausschreibungen zum Bau oder Betrieb von Rechenzentren für die öffentliche Hand Berücksichtigung finden. Eine Idee wäre schließlich die Ausschreibung eines Innovationspreises, der beispielsweise an die ersten drei vollständig mit Flüssigkeitskühlung ausgestatteten Rechenzentren gehen könnte.
- › Die Förderung der Forschung und Entwicklung von wassergekühlten Servern sollte ausgebaut werden. Bisher wurden hierzu nur vereinzelte Projekte gefördert.³⁵

³⁵ Ein Beispiel ist das Projekt »Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren mit Hot-Fluid-Adsorptionskälte-System« (HotFIAd) im Rahmen der Förderinitiative »EnEff.Gebäude.2050 – Innovative Vorhaben für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050« des BMWi. Im Projekt soll die Abwärme von komplett wassergekühlten Servern für Kühlzwecke nutzbar gemacht werden (Borderstep Institut 2020).

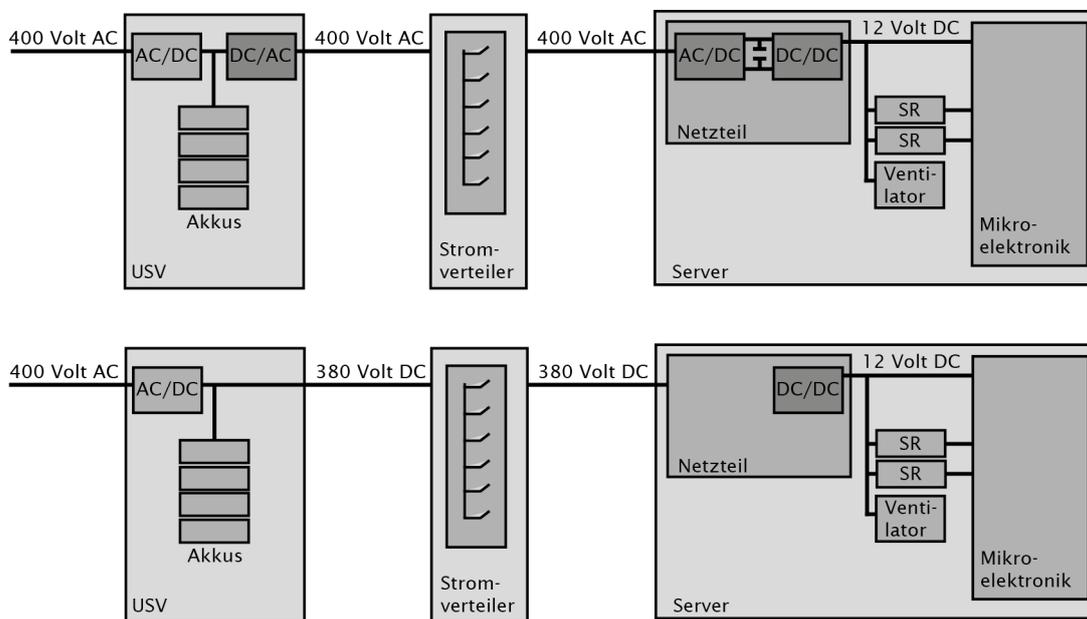
3.2.3 Gleichstromversorgung von Rechenzentren

Heute üblich ist die Stromversorgung der Geräte und Anlagen im Rechenzentrum (Server, Netzwerktechnik, Ventilatoren etc.) mit Wechselstrom. Dadurch erhöht sich allerdings der apparative Aufwand zur Herstellung einer USV. Diese wird typischerweise wie folgt realisiert (Abb. 3.6, oben):

1. Aus dem Versorgungsnetz bezogener Wechselstrom (z. B. 400 Volt Drehstrom) wird in Gleichstrom umgewandelt und in Akkus (zwischen)gespeichert.
2. Aus den Akkus wird Gleichstrom entnommen und wieder in Wechselstrom transformiert. Dieser wird über Stromverteiler an die einzelnen Geräte und Anlagen geleitet.
3. In den Netzteilen der IKT-Endgeräte wird der Wechselstrom ein weiteres Mal in Gleichstrom (und auf eine niedrigere Spannung von in der Regel 12 Volt) umgewandelt, da Elektronikkomponenten wie Prozessor, Speicher etc. mit Gleichspannung versorgt werden.

Jeder dieser Umwandlungsprozesse ist mit Verlusten verbunden. Wenn die Endgeräte stattdessen direkt mit Gleichstrom aus den Akkus versorgt werden, entfallen zwei Umwandlungsprozesse (einer hinter dem Akku in der USV und einer in den Netzteilen der Endgeräte; Abb. 3.6, unten) sowie die dazugehörigen Verluste.

Abb. 3.6 Vergleich Wechsel- und Gleichstromversorgung im Rechenzentrum



AC/DC = Wechselstrom/Gleichstrom; SR = Spannungsregler; USV = unterbrechungsfreie Stromversorgung

Quelle: nach Borderstep Institut (2019, S. 113 f.)

Potenzieller ökologischer Nutzen

Durch eine Umstellung der Stromversorgung in Rechenzentren von der heute gängigen Wechsel- auf die Gleichstromtechnologie ließen sich die Umwandlungsverluste reduzieren. Zusätzlich führt der Wegfall von zwei Stromumrichtern zu kleineren Geräten mit einer geringeren Wärmeentwicklung, sodass auch der Kühlbedarf im Rechenzentrum abnimmt. Das hierdurch entstehende Potenzial für Stromeinsparungen wird im Bereich von 4% (George/Ferrand 2017, S. 8) bis 10% geschätzt (Petschke 2015; Püschel 2019). Ausgehend vom aktuellen Strombedarf der deutschen Rechenzentren von ca. 15 TWh/Jahr (Kap. 2.3.3) entspräche dies der Einsparung einer Strommenge von 0,6 bis 1,5 TWh/Jahr bzw. einer Treibhausgasmenge von 0,24 bis 0,6 Mio. t CO₂/Jahr (bei einem Emissionsfaktor ca. 0,4 t CO₂/MWh, UBA 2020).

Durch den Wegfall der Stromrichter könnten schließlich Materialressourcen eingespart werden. Außerdem kann ggf. der Wartungsaufwand verringert werden.

Diffusionsstand

Der Verbreitungsgrad der Gleichstromtechnologie in Rechenzentren ist derzeit noch äußerst gering. 2015 wurde die Zahl der weltweiten Rechenzentren mit Gleichstromversorgung auf rund 25 geschätzt, wobei die meisten als kleinere Test- oder Demonstrationsanlagen ausgelegt waren (Petschke 2015).

In den letzten fünf Jahren ist das Interesse an der Technologie deutlich gestiegen (dazu und zum Folgenden Püschel 2019). In Japan hat das Telekommunikationsunternehmen NTT bisher 250 seiner Rechenzentren umgerüstet und bis 2030 sollen alle 1.000 Rechenzentren mit Gleichstromsystemen ausgestattet werden. Ähnliche Pläne verfolgen Orange in Frankreich sowie China Mobile, das bereits ein 12 MW-Rechenzentrum umgerüstet hat. Auch in Deutschland gibt es erste Rechenzentren mit Gleichstromversorgung.

Trotz dieser Fortschritte ist der Verbreitungsgrad der Gleichstromtechnologie angesichts einer weltweit in die Millionen gehenden Gesamtzahl an Rechenzentren immer noch sehr gering.

Herausforderungen und politische Handlungsoptionen

Die Verfügbarkeit von Komponenten für den Aufbau von Gleichstromsystemen ist derzeit noch begrenzt. Dies betrifft nicht nur IKT-Geräte wie Server, Speicher oder Netzwerktechnik, sondern auch elektrotechnische Komponenten wie Stecker, Schalter oder Netzteile (Nolte 2018). Um die Effizienzvorteile der Gleichstromversorgung vollständig zu erschließen, müssten schließlich alle Anlagen im Rechenzentrum, die auf eine USV angewiesenen sind (Kühlung, Brandschutzsysteme etc.), umgerüstet werden, da anderenfalls parallel ein Wechselstromsystem betrieben werden muss. Zwar bieten immer mehr Anbieter entsprechende Komponenten an, bevor die Gleichstromtechnologie in Rechenzentren richtig Fuß fassen kann, muss deren Marktverfügbarkeit aber weiter ausgebaut werden. Eine wichtige Voraussetzung hierzu ist die Standardisierung von Komponenten für Gleichstromsysteme. Der Normungsprozess hat zwar begonnen, ist aber noch lange nicht abgeschlossen.

Für die Betreiber von Rechenzentren ist die Umstellung auf einen Gleichstrombetrieb aufwendig, da auch in neu gebauten Rechenzentren zuweilen alte Server- oder Speicherlösungen verwendet werden. Insbesondere für Colocationanbieter wäre eine Fokussierung auf die Gleichstromversorgung mit geschäftlichen Risiken verbunden, da sich dann alle Kunden mit ihrer jeweiligen Hardware darauf einstellen müssten. Insgesamt stellt die vorhandene Wechselstrominfrastruktur in Kombination mit der begrenzten Verfügbarkeit an Gleichstromkomponenten eine stark wirksame Pfadabhängigkeit dar, die die weitere Verbreitung der Gleichstromtechnologie in Rechenzentren noch geraume Zeit hemmen dürfte.

Politische Maßnahmen zur Förderung der Gleichstromtechnologie sollten daher die Überwindung bestehender Pfadabhängigkeiten zum vorrangigen Ziel haben. Eine Möglichkeit hierzu besteht darin, innovative Pilotanwender bei der Errichtung neuer Rechenzentren auf Basis der Gleichstromtechnologie zu unterstützen. Beispiele wie die japanische NTT zeigen, dass große Betreiber von Rechenzentren die Entwicklung der Technologie vermöge hoher eigener Kompetenzen auch ohne ausformulierte Normierungsgrundlage vorantreiben können. Als wichtige Pilotanwender hierzulande kämen beispielsweise staatliche Großrechenzentren aus dem forschungs- und/oder universitären Bereich infrage, die für die Umsetzung mit den entsprechenden finanziellen und personellen Ressourcen auszustatten wären. Anreize auch für private Betreiber könnten beispielsweise durch die Ausruhmung eines Innovationspreises für die ersten vollständig mit Gleichstromtechnologie betriebenen Rechenzentren geschaffen werden. Durch diese Maßnahmen ließe sich zugleich die Nachfrage nach Gleichstromkomponenten steigern und somit die Entwicklung, Normung und Marktverfügbarkeit der Technologie stimulieren. Zudem würden die Rechenzentren als Demonstrationsanlagen für die Gleichstromtechnologie dienen, um Praxiserfahrungen zu sammeln und mögliche Anwender, Hersteller und Dienstleister über den Nutzen der Technologie zu informieren. Mit Blick auf eine weitere Verbreitung der Gleichstromtechnologie wäre es schließlich auch wichtig, die Ausbildung von Fachplanern und Elektroinstallateuren um entsprechende Inhalte zu erweitern.

3.2.4 Rechenzentren als Anbieter von Regelleistung

Im Stromnetz muss fortwährend ein Leistungsgleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch aufrechterhalten werden. Übertragungsnetzbetreiber sind daher auf die Regelleistung angewiesen, also elektrische Leistung, die bei Bedarf entweder zusätzlich in die Netze eingespeist werden kann (positive Regelleistung) oder die den Stromverbrauch zusätzlich erhöht (negative Regelleistung). Den Übertragungsnetzbetreibern stehen dabei drei Regelleistungsqualitäten zur Verfügung (Bundesnetzagentur o. J.):

- › *Primärregelleistung* wird zur schnellen Stabilisierung des Netzes instantan benötigt und muss innerhalb von 30 Sekunden in voller Leistung erbracht werden können;
- › *Sekundärregelleistung* muss innerhalb von fünf Minuten in voller Höhe zur Verfügung stehen;
- › *Minutenreserve* wird zur Ablösung der Sekundärregelleistung eingesetzt, ist mit einer Vorlaufzeit von bis hinunter zu 7,5 Minuten zur erbringen und wird mindestens 15 Minuten lang in konstanter Höhe abgerufen.

Ein Großteil der Regelleistung wird dabei nur selten benötigt, muss aber zur Sicherung der Stromversorgung permanent vorgehalten werden und kurzfristig abrufbar sein.

Rechenzentren verfügen mit den Anlagen der *USV* über gute technische Voraussetzungen, um in den Regelleistungsmarkt eingebunden zu werden:

- › Die Leistung der Akkus ist automatisch gesteuert in Sekundenbruchteilen verfügbar. Sie könnte als Primärregelleistung angeboten werden;
- › Die Leistung der Notstromaggregate ist binnen Sekunden bis weniger Minuten abrufbar. Sie ließe sich als Sekundärregelleistung vermarkten.

Für die Bereitstellung von Regelleistung durch Rechenzentren sind keine aufwendigen technischen Änderungen erforderlich, da die Anlagen der *USV* ohnehin bereits vorhanden sind und ständig einsatzbereit sein müssen. Notwendig ist lediglich eine informationstechnische Anbindung an ein virtuelles Kraftwerk. Hierbei handelt es sich um einen Zusammenschluss von meist kleineren Akteuren im Strommarkt mit dem Zweck, aus der gemeinsamen Vermarktung Marktvorteile zu generieren. Virtuelle Kraftwerke werden von spezialisierten Unternehmen betrieben, sodass sich die Betreiber der Rechenzentren nicht um die Vermarktung der Regelleistung kümmern müssen.

Für Betreiber von Rechenzentren ist die Beteiligung am Regelleistungsmarkt durchaus wirtschaftlich attraktiv und kann darüber hinaus weitere betriebliche Vorteile bieten, wie dies im Folgenden am Beispiel der Sekundärregelleistung erörtert wird. Für die Rechenzentrumsbetreiber stellt die Bereitstellung der Notstromaggregate für die *USV* bislang einen reinen Kostenfaktor dar. Am Regelleistungsmarkt können damit jedoch Erlöse erzielt werden. So hätte z. B. ein Angebot für positive Sekundärregelleistung in der Höhe von 1 MW zwischen Herbst 2019 und Herbst 2020 Einnahmen von etwa 44.000 Euro generiert (wovon allerdings ein vertraglich vereinbarter Anteil an den Betreiber des virtuellen Kraftwerks geht) (dena o. J.).³⁶ Demgegenüber stehen einmalige Investitionskosten für die Anbindung an ein virtuelles Kraftwerk von rund 4.000 Euro (Hintemann/Clausen 2018a, S. 50). Zusätzliche betriebliche Vorteile sind, dass eine häufigere Nutzung der Notstromaggregate das Erkennen von technischen Problemen verbessert, was deren Zuverlässigkeit erhöht. Schließlich können dadurch die sogenannte Dieselpest (langsam voranschreitende mikrobielle Abbauprozesse im Dieselmotorkraftstoff der Aggregate) und andere stillstandsbedingte Schäden vermieden werden (Hintemann/Clausen 2018a, S. 50 f.).

Potenzieller ökologischer Nutzen

Durch die Bereitstellung von Regelleistung aus Notstromaggregaten von Rechenzentren können keine Stromersparungen in den IKT-Infrastrukturen realisiert werden. Allerdings ließe sich dadurch ein Teil der Kraftwerksleistung, die den deutschen Bedarf an positiver Sekundärregelleistung von derzeit rund 1.900 MW (Stand Mitte

³⁶ Erlöse aus der Bereitstellung von positiver Sekundärregelleistung in der Haupt- und Nebenzeit. Die Vergütung wird für das reine Vorhalten der Leistung fällig. Wenn diese tatsächlich abgerufen wird, wird zusätzlich ein Arbeitspreis bezahlt.

2019; Regelleistung.net 2019) deckt, ersetzen. Regelleistung wurde bisher überwiegend durch konventionelle Erzeugungsanlagen bereitgestellt, soll (bzw. muss) künftig aufgrund der Transformation des Stromsystems aber zunehmend auch aus Erneuerbare-Energien-Anlagen kommen (Bundesnetzagentur 2017). Die verfügbare Stromerzeugungsleistung durch Notstromaggregate in deutschen Rechenzentren wurde durch das Borderstep Institut bereits 2014 auf über 700 MW beziffert (Hintemann/Clausen 2018a, S. 50), sodass Rechenzentren einen substanziellen Beitrag zur positiven Regelleistung beisteuern könnten. Eine Quantifizierung der dadurch erzielbaren Ressourcen- und Treibhausgasersparungen ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge an dieser Stelle allerdings nicht möglich. So ist einerseits die tatsächliche Bereitstellung von Regelleistung durch (ggf. ältere) Diesel-Notstromaggregate mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden als beim Einsatz von hocheffizienten thermischen Kraftwerken. Andererseits führt die Regelleistungsvorhaltung durch konventionelle Großkraftwerke typischerweise zum Teillastbetrieb oder zu speziell für diesen Zweck angefahrenen Kraftwerken, was Effizienzmindernungen und folglich höhere Treibhausgasemissionen zur Folge haben kann. Der ökologische Nutzen alternativer Konzepte zur Bereitstellung von Regelleistung besteht allerdings weniger in direkten Emissionsminderungen. Vielmehr ist entscheidend, dass damit konventionelle Großkraftwerke, die bisher für die Netzstabilisierung erforderlich sind, abgelöst und perspektivisch vom Netz genommen werden können.

Diffusionsstand

Das Potenzial von Rechenzentren zur Bereitstellung von Regelleistung wird bislang kaum ausgeschöpft. Zwar gibt es bereits einzelne Betreiber, die Regelleistung anbieten. Gleichwohl schätzen die Gutachter des Borderstep Instituts (2019, S. 121) die Gesamtzahl der Betreiber, die sich derzeit am Regelleistungsmarkt beteiligen, als niedrig ein. Belastbare Informationen dazu sind keine verfügbar. In einer Umfrage des Borderstep Instituts von 2017 gab immerhin etwa ein Drittel der befragten Betreiber an, die Teilnahme am Strommarkt durch ein Angebot an Regelleistung schon einmal in Erwägung gezogen zu haben (Hintemann/Clausen 2018b, S. 33).

Herausforderungen und politische Handlungsoptionen

Ihrer eigentlichen Bestimmung nach gelangen Notstromaggregate bestenfalls nie bzw. nur äußerst selten zum Einsatz. Die Anlagen sind technisch daher meist nicht für einen länger anhaltenden Betrieb ausgelegt. Auch immissionsschutzrechtlich sind längere Einsatzzeiten nicht vorgesehen. Insbesondere in Regionen mit hoher Feinstaubbelastung könnte der Betrieb von großen Dieselaggregaten ohne bestmögliche Abgasreinigung problematisch sein (Hintemann/Clausen 2018a, S. 51). Für jede Anlage wären daher optimale Betriebsdauern zu eruiieren, um die Anforderungen aus der Regelleistungsbereitstellung sowie technische und immissionsschutzrechtliche Restriktionen bestmöglich in Einklang zu bringen.

Bei den Betreibern von Rechenzentren kann die Bereitstellung von Regelleistung auf Sicherheitsbedenken stoßen, da die Anlagen entgegen der gewohnten Routinen genutzt werden. Auch Unsicherheiten in Bezug auf den regulatorischen Rahmen könnten Betreiber von Rechenzentren und virtuellen Kraftwerken bisher daran gehindert haben, entsprechende Projekte voranzutreiben. So kam es in der Vergangenheit zu verschiedenen Anpassungen im Regelleistungsmarkt. Beispielsweise wurde das 2018 eingeführte Mischpreisverfahren nach einer erfolgreichen Klage 2019 bereits wieder aufgehoben. Das Mischpreisverfahren wurde u. a. dafür kritisiert, konventionelle Erzeugungsanlagen zu bevorzugen (Enkhardt 2019). Neue Modalitäten für den Regelleistungsmarkt traten im November 2020 in Kraft³⁷ (Bundesnetzagentur 2020b).

Politische Handlungsmöglichkeiten, um das vorhandene Potenzial zur Bereitstellung von Regelleistung in Rechenzentren besser zu erschließen, wären vor diesem Hintergrund u. a.:

- › Ein dezentrales Angebot an Regelleistungsquellen könnte bei regionalisierter Beauftragung auch das Netz entlasten. Da die Vergabe gegenwärtig im Netzverbund zentral erfolgt, dürfte dies wenig Wirkung bei der Netzentlastung haben. Handlungsbedarf wäre hier im Energierecht (etwa beim EnWG) oder der Praxis des Netzmanagements (Expertenworkshop, 2019).

³⁷ Der Handel mit Leistung und Arbeit (d. h. Energie) findet seitdem für Sekundär- und Minutenreserve auf zwei getrennten Märkten statt, d. h. es können auch für Anlagen, die sich auf dem Regelleistungsmarkt nicht durchgesetzt haben, auf dem Regelarbeitsmarkt Angebote abgegeben werden.

- › Damit sich Betreiber von Rechenzentren für eine aktive Teilnahme am Strommarkt entscheiden, sind verlässliche Rahmenbedingungen unerlässlich. Dazu müsste zum einen die immissionsschutzrechtliche Einordnung von Notstromstromaggregaten, die ebenfalls zur Bereitstellung von Regelleistung eingesetzt wären, geklärt werden. Gemäß Bundes-Immissionsschutzrecht gelten für Anlagen, die »ausschließlich dem Notbetrieb dienen« (§ 16 Abs. 5 44. BImSchV³⁸), eine Reihe von Ausnahmen für die zulässigen Grenzwerte. Notstromaggregate zur Bereitstellung von Regelleistung fallen unter Umständen jedoch nicht mehr unter diese Definition. Hier wären ggf. spezifische Regelungen zu erarbeiten. Zum anderen gilt es, regulatorische Unsicherheiten im Regelleistungsmarkt zu vermeiden bzw. auszuräumen. Ob das ab Ende 2020 gültige Marktdesign für die Betreiber von Rechenzentren attraktive Konditionen bietet, muss sich in den kommenden Jahren erweisen.
- › Ähnlich wie bei den anderen zuvor beschriebenen Technologien könnten mit öffentlichen Mitteln unterstützte Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen dazu beitragen, bei den Betreibern von Rechenzentren ggf. vorhandene Bedenken abzubauen und den ökonomischen Nutzen aufzuzeigen. Gleichzeitig könnten solche Projekte genutzt werden, um die Vorteile einer Umstellung der heute gängigen Blei-Säure-Akkus auf Lithium-Ionen-Akkus zu demonstrieren und interessierten Akteuren bekannt zu machen. Lithium-Ionen-Akkus eignen sich aufgrund der Möglichkeit für häufige Ladezyklen gut für die Bereitstellung von Primärregelleistung (Kap. 3.1.3).
- › Ein weitergehender Vorschlag, um das Potenzial der Regelleistungsbereitstellung durch Rechenzentren deutlich umfassender als bisher auszuschöpfen, bestünde darin, die Genehmigung von Notstromaggregaten an eine Verpflichtung zur Erbringung von Netzdienstleistungen zu knüpfen.

3.3 Zwischenfazit

Wie in diesem Kapitel dargestellt, besteht eine Vielzahl von technologischen und organisatorischen Optionen zur Einsparung von Energie in IKT-Infrastrukturen. Als effizienzsteigernde Innovationen setzen sich viele dieser Optionen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zwar, aber dennoch durch Marktkräfte getrieben von selbst bei den Betreibern von IKT-Infrastrukturen durch. Fraglich ist allerdings, ob die marktgetriebene Diffusion schnell genug erfolgt, um den durch das rasante Wachstum der IKT-Branche induzierten steigenden Energiebedarf durch Effizienzgewinne ausgleichen zu können. Im vorliegenden Kapitel wurden daher zahlreiche Ansätze identifiziert, wie die Erschließung von Energieeinsparpotenzialen in den IKT-Infrastrukturen durch staatliche Akteure (Politik, Behörden und weitere Einrichtungen der öffentlichen Hand) über die durch Marktmechanismen bestimmte Geschwindigkeit hinaus beschleunigt werden könnte.

Ein politisches Handlungsfeld ist die *Forschungsförderung*. Grundlagenforschung erscheint insbesondere im Bereich der Mikroelektronik essenziell, wo nach dem absehbaren Ende vom Mooreschen Gesetz neue technologische Ansätze notwendig sind, um auch mittel- bis langfristig den stetig wachsenden Bedarf an IKT-Leistungen ohne massiv ansteigende Energiebedarfe decken zu können. Auch wenn Innovationen im Bereich der Mikroelektronik vielfach eher in den USA und Asien hervorgebracht werden, sind deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen insbesondere in den Bereichen Nanotechnologie, Silicon Photonics und Quantencomputer durchaus wettbewerbsfähig. Wichtige Bedarfe für die angewandte Forschung bestehen vor allem im Bereich des übergreifenden (Energie-)Managements komplexer dynamischer IKT-Systeme. Benötigt werden hier Lösungen insbesondere für den energieeffizienten Auf- und Ausbau künftiger Netzwerkarchitekturen (Edge, Fog, Cloud) oder für die ganzheitliche Optimierung von IKT-Systemen. In Bezug auf Rechenzentren ist darauf zu achten, dass Energieeffizienzmaßnahmen jeweils angepasst auf alle Größenklassen (weiter)entwickelt und zur Marktreife geführt werden, da die künftige Netzwerkarchitektur von immer größeren Cloud-Rechenzentren auf der einen Seite der Skala und einer wachsenden Zahl an kleinen Edge- oder Micro-Rechenzentren auf der anderen Seite geprägt sein wird. Die Bundesregierung fördert (Stand: März 2021) entsprechende Forschungs- und Entwicklungsprojekte beispielsweise in den Rahmenprogrammen »Mikroelektronik aus Deutschland – Innovationstreiber der Digitalisierung« (Laufzeit: 2016 bis 2020) und »Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland

³⁸ Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über mittelgroße Feuerungs-Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen – 44. BImSchV)

und Europa« (Laufzeit: 2021 bis 2024).³⁹ Die Forschungsförderung in diesem Bereich sollte verstetigt und ggf. ausgebaut werden.

Ein weiteres Handlungsfeld für staatliche Akteure eröffnet sich im Rahmen der *öffentlichen Beschaffung*. Staatliche Institutionen und Einrichtungen (Behörden, Forschungszentren, Universitäten, Verkehrsinfrastrukturen etc.) haben eine große Nachfrage nach IKT-Infrastrukturen und -Dienstleistungen und stellen dadurch einen wesentlichen Marktakteur in diesem Bereich dar. Diese Marktstärke lässt sich dazu nutzen, um die Diffusion von energie- und ressourcensparenden Innovationen zu beschleunigen. Eine einfache Möglichkeit dazu böte die Aufnahme von strengen Energieeffizienzvorgaben in öffentlichen Ausschreibungen für den Bau und/oder Betrieb von IKT-Infrastrukturen. Ein gangbarer Weg bestünde etwa darin, solche Anforderungen schrittweise zu implementieren: Zunächst würden genaue Angaben zum Energiebedarf der jeweiligen Infrastrukturen eingefordert. Auf Basis der so geschaffenen Datenbasis könnten sodann in einigen Jahren konkrete Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung von Effizienzstandards und maximalen Energiebedarfen gestellt werden.

Eine wichtige Rolle könnten öffentliche Stellen (z. B. staatliche Großrechenzentren aus dem forschungs- oder universitären Bereich) außerdem als *Pilotanwender* für innovative Lösungen einnehmen (z. B. für die Flüssigkeitskühlung oder die Gleichstromtechnologie in Rechenzentren). Staatlich unterstützte bzw. betriebene Demonstrationsanlagen könnten u. a. dazu beitragen, bei potenziellen Anwendern ggf. vorhandene Bedenken gegenüber neuen Technologien in Rechenzentren abzubauen.

Eine weitere Möglichkeit für staatliche Akteure besteht darin, die Bemühungen zur *Schaffung einer belastbaren Datengrundlage* zum Energieverbrauch von IKT-Infrastrukturen zu unterstützen. Wie in Kapitel 2 deutlich wurde, kann der aktuelle Energiebedarf von IKT-Infrastrukturen in Deutschland (und weltweit) bestenfalls plausibel abgeschätzt werden. Eine belastbare, transparente und vergleichbare Datengrundlage ist jedoch nicht nur nötig, um ggf. vorhandene Energieeinsparpotenziale besser sichtbar und damit auch nutzbar zu machen, sondern bildet ebenfalls die Grundlage, um das öffentliche und politische (Problem-)Bewusstsein für die Energieintensität von IKT-Dienstleistungen zu erhöhen. Letzteres erscheint vor allem vor dem Hintergrund wichtig, dass angesichts der mit der Digitalisierung assoziierten enormen Nutzenpotenziale unter Umständen die Gefahr besteht, die damit einhergehenden negativen Umweltauswirkungen aus dem Blickfeld zu verlieren. Für die Schaffung einer belastbaren Datengrundlage wäre in einem ersten Schritt eine regelmäßige Datenerhebung des jährlichen Stromverbrauchs von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen zu etablieren. Ein passender Akteur für die Erhebung und Aufbereitung dieser Daten wäre z. B. die Bundesnetzagentur, die mit den hierfür nötigen Befugnissen ausgestattet werden könnte. In weiteren Schritten wäre sodann der Energieverbrauch nicht nur während der Nutzungsphase, sondern über den gesamten Lebenszyklus der IKT-Infrastrukturen in die Datengrundlage einzubeziehen. Dazu ist der Forschungsbedarf aber noch groß.

Die Diffusion einiger Energieeinsparoptionen ließe sich schließlich durch *regulatorische Maßnahmen* beschleunigen. Das Spektrum der in diesem Kapitel diskutierten Möglichkeiten ist sehr breit und reicht je nach Option von gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz bestimmter Komponenten in Rechenzentren bis zur Verpflichtung von Betreibern (großer) Rechenzentren zur Erbringung von Netzdienstleistungen.

³⁹ www.elektronikforschung.de/rahmenprogramm (17.3.2021)

4 Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom in IKT-Infrastrukturen

In Deutschland und weltweit ist, wenn die gegenwärtigen Trends anhalten, in den nächsten Jahren mit einem Anstieg der Strombedarfe der IKT-Infrastrukturen zu rechnen. Gleichzeitig findet im Stromsystem in Deutschland eine grundlegende Transformation weg von fossil und nuklear befeuerten Großkraftwerken hin zu Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien (EE) statt. Dabei handelt es sich überwiegend um fluktuierend einspeisende Anlagen, vor allem Windkraft (installierte Leistung 60,8 GW) und Photovoltaik (49 GW). Kontinuierlich einspeisende bzw. bedarfsgerecht steuerbare Anlagen, etwa Wasserkraft (5,6 GW) und Biomasse (9,4 GW), spielen lediglich eine untergeordnete Rolle (Stand 2019, Quelle: BMWi 2020b).

Aus der Sicht der Betreiber von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen sprechen einige Argumente für eine verstärkte Nutzung regenerativ erzeugten Stroms in IKT-Infrastrukturen, die sich aus unterschiedlichen Motiven speisen: angesichts der hohen Stromintensität des IKT-Sektors stellt dies eine attraktive Option dar, um dessen Umweltwirkungen (den ökologischen Fußabdruck) nicht zuletzt öffentlichkeits- bzw. werbewirksam zu verringern. Des Weiteren kann in bestimmten Fällen schlicht das Argument günstigerer Kosten für die Versorgung mit erneuerbaren Energien sprechen. Abgesehen vom simpelsten Fall, wenn der Bezug von Ökostrom günstiger ist als das konventionelle Konkurrenzangebot, gibt es auch andere Ansätze, etwa Rechenzentren am Standort von Windparks zu errichten und so Synergien zu nutzen.

Aus der Perspektive des Stromversorgungssystems wiederum bestehen Ansatzpunkte, wie IKT-Infrastrukturen als große Stromnachfrager dazu beitragen können, dass fluktuierend erzeugter erneuerbarer Strom besser in das System integriert werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Errichtung von Rechenzentren an Orten, wo sie das Netz entlasten, etwa nahe an Erzeugungsschwerpunkten oder vor Netzengpässen. Möglicherweise ist auch ein netzdienlicher Betrieb machbar, bei dem die Last von Rechenzentren dem Stromdargebot (hohe/niedrige Einspeisung durch PV- und Windkraftanlagen) angepasst wird.

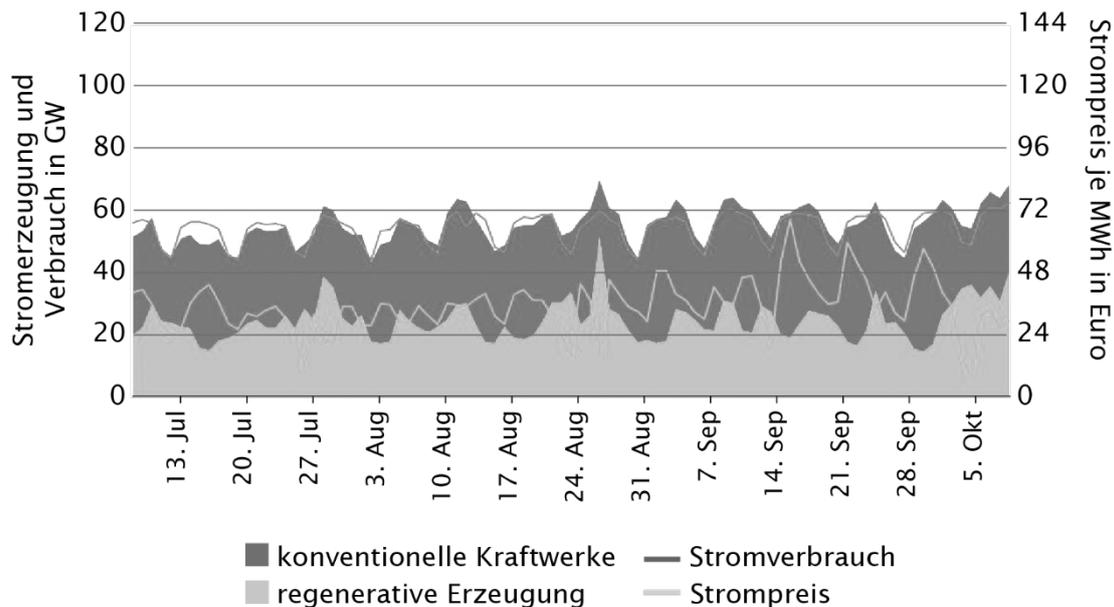
Im Folgenden werden zum einen die Potenziale und Herausforderungen der verstärkten Nutzung volatiler Stromerzeugungsquellen für den Betrieb von IKT-Infrastrukturen dargestellt und analysiert. Zum anderen werden konkrete Ansatzpunkte für die praktische Umsetzung entsprechender Vorhaben anhand von vier konkreten Fallbeispielen vorgestellt. Basis hierfür sind öffentlich verfügbare Informationen sowie Befragungen von relevanten Akteuren. Die folgenden Ausführungen stützen sich wesentlich auf das Gutachten des Borderstep Instituts (2019, S. 219 ff.).

4.1 Herausforderungen

Ein Stromsystem mit hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Einspeisung hat eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen:

- › Das Ausbalancieren von Erzeugung und Verbrauch von Strom zu jedem Zeitpunkt ist diffiziler als in einem Stromsystem mit plan- bzw. regelbarer Einspeisung.
- › Die Übertragung von großen Strommengen vom Erzeugungsort (etwa Windkraft an den norddeutschen Küsten) zu den Verbrauchszentren im Westen und Süden Deutschlands muss bewältigt werden.
- › Die Bereitstellung von Systemdienstleistungen, die traditionell von Großkraftwerken übernommen wurden (vor allem Primär- und Sekundärregelleistung; Kap. 3.2.4) muss gewährleistet sein.

Abb. 4.1 Stromerzeugung und Strompreis vom 8.7.2020 bis 8.10.2020



Quelle: Agora-Energiewende ([www.agora-energiewende.de/service/agorame-ter/chart/power_generation_price/08.07.2020/08.10.2020/today/](http://www.agora-energiewende.de/service/agorame-ter/chart/power_generation_price/08.07.2020/08.10.2020/today/;); 13.9.2022)

Wie die in Abbildung 4.1 dargestellte Zeitreihe verdeutlicht, gibt es Zeiten, in denen der Anteil regenerativ erzeugten Stroms am Strommix sehr hoch ist, während zu anderen Zeiten nur wenig regenerativ erzeugter Strom zur Verfügung steht. Da die konventionellen Kraftwerke aus technischen und/oder ökonomischen Gründen nur in gewissem Ausmaß hoch- bzw. runtergeregelt werden können (sowohl was die Geschwindigkeit als auch den Umfang der Regelung angeht), kommt es bereits heute regelmäßig zu Situationen, in denen ein Überangebot an Strom entsteht. Dies führt zu einem drastischen Einbruch beim Strompreis (Abb. 4.1) und zum anderen dazu, dass Strom aus EE-Anlagen verworfen (abgeregelt) werden muss.

Eine Lösung für dieses Problem besteht in der Speicherung bzw. Umwandlung von überschüssigem Strom in chemische Energieträger (etwa Methan im Zuge von Power to Gas). Dieser Ansatz ist zumindest derzeit noch mit hohem Aufwand und Kosten verbunden. Daher rückt eine weitere Option verstärkt in den Blick, die darin besteht, die Stromnachfrage an das fluktuierende Angebot anzupassen. Energienutzungen, bei denen die Stromnachfrage zeitlich verschoben werden können (wie z.B. in Kühllhäusern), eignen sich hierzu sehr gut. Hingegen sind IKT-Infrastrukturen, insbesondere Rechenzentren, aus zwei Gründen hierfür nicht prädestiniert: zum einen wegen der hohen Bedeutung der Ausfallsicherheit und zum anderen aufgrund ihres kontinuierlichen Strombedarfs.

Ausfallsicherheit

Beim Betrieb von Rechenzentren steht die zuverlässige und ausfallsichere Bereitstellung der Leistung im Vordergrund. Teilweise zählen Rechenzentren zu den kritischen Infrastrukturen⁴⁰, die nach der Definition des Bundesministeriums des Innern (BMI 2009, S. 5) »für die Funktionsfähigkeit moderner Gesellschaften von wichtiger Bedeutung sind« und deren Ausfall oder Beeinträchtigung »nachhaltige Störungen im Gesamtsystem zur Folge« hätten. Aber auch bei den meisten Rechenzentren, die nicht als kritische Infrastrukturen eingestuft wurden, ist eine hohe Ausfallsicherheit unverzichtbar (Bitkom 2013), da auch nur ein kurzzeitiger Ausfall eines Rechenzentrums je nach Branche (z.B. Industrie, Handel) unter Umständen exorbitante (Folge-)Kosten nach sich ziehen

⁴⁰ Gemäß der Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung – BSI-KritisV) zählen dazu Rechenzentren mit einer vertraglich vereinbarten Leistungsaufnahme von 5 MW oder mehr sowie Serverfarmen mit mehr als 25.000 laufenden Instanzen und Content Delivery Networks mit mehr als 75.000 TB ausgelieferten Daten pro Jahr (Anhang 4 BSI-KritisV).

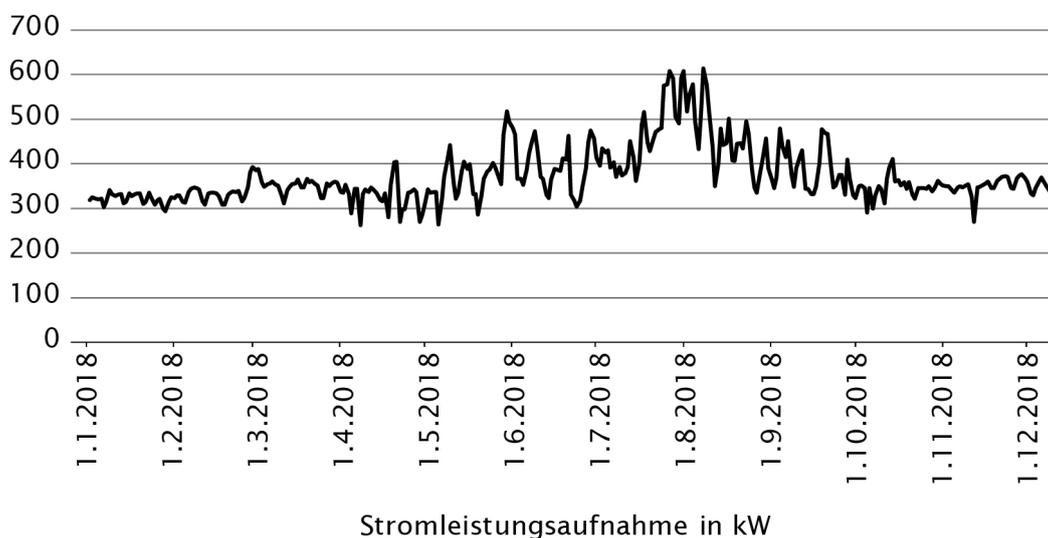
kann. Aus diesem Grund ist es wenig überraschend, dass für Betreiber von Rechenzentren die sichere Stromversorgung einer der bedeutendsten Standortfaktoren ist (Hintemann/Clausen 2018a).

Im Telekommunikationsbereich zählen teilweise die Zugangs- und Kernnetze und weitere netzrelevante Anlagen zu den kritischen Infrastrukturen.⁴¹ Ein Ausfall der Telekommunikationsinfrastrukturen stellt eine hohe Gefährdung der öffentlichen Ordnung und Sicherheit dar. Daher sind Telekommunikationsinfrastrukturen auf eine sichere und jederzeit ausreichende Stromversorgung angewiesen.

Strombedarf

Der Strombedarf von Rechenzentren ist im Zeitverlauf relativ konstant. Ein typischer Jahresverlauf der Leistungsaufnahme eines Rechenzentrums ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Im gesamten Jahresverlauf sinkt die Leistungsaufnahme nie unter 250 kW. Maximal liegt sie im Sommer, wenn ein hoher Kühlbedarf vorliegt, bei ca. 600 kW. Auch im Tagesverlauf schwankt die Stromaufnahme von Rechenzentren verhältnismäßig wenig. Dies hat vor allem zwei Gründe: Zum einen werden in Rechenzentren bewusst Anwendungen wie Backups, Datenanalysen, Modellierungen oder ähnliches auf Zeiten verschoben, in denen die Systeme wenig beansprucht sind. Zum anderen benötigen Server- und Speichersysteme in der Regel auch hohe Energiemengen in Zeiten, in denen sie nur schwach ausgelastet sind. Zwar könnte der Energiebedarf von Rechenzentren in Zeiten schwacher Auslastung durch die Serverkonsolidierung deutlich reduziert werden, allerdings wird diese Maßnahme bislang nur selten angewendet (Kap. 3.1.4)

Abb. 4.2 Strombedarf eines Rechenzentrums 2018



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 221

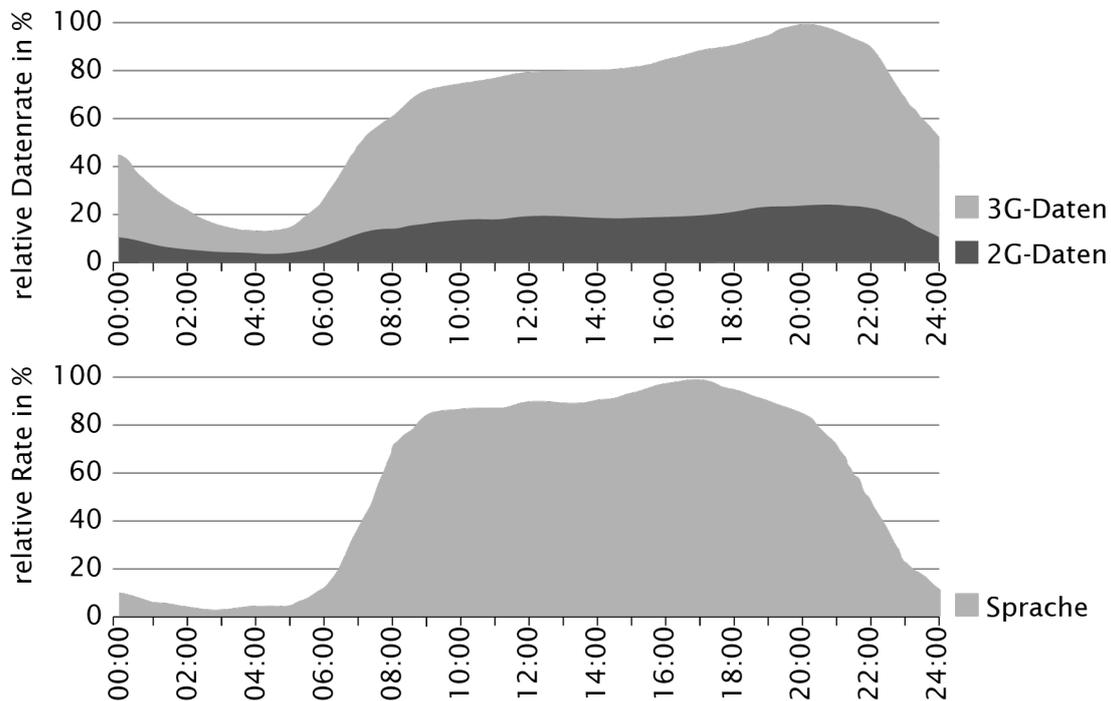
Eine direkte Versorgung mit volatil erzeugtem Strom aus Wind oder Sonne würde also voraussetzen, dass für Zeiten der Windflaute oder ohne Sonneneinstrahlung beträchtliche Energiemengen zwischengespeichert werden müssten. Da die Dauer dieser Zeiten vom Wettergeschehen abhängt und nicht exakt planbar ist (und im ungünstigsten Fall einige Wochen andauern kann, sogenannte Dunkelflaute), stellt dieser Sachverhalt auch ein Problem hinsichtlich der Ausfallsicherheit des Rechenzentrums dar.

Bei den Telekommunikationsnetzen ist der Leistungsbedarf etwas anders gelagert als bei den Rechenzentren: die Last, d. h. die Nutzung für Datenverkehr und Telefonate ist sehr zeitabhängig. In Abbildung 4.3 ist ein typisches Beispiel für den Lastverlauf beim Mobilfunkverkehr im Tagesablauf dargestellt. Zwar verbrauchen Netzkomponenten bis zu 90 % des Energieverbrauchs unabhängig von der Menge der transportierten Daten (Stobbe et al. 2015a, S. 9). Allerdings haben die Betreiber die Möglichkeit, die Netze lastadaptiv zu betreiben (Lange et al.

⁴¹ Gemäß BSI-KritisV (Anhang 4) zählen dazu Zugangs- und Kernnetze mit jeweils über 100.000 Teilnehmeranschlüssen, Internet Exchange Points (IPX) mit mehr als 300 angeschlossenen autonomen Systemen sowie weitere für den Netzbetrieb wichtige Anlagen.

2014). Dies bedeutet, dass Netzkomponenten je nach Auslastung zu- bzw. abgeschaltet werden. Dadurch nähert sich der zeitliche Verlauf des Strombedarfs dem in Abbildung 4.3 gezeigten Nutzungsprofil an.

Abb. 4.3 Lastverlauf beim Mobilfunkverkehr



Quelle: Lange et al. 2014, S. 576

Obwohl auch bei den Telekommunikationsnetzen nicht offensichtlich ist, wie sie ihren Strombedarf einem zeitlich wechselnden Angebot durch erneuerbare Energien anpassen könnten, bestehen hier immerhin etwas bessere Voraussetzungen zur direkten Nutzung von Strom aus Photovoltaikanlagen. Da sich der Strombedarf in Netzen mit lastadaptivem Management tendenziell auf die Tagesstunden konzentriert, ließe sich zumindest ein größerer Teil des Energiebedarfs mit Photovoltaikanlagen decken. Weil darüber hinaus einzelne Mobilfunkanlagen in der Regel elektrische Leistungsaufnahmen im Bereich von wenigen kW haben, ist auch der Einsatz etwa von Batteriespeichern oder Brennstoffzellen zur Überbrückung von PV-armen Zeiten denkbar. Hierzu existieren in Deutschland einige Forschungs- bzw. Pilotprojekte: So errichtete etwa E-Plus energieautarke Mobilfunkbasisstationen in Versmold (Kahle 2011) und Büren (2013)⁴², die mit einem Energiemix aus Photovoltaik, Windkraft und Brennstoffzelle betrieben werden (IEE 2016). Die Telekom betreibt in Dettelbach einen Mobilfunkmast, der dauerhaft über eine Brennstoffzelle betrieben wird. Die Brennstoffzelle wird über einen 3.000-Liter-Tank mit Biomethanol versorgt (Jodl 2019).

⁴² www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/oekologie/archiv/2013-10-10_E-Plus-startet-klimafreundlichen-Mobilfunk.php (17.3.2021)

4.2 Ansatzpunkte zur Nutzung regenerativer Energien in IKT-Infrastrukturen

Um erneuerbare Energien in IKT-Infrastrukturen zu nutzen, gibt es verschiedene Ansätze, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Eine organisatorisch einfache Form ist der Abschluss eines entsprechenden Vertrags mit einem Ökostromanbieter. In einer Befragung von Betreibern von Rechenzentren⁴³ gaben knapp 30% der Teilnehmer an, ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zu beziehen (Hintemann 2017b). Die verschiedenen Ökostromprodukte unterscheiden sich zum Teil deutlich. Üblich ist die Praxis, dass ein Anbieter »grauen« Strom von einem Erzeuger oder auf einem Handelsplatz kauft und für die gleiche Menge an Strom »grüne« Herkunftsnachweise erwirbt (das sind Bescheinigungen, dass eine bestimmte Menge Strom aus EE eingespeist wurde). Herkunftsnachweise und Strom werden zu einem Ökostromprodukt gebündelt. Hier besteht allerdings die Gefahr der Doppelvermarktung. Dies scheint gemäß Revemann/Ostler (2019) etwa bei manchen Herkunftsnachweisen von norwegischer Wasserkraft der Fall zu sein, die in großem Umfang auch in Deutschland vertrieben werden.

Investitionen von IKT-Unternehmen in den Aufbau von Kapazitäten zur erneuerbaren Stromerzeugung sind eine weitere Möglichkeit. Beispiele hierfür liefern Unternehmen wie Apple (Apple 2018), Google (IWR 2016), Microsoft (IWR 2017) oder Amazon (Techcentral.ie 2019). Einige werben damit, dass sie ihre Betriebsstätten zu 100% mit regenerativ erzeugtem Strom betreiben (Apple 2018; Google 2020). Damit ist allerdings lediglich gemeint, dass im Jahr genauso viel erneuerbarer Strom erzeugt bzw. angekauft wie verbraucht wird. Eine physische Vollversorgung mit volatil erzeugtem Strom würde wesentlich höhere Erzeugungsleistungen bzw. einen umfangreichen Einsatz von Speichern erfordern, damit der Bedarf tatsächlich zu jeder Zeit regenerativ gedeckt werden kann. Bis zu diesem Ziel, das u. a. von Google (2020) offenbar angestrebt wird, ist es noch ein weiter Weg.

Eine weitere Option besteht darin, volatile erneuerbare Energien dafür zu nutzen, gezielt nur einen Teil der Stromversorgung von IKT-Infrastrukturen zu übernehmen. Dies kann, wie bereits erwähnt, in Verbindung mit einem lastadaptiven Energiemanagement etwa bei Mobilfunkanlagen sinnvoll sein, bei denen ein Hauptteil der Last in den Tagesstunden anfällt, was gut mit dem Erzeugungsprofil von Photovoltaikanlagen korreliert. Bei Rechenzentren würde sich Photovoltaik insbesondere zum Einsatz für die Kühlung eignen. In diesem Bereich ist der Strombedarf im Sommer besonders hoch, wenn auch die Photovoltaik-Produktion groß ist. Darüber hinaus ist es bei Kühlaggregaten möglich, ihre Leistung je nach Stromangebot zu regeln und zumindest in gewissem Umfang zeitlich zu verschieben (z. B. durch Verwendung von Kältespeichern, s. Glossar). Da die Akkus der USV mit Gleichstrom geladen werden, könnten hier im Prinzip Solarzellen direkt ohne verlustbehaftete Wandlung (von Wechsel- zu Gleichstrom) einspeisen, um dadurch zumindest einen Teil der Stromversorgung abzudecken. Den hierzu von den Gutachtern des Borderstep Instituts befragten Herstellern von USV-Anlagen sind aber in Deutschland keine derartigen Projekte bekannt. Als Grund wurden Bedenken hinsichtlich möglicher Fehlerquellen und damit Einschränkungen für die Verfügbarkeit genannt.

Schließlich bleibt die Möglichkeit, die Stromnachfrage der IKT-Infrastrukturen an das zeitlich veränderliche Angebot an erneuerbarer Stromerzeugung durch zeitliche und räumliche Lastverschiebung anzupassen, um dadurch eine direkte Versorgung mit Strom aus regenerativer Erzeugung zu ermöglichen. Dies ist, wie beschrieben, bei Telekommunikations- bzw. Rechenzentrumsinfrastrukturen (außerhalb einiger Nischenanwendungen, z. B. Kühlung) sehr schwierig umzusetzen. Bei Rechenzentren existieren immerhin Konzepte, die hier Potenziale versprechen. Hierfür ist allerdings ein ganzheitlicher Ansatz Voraussetzung, der bereits bei der Planung eines Rechenzentrums dem Aspekt der (möglichst umfassenden) regenerativen Energieversorgung eine hohe Priorität einräumt. Simulations- und Planungstools für diesen Zweck wurden etwa im Projekt RenewIT entwickelt (RenewIT 2013).

Im folgenden Kapitel werden einige Konzepte zur direkten Nutzung regenerativ erzeugten Stroms in Rechenzentren anhand von aktuellen Fallbeispielen näher beleuchtet.

⁴³ Die Befragung zielte auf die Betreiber größerer Rechenzentren in Deutschland. Insgesamt haben 74 Personen teilgenommen, die 328 Rechenzentren mit einer Fläche von 475.000 m² betreiben – das entspricht etwa ein Viertel der Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland.

4.3 Fallbeispiele

Bei den nachfolgend dargestellten Fallbeispielen handelt es sich jeweils um Start-ups. Dieser Sachverhalt mag auf den ersten Blick überraschend sein. Die Diffusionsforschung hat aber gezeigt, dass in der Vergangenheit Grundlageninnovationen im Bereich der Nachhaltigkeit insbesondere von Gründerunternehmen hervorgebracht wurden, während etablierte Unternehmen sich eher dadurch auszeichneten, Verbesserungsinnovationen in den Markt zu bringen. Insbesondere im Produktfeld der regenerativen Energieanlagen ist der Anteil von Start-ups an der Markteinführung von Grundlageninnovationen sehr hoch (Fichter/Clausen 2013; Weiß et al. 2012).

Die Informationen über die Fallbeispiele wurden durch eine schriftliche Befragung und zusätzliche telefonische Interviews durch die Gutachter des Borderstep Instituts zusammengetragen.

4.3.1 Windcloud

Das Konzept des Unternehmens Windcloud⁴⁴ verfolgt den Ansatz, Rechenzentren am Standort von Windparks zu errichten und diese möglichst ausschließlich mit regenerativer Energie zu betreiben. Für die Zeiten, in denen nicht ausreichend Windstrom zur Verfügung steht, sind Backup-Kapazitäten vorgesehen. Hierfür war beispielsweise am Standort Braderup (bei Niebüll/Schleswig-Holstein) eine Biogasanlage geplant.⁴⁵ Zur Absicherung gegen Ausfälle soll zusätzlich ein Batteriespeicher in Hybridtechnologie bereitstehen. Dieser kombiniert zwei unterschiedliche Batterietypen, die Lithium-Ionen-Technologie, die sich eher für den Ausgleich kurzzeitiger Schwankungen eignet, und die Vanadium-Redoxflow-Batterie, die die Möglichkeit der langfristigen Speicherung bietet.

Ziel ist es, eine autarke Stromversorgung herzustellen, sodass keine Netzentgelte und EEG-Umlage bezahlt werden müssen. Auf diese Weise sollen Kostenvorteile generiert werden, die die Nutzung auch für Kunden im Hochleistungsbereich (z. B. rechenintensive wissenschaftliche Anwendungen) oder mit KI-Anwendungen attraktiv macht, die derzeit eher ins Ausland gehen. So sollen hohe Mengen an Windstrom direkt am Entstehungsort in Rechenleistung und Abwärme umgewandelt werden. Es ist außerdem vorgesehen, die Abwärme möglichst vor Ort zu nutzen. Am Standort Enge-Sande (bei Husum/Schleswig-Holstein) etwa wird damit eine Algenfarm beheizt (Windkraft-Journal 2020).

Das Geschäftsmodell der Windcloud basiert zu einem wesentlichen Teil darauf, dass Netznutzungsentgelte und die EEG-Umlage durch die direkte Nutzung von Windstrom eingespart werden können. Dies ist jedoch aus Sicht des Betreibers bei der derzeitigen Gesetzeslage unsicher. So zog sich etwa am Standort Braderup der Stromnetzbetreiber aus dem Projekt zurück, weil er keine Rechtssicherheit für die gleichzeitige Produktion und den Verbrauch von grüner Energie sah. Die physikalische Trennung von Grün- und Graustrom sei möglicherweise nicht ausreichend. Damit wäre die EEG-Umlage zu zahlen gewesen, was die Wirtschaftlichkeit des Projekts infrage gestellt hätte.

4.3.2 WindCORES

Die Grundidee von WindCORES⁴⁶ ist es, Rechenzentren in bereits vorhandene Windkraftanlagen einzubauen. Eine Stellfläche für bis zu 50 Racks ist in einer Windkraftanlage derzeit realisierbar. Für Kunden besteht die Möglichkeit, im Sinne von Colocation ein oder mehrere Racks zu nutzen oder aber eine ganze Windkraftanlage exklusiv ausbauen zu lassen. Die Racks können je nach Kundenanforderungen ausgestaltet werden (z. B. Energiebedarf, Klimatisierung, Kommunikation, Zugriff) bis hin zur physischen Absicherung mit Panzerschränken. Die Standorte sind durch exklusiv genutzte Glasfaserverbindungen an die überregionalen Glasfasernetze angebunden.

Die Stromversorgung für den Rechenzentrumsbetrieb erfolgt primär durch den in der Windkraftanlage erzeugten Strom. In Zeiten, in denen nicht ausreichend Windstrom zur Verfügung steht, kann Strom aus dem Netz bezogen werden. Es wurde gezeigt, dass für diese Installationen eine zeitliche Verfügbarkeit von mehr als 99,9%

⁴⁴ <https://windcloud.de> (17.3.2021)

⁴⁵ Im Februar 2019 hat die Windcloud Braderup GmbH ihren operativen Betrieb eingestellt (<https://windcloudbraderup.de>; 17.3.2021)

⁴⁶ www.windcores.de (17.3.2021)

(entspricht der Verfügbarkeitsklasse 3 der IEEE⁴⁷) erreicht werden kann, d.h. eine Ausfallzeit von weniger als 9 Stunden im Jahr. Die Installation von stromverbrauchender IKT-Infrastruktur am Ort der Stromerzeugung verringert die Transportverluste und kann einen Beitrag zur Entlastung der Transportnetze für Strom leisten.

Ein zusätzlicher Umweltnutzen kann gestiftet werden, da bereits vorhandene Gebäude, Räumlichkeiten und andere Infrastrukturen wie Glasfaseranschlüsse der Windkraftanlage genutzt werden und diese somit nicht extra errichtet werden müssen.

Im Februar 2018 wurde im Windpark Lichtenau (bei Paderborn/Nordrhein-Westfalen) das deutschlandweit erste Rechenzentrum in einer Windkraftanlage in Betrieb genommen. Etwa 100 mögliche Standorte befinden sich in der Betriebsverantwortung des Trägerunternehmens WestfalenWIND. Nach Angaben des Unternehmens ist der Endkundenpreis für Colocationfläche in den WindCORES oft 50 % niedriger als bei nationalen Wettbewerbern. WindCORES seien somit in den Anwendungsbereichen Hochleistungsrechnen, Edge oder dem klassischen Cloudcomputing konkurrenzfähig aufgestellt. Allerdings seien die Transaktionskosten (Kundenakquise etc.) in der derzeitigen Aufbauphase noch sehr hoch.

4.3.3 Cloud & Heat

Das Konzept von Cloud & Heat⁴⁸ hat seinen Ausgangspunkt in der Idee, die Abwärme von Rechenzentren direkt zum Heizen zu nutzen. Hierfür wurden modulare Rechenzentren in Containern entwickelt, die mit wassergekühlten Komponenten ausgestattet direkt an eine Hausheizung angeschlossen werden können (Weckbrodt 2018). Dieser modulare Ansatz wurde sukzessive weiterverfolgt. So wurde eine Software entwickelt, die eine hochverteilte Rechenzentrumsinfrastruktur im Verbund so steuern kann, dass Rechenlasten stets an dem Standort platziert werden, wo deren Ausführung am effizientesten ist (siehe auch lastadaptives Rechenzentrum; Kap. 3.1.4). Die Verteilung geschieht automatisiert auf Basis von verschiedenen Metriken, z.B. Wärmebedarf, verfügbare Energie und Stromkosten, damit immer ein möglichst hoher Teil der Rechenzentren mit regenerativ erzeugtem Strom versorgt werden kann.

Auf Veränderungen reagiert das System schnell und flexibel. Rechenzentren werden dadurch zu flexiblen Energieverbrauchern, die dafür genutzt werden können, die durch erneuerbare Energien in die Stromerzeugung und -versorgung eingebrachte Volatilität auszugleichen. Die Entwicklung dieser Lösung befindet sich aktuell noch im Forschungsstadium. Im nächsten Schritt soll die Anpassung der Lastverteilung an die Stromerzeugung mithilfe von realen Daten und realer Hardware evaluiert werden.

4.3.4 Limebird

Limebird⁴⁹ bietet B2B-Kunden aus dem technologischen Mittelstand kundennahe und grüne Clouddienstleistungen. Es ist geplant, einen vernetzten Betrieb von verteilten Edge-Rechenzentren in räumlicher Nähe zu Wind- und Solarparks aufzubauen. Dazu wird eine intelligente Schwarmplattform zur automatisierten Koordination und Betriebsoptimierung von verteilten Edge-Rechenzentren entwickelt. Damit können Lasten in einem dezentralen Netz von kleineren Edge-Rechenzentren so verteilt werden, dass bevorzugt dort gerechnet wird, wo regenerativ erzeugter Strom zur Verfügung steht. Neben dem Betrieb eigener Edge-Rechenzentren ist auch eine Kooperation mit den Angeboten von z.B. WindCORES oder Windcloud vorgesehen.

Ziel ist es, möglichst viel Ökostrom vor Ort ohne Netzdurchleitung zu beziehen. In Windparks sollen etwa 90 % und in Solarparks etwa 55 % der Volllaststunden der Edge-Rechenzentren mit dem vor Ort erzeugten Strom gedeckt werden können. Der Reststrombedarf soll durch zertifizierte Ökostromversorger (etwa mit dem Grünen Strom-Label oder dem OK Power-Gütesiegel) bezogen werden. Diese Art der Stromversorgung soll nicht nur einen ökologischen Vorteil, sondern auch einen Preisvorteil durch den hohen Anteil an Direktversorgung mit Ökostrom (»power to byte«) generieren. Auch die Nutzung von Abwärme ist in dem Konzept vorgesehen. Im Verbund der Rechenzentren kann dann automatisiert entschieden werden, ob es wirtschaftlicher ist, bestimmte

⁴⁷ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ist ein Ingenieurverband, der u. a. weltweit anerkannte Normen und Standards erarbeitet.

⁴⁸ www.cloudandheat.com (17.3.2021)

⁴⁹ www.limebird.io (17.3.2021). Bis 2019 firmierte das Projekt unter dem Namen edge | it (www.future-thinking.de/einreichungen/dezentral-und-gruen-im-schwarmverbund-zur-nachhaltigen-edge-cloud; 17.3.2021)

IT-Workloads auf andere Standorte zu verschieben oder bei temporär schwacher Auslastung einzelner Standorte auch in den Standby zu schalten, um Energie zu sparen.

4.3.5 Hemmnisse und Ansatzpunkte zu deren Überwindung

Die Initiatoren bzw. Betreiber der beschriebenen Fallbeispiele haben im Zuge der Befragung eine Vielzahl an Hemmnissen für ihre Konzepte bzw. Geschäftsmodelle geschildert (Borderstep Institut 2019, S. 225 ff.). Dabei handelt es sich vielfach um regulative bzw. rechtliche Hürden für die Realisierung der entsprechenden Konzepte. Hinzu kommen häufig standortspezifische Probleme bei der Umsetzung.

Die Geschäftsmodelle einiger der Konzepte (etwa Windcloud bzw. WindCores) zielen darauf ab, mit dem Verbrauch von Windstrom nahe am Ort der Erzeugung die EEG-Umlage bzw. Netznutzungsgebühren ganz oder zumindest anteilig einzusparen. Allerdings sind Letztverbraucher von Strom nach § 61 EEG auch im Fall der Eigenversorgung zur Zahlung der EEG-Umlage verpflichtet. Diese Verpflichtung entfällt bzw. verringert sich nur unter speziellen Bedingungen, die in den §§ 61a bis 61g und 61l EEG ausgeführt sind. Projekte so zu gestalten, dass sie diesen Bedingungen genügen, ist nach Aussage der Betreiber von Windcloud oder WindCore schwierig bzw. unpraktikabel. Kleinere dezentrale Rechenzentren profitieren auch nicht von der Reduzierung der EEG-Umlage für stromkostenintensive Unternehmen gemäß § 64 EEG.

Auch die Einsparung von Netznutzungsentgelten ist nur unter sehr spezifischen Bedingungen möglich. Falls etwa das Stromnetz als Rückfalloption zur Absicherung des Rechenzentrumsbetriebs genutzt werden soll, fallen Netznutzungsgebühren an. Der fixe Anteil (die Grundgebühr) bemisst sich nach der angeschlossenen elektrischen Leistung und nicht nach der übertragenen Strommenge. Selbst wenn die Leistung nur in einer Stunde im Jahr abgerufen werden sollte, ist die volle Netznutzungsgebühr fällig.

Netznutzungsentgelte eines Netzbetreibers werden gegenwärtig standortunabhängig erhoben, d. h. sie bieten keinen Anreiz, Stromverbraucher in räumlicher Nähe zu Stromerzeugern zu platzieren. Im Gegenteil: Netzbetreiber, die im Zuge der Energiewende einen erhöhten Ausbaubedarf ihrer Netze aufweisen, legen die dadurch entstehenden Kosten um, was zu höheren Netznutzungsgebühren führt.

Auch ein flexibler netzdienlicher Betrieb eines Rechenzentrums ist derzeit wirtschaftlich nicht attraktiv. Hierfür fehlen Geschäftsmodelle, wie die netzseitig generierten systemischen Vorteile, etwa ein verringerter Ausbaubedarf, vermiedene Engpässe oder eine stabilere Versorgung, den Rechenzentrumsbetreibern vergütet werden können.

Die befragten Betreiber der Fallbeispiele wünschten sich unisono eine Reformierung der Systematik der EEG-Umlage bzw. der Netznutzungsentgelte, damit auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Rechenzentrumskonzepte gefördert werden können. Des Weiteren wurde die Erarbeitung von Mechanismen zur Vergütung der Bereitstellung von Flexibilität gewünscht, beispielsweise Marktanreize im Rahmen des Netzengpassmanagements. Außerdem könnte eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete öffentliche Beschaffung von IT-Dienstleistungen den Markteintritt innovativer Rechenzentrumskonzepte erleichtern.

4.4 Zwischenfazit

Eine vertiefte Untersuchung der ökonomischen bzw. ökologischen Stichhaltigkeit der zuvor dargestellten innovativen Konzepte zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien für den Betrieb von IKT-Infrastrukturen war nicht Ziel dieses Projekts. Hierfür wären nicht nur vonseiten der Initiatoren der Konzepte standort- und fallspezifische Detailinformationen notwendig, sondern u. a. auch von den Stromnetzbetreibern der Übertragungs- und Verteilnetze. Am Beispiel eines Rechenzentrums, das auf dem Gelände eines Windparks errichtet werden und den dort erzeugten Strom nutzen soll, wird hier verdeutlicht, welche Faktoren bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung eine entscheidende Rolle spielen:

- › Wird das Rechenzentrum nur dann genutzt, wenn Windstrom zur Verfügung steht, werden die teuren und ressourcenaufwendig produzierten IKT-Komponenten sehr ineffizient betrieben. Allerdings könnte hier im Prinzip auf eine Anbindung an das Stromnetz verzichtet werden, was sich in der Kostenstruktur und Ressourcenbilanz positiv niederschlägt.

- › Sollen die Schwankungen in der Stromverfügbarkeit durch vor Ort errichtete Speicher ausgeglichen werden, muss der Aufwand dafür in der ökonomischen und in der ökologischen Bilanz berücksichtigt werden. Allerdings ist erfahrungsgemäß die Alternative einer Stromnetzanbindung oft günstiger, wenn keine besonderen örtlichen Gegebenheiten vorliegen.
- › Wird wiederum die Verfügbarkeit des Rechenzentrums in windschwachen Zeiten über die Anbindung an das Stromnetz gesichert, ist exakt die gleiche physische Stromnetzinfrastruktur erforderlich, wie wenn das Rechenzentrum hunderte Kilometer vom Windpark entfernt stehen würde. Ändern würde sich lediglich das zeitliche Profil der Stromflüsse.
- › Abgesehen von der Frage, inwiefern ökonomische bzw. ökologische Kosteneinsparungen beim Aufbau und Betrieb der Strominfrastruktur (Netze und/oder Speicher) erzielt werden können, ist ein relevantes Bewertungskriterium, ob das Rechenzentrum schlicht EE-Strom verbraucht, der ansonsten in das Netz eingespeist worden wäre, oder ob es sich um zusätzliche Strommengen handelt.

Die ökologische und ökonomische Bewertung innovativer Konzepte zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien in IKT-Infrastrukturen ist sehr komplex und vom Einzelfall abhängig. Dies hemmt gegenwärtig deren breite Diffusion in die Praxis. Hierfür sind eine breitere Wissensbasis und weitere praktische Erfahrungen notwendig. Daher sollte die Entwicklung und Erprobung innovativer Konzepte weiter gefördert werden. Forschungsförderung und der Abbau bestehender innovationshemmender Regulierungen sind hier probate Mittel.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für die direkte Versorgung von IKT-Infrastrukturen mit volatil erzeugtem Strom technisch und organisatorisch große Herausforderungen überwunden werden müssen. Lösungen, die darauf abzielen, IKT-Infrastrukturen über Verträge mit Stromanbietern rein rechnerisch mit regenerativ erzeugtem Strom zu betreiben, sind dagegen weit verbreitet. Insbesondere große Cloudunternehmen haben damit begonnen, selbst große Wind- oder Solarkraftwerke zu errichten. Die (Teil-)Versorgung der dezentral aufgebauten Telekommunikationsnetzinfrastrukturen (Mobil- und Festnetz) über dezentrale regenerative Stromerzeugung ist insbesondere in Regionen ohne zentrale Stromversorgung eine sinnvolle Möglichkeit. In Deutschland gibt es hier allerdings bisher nur wenige Pilotprojekte.

5 Vertiefungsthemen

In diesem Kapitel werden drei Vertiefungsthemen behandelt. Um ein detaillierteres Bild von den Energieverbräuchen und Einsparmöglichkeiten zu erhalten, wurden zwei Anwendungsbereiche aus dem IKT-Sektor eingehender analysiert. Wegen ihrer Aktualität und ihrer erheblichen Bedeutung für den Energieverbrauch wurden die Blockchaintechnologie sowie die private Internet- und digitale Mediennutzung ausgewählt.

Um die Einsparpotenziale zu beleuchten, die die Nutzung von IKT-Anwendungen in anderen Wirtschaftsbereichen ermöglicht, wurde ein Sektor exemplarisch ausgewählt: die Energieversorgung von Gebäuden.

5.1 Energiebedarf von Blockchainanwendungen am Beispiel von Kryptowährungen

Die Technologie der Blockchain hat in den letzten Jahren hohe Aufmerksamkeit in Wirtschaft und Gesellschaft erlangt. Mit ihren charakteristischen Eigenschaften Manipulationssicherheit, Dezentralität und Nachvollziehbarkeit hat sie vielfältige Anwendungspotenziale z. B. in der Energiewirtschaft (z. B. Peer-to-Peer Strommarkt⁵⁰), in der Logistik (z. B. Transparenz von Lieferketten), im Gesundheitswesen (z. B. sicheres Teilen von Gesundheitsdaten) oder in der digitalen Verwaltung (z. B. fälschungssichere Register) (acatech 2018, S. 11).

Die ersten und heute bekanntesten praktischen Anwendungen der Blockchaintechnologie sind jedoch Kryptowährungen. Insbesondere der Bitcoin, der 2009 als erste blockchainbasierte Kryptowährung eingeführt wurde (Yaga et al. 2018, S. 2), zieht durch teils spektakuläre Kursgewinne und -verluste viel Aufmerksamkeit auf sich. Neben dem Bitcoin wurden mittlerweile hunderte weitere blockchainbasierte Kryptowährungen eingeführt (z. B. Ethereum, Bitcoin Cash, Litecoin, EOS, Cardano). Mit einem Anteil von aktuell rd. 65% am globalen Markt ist aber der Bitcoin nach wie vor die dominierende Kryptowährung, während die zweitgrößte Kryptowährung Ethereum aktuell einen Marktanteil von 9,7% erreicht (Stand Juni 2020).⁵¹ Der Einsatz von Kryptowährungen wird allerdings aufgrund der dadurch verursachten enormen Energiebedarfe in den IKT-Infrastrukturen auch sehr kontrovers diskutiert. So wird vermutet, dass alleine die Kryptowährung Bitcoin für rund 10 bis 20% des aktuellen weltweiten Strombedarfs in Rechenzentren verantwortlich ist (Borderstep Institut 2019, S. 22).

Am Beispiel der Kryptowährung Bitcoin werden in diesem Vertiefungskapitel die Ursachen für den hohen IKT-bedingten Strombedarf von bestimmten Blockchainanwendungen erörtert und Möglichkeiten zur Reduktion des Stromverbrauchs diskutiert. Nicht betrachtet werden mögliche Beiträge der Blockchaintechnologie für die Einsparung von Energie in anderen Anwendungsfeldern wie z. B. in der Logistik oder im Energiesektor. Die Ausführungen basieren – soweit nicht durch weitere Quellen belegt – auf Kapitel 4.3 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019, S. 205-218).

5.1.1 Wie funktioniert eine Blockchain?

Um die Ursachen für den hohen Strombedarf von bestimmten blockchainbasierten Kryptowährungen zu verstehen, ist es notwendig, die grundlegende Funktionsweise einer Blockchain zu verstehen. Eine detaillierte Beschreibung der komplexen Technologie kann an dieser Stelle jedoch nicht erfolgen. Die Inhalte in diesem Kapitel stützen sich wesentlich auf die Publikation von Yaga et al. (2018).

Grundlagen der Blockchaintechnologie

Eine Blockchain ist eine fälschungssichere digitale Datenbank, deren Einträge nicht zentral, sondern vielfach redundant auf unabhängigen Rechnern (den Nodes oder Netzwerkknoten) gespeichert werden. Die Aufnahme neuer Einträge in die Datenbank erfolgt nach bestimmten Regeln, die im Protokoll der Blockchain festgehalten

⁵⁰ Peer-to-Peer Strommarkt bezeichnet den direkten Stromhandel zwischen Stromerzeuger und -verbraucher ohne Zwischenhändler (klassischer Energieversorger).

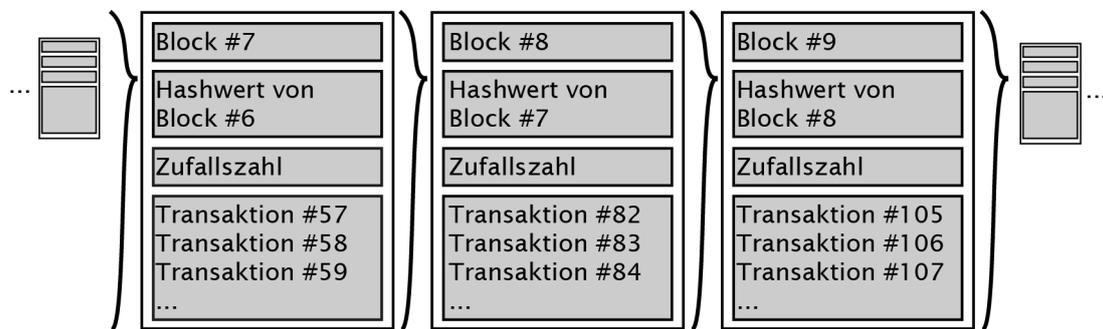
⁵¹ <https://coinmarketcap.com/de> (17.3.2021)

sind. Die Rechner an den Knoten überprüfen neue Datenbankeinträge auf ihre Regelkonformität und sorgen laufend für die Synchronisation der verteilten Datenbankkopien im Blockchainnetzwerk. In ihrer grundlegenden Funktion ermöglicht eine Blockchain also einen sicheren Datenaustausch zwischen den Teilnehmern des Netzwerks, ohne dass hierfür eine zentrale Instanz für die Datenspeicherung und -verwaltung notwendig ist.

Im Falle von Kryptowährungen handelt es sich bei den Datenbankeinträgen um Geldtransaktionen zwischen den Teilnehmern des Netzwerks (z. B. »Teilnehmer A überweist Teilnehmer B die virtuelle Geldmenge X«). Eine zentrale Bank zur Verwaltung von Kundenkonten und Abwicklung von Finanztransaktionen ist nicht mehr erforderlich. Eine wichtige Eigenschaft der Blockchain ist, dass Datenbankeinträge immer nur hinzugefügt, nie aber verändert, überschrieben oder gelöscht werden. Sämtliche in einer Blockchain jemals getätigten Transaktionen bleiben daher dauerhaft gespeichert und transparent nachvollziehbar.

Ihren Namen hat eine Blockchain (Blockkette) daher, dass neu hinzuzufügende Datenbankeinträge (im Falle von Kryptowährungen neue Transaktionen) zu Blöcken zusammengefasst im Netzwerk veröffentlicht werden, wobei jeder neue Block mithilfe von kryptografischen Verfahren mit seinem jeweiligen Vorgängerblock verknüpft wird (Abb. 5.1). Dadurch entsteht eine Kette, in der keine Änderungen vorgenommen werden können, ohne dass dies Auswirkungen auf die gesamte Kette hätte. Durch diesen Mechanismus sind sämtliche in der Blockchain enthaltenen Daten wirksam vor Manipulation geschützt.

Abb. 5.1 Aufbau einer Blockchain



Quelle: vereinfachte Darstellung nach Yaga et al. (2018, S. 17)

Für die Verknüpfung der Blöcke werden Hashfunktionen eingesetzt, die für einen beliebigen Dateninput einen digitalen Fingerabdruck (Hashwert) erzeugen (Kasten). Konkret enthält jeder Datenblock zusätzlich zu den Transaktionsdaten den Hashwert, der sich aus den Daten des jeweiligen Vorgängerblocks berechnet. Damit wird erreicht, dass durch jede noch so kleine Änderung in einer beliebigen Transaktion in der Blockchain die Hashwerte des betroffenen Blocks sowie aller nachfolgenden Blöcke verändert werden, sodass jede Datenmanipulation für jeden Teilnehmer des Netzwerks sofort offenkundig wird.

Kryptografische Hashfunktionen

Eine wichtige Komponente von Blockchaintechnologien sind kryptografische Hashfunktionen. Dabei handelt es sich um mathematische Funktionen, die einen beliebigen Dateninput (Text, Bild, Datei etc.) auf eine Zeichenfolge mit fester Länge abbilden (Hashwert). Identische Dateninputs führen immer zu demselben Hashwert. Wird jedoch auch nur ein einzelnes Zeichen im Dateninput verändert, sieht der zugehörige Hashwert völlig anders aus. Die folgenden beispielhaften Begriffe und dazugehörigen Hashwerte verdeutlichen dies:⁵²

- › Deutscher Bundestag
bb93983c759a02de81cffd4561d7bf38135a49e700d13c12517bc0f9ae932a43

- › Deutscher bundestag
a198c859d09c0ece9541439ab117b61d9ddf12c01682afe5c2c8b75024b69f1c

Kryptografische Hashfunktionen sind Einwegfunktionen. Es ist also nicht möglich, aus einem Hashwert den dazugehörigen Dateninput zu rekonstruieren. Zudem ist es aufgrund der enormen Zahl an möglichen Hashwerten nahezu ausgeschlossen, dass zwei unterschiedliche Dateninputs zum gleichen Hashwert führen. Außer durch Ausprobieren ist es auch nicht möglich, zwei Dateninputs zu erzeugen, die einen identischen Hashwert besitzen. Hashfunktionen werden u. a. zum Schutz von zu übertragenden Dateien eingesetzt: Stimmen die Hashwerte der Originaldatei und der empfangenen Datei überein, kann eine Manipulation der Daten ausgeschlossen werden.

Quelle: Yaga et al. 2018, S. 7 f.

Blockchainanwendungen können in Bezug auf den Kreis der Teilnehmer, die Anonymität der Teilnehmer und die Berechtigung der Teilnehmer zur Erstellung neuer Blöcke auf verschiedene Arten implementiert werden. Die hier im Fokus stehenden Kryptowährungen basieren in der Regel auf einer öffentlichen, berechtigungsfreien Blockchain (»public-permissionless blockchain«). Diese Art von Blockchain steht jedem offen und jeder Teilnehmer des Netzwerks ist berechtigt, neue Blöcke zu erstellen und zu veröffentlichen. In den Netzwerken von Kryptowährungen bleiben die Teilnehmer zudem meist anonym, lediglich ihre digitalen Konten sind durch Pseudonyme eindeutig identifizierbar. Im Gegensatz dazu können etwa an einer privaten, berechtigungsbasierten Blockchain (»privat-permissioned blockchain«) nur autorisierte Nutzer teilnehmen und nicht jeder Teilnehmer ist berechtigt, neue Blöcke zu erstellen. Solche Systeme werden etwa von Banken für den sicheren Datenaustausch untereinander benutzt (VDE 2019, S. 7).

Konsensmechanismus

Eine zentrale Frage in jeder Blockchainanwendung lautet, welcher Teilnehmer den nächsten Block veröffentlichen und damit bestimmen darf, welche Daten bzw. Transaktionen neu in die Blockchain aufgenommen werden. Notwendig ist daher ein Mechanismus, durch den diese Teilnehmer laufend so ausgewählt werden, dass alle anderen Teilnehmer des Netzwerks dieser Auswahl zustimmen können (Konsensmechanismus).

Im Falle von Kryptowährungen (und anderen öffentlichen, berechtigungsfreien Blockchainanwendungen) tritt ein weiterer Faktor hinzu. In diesen Netzwerken herrscht zwischen den pseudonymen Teilnehmern generell wenig bis kein Vertrauen. Ein Problem besteht folglich darin, dass einzelne Teilnehmer bzw. eine Gruppe von Teilnehmern versuchen könnten, sich bei der Veröffentlichung neuer Blöcke Vorteile zu verschaffen. Beispielsweise könnten eigene Transaktionen bevorzugt in die Blockchain aufgenommen werden, während Transaktionen von anderen Teilnehmern oder Teilnehmergruppen (z. B. aus bestimmten Weltregionen) ignoriert werden. Zur Erinnerung: Im Netzwerk gibt es keine Autorität, die schädliches Verhalten einzelner Teilnehmer aufdecken und sanktionieren könnte, alle Teilnehmer sind gleichberechtigt. Der Konsensmechanismus muss daher auch unter der Bedingung gegenseitigen Misstrauens eine Einigung unter den Teilnehmern erzielen können.

⁵² Für die Berechnung der SHA-256-Hashwerte wurde die Schnittstelle auf der Internetseite <https://andersbrownworth.com/blockchain/hash> (17.6.2020) verwendet.

Es existieren verschiedene Konsensmechanismen. Für Kryptowährungen (und andere pseudonyme, öffentliche, berechtigungsfreie Blockchainanwendungen) sind vor allem die folgenden zwei Verfahren von Bedeutung.

Proof-of-Work-Konsensmechanismus

Der Proof-of-Work-Konsensmechanismus basiert auf der Idee, dass zur Veröffentlichung eines neuen Blocks ein gewisser Aufwand betrieben werden muss. Für die geleistete Arbeit erhalten die Teilnehmer, die neue Blöcke veröffentlichen, eine Belohnung. Im Falle der Kryptowährungen besteht diese Belohnung in der Ausschüttung einer festgelegten Zahl an Kryptomünzen (sowie ggf. aus den Erträgen durch Transaktionsgebühren). Weil sich dadurch die Menge der insgesamt in der jeweiligen Kryptowährung vorhandenen Münzen stetig erhöht, wird dieser Prozess auch Mining bzw. Schürfen genannt. In Abhängigkeit der Zahl der ausgeschütteten Münzen und des aktuellen Wechselkurses der Kryptowährung können durch das Schürfen erhebliche Einnahmen erzielt werden. Im Bitcoin-Netzwerk beispielsweise erhielten Teilnehmer Ende 2017 (hoher Wechselkurs) umgerechnet über 130.000 Euro für die Veröffentlichung eines neuen Blocks. Aktuell liegt die Entlohnung bei rund 50.000 Euro (Stand: Juni 2020).⁵³

Der zu leistende Aufwand wird durch das Lösen einer rechenintensiven Aufgabe erbracht. Im Bitcoin-Netzwerk besteht diese Aufgabe darin, für den zu veröffentlichenden Block einen Hashwert mit vorgegebener Form zu finden (Hashrätsel, siehe Kasten). Die Bitcoin-Blockchain passt die Schwierigkeit des Hashrätsels rund alle zwei Wochen (jeweils nach 2016 Blöcken) automatisch an die im Netzwerk insgesamt für das Schürfen bereitgestellte Rechenleistung an, damit durchschnittlich nur alle 10 Minuten ein Hashrätsel gelöst und damit ein neuer Block veröffentlicht werden kann.

Hashrätsel im Bitcoin-Netzwerk

Im Bitcoin-Netzwerk besteht das Hashrätsel darin, dass für jeden neuen Block ein Hashwert mit einer vorgegebenen Anzahl an Nullen am Beginn gefunden werden muss. Aufgrund der speziellen Eigenschaften von Hashfunktionen lässt sich das Hashrätsel nur durch Ausprobieren lösen. Dazu wird den Daten des fraglichen Blocks zunächst eine beliebige Zahl im Feld »Zufallszahl« (Abb. 5.1) hinzugefügt und davon dann der Hashwert berechnet. Dies wird solange wiederholt, bis ein passender Hashwert gefunden wird. Die Schwierigkeit des Hashrätsels lässt sich erhöhen bzw. senken, indem die geforderte Zahl an Nullen erhöht bzw. erniedrigt wird.

Beispielsweise kann durch Hinzufügen einer geeigneten Zahl zum Begriff »Deutscher Bundestag« (siehe Kasten zuvor) ein Hashwert mit 7 Nullen am Anfang generiert werden:

- › Deutscher Bundestag 132906520
00000006e69c5f2ec8ff7d4bb52f4a98128e3c00cfc8fc8518d75e880b085a53

Für das Auffinden der richtigen Zahl waren über 130 Mio. Hashberechnungen notwendig (als »Zufallszahl« wurden nacheinander alle Zahlen von 1 bis 132906520 ausprobiert). Dies hat mit der CPU eines gängigen Laptops ca. 5 Minuten gedauert. Die Suche nach einem Hashwert mit einer zusätzlichen Null am Anfang hat auf demselben Laptop bereits beinahe 7 Stunden gedauert. Ein passender Hashwert im Bitcoin-Netzwerk beginnt derzeit mit 19 Nullen.

Durch den Proof-of-Work-Konsensmechanismus wird die Manipulationssicherheit der Blockchain durch mehrere Effekte erhöht:

- › Der Mechanismus errichtet eine Hürde für die Veröffentlichung neuer Blöcke. Teilnehmer mit schlechten Absichten müssen diese Hürde überwinden.
- › Der Mechanismus führt zu einem Wettbewerb um die Veröffentlichung des nächsten Blocks, bei dem grundsätzlich jeder Teilnehmer die Möglichkeit hat, das Hashrätsel als erster zu lösen. Zwar kann ein Teilnehmer seine Chancen durch mehr Rechenkapazität erhöhen, allerdings gilt es als unwahrscheinlich, dass einzelne

⁵³ www.blockchain.com/btc/blocks (17.3.2021)

Teilnehmer mehr Rechenleistung als alle übrigen Teilnehmer im Netzwerk aufbringen können. Der Wettbewerb sorgt dafür, dass niemand die Kontrolle über die Erstellung neuer Blöcke übernehmen kann.

- › Eine Manipulation der Daten in zurückliegenden Blöcken ist so gut wie ausgeschlossen. Denn dafür wäre es notwendig, das Hashrätsel für den betroffenen und auch für alle nachfolgenden Blöcke neu zu lösen. Der dazu notwendige Rechenaufwand ist praktisch nicht zu realisieren.

Ein zentraler Nachteil des Proof-of-Work-Konsensmechanismus ist jedoch sein enormer Ressourcenverbrauch für die Bereitstellung der nötigen Rechenkapazität (Kap. 5.1.2.2).

Neben dem Bitcoin-Netzwerk basieren zahlreiche weitere Kryptowährungen auf dem Proof-of-Work-Konsensmechanismus, etwa Ethereum, Bitcoin Cash, Bitcoin SV und Litecoin. Alleine diese fünf Währungen erreichen gemessen an der Marktkapitalisierung aktuell einen Anteil von über 78 % am globalen Markt für Kryptowährungen.⁵⁴ Das Proof-of-Work-Verfahren ist somit der derzeit am weitesten verbreitetste Konsensmechanismus in Kryptowährungen.

Proof-of-Stake-Konsensmechanismus

Der Proof-of-Stake-Konsensmechanismus beruht auf der Idee, dass Teilnehmer, die bereits viel in eine Kryptowährung investiert haben (z. B. gemessen an ihrem Anteil am Gesamtvermögen der Kryptowährung), wenig Interesse haben, dem Netzwerk zu schaden. Entsprechend erhalten Teilnehmer, die große Anteile am Gesamtvermögen halten, höhere Chancen zur Veröffentlichung des nächsten Blocks. Für die Implementierung existieren unterschiedliche Ansätze, die – ähnlich wie beim Proof-of-Work-Mechanismus – für einen gewissen Wettbewerb unter den Teilnehmern führen, z. B.:

- › Ein Zufallsverfahren bestimmt den Teilnehmer, der den nächsten Block veröffentlichen darf. Dabei gilt: Je höher sein Anteil am Gesamtvermögen, desto größer die Wahrscheinlichkeit für den Zuschlag.
- › Ein Algorithmus wählt einige vermögende Teilnehmer aus, die Vorschläge für den nächsten Block machen. Danach wird darüber abgestimmt, welcher dieser Blöcke veröffentlicht wird.
- › Die Teilnehmer des Netzwerks stimmen kontinuierlich darüber ab, wer neue Blöcke veröffentlichen darf. Das Stimmgewicht der Teilnehmer hängt dabei vom Anteil am Gesamtvermögen ab.

Im Vergleich zum Proof-of-Work-Konsensmechanismus ist das Proof-of-Stake-Verfahren sehr energieeffizient, da das rechenintensive Lösen des Hashrätsels entfällt. Als wesentlicher Nachteil gilt, dass es zu einer Machtkonzentration kommen kann, bei der das Netzwerk durch eine Gruppe vermögender Teilnehmer kontrolliert wird. In diesem Fall wäre ein eigeninteressenbezogenes Handeln dieser Gruppe zum Schaden der anderen Teilnehmer nicht auszuschließen.

Aktuell nutzt eine Reihe von kleineren Kryptowährungen (gemessen an ihrer Marktkapitalisierung) verschiedene Ausprägungen des Proof-of-Stake-Konsensmechanismus (z. B. Ethereum Casper, Bitshares, Cardano, EOS).

5.1.2 Strombedarf der Kryptowährungen Bitcoin

Der in den IKT-Infrastrukturen verursachte Strombedarf von Kryptowährungen auf Basis des Proof-of-Work-Konsensmechanismus entsteht im Wesentlichen durch zwei Prozesse der Blockchain: durch den Betrieb der Netzwerkinfrastruktur mit handelsüblichen Rechnern an den Netzwerkknoten sowie durch das Lösen des Hashrätsels zur Erstellung neuer Blöcke (Schürfen), wofür beim Bitcoin heute fast ausschließlich spezielle IT-Hardware eingesetzt wird.

⁵⁴ <https://coinmarketcap.com/de> (17.3.2021)

Strombedarf für den Betrieb der Netzwerkinfrastruktur

Die Bitcoin-Blockchain erreicht mittlerweile eine Gesamtgröße von 280 GB⁵⁵ und wird auf Rechnern an weltweit über 10.000 Netzwerkknoten gespeichert und laufend synchronisiert.⁵⁶ Ausgehend von einer mittleren Leistungsaufnahme von 1.000 W pro Knotenrechner (Reetz 2019, S. 7), lässt sich der für den Betrieb der Netzwerkinfrastruktur erforderliche Strombedarf auf rund 0,09 TWh/Jahr abschätzen.

Strombedarf für das Lösen des Hashrätsels (Schürfen)

Ein hoher Stromverbrauch liegt in der Natur des Proof-of-Work-Konsensmechanismus: Nur wer genügend Rechenleistung zur Lösung des Hashrätsels bereitstellt, hat eine reelle Chance, den nächsten Block zu veröffentlichen und dafür mit der Ausschüttung von Bitcoins belohnt zu werden. Die genaue Höhe der aufgewendeten Strommenge ist allerdings schwierig zu beziffern. Diese hängt von der Rechenleistung, die zu jedem Zeitpunkt im gesamten Netzwerk für das Lösen des Hashrätsels aufgewendet wird, sowie von der Energieeffizienz der eingesetzten IT-Hardware ab. Während die gesamte Rechenleistung im Bitcoin-Netzwerk in Echtzeit dokumentiert wird, sind über die von den Schürfern eingesetzte Hardware oft nur Mutmaßungen möglich.

Sicher ist, dass sich die Leistungsfähigkeit und damit auch die Energieeffizienz der für das Schürfen eingesetzten Hardware im Bitcoin-Netzwerk seit dem Start der Kryptowährung im Jahr 2009 enorm verbessert haben. In den Anfangsjahren wurde das Schürfen meist durch Privatpersonen als Hobby betrieben, die dafür die CPU gewöhnlicher PCs verwendeten. Ab 2010 wurden verstärkt Systeme mit Grafikprozessoren (GPUs) benutzt, die gegenüber CPUs eine deutlich höhere Rechenleistung (gemessen an der Zahl an Hashberechnungen pro Sekunde) und Energieeffizienz (gemessen am Stromverbrauch pro Hashberechnung) aufweisen. Mit dem Erfolg des Bitcoins ab 2011 wurden zunehmend auch Rechnersysteme im industriellen Maßstab eingesetzt, die mit spezieller Hardware ausgestattet wurden. Seit 2012 werden anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (Application Specific Integrated Circuits – ASICs) verwendet, die eigens für das Schürfen von Bitcoins entwickelt werden und daher sehr leistungsfähig und energieeffizient sind. So können Hashwerte mit heute gängigen ASICs nicht nur rund 50 Mio. mal schneller im Vergleich zu den 2009 benutzten CPUs, sondern auch mit einer um den Faktor 1 Mio. besseren Energieeffizienz berechnet werden (Kamiya 2019). Eine Folge davon ist, dass sich das Schürfen von Bitcoins zunehmend auf sogenannte Miningfarmen konzentriert, also speziell für diese Aufgabe errichtete große Rechenzentren, in denen Tausende von ASICs in Betrieb sind. Die größten Miningfarmen sind aktuell dabei, in Leistungsklassen von mehreren 100 MW vorzustoßen (Klee 2020; Livshits 2019). Zum Vergleich: 100 MW entspricht über ein Jahr gerechnet dem Stromverbrauch von etwa 270.000 deutschen 2-Personen-Haushalten.⁵⁷ In der Folge davon siedeln sich Miningfarmen bevorzugt in Ländern mit niedrigen Strompreisen an, so insbesondere in China, das mit 65,1 % aktuell den größten Anteil an der gesamten Rechenkapazität im Bitcoin-Netzwerk beisteuert (Stand: April 2020). Weitere für das Bitcoin-Schürfen wichtige Länder sind die USA (Anteil von 7,2 %), Russland (6,9 %), Kasachstan (6,1 %), Malaysia (4,3 %) oder Iran (3,8 %). Der Anteil Deutschlands an den weltweiten Bitcoin-Schürfaktivitäten wird derzeit mit lediglich 0,56 %, jener in der EU-27 mit 1,63 % beziffert (CCAF o. J.). Um das Schürfen im industriellen Maßstab zu vermeiden, verfolgen die Netzwerke einiger Kryptowährungen (z. B. Ethereum) den Ansatz, die Algorithmen so zu programmieren, dass ein Einsatz von ASICs keine Leistungsvorteile gegenüber gewöhnlichen CPUs oder GPUs ermöglicht (Klee 2019).

Entgegen der Intuition führt eine höhere Energieeffizienz der Hardware allerdings nicht automatisch dazu, dass der Strombedarf im Bitcoin-Netzwerk sinkt (Reetz 2019, S. 11): Denn Energieeffizienzgewinne führen zu sinkenden Stromkosten und damit zu höheren Erträgen beim Bitcoin-Schürfen. Insbesondere in Verbindung mit steigenden Wechselkursen für den Bitcoin erhöht sich dadurch die wirtschaftliche Attraktivität von Miningfarmen. Dies motiviert die Betreiber dazu, die Leistungsfähigkeit der Hardware weiter auszubauen, und lockt gleichzeitig neue Schürfer an. In der Folge erhöht sich die insgesamt im Bitcoin-Netzwerk für das Lösen des Hashrätsels eingesetzte Rechenleistung. Dies wiederum führt aber dazu, dass die Schwierigkeit des Hashrätsels und damit der Rechenaufwand zur Erstellung neuer Blöcke erhöht werden. Zur Erinnerung: Die Schwierigkeit des Hashrätsels wird ca. alle 2 Wochen automatisch an die gesamte im Netzwerk verfügbare Rechenleistung angepasst, damit im Schnitt nur alle 10 Minuten ein neuer Block veröffentlicht wird. Steigt nun aber die Schwierigkeit des Hashrätsels

⁵⁵ www.blockchain.com/charts/blocks-size (17.3.2021)

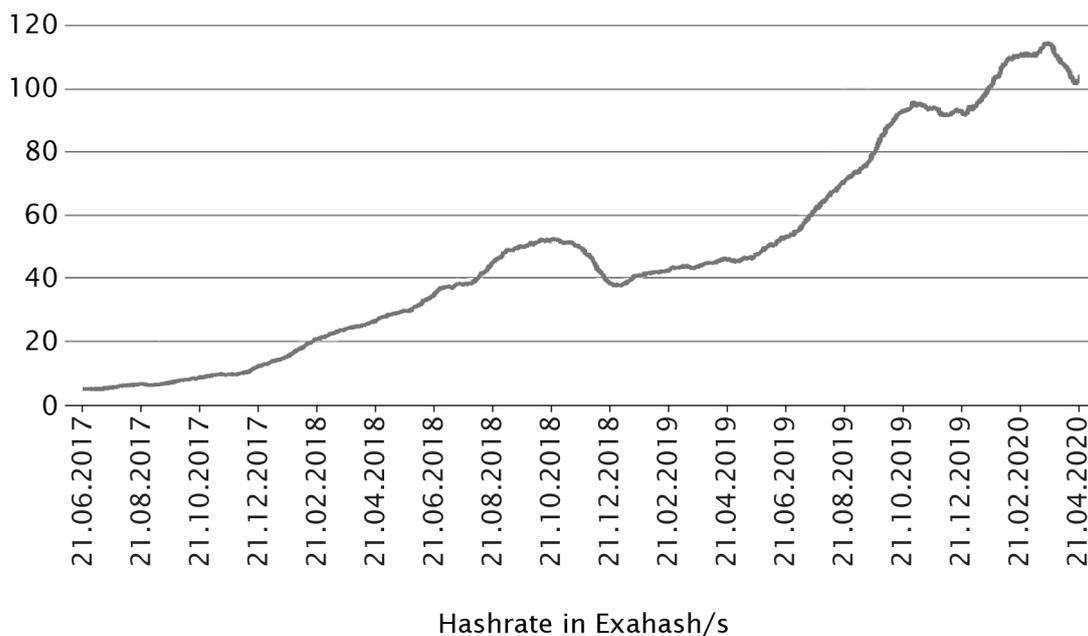
⁵⁶ <https://bitnodes.io> (17.3.2021)

⁵⁷ Es wird von einem durchschnittlichen Stromverbrauch in privaten 2-Personen-Haushalten von 3.205 kWh/Jahr ausgegangen (Statistisches Bundesamt 2019a).

schneller als die Energieeffizienz der zur Lösung des Rätsels eingesetzten Hardware, so wächst auch der Strombedarf für die Veröffentlichung neuer Blöcke und damit für das gesamte Bitcoin-Netzwerks an.

Tatsächlich ist die Hashrate, d. h. die Zahl der insgesamt im Bitcoin-Netzwerk durchgeführten Hashberechnungen pro Sekunde, in der Vergangenheit aufgrund der immer leistungsfähigeren Hardware und des tendenziell steigenden Bitcoin-Wechselkurses praktisch kontinuierlich angestiegen (Abb. 5.2). Aktuell werden in jeder Sekunde über 100 Mio. Billionen (100.000.000.000.000.000) Hashwerte (100 Exahash) berechnet, um im Schnitt alle 10 Minuten einen passenden Hashwert zu finden. (Dies bedeutet auch, dass alle 10 Minuten rund 60 Mrd. Billionen Hashberechnungen umsonst durchgeführt werden.) Die Zahl der Hashberechnungen pro Sekunde und damit die Schwierigkeit des Hashrätsels im Zeitraum haben sich alleine von Mitte 2017 bis Mitte 2020 ungefähr verzwanzigfacht. Dagegen hat sich die Energieeffizienz der im selben Zeitraum neu am Markt eingeführten ASICs nur etwa vervierfacht.⁵⁸ Die Folge davon ist ein steigender Energiebedarf des Bitcoin-Netzwerks.

Abb. 5.2 Geschätzte gesamte Hashrate im Blockchainnetzwerk



Quelle: www.blockchain.com/charts/hash-rate (17.3.2021)

Wissensstand zum Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks

Obschon es im Bitcoin-Netzwerk möglich ist, die insgesamt erbrachte Rechenleistung (Hashrate des gesamten Netzwerks) relativ exakt zu bestimmen, weichen Abschätzungen zum jährlichen Stromverbrauch der Bitcoin-Blockchain teilweise stark voneinander ab. Eine Ursache dafür liegt in der hohen Dynamik der Netzwerkaktivitäten. Da die Wirtschaftlichkeit des Schürfens maßgeblich vom Wechselkurs des Bitcoins abhängt, werden bei steigenden Kursen innerhalb kurzer Zeit große zusätzliche Rechenkapazitäten aufgebaut oder bei sinkenden Kursen nicht rentable Anlagen auch wieder abgeschaltet. Berechnungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten können daher zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Eine weitere Ursache für die hohe Spannweite der Abschätzungen sind unterschiedliche methodische Herangehensweisen sowie divergierende Annahmen über die in Miningfarmen eingesetzte Hardware, deren Kühlbedarfe sowie die Investitions-, Strom- und weitere Betriebskosten. Da Miningfarmen weltweit unter sehr heterogenen Bedingungen betrieben werden, werden diese Parameter in Studien teils sehr unterschiedlich eingeschätzt.

⁵⁸ Eine Zusammenstellung gängiger ASICs für das Bitcoin-Schürfen mit Angaben zur Energieeffizienz findet sich z.B. unter <http://sha256.cbeci.org> (17.3.2021)

Die Ergebnisse diverser Studien zum Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks werden in Abbildung 5.3 vergleichend dargestellt. Hierbei handelt es sich um zwei Analysen, die den Strombedarf auf Grundlage der aktuellen gesamten Hashrate kontinuierlich und tagesaktuell abschätzen und daraus den Jahresenergiebedarf hochrechnen.⁵⁹ Dargestellt sind jeweils Abschätzungen zum minimalen sowie zum erwarteten Strombedarf des gesamten Bitcoin-Netzwerks. Für die Abschätzung des minimalen Strombedarfs wird angenommen, dass das Schürfen mit der jeweils energieeffizientesten am Markt verfügbaren Hardware erfolgt. Die minimale erforderliche Strommenge leitet sich dann aus der Leistungsfähigkeit der Hardware und der gesamten Hashrate im Netzwerk ab. Hierbei handelt es sich allerdings nur um einen theoretischen unteren Wert für den Strombedarf, da Schürfer ältere (und damit weniger energieeffiziente) Hardware so lange weiter betreiben dürften, wie dies für sie noch profitabel ist. Für eine realistischere Abschätzung werden daher Wirtschaftsmodelle herangezogen. Hier werden Einnahmen und Ausgaben einander gegenübergestellt, um beispielsweise für jeden Zeitpunkt das Portfolio der in Miningfarmen noch wirtschaftlich zu betreibenden Hardware abzuschätzen. Der Strombedarf des gesamten Netzwerks lässt sich dann aus den Kennziffern der eingesetzten Hardware abschätzen. Dabei lassen sich die Einnahmen der Schürfer einfach aus der Anzahl der ausgeschütteten Bitcoins, den Erträgen aus den Transaktionskosten sowie dem aktuellen Wechselkurs des Bitcoins bestimmen. Für die Berechnung der Ausgaben sind dagegen eine Reihe von Annahmen über die Strom-, Betriebs- und Hardwarekosten sowie den Energiebedarf von Kühlung, USV und sonstigen gebäudebezogenen Infrastrukturen zu treffen. Dabei wird allgemein davon ausgegangen, dass Miningfarmen im Vergleich zu klassischen Rechenzentren relativ einfach aufgebaut sind. Die Hardware wird in der Regel in einfachen Regalen installiert und auf Redundanzen bei der Kühlung oder der Stromversorgung wird meist verzichtet (Mitschak/Ostler 2019).

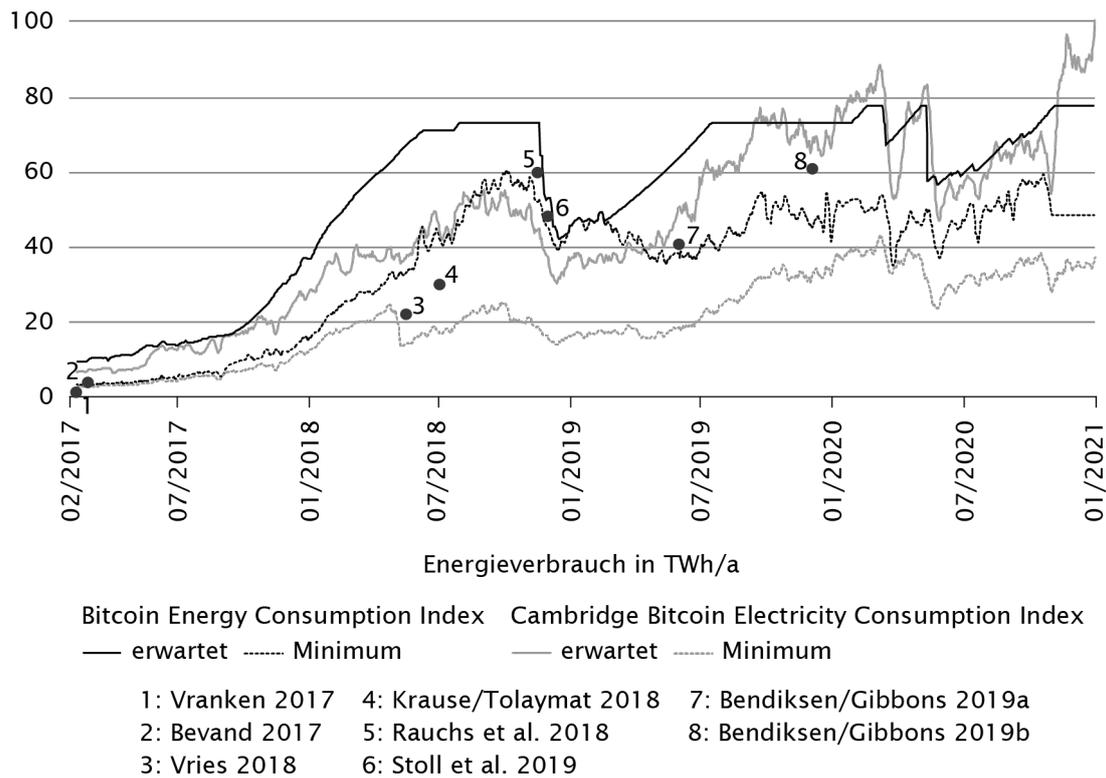
In Abbildung 5.3 sind zusätzlich die Ergebnisse einer Reihe von Studien abgebildet, in denen der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks für einen bestimmten Zeitpunkt berechnet wurde.⁶⁰ Auch in diesen Studien wird ein Ansatz verwendet, in dem Annahmen für die Effizienz der durchschnittlich eingesetzten Hardware getroffen werden, oder basieren auf einem Wirtschaftsmodell.

Durch die Streuung der Studienergebnisse ist es lediglich möglich, einen plausiblen Bereich für den jährlichen Strombedarf der Kryptowährung Bitcoin anzugeben. Dieser liegt für das Jahr 2018 zwischen 22 und 62 TWh, für das Jahr 2019 zwischen 41 und 64 TWh und für das Jahr 2020 bei rund 70 TWh. Im März 2020 sank der Wechselkurs des Bitcoins infolge der COVID-19-Pandemie kurzzeitig ab, was sich temporär in verminderten Schürfaktivitäten (und damit auch in einem reduzierten Strombedarf) bemerkbar machte (Sedlmeir et al. 2020, S. 4). Ein Rückgang des Strombedarfs ist außerdem seit Mai 2020 zu beobachten. Die Ursache hierfür kann in der Halbierung der Belohnung für die Veröffentlichung neuer Blöcke vermutet werden. Da die Menge der insgesamt durch das Schürfen erzeugbaren Bitcoins gedeckelt ist (auf insgesamt etwa 21 Mio. Münzen), wird die Anzahl der ausgeschütteten Münzen etwa alle vier Jahre halbiert. Die jüngste Halbierung der Belohnung von 12,5 auf 6,25 Bitcoins fand im Mai 2020 statt (Schiller 2020). Dies hat vermutlich dazu geführt, dass ältere Hardware in Miningfarmen unrentabel und daher abgeschaltet wurde. In der zweiten Jahreshälfte 2020 kann schließlich korrespondierend mit dem Anstieg des Wechselkurses für den Bitcoin auch wieder eine Erhöhung im Strombedarf beobachtet werden (Abb. 5.3).

⁵⁹ Die Analyseergebnisse werden auf der Internetplattform Digiconomist (<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>; 17.3.2021) sowie auf der Internetplattform des Cambridge Centre for Alternative Finance (<https://cbeci.org>; 17.3.2021) in Echtzeit veröffentlicht.

⁶⁰ Die Ergebnisse wurden jeweils an dem im Beitrag genannten Berechnungszeitpunkt oder dann am Tag der Einreichung bzw. Veröffentlichung der Beiträge eingetragen.

Abb. 5.3 Geschätzter Strombedarf der Bitcoin-Blockchain



Quellen: Bendiksen/Gibbons 2019a, 2019b; Bevand 2017; CCAF o.J.; Digiconomist o.J.; Krause/Tolaymat 2018; Rauchs et al. 2018; Stoll et al. 2019; Vranken 2017; Vries 2018

Um die Größenordnung des Energiebedarfs der Kryptowährung Bitcoin besser einschätzen zu können, wird dieser häufig mit dem Stromverbrauch einzelner Länder verglichen. Demnach verbrauchte das Bitcoin-Netzwerk gemäß den zuvor zitierten Studienergebnissen im Jahr 2019 ungefähr dieselbe Strommenge wie Ungarn (41,4 TWh) bzw. wie Österreich (65,5 TWh) (eurostat 2020). Als weitere Vergleichsgröße wird häufig der Strombedarf für eine einzelne Transaktion im Bitcoin-Netzwerk genannt. So wurden 2019 rund 120 Mio. Transaktionen der Bitcoin-Blockchain hinzugefügt.⁶¹ Der Stromverbrauch für eine Transaktion lag folglich in einem Bereich von 340 bis 530 kWh. Mit dieser Strommenge könnte ein privater 2-Personenhaushalt rund 1,3 bis 2 Monate versorgt werden.

Nicht unerheblich sind schließlich die Energie- und Ressourcenbedarfe für die Produktion der Hardware für die Miningfarmen. Die Hardware muss aufgrund des starken Wettbewerbs zwischen den Schürfern typischerweise bereits nach Monaten bis wenigen Jahren gegen leistungsfähigere Komponenten ausgetauscht werden. Die speziell für das Schürfen von Bitcoins entwickelten ASICs können auch nicht für andere Anwendungen weiter verwendet werden (Reetz 2019, S. 12). Auf Basis der Abschätzungen von McCook (2018, S. 18) zur Energieintensität der Produktion von ASICs und deren Erneuerungsrate im Bitcoin-Netzwerk lässt sich ein zusätzlicher jährlicher Energiebedarf von über 4 TWh errechnen.

⁶¹ www.blockchain.com/charts/n-transactions-total (17.3.2021)

5.1.3 Handlungsoptionen zur Reduktion des Energiebedarfs von Kryptowährungen und weiteren Blockchainanwendungen

Verantwortlich für den hohen Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks und weiterer energieintensiver Kryptowährungen ist der Proof-of-Work-Konsensmechanismus, dessen Fundament die automatische Anpassung der Schwierigkeit des Hashrätsels an die zur Verfügung gestellte Rechenleistung ist. Dieser Automatismus führt in Kombination mit dem Wettbewerb unter den Schürfern zu der paradoxen Wirkung, dass Effizienzverbesserungen in der Hardware den Energieverbrauch nicht reduzieren, sondern tendenziell in die Höhe treiben können. Um die Energieintensität dieser Kryptowährungen substanziell zu reduzieren, ist daher eine Abkehr vom Proof-of-Work-Konsensmechanismus erforderlich. Beispielsweise ließe sich der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks durch einen Wechsel auf den energieeffizienteren Proof-of-Stake-Mechanismus von aktuell bis 70 TWh/Jahr auf rund 0,1 TWh/Jahr für den Betrieb der Netzwerkknoten reduzieren (Kap. 5.1.2.1; Reetz 2019, S. 13).

Ein Wechsel des Konsensmechanismus kann nur durch die Teilnehmer des jeweiligen Netzwerks vorgenommen werden, die sich dazu auf eine Änderung des Blockchainprotokolls verständigen müssten. Soweit bekannt gibt es im Bitcoin-Netzwerk derzeit jedoch keine Pläne für eine Umstellung des Konsensmechanismus. Bei der zweitgrößten Kryptowährung Ethereum gibt es dagegen Bestrebungen, zwecks Energieeinsparungen vom Proof-of-Work- auf das Proof-of-Stake-Verfahren zu wechseln. Sollte sich das Verfahren hier bewähren, schließen Experten nicht aus, dass künftig auch das Bitcoin-Netzwerk einen Wechsel vollzieht (Huillet 2020).

Da staatliche Eingriffe in das Protokoll einer Blockchain nicht möglich sind, verbleiben für die Politik im Wesentlichen die Möglichkeiten zur Regulierung von Kryptowährungen. Grundsätzlich zu bedenken ist jedoch, dass regionale regulatorische Maßnahmen die gewünschte Wirkung aufgrund des ausgesprochen globalen Charakters von Kryptowährungen ggf. nicht erzielen können. So würde beispielsweise ein gesetzliches Verbot für das Schürfen von Bitcoins in Deutschland bzw. in der EU – abgesehen von den Schwierigkeiten beim Vollzug – keine nennenswerte Wirkung entfalten können. Aktuell konzentrieren sich schätzungsweise über 93 % der weitweiten Schürfaktivitäten auf nur sechs Länder außerhalb der EU (Kap. 5.1.2.2). Bei einem Verbot würde der ohnehin sehr geringe Anteil der EU infolge des weltweiten Wettbewerbs unmittelbar von Schürfern außerhalb der EU übernommen werden.

Ein stärkerer Effekt kann gegebenenfalls von marktbezogenen regulatorischen Maßnahmen erwartet werden. Der Anteil Deutschlands bzw. der EU am globalen Markt für Kryptowährungen wird aktuell auf bis zu 7 % (Deutschland) bzw. rund 30 % (EU) geschätzt (Schaub/Schmitt 2020). Die Regulierung des Kryptomarktes in Deutschland oder der EU könnte daher – anders als ein Verbot für das Bitcoin-Schürfen – durchaus weltweite Signalwirkung entfalten. Eine Option wären Maßnahmen, die bei den Dienstleistern der Kryptowährungen ansetzen (z. B. bei den Handelsplattformen bzw. Kryptobörsen oder den Anbietern von Kryptowallets⁶²), um den Handel mit energieintensiven Kryptowährungen zu erschweren und damit für die Teilnehmer der Netzwerke weniger attraktiv zu machen (Wenger/Tokarski 2020, S. 264). Eine sehr weitreichende Marktintervention würde in einem EU-weiten Handelsverbot von Kryptowährungen auf Basis des Proof-of-Work-Konsensmechanismus bestehen.

Regulatorische Maßnahmen, die eine Abkehr vom Proof-of-Work-Mechanismus bezwecken, sollten von forschungspolitischen Maßnahmen flankiert werden, die das Ziel verfolgen, das Vertrauen in energieeffizientere Konsensmechanismen zu steigern. So wird in Fachkreisen eine Debatte darüber geführt, ob eine Abkehr vom Proof-of-Work-Konsensmechanismus zulasten der Sicherheit gehen könnte (Sedlmeir et al. 2020, S. 6), etwa weil es beispielsweise beim Proof-of-Stake-Mechanismus zu einer Machtkonzentration auf einige vermögende Teilnehmer kommen kann (Kap. 5.1.1.2). Durch die Förderung von Grundlagenforschung zur Bewertung und Weiterentwicklung von alternativen Konsensmechanismen im Hinblick auf die Sicherheit könnte der Wechsel auf energieeffizientere Mechanismen befördert werden.

⁶² Kryptowallets sind elektronische Geldbörsen zur Verwaltung und Sicherung von Kryptowerten. Nutzer benötigen Kryptowallets, um am Handel mit Kryptowährungen teilzunehmen.

Über das Thema der Kryptowährungen hinausgedacht erscheint es wichtig, aus den in diesem Pionierfeld der Blockchaintechnologie gemachten Erfahrungen die richtigen politischen Lehren für Blockchainanwendungen in anderen Feldern (Energie, Verkehr, Gesundheit etc.) zu ziehen. In Bezug auf den Energieverbrauch bedeutet dies, dass in künftigen staatlichen Blockchainanwendungen von Beginn an auf den Einsatz des Proof-of-Work-Konsensmechanismus zugunsten von energieeffizienteren Verfahren verzichtet werden sollte. Es ist daher ausdrücklich zu begrüßen, dass die Bundesregierung in ihrer Blockchainstrategie »nachhaltigkeitsbezogene Anforderungen zu einem wichtigen Entscheidungskriterium bei der Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchaintechnologie machen« möchte (BMWi/ BMF 2019, S. 10). Für nichtstaatliche Blockchainanwendungen könnten entsprechende Anreize beispielsweise durch die Schaffung von Gütekriterien oder eines Gütesiegels für nachhaltige Blockchainanwendungen gesetzt werden.

5.2 Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung

In den vorangegangenen Kapiteln lag der Untersuchungsfokus auf dem Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen, also der Telekommunikationsnetze und der Rechenzentren. Um die dadurch bereitgestellten IKT-Dienstleistungen zu nutzen, sind jedoch weitere Geräte auf der Seite der Endanwender erforderlich. Dazu gehören Endgeräte wie z. B. PCs, Smartphones oder Fernsehgeräte, aber auch das Equipment für den Aufbau von Unternehmens- oder Heimnetzwerken. Herstellung und Betrieb dieser Geräte tragen ebenfalls zum IKT-bedingten Energiebedarf bei.

In diesem Vertiefungskapitel wird exemplarisch der Energiebedarf detaillierter untersucht, der im Anwendungsfeld der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung entsteht. Dieses Anwendungsfeld gilt als wichtiger Treiber für das Ansteigen des Energiebedarfs in den IKT-Infrastrukturen (u. a. verursacht durch den Trend des Videostreamings; Kap. 2.3.4). Hinzu kommt der Energieverbrauch der Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung, die in privaten Haushalten in Deutschland in einer enormen Zahl im Einsatz stehen.

Die Ausführungen basieren – soweit nicht durch weitere Quellen belegt – auf Kapitel 4.1 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019, S. 136 - 174).

5.2.1 Abgrenzung und Methodik

Der Fokus dieses Kapitels richtet sich auf die private Internet- und digitale Mediennutzung. Dies beinhaltet sämtlicher Internetangebote und -dienste, die privaten Anwendern textliche und/oder audiovisuelle Inhalte zur Verfügung stellen. Weiter gehört die Individualkommunikation im Internet dazu, z. B. die Nutzung von Chatdiensten oder sozialen Medien. Zur digitalen Mediennutzung wird in diesem Kapitel außerdem der TV-Konsum⁶³ sowie das Hören von digital übertragenen Radioprogrammen und Audioinhalten gezählt.

Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung

In Bezug auf die für die private Internet- und digitale Mediennutzung benötigten Endgeräte richtet sich der Blick zunächst auf die Unterhaltungselektronik, die den Zugang zu digitalen Medien vermittelt. Dazu gehören vor allem:

- › *Fernsehgeräte und Geräte der Fernsehperipherie (Set-Top-Boxen, Streamingboxen, Spielekonsolen etc.):* Set-Top-Boxen (Beistellgeräte) dienen primär der Signalverarbeitung und waren als Receiver für den Empfang von (digitalen) TV-Sendern bis vor wenigen Jahren zwingend erforderlich. Die Geräte verfügen meist über Zusatzfunktionen wie die Dekodierung von kostenpflichtigen TV-Sendern oder die Aufnahme von TV-Sendungen mithilfe von internen Speichermedien (Stobbe et al. 2015b, S. 154 f.). Bei neueren Fernsehgeräten sind Signalverarbeitung und Zusatzfunktionen oft bereits integriert, sodass keine zusätzlichen Set-Top-Boxen mehr benötigt werden. Moderne Fernsehgeräte verfügen außerdem häufig über eine Anbindung ans

⁶³ Die analoge Fernsehübertragung wurde auf den Empfangswegen Terrestrik, Satellit und zuletzt bis Mitte 2019 auch Kabel eingestellt (Verbraucherzentrale Bundesverband 2020).

Internet. Diese Smart-TVs ermöglichen u. a. den direkten Zugriff auf Inhalte von Mediatheken, Streamingdiensten oder Plattformen für Onlinevideos (z. B. YouTube). Ältere Fernsehgeräte ohne Internetanbindung lassen sich durch Streamingboxen zu einem Smart-TV nachrüsten.

- › *Geräte für den digitalen Audioempfang*: Hier zu nennen sind insbesondere Geräte für den terrestrischen digitalen Radioempfang über den Digital-Audio-Broadcasting-(DAB-)Standard (im Folgenden: Digitalradio-geräte) sowie Geräte für den Empfang von Radiosendern und weiteren Audioangeboten, die über das Internet verbreitet werden (im Folgenden: Internetradiogeräte). Durch eine Streamingbox lassen sich ältere Geräte zu einem Internetradio nachrüsten.

Für den privaten Internet- und digitalen Medienkonsum erforderlich sind darüber hinaus End- bzw. Zugangsgeräte aus dem IKT-Bereich, etwa stationäre PCs einschließlich Monitore, mobile PCs (Notebooks, Laptops, Netbooks), Tablets und Router. Eine herausragende Rolle spielen schließlich Smartphones, die als Multifunktionsgeräte zunehmend ganze Gerätegruppen substituieren (Bitkom 2018b). So werden einst erfolgreiche Produkte wie MP3-Player, mobile DVD-Player, Digitalkameras, Camcorder oder Navigationsgeräte heute immer weniger nachgefragt.

Für die folgende Analyse werden die Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung einer von insgesamt 18 in Tabelle 5.1 (Kap. 5.2.2.3) aufgeführten Gerätekategorien zugeordnet.

Methodik

Der Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung in Deutschland setzt sich aus dem Energieverbrauch der Endgeräte und den durch die Nutzung induzierten Energieverbräuchen in Rechenzentren und Übertragungsnetzen zusammen. Für die Ermittlung des Energieverbrauchs der Endgeräte (Kapitel 5.2.2) wird in einem ersten Schritt der Gerätebestand in privaten Haushalten in Deutschland aufgeschlüsselt. In einem zweiten Schritt werden Daten zur durchschnittlichen Leistungsaufnahme und zu den täglichen Nutzungszeiten dieser Geräte erhoben. Der Gesamtenergiebedarf der Endgeräte berechnet sich dann aus dem Produkt dieser drei Größen. Die Abschätzung der durch die private Internet- und digitale Mediennutzung verursachten Energieverbräuchen in Rechenzentren und in den Fest- und Mobilfunknetzen (Kapitel 5.2.3) baut auf den Ergebnissen aus Kapitel 2 auf.

Um eine gefestigte Datengrundlage aus öffentlich zugänglichen Quellen zur Verfügung zu haben, wird als Bezugsjahr für die Untersuchung das Jahr 2018 gewählt. Bereits an dieser Stelle ist jedoch festzuhalten, dass die Datenlage zum Gerätebestand und zu den Nutzungszeiten der Geräte teilweise dürftig ist.

5.2.2 Energiebedarf der Endgeräte

Gerätebestand in deutschen Privathaushalten

Zur Bestimmung der Ausstattung privater Haushalte mit stationären und mobilen (Laptop/Notebook/Netbook) PCs, Tablets sowie mit Smartphones wurden die Ergebnisse der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe⁶⁴ des Statistischen Bundesamts (2020a) für das Jahr 2018 herangezogen. Die Abschätzung des Bestands an PC-Monitoren orientiert sich an der Zahl der stationären PCs, da Doppel- und Mehrfachmonitore im Privatbereich eher die Ausnahme sind. Die jeweiligen Bestandszahlen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Für die anderen Gerätekategorien der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung geben die Erhebungen des Statistischen Bundesamts keine ausreichend detaillierte Auskunft. Als Ausgangspunkt für die Abschätzung der Bestandszahlen wurde daher die Studie »Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland« von Stobbe et al. (2015b, S. 145 ff.) herangezogen, im Rahmen derer auch Prognosen zum Gerätebestand 2015, 2020 und 2025 erstellt wurden. Die Prognosen fußen auf den Geräteverkaufszahlen für die Jahre 1995 bis 2014 sowie der Annahme, dass die Geräte nach einer durchschnittlichen Nutzungszeit außer Betrieb gesetzt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurden die in der Studie von Stobbe et al. antizipierten Entwicklungen mit aktuellen Marktdaten abgeglichen und – wo nötig – angepasst.

⁶⁴ Die Einkommens- und Verbrauchsstichprobe wird alle 5 Jahre durchgeführt, zuletzt für das Bezugsjahr 2018. Im Rahmen der Erhebung werden bundesweit etwa 60.000 private Haushalte in Deutschland befragt (Statistisches Bundesamt 2020c).

Da der Energiebedarf von Flachbildfernsehern mit steigender Gerätegröße (Bildschirmdiagonale) anwächst, ist eine Einteilung in verschiedene Größenklassen sinnvoll. Dabei geht der Trend zu immer größeren Fernsehformaten: Während vor zehn Jahren das am weitesten verbreitete Diagonalmaß unter 36 Zoll (92 Zentimeter) lag, trugen 2018 Geräte ab 45 Zoll (114 Zentimeter) mit über 70% den größten Anteil zum Marktumsatz bei. Dabei weisen vor allem Geräte ab 55 Zoll (140 Zentimeter) hohe Wachstumsraten auf: Gegenüber 2017 beliefen sich die Umsatzsteigerungen bei Geräten von 55 bis 59 Zoll (140 bis 150 Zentimeter) auf 7%, bei Geräten von 60 bis 69 Zoll (152 bis 175 Zentimeter) sogar auf 28% (gfu 2019). Das starke Marktwachstum bei großformatigen Bildschirmen wurde in der Bestandsprognose von Stobbe et al. (2015b, S. 145 ff.) noch unterschätzt. Die auf der Basis aktueller Marktdaten von den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019, S. 151) modellierten Bestandszahlen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Zur Ausstattung mit Flachbildgeräten kommt noch ein Altbestand an Röhrenbildschirmen hinzu. Während diese vor 10 Jahren mit über 35 Mio. Stück noch dominierten, geht die Bestandzahl seitdem stark zurück und betrug 2018 nach den Prognosen von Stobbe et al. (2015b, S. 145) noch 6 Mio. Geräte. 2025 sollen Röhrenbildschirme dann fast vollständig verschwunden sein.

Zur Bestimmung des Gerätebestands an Set-Top-Boxen gehen Stobbe et al. (2015b, S. 155) in ihrer Prognose noch davon aus, dass sich der Wachstumstrend der vorherigen Jahre auch nach 2015 weiter fortsetzt und ermitteln auf dieser Basis für 2018 eine Gerätezahl von rund 48 Mio. Diese Annahme scheint allerdings nicht mehr zeitgemäß, da neuere Fernsehgeräte die Funktionalitäten von Set-Top-Boxen meist integrieren. Daher wird angenommen, dass Set-Top-Boxen heute vorrangig in Kombination mit älteren Fernsehgeräten eingesetzt werden. Der Bestand an älteren Fernsehgeräten wird hier einfachheitshalber als der Gesamtbestand an Röhrenbildfernsehern sowie an Flachbildgeräten mit einer Diagonalen bis 40 Zoll modelliert. Daraus lässt sich grob ein Gerätebestand an Set-Top-Boxen von 34,8 Mio. Stück abschätzen.

Der Gerätebestand an Spielekonsolen in deutschen Haushalten wird in der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe des Statistischen Bundesamts (2020b) mit 21,4 Mio. Stück angegeben. Eine Differenzierung nach stationären und mobilen Spielekonsolen, die mit Blick auf den Strombedarf wesentlich ist, fehlt allerdings. Zur Bestimmung der in Tabelle 5.1 aufgeführten Bestandszahlen wurde daher das in Stobbe et al. (2015b, S. 153) geschätzte Verhältnis zwischen diesen beiden Gerätekategorien verwendet.

Die Bestände der Digital- und Internetradiogeräte in deutschen Wohnungen wuchsen in den letzten Jahren stark an und beliefen sich gemäß dem Digitalisierungsbericht 2020 der 14 Landesmedienanstalten in Deutschland im Jahr 2018 auf 7,4 Mio. DAB+-Empfänger sowie 5,6 Mio. Internetradios (die mediananstalten - ALM GbR 2020, S. 21).

Für Router und Streamingboxen sind weder Bestands- noch Absatzzahlen verfügbar. Der Ausstattungsbestand an Routern wurde daher auf Basis der Anzahl von Breitbandanschlüssen in den Festnetzen abgeleitet. Der Europäischen Kommission (o. J.) zufolge waren 2018 etwa 87,2% der deutschen Haushalte mit einer festen Breitbandverbindung ausgestattet. Bei 41,38 Mio. deutschen Privathaushalten im Jahr 2018 (Statistisches Bundesamt 2019b, S. 34) ergibt dies einen Gerätebestand von rd. 36 Mio. Routern. Der Gerätebestand an Streamingboxen wurde auf der Basis des Ausstattungsgrads deutscher Haushalte mit diesen Geräten abgeschätzt. Dieser wird laut einer Erhebung der Seven One Media GmbH (2018, S. 9) mit 19% angegeben. Unter der vereinfachenden Annahme, dass jeweils eine Streamingbox pro Haushalt betrieben wird, ergibt sich ein Gerätebestand von 7,9 Mio. Stück.

Elektrische Leistungsaufnahme der Geräte

Für die Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme der einzelnen Geräte orientierten sich die Gutachter des Borderstep Instituts (2019, S. 152 ff.) an den Ergebnissen der Studie von Stobbe et al. (2015b, S. 146 ff.). Die hier auf der Basis von Marktdaten, Produktdatenblättern und Annahmen zur weiteren technischen Entwicklung ermittelten Werte konnten größtenteils übernommen werden. Der Vergleich der 2015 prognostizierten Werte mit der elektrischen Leistungsaufnahme von aktuell auf dem Markt verfügbaren Geräten zeigte lediglich für Fernsehgeräte einen Korrekturbedarf an. So erweisen sich moderne Flachbildfernsehgeräte bis 39 Zoll sowohl im aktiven Betrieb als auch im Bereitschaftszustand (Standby) als deutlich energieeffizienter als noch 2015 vorhergesagt, während der Strombedarf für Geräte ab 60 Zoll deutlich höher ausfällt (u. a. bedingt durch die bei größeren Bildschirmformaten verwendeten neuen Übertragungsstandards wie 4K). Die angepassten Leistungsaufnahmen der einzelnen Geräte werden in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die elektrische Leistungsaufnahme von Streamingboxen wurde als Mittelwert von heute gängigen Geräten (Geräte von Apple TV⁶⁵ und von Nvidia Shield TV⁶⁶) modelliert. Die von den Gutachtern des Borderstep Instituts (2019, S. 154) geschätzte Leistungsaufnahme von Internetradiogeräten von 10,5 W ergibt sich als Durchschnittswert von auf dem Markt verfügbaren Geräten. Nach derselben Methode wurde für Digitalradiogeräte (DAB+) eine mittlere Leistungsaufnahme von 14,7 W angesetzt.

Generell hängt die Leistungsaufnahme von Endgeräten für die private Internet- und digitale Mediennutzung stark vom jeweiligen Funktionsspektrum sowie den verwendeten Technologien ab, sodass anstelle einer Mittelwertbildung für jede Gerätekategorie eigentlich der Verbreitungsgrad für verschiedene Gerätetypen innerhalb jeder Kategorie erhoben werden müsste. Dies kann im Rahmen dieses Berichts jedoch nicht geleistet werden. Die hier ermittelten Werte sind daher generell als grobe Abschätzungen zu betrachten.

Tägliche Betriebsstunden der Geräte

Die Ermittlung der täglichen Betriebsstunden von Geräten der privaten Internet- und digitale Mediennutzung ist schwierig. Hierfür sind detaillierte Informationen notwendig, wie viel Zeit Privatpersonen täglich einem bestimmten Medium widmen. Die Datenlage zu den Mediennutzungszeiten ist allerdings vielfach unzureichend und – je nach Erhebung – teilweise auch sehr heterogen. Überdies wird es aufgrund der Funktionserweiterungen bei vielen Geräten zunehmend schwieriger, eine bestimmte Mediennutzung einem einzelnen Gerät zuzuordnen. So können heute beispielsweise Onlinevideos (z. B. Inhalte von Mediatheken der TV-Sender, YouTube-Videos, Angebote von Streamingdiensten wie Netflix oder Maxdome) auf internetfähigen Fernsehgeräten, PCs, Tablets oder Smartphones betrachtet werden. Die nachfolgend angesetzten Durchschnittswerte für die täglichen Betriebsstunden der einzelnen Geräte sind daher mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Bei Fernsehgeräten wurde eine mittlere tägliche Betriebsdauer von 3,9 Stunden angenommen. Dieser Wert setzt sich wie folgt zusammen: Die durchschnittliche Sehdauer für klassische TV-Angebote betrug 2018 unterschiedlichen Erhebungen zufolge rund 220 Minuten pro Tag (AGF Videoforschung GmbH o. J. ; Seven One Media GmbH 2019b, S. 6). Hinzu kommt der Konsum von Onlinevideos über internetfähige Fernsehgeräte. 2018 wurden kostenlose Onlinevideos (Inhalte von Mediatheken, YouTube-Videos etc.) im Schnitt täglich 23 Minuten, kostenpflichtige Angebote (z. B. Inhalte von Streamingdiensten) täglich 17 Minuten betrachtet (Seven One Media GmbH 2019b, S. 6). Davon entfielen allerdings bei den kostenlosen nur etwa 24%, bei den kostenpflichtigen Angeboten etwa 60% der Nutzung auf Fernsehgeräte (insgesamt 15 Minuten pro Tag), der Rest wurde über PCs, Tablets oder Smartphones konsumiert (Seven One Media GmbH 2019a, S. 25, 2019b, S. 17). Entsprechend wird auch die mittlere tägliche Betriebsdauer von Streamingboxen, die ältere TV-Geräte mit dem Internet verbinden, auf 15 Minuten geschätzt. Für die tägliche Betriebsdauer von Set-Top-Boxen wird die tägliche Sehdauer für klassische TV-Angebote angenommen.

Zur täglichen Nutzungszeit von Spielekonsolen ist die Quellenlage unbefriedigend. Eine aktuelle Umfrage im Auftrag von Bitkom (2020, S. 6) unter Personen ab 16 Jahren ergab, dass 26% derjenigen, die mit einer stationären Spielekonsole spielen, dies mehrmals pro Woche tun, 28% spielen täglich und 11% täglich mehr als 2 Stunden. Daraus lässt sich grob eine Betriebsdauer der Geräte von 40 Minuten pro Tag abschätzen.⁶⁷ Digitale Spiele sind vor allem bei Jüngeren beliebt. Umfragen unter Jugendlichen ergeben denn auch tägliche Spielzeiten von durchschnittlich 109 Minuten (mpfs 2018, S. 58) bis 117 Minuten (Bitkom 2017). Dies umfasst neben Konsolen- allerdings auch Computer-, Tablet- und Smartphonespiele, wobei das Smartphone vor PC und stationäre Spielekonsole das beliebteste Spielegerät ist (mpfs 2018, S. 57 f.). Eine etwas ältere Untersuchung von Prakash et al. (2014b, S. 63) ergab, dass 73% der Spielekonsolen nur selten benutzt werden (weniger als einmal in der Woche). Wenn Geräte eingeschaltet werden, so wird nur in der Hälfte der Fälle länger als eine Stunde gespielt. Aus diesen Umfrageergebnissen lässt sich eine mittlere Nutzungsdauer von ungefähr 20 Minuten ableiten. In der Gesamtbetrachtung wird daher eine mittlere tägliche Betriebszeit für stationäre (und analog für mobile) Spielekonsolen von 30 Minuten angenommen.

⁶⁵ Umweltbezogene Daten aller Appleprodukte können unter www.apple.com/de/environment (17.3.2021) aufgerufen werden.

⁶⁶ www.nvidia.com/de-de/shield/specs (17.3.2021)

⁶⁷ Für die Berechnung wurde angenommen, dass 11% der Spieler täglich 2,5 Stunden, 28% täglich 1 Stunde, 26% dreimal wöchentlich 1 Stunde und 35% einmal wöchentlich 0,5 Stunden die Konsole nutzen.

Die tägliche Nutzungszeit von Internetradiogeräten wurde gemäß dem Media Activity Guide 2018 (Seven One Media GmbH 2018, S. 35) mit 15 Minuten angesetzt, die von Digitalradiogeräten wie bei der klassischen Rundfunknutzung mit 94 Minuten.

Die Betriebsdauer von stationären und mobilen privaten PCs wurde von Stobbe et al. (2015b, 160 f.) für 2010 auf 4 Stunden pro Tag geschätzt. Für 2020 wurde eine Nutzungszeit von 3,5 Stunden angesetzt, da sich Teile der PC-Nutzung zunehmend auf Tablets oder Smartphones verschieben. Für 2018 lässt diese Entwicklung auf eine tägliche Betriebsdauer von 3,6 Stunden schließen. Dieser Wert wird auch für PC-Monitore angenommen. Für Tablets wird basierend auf Stobbe et al. (2015b, S. 159) von einer täglichen Nutzungszeit von 2 Stunden ausgegangen.

Weil Smartphones in der Regel durchgehend angeschaltet sind, wurde hier keine tägliche Nutzungszeit, sondern ein Akkuladezyklus pro Tag angenommen. Der Strombedarf errechnet sich somit aus der Leistungsaufnahme pro Ladezyklus. Router sind in der Regel rund um die Uhr im Betrieb.

Tab. 5.1 Kennzahlen für die Berechnung des Energiebedarfs der Endgeräte

Geräte-kategorie	Ausstattungsbestand in Mio. Stück	Leistungsaufnahme aktiver Betrieb in W	Leistungsaufnahme Standby in W	tägliche Nutzungs- dauer in Stunden	Gesamtenergiebedarf 2018 in GWh
Flachbildfernseher < 20"	1,2	24,5	0,6	3,9	46,7
Flachbildfernseher 20 bis 29"	7,4	30,5	0,5	3,9	351,4
Flachbildfernseher 30 bis 39"	20,2	49,7	0,6	3,9	1.515,4
Flachbildfernseher 40 bis 49"	21,1	75,9	0,5	3,9	2.354,3
Flachbildfernseher 50 bis 59"	11,6	98,5	0,5	3,9	1.670,4
Flachbildfernseher > 60"	2,5	194,2	0,4	3,9	698,6
Röhrenbildfernseher	6	95,7	4,1	3,9	994,2
Set-Top-Boxen	34,8	13,9	1,4	3,7	1.026,4
Streamingboxen	7,9	3,7	0,4	0,25	32,8
stationäre Spielekonsolen	14,3	88,4	3,2	0,5	625,8
mobile Spielekonsolen	7,1	1,5	0	0,5	1,9
Internetradiogeräte	5,6	10,5	0,6	0,25	34,4
Digitalradiogeräte	7,4	14,7	0,6	1,57	98,7
stationäre PCs	22,1	29,7	2,6	3,6	1.296,9
Monitore	22,1	28,7	0,8	3,6	959,1
mobile PCs	43,5	9,4	0,5	3,6	708,1
Tablets	25,2	4,3	0,3	2	148,6
Smartphones	58,5	7,5 Wh	-	1 Ladezyklus/Tag	160,1
Router	36,1	7,6	-	24	2.402,1

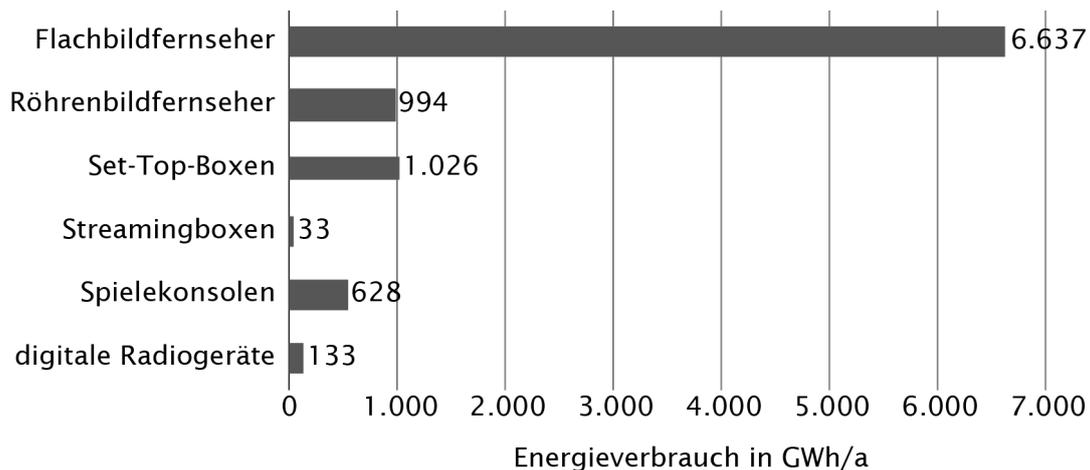
Eigene Zusammenstellung basierend auf den Quellen im Text

Energiebedarf der Endgeräte

Im Folgenden werden die berechneten Energiebedarfe der Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Medien-nutzung im Jahr 2018 vorgestellt.

Der Energiebedarf der Unterhaltungselektronik (Fernsehgeräte, Set-Top- und Streamingboxen, Spielekon-solen, digitale Radiogeräte) ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Mit rund 70 % waren Flachbildschirmfernsehgeräte für den größten Anteil am Stromverbrauch verantwortlich.

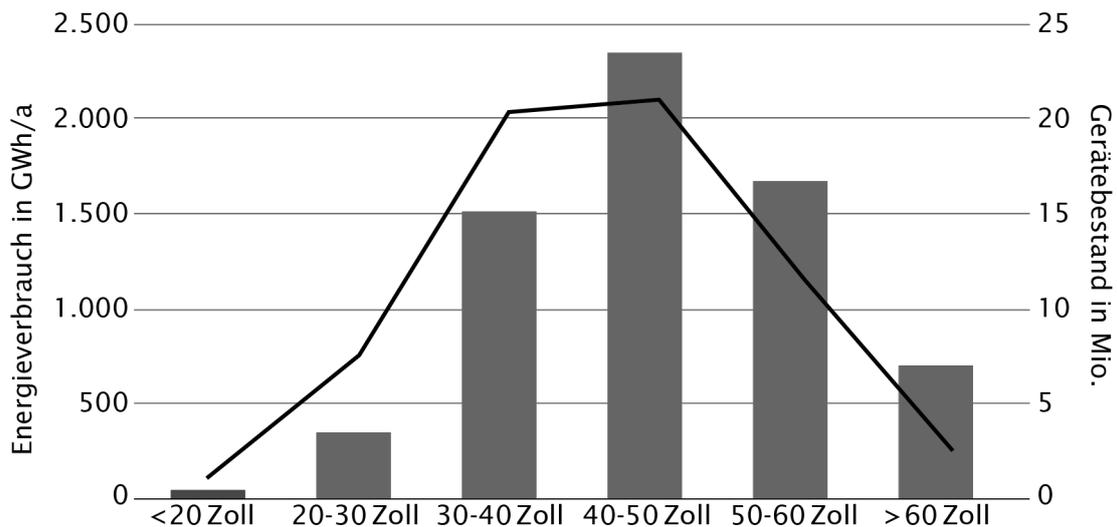
Abb. 5.4 Energiebedarfe der Unterhaltungselektronik 2018



Eigene Darstellung

In Abbildung 5.5 wird der Energieverbrauch und der Gerätebestand von Flachbildfernseher nach Größenklassen aufgeschlüsselt. Da die Leistungsaufnahme der Geräte mit ihrer Größe ansteigt (Tab. 5.1), tragen großformatige Fernsehgeräte überproportional zum Gesamtenergiebedarf bei. So waren 2018 Geräte der Größe 50 Zoll und darüber für 36 % des Strombedarfs verantwortlich, obwohl sie nur 22 % des Bestands ausmachten. Noch deutlicher wird dieser Zusammenhang bei den sehr energieintensiven Geräten über 60 Zoll: 2018 lag hier der Anteil am Bestand bei lediglich 4 %, am Energieverbrauch jedoch bei 11 %. Der Trend zu immer größeren Bildschirmfor-maten treibt den Energieverbrauch im Bereich der Fernsehgeräte somit in die Höhe.

Abb. 5.5 Energiebedarfe und Bestand Flachbildfernsehgeräte 2018



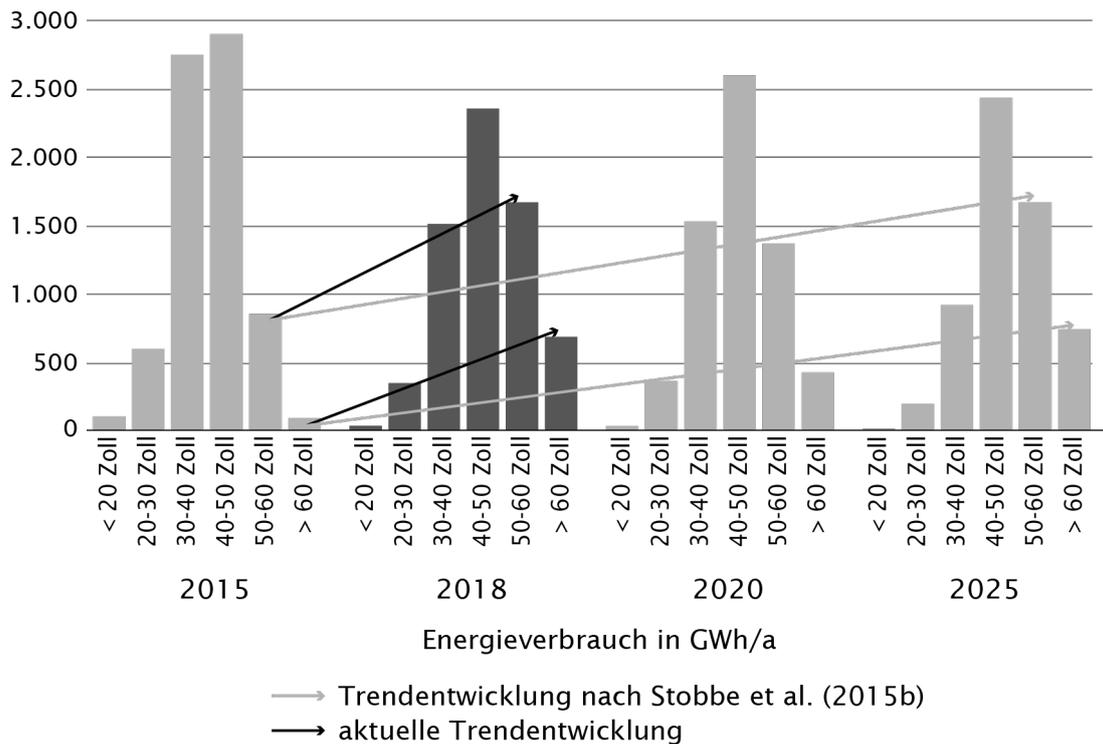
Eigene Darstellung

Die Dynamik dieser Entwicklung wurde vor wenigen Jahren noch unterschätzt. Beispielsweise wurde der in der Studie von Stobbe et al. (2015b) für das Jahr 2025 vorhergesagte Energieverbrauch durch Fernsehgeräte von 50 bis 59 Zoll (1.668 GWh) tatsächlich bereits 2018 erreicht. Auch bei Geräten der Größe 60 Zoll und darüber lag der Energieverbrauch im Jahr 2018 nur knapp unter dem für 2025 vorhergesagten Wert von 744 GWh (Abb. 5.6).

Bei den IKT-Endgeräten verursachte die private Internet- und digitale Mediennutzung im Jahr 2018 die in Abbildung 5.7 dargestellten Energieverbräuche. Den größten Anteil steuerten die rund um die Uhr aktiven Router bei (42%), gefolgt von stationären PCs und die dazugehörigen Monitore (40%). Die für einen stromsparenden Betrieb optimierten mobilen Endgeräte waren dagegen nur für 18% des Energieverbrauchs der IKT-Endgeräte verantwortlich.

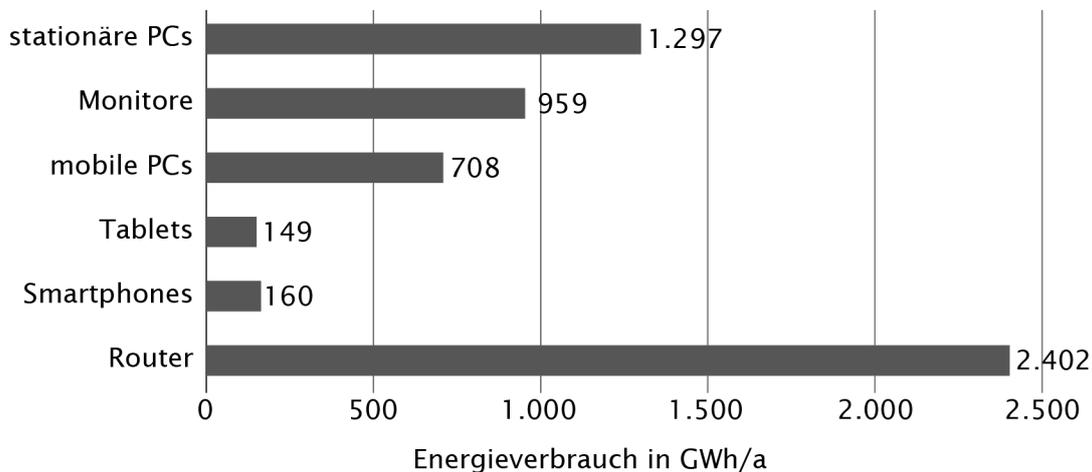
Insgesamt hat der Betrieb von Endgeräten der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung im Jahr 2018 knapp 15,1 TWh an Energie benötigt. Mit knapp 12,3 TWh (81%) den größten Anteil steuerten Fernsehgeräte, stationäre PCs einschließlich Monitore sowie Router bei.

Abb. 5.6 Vergleich der Prognosen von Stobbe et al. (2015b) (grau) mit den in dieser Analyse erzielten Ergebnissen (schwarz)



Eigene Darstellung mit Daten für 2015, 2020 und 2025 nach Stobbe et al. (2015b, S. 146)

Abb. 5.7 Energiebedarfe der IKT-Endgeräte 2018



Eigene Darstellung

Energiebedarf für die Herstellung von Endgeräten

Nicht nur die Nutzungsphase, sondern auch die Herstellungsphase trägt in erheblichem Umfang zum Energieverbrauch bei, da die Elektronikproduktion sehr energieintensiv ist. Wie groß dieser Beitrag für den Gerätebestand in Deutschland ist, lässt sich nicht vollständig quantifizieren. Dazu wären genaue Informationen zum Energieverbrauch während der Geräteherstellung notwendig, die aber von den Herstellern meist nicht veröffentlicht werden. Darüber hinaus fehlt es an Daten zur Ausstattung der deutschen Haushalte mit spezifischen Gerätemodellen.

Daher soll im Folgenden die Bedeutung der Herstellung für den Gesamtenergiebedarf anhand von zwei typischen Fallbeispielen für Smartphones und mobile PCs näherungsweise illustriert werden. Wie bereits gesehen, tragen mobile Geräte in der Nutzungsphase einen vergleichsweise geringen Beitrag zum Energieverbrauch der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung bei. Für die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs (Herstellung und Nutzung) werden folgende vereinfachte Annahmen getroffen:

- › Bei den im Jahr 2018 in Deutschland genutzten Smartphones handelte es sich um Geräte des Typs iPhone 8 (64 GB)⁶⁸ oder damit vergleichbare Modelle. Die durchschnittliche Nutzungsdauer dieser Geräte soll 3 Jahre betragen.
- › Bei den 2018 verwendeten mobilen PCs handelte es sich um Geräte des Typs Lenovo ThinkPad X1 Yoga⁶⁹ oder damit vergleichbare Modelle. Die Geräte stehen im Mittel 5 Jahre im Einsatz.

Gemäß Herstellerangaben verursacht die Produktion eines iPhone 8 (64 GB) Smartphones Emissionen in der Höhe von 45,6 kg CO₂-Äquivalenten (Apple 2017). Um die Herstellungsphase mit der Nutzungsphase vergleichbar zu machen, wird dieser Emissionswert in eine Strommenge umgerechnet. Hierfür wurde die CO₂-Intensität der globalen Stromerzeugung für das Jahr 2017 von 482 kg CO₂/MWh verwendet (IEA 2020). Damit ergibt sich für die Herstellung des Geräts ein theoretischer Strombedarf von 94,6 kWh. 2018 betrug der Ausstattungsbestand von Smartphones in deutschen Haushalten 58,5 Mio. Geräte (Tab. 5.1). Damit würde der Strombedarf für die Herstellung dieser Geräte rund 5,5 TWh betragen. Bei einer unterstellten Nutzungsdauer von 3 Jahren entspräche dies 1,8 TWh pro Jahr, also mehr als 11-mal so viel wie bei der Nutzung der Geräte verbraucht wird.

Die Produktion eines ThinkPad X1 Yoga Notebooks verursacht gemäß den Herstellerangaben Emissionen in der Höhe von 329,5 kg CO₂-Äquivalenten (Lenovo 2016). Analog zur obigen Berechnung ergibt sich hieraus ein theoretischer Strombedarf für die Herstellung von 683,6 kWh. 2018 gab es in deutschen Haushalten 43,5 Mio. mobile PCs (Tab. 5.1). Deren Herstellung benötigt somit insgesamt etwa 29,7 TWh an Strom. Bei einer unterstellten Nutzungsdauer von 5 Jahren entspräche dies jährlich 5,9 TWh, also über 8-mal so viel wie bei der Nutzung der Geräte verbraucht wird.

5.2.3 Energiebedarf in Übertragungsnetzen und Rechenzentren

Für die Abschätzung des Energiebedarfs, der durch die private Internet- und digitale Mediennutzung in den Übertragungsnetzen und Rechenzentren ausgelöst wird, kann auf die Ergebnisse von Kapitel 2 zurückgegriffen werden.

Energiebedarf im Fest-, Mobilfunk- und Kabelnetz

2018 wurden gemäß der Bundesnetzagentur (2019a, S. 51 u. 57) im deutschen Festnetz 45 Mrd. GB an Daten über DSL-, HFC-Breitbandkabel- und direkte Glasfaseranschlüsse übertragen; das mobile Datenvolumen summierte sich im selben Jahr auf 1,993 Mrd. GB. Der hierdurch verursachte Energiebedarf lässt sich aus den Ergebnissen von Kapitel 2.4.2 durch lineare Interpolation ableiten und belief sich im Jahr 2018 auf 3,44 TWh im Festnetz einschließlich HFC-Breitbandkabelnetz sowie auf 2,15 TWh im Mobilfunknetz.

⁶⁸ Hierbei handelt es sich um ein gängiges Smartphone-Modell, für das der Hersteller Informationen zum Energieverbrauch während der Geräteherstellung veröffentlicht hat (Apple 2017).

⁶⁹ Hierbei handelt es sich um ein gängiges Notebookmodell, für das der Hersteller Informationen zum Energieverbrauch während der Geräteherstellung veröffentlicht hat (Lenovo 2016).

Die von der Bundesnetzagentur veröffentlichten Datenvolumina beinhalten allerdings sowohl die private wie auch die geschäftliche Internetnutzung. Der Anteil der konsumentenbezogenen Internetnutzung lässt sich mithilfe von Daten des Unternehmens Cisco abschätzen. Demnach waren private Nutzer 2018 für rund 82 % des Datenaufkommens im deutschen Mobilfunknetz verantwortlich (Cisco 2019). Im deutschen Festnetz lässt sich der konsumentenbezogene Beitrag im Jahr 2017 aus den Daten von Cisco (2018c, 2018d) auf 78 % abschätzen, wobei dieser bis 2022 voraussichtlich auf 83 % ansteigt. Auf der Basis dieser Daten berechnet sich der im Jahr 2018 durch die private Internetnutzung im deutschen Fest- und Mobilfunknetz induzierte Energiebedarf auf insgesamt 4,48 TWh.

Hinzu kommt schließlich noch der Energiebedarf für die TV-Datenübertragung über das TV-Kabelnetz. Für das Jahr 2018 berechnet sich dieser Beitrag aus den Ergebnissen von Kapitel 2.4.2.3 auf 1,26 TWh.

Energiebedarf in Rechenzentren

Im Gegensatz zur Situation in den Übertragungsnetzen tragen Konsumenten Anwendungen in Rechenzentren einen vergleichsweise geringen Anteil zum Energieverbrauch bei. Wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, lag dieser Anteil 2016 bei 24 % und dürfte sich bis 2021 auf 27 % erhöhen, wovon laut Cisco (2018a, S. 4) ungefähr ein Drittel auf das Videostreaming entfällt. Der durch die private Internet- und die digitale Mediennutzung im Jahr 2018 in Rechenzentren in Deutschland verursachte Energiebedarf lässt sich auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 2.2.3 somit auf 3,5 TWh beziffern.

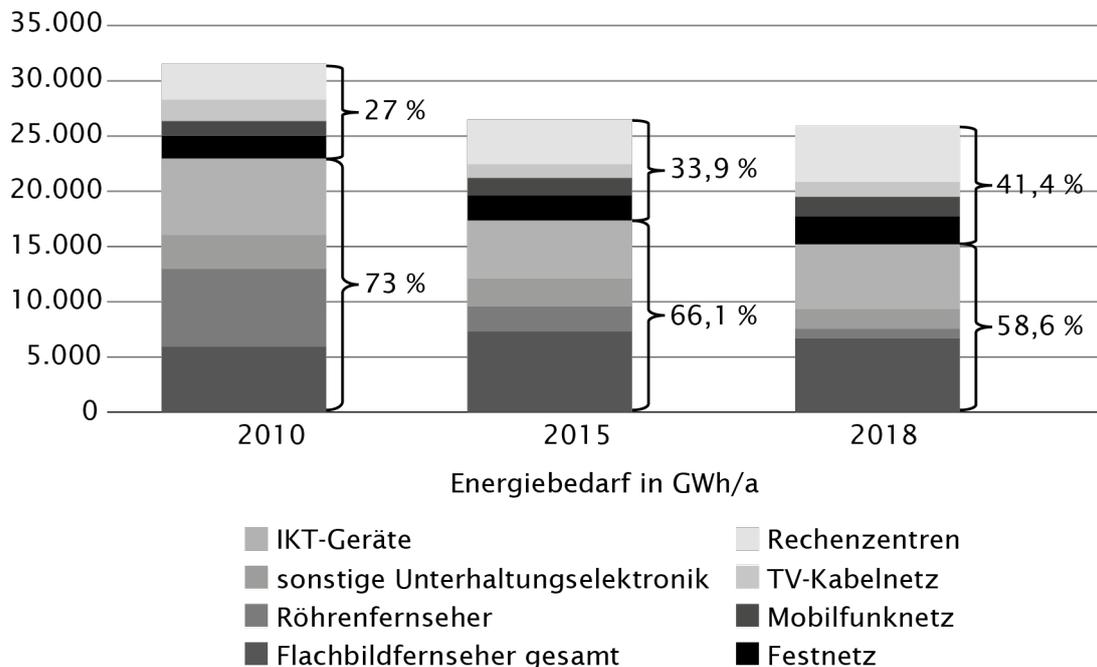
Zu dieser Energiemenge muss noch der aus Deutschland heraus im Ausland induzierte Energiebedarf von Rechenzentren summiert werden. In Kapitel 2.3.4 wurde dieser Beitrag alleine für die bei privaten Nutzern beliebten Internetanwendungen »Social Networking« und »Suche« auf mindestens 10 % des gesamten Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland geschätzt. Als untere Grenze für den Energieverbrauch 2018 der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung in Rechenzentren in Deutschland und im Ausland ergibt sich somit ein Wert von 4,9 TWh.

5.2.4 Entwicklung im Zeitverlauf und Ausblick

Die Abbildung 5.8 stellt den gesamten Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung im Verlauf der Jahre 2010, 2015 und 2018 dar. Die Energiebedarfe der Endgeräte für die Jahre 2010 und 2015 wurden der Studie von Stobbe et al. (2015b, S. 139 ff.) entnommen.⁷⁰ Für die Berechnung des Energiebedarfs in den IKT-Infrastrukturen wurde angenommen, dass sich die privaten Anteile im Festnetz, Mobilfunknetz und in Rechenzentren entsprechend der Prognosen des Unternehmens Cisco linear entwickelten. Deutlich wird, dass der Gesamtenergiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung im Zeitraum von 2010 bis 2015 von 31,4 TWh pro Jahr auf 26,4 TWh pro Jahr deutlich reduziert werden konnte, nach 2015 jedoch weitgehend konstant geblieben ist.

⁷⁰ Streamingboxen wurden von Stobbe et al. unter den Set-Top-Boxen subsummiert. Ferner wurden die Gerätekategorien Digital- und Internetradios nicht gesondert ausgewiesen. Die Anteile dieser Gerätekategorien am Gesamtenergiebedarf 2010 und 2015 sind jedoch vernachlässigbar.

Abb. 5.8 Gesamtenergiebedarfe durch private Internet- und digitale Mediennutzung in Deutschland im Zeitverlauf



Eigene Darstellung, zum Teil basierend auf Stobbe et al. (2015b, S. 146 ff.)

Energieverbrauch der Endgeräte

Der deutliche Rückgang beim Gesamtenergiebedarf zwischen 2010 und 2015 ist auf Verbrauchseinsparungen bei den Endgeräten zurückzuführen (Rückgang von 22,9 auf 17,4 TWh pro Jahr; entspricht 5,3 % p. a.). Nach 2015 setzte sich diese Entwicklung fort, allerdings mit einer etwas geringeren Geschwindigkeit (Rückgang auf 15,1 TWh im Jahr 2018 bzw. 4,5 % p. a.). Die erzielten Energieeinsparungen lassen sich auf verschiedene Ursachen zurückführen:

- › *Technische Neuerungen:* In einigen Bereichen konnte der Energiebedarf der Endgeräte durch neue Technologien gesenkt werden. Deutlich wird dies etwa im Bereich der Fernsehgeräte, wo der Austausch von alten Röhrenbildfernsehern mit energieeffizienteren Flachbildgeräten zu hohen Einsparungen führte.
- › *Veränderte Gerätenutzung:* Internet- und digitale Medieninhalte werden zunehmend auf mobilen Endgeräten konsumiert, die für einen stromsparenden Betrieb ausgelegt sind. So ist Rückgang des Energiebedarfs im Bereich der IKT-Endgeräte zwischen 2010 und 2015 auch auf die zunehmende Verdrängung von stationären PCs (inklusive Monitore) durch energiesparsamere mobile PCs zurückzuführen.
- › *Regulatorische Maßnahmen:* Beispielhaft genannt seien hier die EU-Energieverbrauchskennzeichnung (auch als EU-Energielabel bekannt) und die Verordnung (EU) Nr. 801/2013⁷¹. Ziel des EU-Energielabels ist es, Konsumenten zum Kauf von energieeffizienten Geräten zu bewegen. Für Fernsehgeräte und Monitore ist das EU-Energielabel seit 2011 verpflichtend. Die Verordnung (EU) Nr. 801/2013 regelt den Stromverbrauch von Haushalts- und Bürogeräten im Aus- und Bereitschaftszustand. So dürfen die Geräte seit 2013 im Aus- oder Bereitschaftszustand mit Statusanzeige nicht mehr als 0,5 W sowie im Bereitschaftszustand mit Informationsdisplay nicht mehr als 1 W verbrauchen. Laut den Prognosen von Stobbe et al. (2015b,

⁷¹ Verordnung (EU) Nr. 801/2013 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1275/2008 im Hinblick auf die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an den Stromverbrauch elektrischer und elektronischer Haushalts- und Bürogeräte im Bereitschafts- und im Aus-Zustand und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 642/2009 im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Fernsehgeräten

S. 143 ff.) führte die Verordnung dazu, dass sich der jährliche Standby-Strombedarf von Geräten der Unterhaltungselektronik und der IKT in deutschen Haushalten von über 12 TWh im Jahr 2010 auf rund 4,3 TWh im Jahr 2020 fast gedrittelt hat (Borderstep Institut 2019, S. 169).

Es sind aber auch gegenläufige Effekte zu konstatieren:

- › Im Bereich der Fernsehgeräte führt der Trend zu immer größeren und damit energieintensiveren Bildschirmformaten (Kap. 5.2.2.4) dazu, dass die durch den Wegfall alter Röhrenbildfernseher erzielten Einsparungen zunehmend kompensiert werden. Setzt sich dieser Trend fort, ist in diesem Bereich wieder mit einem Anstieg des Energieverbrauchs zu rechnen.
- › Die veränderte Gerätenutzung führt teilweise auch zu steigenden Energiebedarfen. So ist der Energiebedarf von IKT-Endgeräten seit 2015 aufgrund der zunehmenden Verbreitung und Nutzung von mobilen Geräten (Smartphones, Tablets und mobile PCs) wieder leicht angestiegen. Da die Energieintensität der Datenübertragung im Mobilfunknetz höher als im Festnetz ist, führt der Trend zur mobilen Internet- und digitalen Mediennutzung auch in den Übertragungsnetzen zu einem Mehrbedarf an Energie. Für 2018 wurde die Energieintensitäten für das Festnetz (inklusive HFC-Breitbandkabelnetz) auf rund 76 kWh/TB und für das Mobilfunknetz auf 1.081 kWh/TB abgeschätzt (Kapitel 2.4.3). Werden folglich beispielsweise Onlinevideos unterwegs auf dem Smartphone über ein mobiles Zugangsnetz betrachtet, führte dies 2018 zu einem 14-mal höheren Stromverbrauch in den Übertragungsnetzen als beim Konsum derselben Inhalte zuhause über einen kabelgebundenen Internetanschluss. Allerdings bestehen beim Mobilfunknetz erhebliche Effizienzpotenziale, sodass damit gerechnet wird, dass sich dessen Energieintensität in den kommenden Jahren der des Festnetzes zunehmend annähern wird (Kap. 2.5.2).
- › Mit Blick auf den Energieverbrauch ist schließlich auch der Trend der zunehmenden Vernetzung von Geräten als kritisch zu bewerten. Die Ursache hierfür liegt beim Stromverbrauch im vernetzten Bereitschaftszustand, in dem Geräte Schaltsignale aus dem Netzwerk empfangen können. Eine typische Anwendung sind Geräte der Unterhaltungselektronik, die sich auch über eine Smartphone-App anschalten und bedienen lassen. Gemäß der Verordnung (EU) Nr. 801/2013 dürfen Geräte je nach Art. 3 bis 12 W im vernetzten Bereitschaftszustand verbrauchen, also deutlich mehr als im gewöhnlichen Bereitschaftszustand. Der Trend der Vernetzung geht aber über die Unterhaltungselektronik weit hinaus und betrifft mittlerweile so gut wie alle elektrischen oder elektronischen Geräte in privaten Haushalten. Dies wird oft mit dem Schlagwort Internet der Dinge bezeichnet. Beispielhaft seien hier intelligente Heizkörperthermostate genannt, die sich mithilfe einer Smartphone-App über das Internet jederzeit und von überall aus steuern lassen. Die Folgen davon sind nicht nur, dass die Bereiche Unterhaltungselektronik, IKT-Endgeräte und Haushaltsgeräte immer stärker zusammenwachsen, sodass künftig auch Haushaltsgeräte als Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung gelten könnten. Darüber hinaus erhöht die Vernetzung auch den Energieverbrauch der Haushaltsgeräte teilweise deutlich. Hintemann und Hinterholzer (2018, S. 11) führen hierzu das Beispiel einer vernetzten LED-Leuchte an. Die Leistungsaufnahme der Leuchte beträgt im aktiven Betrieb etwa 17 W und im vernetzten Bereitschaftszustand etwa 2,3 W. Wird die Leuchte täglich 2 Stunden genutzt, beläuft sich der jährliche Energiebedarf für den tatsächlichen Betrieb auf 12,4 kWh und für den Bereitschaftsbetrieb auf rund 22 kWh. Der jährliche Energieverbrauch wird also durch den vernetzten Bereitschaftszustand beinahe verdreifacht.

Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen

Während der Energieverbrauch der Endgeräte tendenziell sinkt, ist bei dem durch die private Internet- und digitale Mediennutzung verursachten Energiebedarf in den IKT-Infrastrukturen (Übertragungsnetze und Rechenzentren) eine entgegengesetzte Entwicklung zu beobachten. So stieg der Energiebedarf in den Übertragungsnetzen und in Rechenzentren zwischen 2010 und 2018 von 8,5 auf 10,7 TWh pro Jahr. Dabei beschleunigte sich der Anstieg seit 2015 deutlich: Lag dieser zwischen 2010 und 2015 noch bei 1,2% p. a., wurden zwischen 2015 und 2018 jährlich 6% mehr Energie in den IKT-Infrastrukturen verbraucht. Als wichtige Ursachen hierfür gelten die zunehmende Vernetzung der Endgeräte und generell die stärkere private Nutzung von Internetdiensten (insbesondere von Audio- und Videostreamingdiensten), wodurch immer mehr Rechenzentrumskapazitäten benötigt werden und der private Datenverkehr in den Übertragungsnetzen stark ansteigt. Die Folge davon ist, dass die IKT-

Infrastrukturen einen immer größeren Anteil am Energieverbrauch der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung beisteuern: Lag dieser im Jahr 2010 noch bei 27%, belief er sich 2018 bereits auf 41,4% (Abb. 5.8). Setzt sich dieser Trend fort, so ist künftig wieder von einer Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs durch die private Internet- und digitale Mediennutzung auszugehen.

5.2.5 Gestaltungsfelder

Aus der Analyse zum Energiebedarf der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung lässt sich eine Reihe von politischen Handlungsoptionen für Energieeinsparungen in diesem Bereich ableiten. Nachfolgend werden einige wichtige Gestaltungsfelder skizziert.

In Bezug auf die Endgeräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung sollten die politischen Anstrengungen dahin zielen, die bisher erreichten Erfolge bei der Senkung des Energieverbrauchs nicht abreißen zu lassen. Möglichkeiten hierzu sind u. a.:

- › *Anreize zur Herstellung und zum Kauf energieeffizienter Geräte:* Die EU-Energieverbrauchskennzeichnung fokussiert derzeit auf Haushaltsgebrauchsgeräte wie Kühlschränke, Geschirrspüler oder Waschmaschinen (weiße Ware). Von den Endgeräten der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung sind EU-Energielabels bisher nur für Fernsehgeräte und Videomonitore einschließlich PC-Monitore⁷² verpflichtend vorgeschrieben (EU 2020). Vor diesem Hintergrund wäre die Einführung verpflichtender Energielabels auch für weitere energieintensive Geräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung zu prüfen (insbesondere für die energieverbrauchsintensiven stationären PCs und Router). Das würde für die Gerätehersteller einen Anreiz schaffen, energieeffizientere Geräte zu entwickeln, und auch Verbraucher könnten ihre Kaufentscheidungen stärker nach ökologischen Gesichtspunkten ausrichten. Daneben existieren zahlreiche Umweltzeichen, die Gerätehersteller auf freiwilliger Basis für ihre Produkte beantragen können. Ein Beispiel hierfür ist der »Blaue Engel«, bei dem allerdings Geräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung bisher kaum eine Rolle spielen.⁷³ Es sollte daher nach Möglichkeiten gesucht werden, wie die Attraktivität von freiwilligen Umweltzeichen für die Gerätehersteller erhöht werden könnte.
- › *Energieeffizientere großformatige Flachbildfernseher:* Der Trend zu immer größeren Flachbildfernsehgeräten dürfte den Energieverbrauch in diesem Bereich künftig wieder ansteigen lassen. Vor diesem Hintergrund wäre ggf. eine Verschärfung der regulatorischen Anforderungen an die Leistungsaufnahme von großformatigen Bildschirmen zu prüfen (z. B. im Rahmen der Ökodesignvorschriften⁷⁴). Dabei bestünde das Ziel darin, die Energieeffizienz der Displaytechnologien insgesamt zu steigern. Hierzu kann ggf. auch die öffentlich geförderte Forschung und Entwicklung beitragen.
- › *Vernetzte Geräte:* Der Trend der Vernetzung von Geräten (IKT-Endgeräte, Unterhaltungselektronik, Haushaltsgeräte etc.) führt voraussichtlich zu einem Anstieg des Energiebedarfs durch die private Internet- und digitale Mediennutzung. Gestaltungsoptionen bestehen hier beispielsweise in der Nutzung bzw. Verschärfung der Ökodesignvorschriften für diese Geräteklasse, etwa im Hinblick auf die Grenzwerte für die elektrische Leistungsaufnahme im vernetzten Bereitschaftszustand. Außerdem sollte dafür gesorgt werden, dass die Hauptfunktionen von vernetzten Geräten auch dann nutzbar bleiben, wenn die Vernetzungsschnittstelle nicht genutzt wird bzw. die Geräte gar nicht an ein Netzwerk angeschlossen werden.

Die in Abbildung 5.8 dargestellte zeitliche Entwicklung spiegelt die Verlagerung des Energiebedarfs der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung von den Endgeräten hin zur IKT-Infrastruktur wider. Die Energieverbräuche in Rechenzentren und Übertragungsnetzen sollten daher besondere Beachtung finden. Folgende Optionen können dazu beitragen, den Energiebedarf zu verringern:

⁷² Ab 1. März 2021 wird diese Produktgruppe neu als »elektronische Displays einschließlich Fernsehgeräten, Monitoren und digitalen Signage-Displays« bezeichnet (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/MEMO_19_1596; 17.3.2021)

⁷³ www.blauer-engel.de/de (17.3.2021)

⁷⁴ Siehe dazu die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 1062/2010 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU im Hinblick auf die Kennzeichnung von Fernsehgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch

- › *Energieeinsparpotenziale in den IKT-Infrastrukturen erschließen:* Die Möglichkeiten zur Einsparung von Energie in den IKT-Infrastrukturen sowie Handlungsoptionen für die Politik, um die Erschließung der Potenziale durch die Betreiber zu fördern, wurden ausführlich in Kapitel 3 diskutiert.
- › *Aufklärungs- und Informationsangebote für Verbraucher:* Der Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur wird von den Nutzern noch weniger wahrgenommen als dies bei den Endgeräten der Fall ist. Daher sollten Initiativen entwickelt werden, um die Verbraucher für das Thema zu sensibilisieren und ihnen Orientierung bei Nutzungsentscheidungen zu geben. So haben Verbraucher diverse Möglichkeiten, um dem Trend des steigenden privaten Datenverkehrs in den Übertragungsnetzen entgegenzuwirken (z. B. indem Videoinhalte grundsätzlich mit einer möglichst geringen und an die Größe des Displays des Endgeräts angepassten Auflösung abgespielt werden oder indem das automatische Abspielen von Videoinhalten auf Webseiten ausgeschaltet wird; Köhn et al. 2020, S. 11 ff.). Ohne die Sichtbarmachung des durch die private Internet- und digitale Mediennutzung verursachten Energieverbrauchs können umweltbewusste Verbraucherinnen und Verbraucher ihr Verhalten jedoch nicht anpassen. Eine Option hierfür bestünde – in Analogie zu den EU-Energielabels bei Endgeräten – in der Einführung einer Energieverbrauchskennzeichnung für spezifische IKT-Dienstleistungen (z. B. der Konsum eines Films über eine Streamingplattform). Die Berechnung der Umweltauswirkungen einzelner Cloud-Dienstleistungen ist methodisch zwar aufwendig, aber – wie etwa das Forschungsprojekt »Green Cloud-Computing« aufgezeigt hat, durchaus möglich (Köhn et al. 2020, S. 3 f.). Auch freiwillige Umweltkennzeichen könnten für besonderes umweltfreundliche Internetangebote werben. Schließlich bieten Aufklärungskampagnen oder die Medienbildung in Schulen Möglichkeiten, um eine ökologisch tragfähige private Internet- und digitale Mediennutzung zu befördern.
- › *Anreize zur Einsparung von Daten:* Um den weiteren Anstieg im Datenverkehr zu drosseln, sollten Fehlanreize, die zur Erhöhung des Datenvolumen führen, vermieden werden. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Datenübertragung im Mobilfunknetz, die gegenüber dem Festnetz energieintensiver ist (Kapitel 2.4.3). So sind beispielsweise Flatrates in Mobilfunkverträgen, die den Konsum beispielsweise von Onlinevideos über mobile Zugangspunkte begünstigen, aus ökologischer Sicht als kritisch zu bewerten (Köhn et al. 2020, S. 12 f.). Weitere Handlungsbedarfe bestehen beispielsweise im Hinblick auf die Vermeidung eines weiteren Anstiegs im übertragenen Datenvolumen etwa durch Werbeinhalte oder Datenmüll wie Spam-E-Mails. Zu geringeren Datenströmen könnten schließlich auch Softwareentwickler im Rahmen einer energieeffizienteren Programmierung beitragen (Kap. 3.1.4). Das Thema Datensuffizienz bei der Programmierung gewinnt insbesondere angesichts von datenintensiven Trends wie dem Internet of Things oder Smarthome kontinuierlich an Bedeutung.

5.3 Smartbuildings

Im Gegensatz zu den Kapiteln 2 und 3, in denen es um den Energieverbrauch und Einsparmöglichkeiten in den IKT-Infrastrukturen (insbesondere bei Rechenzentren und Kommunikationsnetzen) geht, wird in diesem Kapitel die Frage behande, welche Energieeffizienzsteigerungen durch den Einsatz von IKT in einem Anwendungssektor, und zwar dem Gebäudesektor, eröffnet werden.

Bei den folgenden Analysen wird sich auf die Fragestellung konzentriert, wie mit intelligenten Energiemanagementsystemen der Wärmeverbrauch in Gebäuden verringert werden kann. Diesen Einsparpotenzialen wird der Energieverbrauch der Energiemanagementsysteme gegenübergestellt.

Nur gestreift wird dagegen die Frage, auf welche Weise der Stromverbrauch in Gebäuden durch intelligente Energiemanagementsysteme optimiert werden kann. Denn im Vergleich zur Wärme ist der Stromverbrauch des Gebäudesektors bezogen auf die Energiemenge von untergeordneter Bedeutung: er beträgt nur etwa ein Fünftel des gebäudebezogenen Energieverbrauchs. Über direkte Einsparungen hinaus haben intelligente Energiemanagementsysteme das Potenzial, Stromerzeugung und Verbrauch zeitlich besser in Einklang zu bringen, sowie zur Integration von Strom aus erneuerbaren Energien beizutragen. Einige der mit dieser übergreifenden Fragestellung verbundenen Themen wurden in Kapitel 4 aufgegriffen. Eine darüberhinausgehende Analyse und Bewertung kann im Rahmen dieses Berichts jedoch nicht erfolgen.

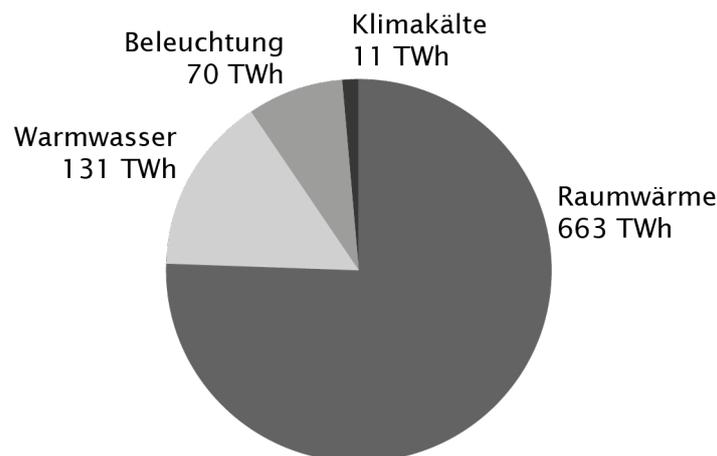
Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren – sofern nicht durch weitere Quellenangaben kenntlich gemacht – auf Kapitel 4.2 des Gutachtens des Borderstep Instituts (2019, S. 174 ff.).

5.3.1 Überblick: Energieverbrauch im Gebäudebestand

Der Gebäudesektor ist für die Energie- und Klimapolitik in Deutschland von großer Bedeutung. Rund 36 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfallen auf Gebäude. Davon wird mit etwa 90 % bzw. 794 TWh/Jahr der weitaus größte Anteil für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser benötigt (Abb. 5.9). Dies ist mehr als im gesamten Verkehrssektor (790 TWh/Jahr) oder für Industriewärme (504 TWh/Jahr) verbraucht wird. Bei den jährlichen CO₂-Emissionen liegt der Verkehrsbereich mit ca. 225 Mio. t nur wenig höher als die Gebäudewärme (ca. 190 Mio. t) (dena 2018, S. 35; Bezugsjahr: 2016). Daher ist der Gebäudebereich ein zentrales Handlungsfeld für Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, wie sie etwa im Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz der Bundesregierung aufgeführt sind (BMWi 2014a). Ein im Rahmen der »Energieeffizienzstrategie Gebäude« der Bundesregierung formuliertes Langfristziel ist die Erreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis 2050 (BMWi 2015).

Rund 63 % des deutschen Gebäudeenergieverbrauchs werden durch Wohngebäude verursacht. Das Potenzial für Energieeinsparungen ist sehr groß, insbesondere bei den Gebäuden, die vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (WSVO)⁷⁵ von 1979 erbaut wurden. Die Abbildung 5.10 verdeutlicht diesen Zusammenhang: Während Gebäude der Baujahre von 1919 bis in die späten 1970er Jahre hohe mittlere Energieverbräuche von bis über 200 kWh/m² pro Jahr aufweisen, sinkt bei Gebäuden ab dem Baujahr 1979 der Energieverbrauch kontinuierlich. Dies ist auf die sukzessive novellierten und verschärften Wärmeschutz- bzw. Energieeinsparverordnungen (WSVO 1979, 1982, 1995 und nachfolgend EnEV⁷⁶ 2002, 2004, 2007, 2009, 2013) zurückzuführen, die zu verbesserten Bau- und Sanierungsstandards geführt haben. Die Umsetzung dieser Standards im Gebäudebestand wurde durch Sanierungsprogramme unterstützt.

Abb. 5.9 Endenergiebezogener Gebäudeenergieverbrauch in Deutschland, Bezugsjahr 2019



Quelle: BMWi 2020a, Tabelle 7

Dennoch existiert in Deutschland immer noch eine sehr hohe Anzahl an älteren Gebäuden mit hohem Energieverbrauch. Wie Abbildung 5.10 zeigt, machen die vor dem Jahr 1996 erbauten Gebäude (in der Abbildung grau unterlegt) einen Bestand von ca. 15,4 Mio. der insgesamt rund 19 Mio. Wohngebäude in Deutschland aus. Um die Energiewende im Gebäudesektor zu beschleunigen, muss daher vor allem der Energiebedarf dieser Bestandsgebäude deutlich reduziert werden.

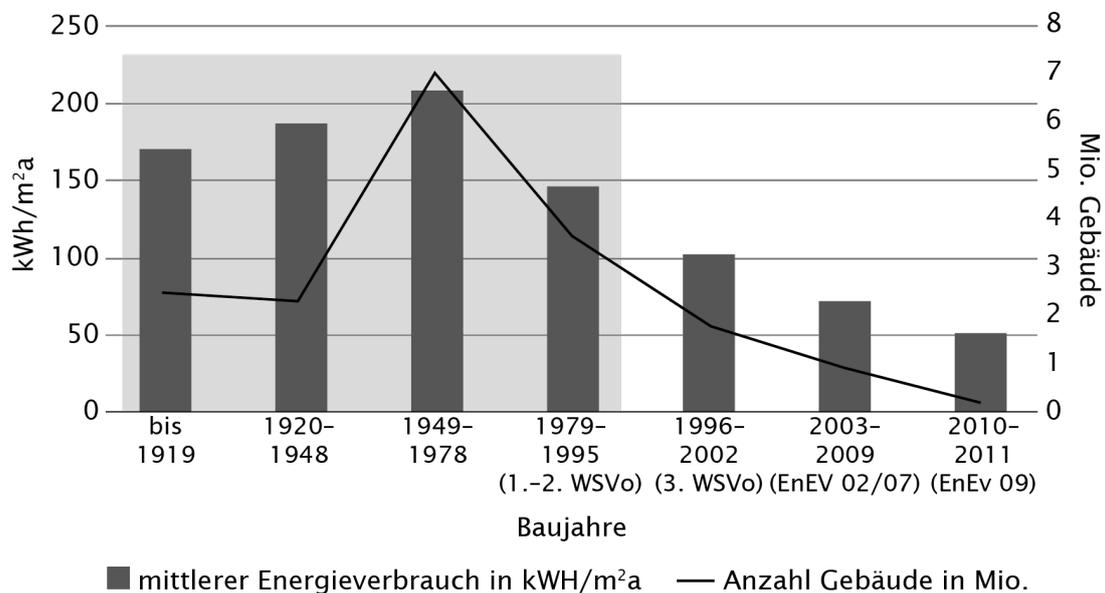
Es hat sich allerdings gezeigt, dass die bauliche Sanierung im Gebäudebestand (z. B. Außendämmung, Austausch von Fenstern und Türen, Modernisierung von Heizungsanlagen) deutlich zu langsam voranschreitet, um die gesetzten Einsparziele zu erreichen. Um die Entwicklung zu beschleunigen, hat die Bundesregierung bereits

⁷⁵ Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)

⁷⁶ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); aktuelle Fassung: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951)

im Energiekonzept 2010 den zentralen Schwerpunkt formuliert, die Sanierungsrate für Gebäude bis 2020 von etwa 1 % des Gebäudebestands pro Jahr auf 2 % zu verdoppeln (BMW/BMU 2010, S. 5). Dieses Ziel wird jedoch absehbar deutlich verfehlt: 2018 lag die Sanierungsquote weiterhin stabil bei etwa 1 % (dena 2018, S. 15). Ebenso wird beim derzeitigen Trend das Ziel, bis 2020 20 % der Wärmeenergie im Gebäudebestand gegenüber 2008 einzusparen, klar verfehlt (dena 2018, S. 27).

Abb. 5.10 Bestand und Energieverbrauch von Wohngebäuden nach Baujahr



EnEV: Energieeinsparverordnung; WSVo: Wärmeschutzverordnung

Quellen: Borderstep Institut 2019, S. 176, basierend auf BMWi 2014b, S. 5 u. 7

Vielfältige Hemmnisse stehen der zügigen Umsetzung von energieeffizienzbezogenen Sanierungsmaßnahmen entgegen. Dies sind in erster Linie ökonomische Faktoren, etwa ein hoher Investitionsbedarf verbunden mit einer zum Teil unklaren Refinanzierung oder lange Investitionszyklen von relevanten Bauteilen (z. B. Fassaden, Fenster). Aber auch bestimmte soziale (z. B. fehlende Akzeptanz für steigende Mieten) bzw. kulturelle Faktoren (z. B. Denkmalschutz) haben einen hemmenden Einfluss (Beucker/Hinterholzer 2019; Durth 2017, 2019).

Im Mietwohnungsbau spielt zudem das sogenannte Investor-Nutzer-Dilemma eine wesentliche Rolle. Es beschreibt einen Konflikt, gemäß dem Immobilieneigentümer/innen (bzw. Vermieter/innen) ökonomisch sinnvolle Investitionen in die Gebäude nicht tätigen, weil deren Nutzen in Form von geringeren Kosten für Heizung und Warmwasser bei den Mieter/innen anfällt und keine adäquate Rückvergütung, z. B. über höhere Mieten, erfolgt (IEA 2007). Unterbleibt die Sanierung aus diesem Grund, sind die Mieter/innen weiterhin durch (zu) hohe Energiekosten belastet. Deutschland besitzt im Vergleich mit anderen Ländern eine hohe Mieterquote (55%) (difu 2018), weshalb das Investor-Nutzer-Dilemma besonders relevant ist.

5.3.2 Intelligente Vernetzung bei Gebäuden

Da es aus den beschriebenen Gründen fraglich ist, ob eine rasche Effizienzsteigerung im Gebäudebestand allein über bauliche Maßnahmen an Gebäudehülle und Energietechnik gelingen kann, ist es sinnvoll, auch weitere Möglichkeiten auszuschöpfen. Ein Ansatzpunkt hierfür liegt in der intelligenten Vernetzung und Steuerung der energieverbrauchsrelevanten Geräte und Anlagen in Gebäuden. Verbreitet wird dafür der Begriff »smart« verwendet. Je nachdem, auf welcher Ebene der Fokus der Vernetzung liegt, spricht man von Smarthome/Smart Living (intelligente Haushalte), Smartbuilding (Gebäudeautomation) oder Smart Neighborhood (vernetzte Quartiere). Es bestehen ausgeprägte Schnittstellen zum Themenbereich intelligente Energienetze (Smart Grids in Verbindung mit

Smart Meter, d.h. intelligente Strom- bzw. Gaszähler) und allgemein zu einer intelligenten hochvernetzten Infrastruktur (Smart Infrastructure).

Dabei ist die Steigerung der energetischen Effizienz von Gebäuden meist nicht das vordringlichste Ziel einer intelligenten Vernetzung. Bei vielen Anwendungen aus den Bereichen Smarthome oder Smartbuilding wird sich eher auf die Steigerung des Wohnkomforts (z. B. der intelligente Kühlschrank, der selbsttätig Lebensmittel nachbestellt), auf die Unterstützung altersgerechten Wohnens und Lebens (Ambient Assisted Living, d. h. alltagstaugliche Assistenzlösungen für ein selbstbestimmtes Leben) oder etwa auf eine Erhöhung der Sicherheit sowohl von Geräten und Anlagen (Betriebssicherheit) als auch vor äußeren Einwirkungen (z. B. Einbruchschutz) konzentriert. Allerdings ermöglichen die Vernetzung und die Automation einen flexiblen und effizienten Gebäudebetrieb und schaffen so im günstigen Fall die Voraussetzungen für Energieeinsparungen durch intelligente Energiemanagementsysteme (Beucker/Hinterholzer 2019; Kalz et al. 2018).

Im Auge behalten werden muss jedoch, dass eine positive Energiebilanz nur dann erreicht werden kann, wenn die durch intelligente Energiemanagementsysteme erzielten Einsparungen den Eigenverbrauch der dafür installierten Vernetzungs- und Automatisierungstechnik übersteigen. Digitale Lösungen für Energieeinsparungen erfordern daher eine detaillierte Analyse der energetischen Wirkungen beispielsweise in Form von Lebenszyklusanalysen bzw. der Analyse kumulierter Energieaufwände. Dabei müssen auch mögliche Reboundeffekte bewertet werden. Damit ist das verbreitet auftretende Phänomen gemeint, dass eine effizienzsteigernde Maßnahme gleichzeitig zu einer vermehrten Nutzung führt, was den Einspareffekt konterkariert (Santarius 2015).

Im Folgenden werden die bestehenden Systeme und ihre Potenziale für die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebestand dargestellt und eingeordnet. Umfassende Lebenszyklusanalysen konnten im Rahmen des Projekts allerdings nicht erstellt werden.

Systemklassen intelligenter Vernetzungs- und Gebäudetechnik für das Energiemanagement in Gebäuden

Die nachfolgenden Analysen potenzieller Verbräuche und Einsparungen der Technik beziehen sich vor allem auf Systeme, die dem Energiemanagement von Wärme in Gebäuden dienen. Als Grundlage für die Analyse dient die Einteilung von Systemen in Automations- und Effizienzklassen, wie sie im Rahmen der DIN EN 15232.1:2017-12 vorgenommen wird.

Die hier definierten Effizienzklassen sind, wie bei Normungsprozessen üblich, Ergebnis eines längeren deutschen und europäischen Konsultationsprozesses von Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft und basieren auf theoretischen Erkenntnissen sowie praktischen Erfahrungen. Die in der Norm beschriebenen Effizienzklassen können damit als gesichert geltende Einsparpotenziale angesehen werden, die im Falle einer fachgerechten Ausführung und Anwendung der Technik erreicht werden können. In der Norm werden Energiemanagementsysteme in die Klassen A bis D eingeteilt. Das höchste Einsparpotenzial an Wärmeenergie erreichen Systeme der Klasse A vor solchen der Klasse B. Systeme der Klasse C sind als derzeitiger Umsetzungsstand der Technik definiert (welchen demzufolge ein Einsparpotenzial von 0% zugeordnet wird). Klasse D beschreibt den Fall fehlender Raumautomation, die zu einem Mehrverbrauch gegenüber dem Stand der Technik führt. Im Einzelnen sind dies (Abb. 5.11):

Klasse A: Hochenergieeffiziente Raumautomation

Systeme der Klasse A erreichen mindestens 19% Energieeinsparung gegenüber dem Standard (Klasse C). Sie bestehen aus hierarchisch vernetzten Steuerungs- bzw. Kontrolleinheiten (Embedded-PC, Gateway etc.) und sind umfassend mit Sensoren und Aktoren ausgestattet, die draht- oder funkgebunden (oftmals über einen Gebäudebus) miteinander bzw. mit den Kontrolleinheiten kommunizieren. Diese Systeme sind für die Steuerung von komplexen Liegenschaften ausgelegt und ermitteln den Heizbedarf im Gebäude auf Grundlage von individuellen Profilen einzelner Räume bzw. Wohnungen abhängig von den gemessenen Raumtemperaturen unter Berücksichtigung von Gebäudeparametern, Wetterdaten sowie weiteren Faktoren. Die Wärmeversorgung in einem Gebäude oder in Quartieren wird nach nutzerspezifischen Vorgaben gesteuert und kontinuierlich optimiert. Die Systeme können, wenn sie offene Schnittstellen besitzen, um Funktionen und Angebote der intelligenten Heimvernetzung (Kommunikation, Sicherheit, Altersgerechtes Wohnen etc.) erweitert werden.

Klasse B: Teiloptimierte Raumautomation

Systeme der Klasse B erreichen mindestens 12% Energieeinsparung gegenüber dem Standard (Klasse C). Sie bestehen meist aus einer Steuerungs- bzw. Kontrolleinheit (Embedded-PC, Gateway etc.) und sind mit einer begrenzten Anzahl an Sensoren und Aktoren ausgestattet, die lediglich auf Wohnungsebene über Kabel oder Funk vernetzt sind. Die Systeme ermitteln den Heizbedarf im Gebäude auf Grundlage von einzelnen Räumen und Wohnungen, Temperaturmessungen, Gebäudeparametern und Wetterdaten. Über eine Kontrolleinheit werden Wärmeerzeuger und z. B. Stellantriebe für Heizkörper oder Lüftungsventile auf Wohnungs- bzw. Einfamilienhausbene gesteuert. Hinsichtlich ihres Funktionsumfangs, der Erweiterbarkeit und des Energieverbrauchs unterscheiden sich die am Markt erhältlichen Systeme deutlich. Ihre Erweiterbarkeit ist von der eingesetzten Vernetzungstechnik, deren Standards (Bussystem, Funkstandard etc.) sowie den Steuerungskonzepten abhängig.

Klasse C: Standard-Raumautomation

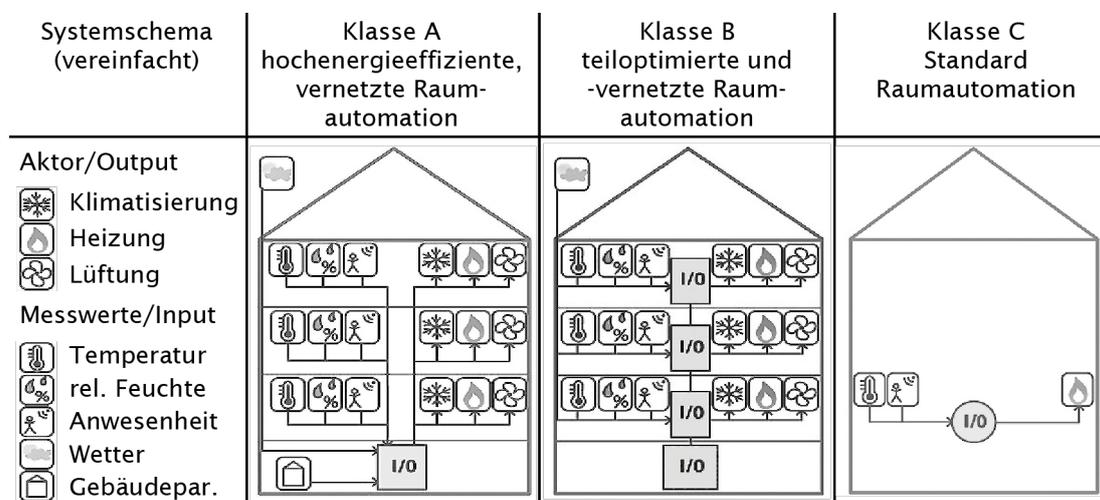
Systeme der Klasse C repräsentieren den gegenwärtigen technischen Umsetzungsstand der Raumautomation und entsprechen daher einem Einsparpotenzial von 0%. Darunter fallen nichtvernetzte Steuerungsansätze aus einfachen Sensoren und Aktoren auf Raum- oder Wohnungsebene, etwa Standardheizungen (z. B. Gasbrennwertthermen oder Ölheizungen) in Verbindung mit programmierbaren Thermostatventilen für Heizkörper. Ihr Funktionsumfang ist auf eine spezifische Aufgabe (z. B. Steuerung eines Heizkörpers) ausgerichtet und üblicherweise nicht erweiterbar.

Klasse D: Keine Raumautomation

Klasse D beschreibt den Fall, dass kein Einsatz von intelligenter Heimvernetzungs- und Gebäudetechnik vorliegt. Hierfür wird ein Mehrverbrauch an Heizenergie von 10% gegenüber der Klasse C angenommen. Systeme der Klasse D werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Systeme der Klassen A und B besitzen oft die Möglichkeit, auch das Management von Stromverbrauchern zu steuern. Dies umfasst z. B. die Nutzung variabler Stromtarife in Haushalten bzw. Gebäuden sowie die Schaltbarkeit von Stromverbrauchern über vernetzte Steckdosen oder Schalter. Damit qualifizieren sich die Systeme auch für ein Lastmanagement (Demand Side Management).

Abb. 5.11 System- und Automationsklassen für das Energiemanagement in Gebäuden



Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 183, in Anlehnung an Beucker et al. 2016

Marktentwicklung und Trends

Eine Herausforderung bei der Abschätzung des Einflusses von Smarthome- und Smartbuildingsystemen auf die Energieverbräuche im Gebäudesektor ist, dass es sich hierbei um ein junges Technologie- und Anwendungsfeld handelt. Systematisch erhobene und verlässliche Daten liegen weder zur Marktdurchdringung noch zu den im Praxiseinsatz tatsächlich erzielten Energieeinsparungen vor. Die tatsächlichen Energieeinsparungen hängen empfindlich davon ab, ob die Systeme fachgerecht installiert, regelmäßig gewartet und effizient betrieben werden.

Prognosen der Marktpotenziale werden zwar in regelmäßigen Abständen veröffentlicht. Allerdings sind diese aufgrund von teils sehr unterschiedlich angewandten Definitionen und Abgrenzungen der Systeme oft kaum miteinander vergleichbar. Generell werden dem Markt Wachstumspotenziale zugeschrieben, die Spannweite der Schätzungen verdeutlicht jedoch die Unsicherheiten solcher Prognosen. Beispielsweise soll gemäß einer Studie des Verbands der Internetwirtschaft (eco) und des Beratungsunternehmens Arthur D. Little der Umsatz mit Smarthome-Energiemanagementsystemen in Deutschland im Zeitraum von 2017 bis 2022 von 0,4 auf 1,3 Mrd. Euro steigen, was einem jährlichen Marktwachstum von über 25 % entspricht (Weiler 2017). Die Marktforscher von Statista sehen dagegen im selben Zeitraum den Markt lediglich von 289 Mio. Euro (2017) auf 774 Mio. Euro (2022) wachsen (2020)⁷⁷.

Der Branchenverband Bitkom veröffentlicht regelmäßig repräsentative Umfragen zur Smarthomethematik. Im Jahr 2018 besaß demnach etwa jede/r vierte Bundesbürger/in eine Smarthomeanwendung (Bitkom 2018c)⁷⁸, wobei die Definition von Smarthome in diesem Fall sehr weit gefasst war und beispielsweise auch intelligente Beleuchtung (17 % Nennung), Videoüberwachung (14 % Nennung) und digitale Sprachassistenten (13 % Nennung) umfasste. Für das Thema Energiemanagement in Haushalten ist jedoch relevant, dass für zukünftige Anschaffungen intelligente Heizungsthermostate (29 % Nennung) und intelligente Beleuchtung (27 % Nennung) besonders in Erwägung gezogen wurden. Im darauffolgenden Jahr gaben bereits 31 % der befragten Bundesbürger/innen an, eine Smarthomeanwendung zu nutzen. Zu den am häufigsten genutzten Funktionen zählen die intelligente Beleuchtungs- (18 %) und Heizungsteuerung (14 %) (Bitkom 2019b)⁷⁹.

Im Kontrast dazu gelangte das Marktforschungsunternehmens NORDLIGHT research (2018) in der Umfrage »Trendmonitor Deutschland«⁸⁰ zu einer deutlich vorsichtigeren Einschätzung. Zwar interessierte sich mehr als jede/r zweite Bundesbürger/in für Smarthomeprodukte, allerdings wurden entsprechende Geräte nur sehr selten auch tatsächlich angeschafft. Eine Kaufabsicht in den nächsten 6 Monaten äußerten nur 1 bis 3 % der Befragten. Insgesamt gesehen zeigen die Umfragen ein heterogenes Bild und lassen nur eingeschränkte Aussagen über die bisherige Marktdurchdringung von intelligenten Energiemanagementsystemen (und weiteren Smarthomeanwendungen) zu.

Hemmnisse für die weitere Verbreitung

Einer beschleunigten Marktdurchdringung von intelligenten Energiemanagementsystemen und generell für Smarthome- und Smartbuildingsystemen stehen derzeit einige Hemmnisse entgegen:

Oftmals sind die Systeme verschiedener Hersteller nicht untereinander kompatibel. Es existiert eine Vielzahl von unternehmenseigenen Kommunikationsprotokollen und -standards. Diese konkurrieren mit neuen (internationalen) IP-basierten Konzepten und Initiativen (z. B. Connected Living⁸¹, EEBUS⁸²), die sich für offene Standards und Architekturen der Heimvernetzung einsetzen. Bisher hat sich allerdings kein Standard bzw. keine Initiative durchsetzen können. Für potenzielle Nutzer ist dies abschreckend, da eine Entscheidung für ein System bedeutet, dass für spätere Umbauten oder Erweiterungen möglicherweise geeigneterer Komponenten anderer Hersteller nicht mehr infrage kommen.

⁷⁷ Allerdings wurde diese Prognose im Oktober 2020 um die erwarteten Auswirkungen von COVID-19 angepasst.

⁷⁸ Bei dieser Umfrage wurden 1.611 Personen in Deutschland ab 18 Jahren telefonisch befragt, darunter 425 Besitzer von Smarthomeanwendungen.

⁷⁹ An dieser Umfrage beteiligten sich 1006 Bundesbürger/innen über 16 Jahren (Bitkom 2019b).

⁸⁰ Es wurden über 1.100 Bundesbürger/innen ab 14 Jahren im Frühjahr 2018 repräsentativ befragt.

⁸¹ Connected Living ist ein Innovationszentrum, das die Bildung einer branchen- und herstellerübergreifenden Plattform zur Entwicklung von Partnerschaften und Lösungen der intelligenten Heimvernetzung zum Ziel hat (www.connected-living.org, 17.3.2021).

⁸² EEBUS ist eine Initiative, die sich für die Entwicklung und Einführung einer globalen Sprache und einem Kommunikationsprotokoll für Komponenten im Energiesektor einsetzt (www.eebus.org/what-is-eebus/#language_for_energy, 17.3.2021).

Ein weiteres Problemfeld, das viele potenzielle Nutzer von Smarthomesystemen beschäftigt, ist der Umgang mit den bzw. die Sicherheit der erfassten und verarbeiteten Daten. So haben etwa bei der bereits zitierten Umfrage von NORDLIGHT research 50 % der Befragten angegeben, sie sehen eine »hohe« Gefahr, von Smarthomegeräten »ausspioniert« zu werden, weitere 32 % schätzten diese Gefahr als »moderat« ein. Lediglich 18 % fanden Smarthomegeräte in dieser Hinsicht »unbedenklich«.

Grundsätzlich handelt es sich bei den von Smarthome- bzw. Smartbuildingsystemen auf Raum- und Wohnungsebene erfassten Daten um personenbezogene Daten, sobald diese mit einer spezifischen Wohnung oder Person korreliert werden können (Beucker et al. 2017). Damit fällt der Umgang mit diesen Daten in vielen Fällen unter die Datenschutz-Grundverordnung⁸³. Die Anbieter entsprechender Systeme verfolgen mit den anfallenden Daten unterschiedliche Speicher- und Auswertungskonzepte, die mit entsprechenden Schutzerfordernissen einher gehen.

In komplexeren Smartbuildingsystemen, die verstärkt im mehrgeschossigen Wohnungsbau zum Einsatz kommen, werden die Daten oftmals in der Wohnung bzw. im Gebäude belassen und auch nur dort für Steuerungszwecke ausgewertet. In diesem Fall ist der Datenschutz durch Sicherheitsmaßnahmen einfacher zu gewährleisten. In vielen Smarthomesystemen, die in einzelnen Haushalten zum Einsatz kommen, werden die Daten dagegen üblicherweise in der Cloud gespeichert und ausgewertet. Dies stellt deutlich höhere Anforderungen an den Datenschutz und die Datensicherheit, an die Datenübermittlung (sichere Kommunikation) sowie an den Speicherort der Daten (eine Speicherung in einem EU-Land muss sichergestellt werden). Zwar müssen deutsche bzw. europäische Anbieter von Smarthome- und Smartbuildingsystemen ihre Technik und Angebote in Konformität mit der Datenschutz-Grundverordnung gestalten. Bei Cloudanbietern außerhalb der EU ist dies jedoch unter Umständen nicht immer gewährleistet.

Ganz generell mangelt es an Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen den am Markt angebotenen Smarthome- und Smartbuildingsystemen. Dies beginnt mit der Differenzierung zwischen den Systemen und ihren Einsatzgebieten (Wohnung, Haus, Gebäude etc.) und reicht über die unabhängige Verifizierung von Energieeinsparungen und Eigenverbräuchen bis hin zur Zertifizierung der Erweiterbarkeit und nicht zuletzt der Datensicherheit der Systeme. Mit der DIN EN 15232-1 wurde zwar eine wichtige grundlegende Norm über die Klassifizierung von Gebäudeautomation und anrechenbaren Effizienzsteigerungen in der Wärmeversorgung von Gebäuden geschaffen, für die Anbieter gibt es aber bisher keine Verpflichtung, sich nach dieser Klassifizierung einzuordnen und zu qualifizieren.

5.3.3 Energieeinsparungen vs. Eigenverbrauch

Grundlegende Anwendungsmöglichkeiten intelligenter Heimvernetzungs- und Gebäudetechnik wurden in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben und es kann trotz unsicherer Daten- und Marktlage angenommen werden, dass intelligente Energiemanagementsysteme eine Schlüsseltechnologie im Neubau und in der Sanierung von Bestandsgebäuden sein werden. Die ubiquitäre Verbreitung und Nutzung von IKT in fast allen Lebensbereichen werden auch vor dem Gebäudesektor nicht Halt machen. Weitestgehend offen ist, welche Anwendungen und Angebote sich durchsetzen werden und ob der Markt vor allem über Endkunden (Smarthome) oder über Vermieter (Smartbuilding) erschlossen werden wird.

Gleichzeitig kann Smarthome- und Smartbuildingtechnik einen Beitrag zur Energiewende und zu den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung leisten. Dieser Beitrag ist jedoch schwer quantifizierbar und Smarthome- oder Smartbuildingtechnik muss nicht per se energieeffizient sein. Die Herausforderung einer Analyse besteht daher darin, eine erste Orientierung zu einer möglichen Verbreitung der Technik, ihren umwelt- und klimapolitisch sinnvollen Einsatzgebieten in Gebäuden und ihren möglichen Energieverbräuchen zu geben. Dies macht eine deutliche Engführung und Eingrenzung der zu analysierenden Anwendungen sowie die Definition von wahrscheinlichen Nutzungsszenarien notwendig.

⁸³ Verordnung (EU) 2016/679 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung)

Energieeigenverbrauch von Smarthome und Smartbuildingsystemen

Da keine detaillierten Daten zum Bestand, Energiebedarf und zu Nutzungsmustern von Smarthome- und Smartbuildingsystemen vorhanden sind und die bisher vorliegenden Prognosen der Marktpotenziale ein heterogenes Bild zeichnen, haben die Gutachter des Borderstep Instituts auf der Basis von Informationen aus relevanten Quellen, die derzeit allerdings nur spärlich vorhanden sind, sowie auf Grundlage ihrer Marktkenntnisse und von Plausibilitätsüberlegungen Einschätzungen für die genannten Parameter getroffen. Unter anderem wird vereinfachend angenommen, dass es sich bei Smartbuildingsystemen um Anlagen der Klasse A handelt und Smarthomesysteme der Klasse B zugeordnet werden können.

Smartbuildingsysteme

Smartbuildingsysteme der Klasse A sind für die Steuerung von mehrgeschossigen Wohngebäuden ausgelegt und ermitteln den Heizbedarf z. B. auf Grundlage von individuellen Profilen, Präsenzerkennung, Temperaturmessungen, Gebäudeparametern und Wetterdaten. Der Bestand für 2019 an diesen Systemen in Deutschland wird auf ca. 130.000 geschätzt. Es wird ein jährlicher Marktanstieg von 5% angenommen, was 2025 zu ca. 175.000 installierten Systemen führt⁸⁴.

Smartbuildingsysteme sind kontinuierlich im Betrieb (24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr). Dabei befinden sie sich jedoch die meiste Zeit in einem Ruhezustand (Idle-Zustand) und werden erst bei bestimmten Signalen aktiv. Daher wurden für die Nutzungsmuster Annahmen zum Umfang der aktiven und der Idle-Zeiten getroffen (Tab. 5.2).

Für die Abschätzung der Leistungsaufnahme der Systeme wird davon ausgegangen, dass in den Steuerungseinheiten sehr effiziente Hardware (Embedded PCs, Gateways etc.) eingesetzt wird. Für den aktiven Betriebszustand wird eine elektrische Leistungsaufnahme von 2,5 W und für den Idle-Zustand 1,5 W angesetzt. Weiter wird angenommen, dass sich die Leistungsaufnahmen aufgrund des technischen Fortschritts bis 2025 leicht verringern (aktiv: 2 W bzw. idle: 1 W). Hinzu kommen im Prinzip noch die Sensoren und Aktoren in den Räumen und Wohnungen, deren Energiebedarf jedoch in der Summe als sehr klein eingeschätzt und daher im Weiteren vernachlässigt werden kann.

Aus den beschriebenen Annahmen ergibt sich ein aktueller jährlicher Energiebedarf von 14,6 kWh pro installiertes System, was bei einem Bestand von ca. 130.000 Systemen zu einem Gesamtenergiebedarf von 1,9 GWh im Jahr 2019 führt. Bis zum Jahr 2025 ist trotz steigender Zahl von Geräten aufgrund von Effizienzverbesserungen mit einem praktisch gleichbleibenden jährlichen Energieverbrauch von 1,9 GWh zu rechnen.

Tab. 5.2 Bestand und Energiebedarf von Smartbuildingsystemen

Smartbuilding-systeme	2019		2025	
Bestand	ca. 130.000		ca. 175.000	
Nutzungsmuster	aktiv [h]	idle [h]	aktiv[h]	idle [h]
	4	20	5	19
Leistungsaufnahme	aktiv [W]	idle [W]	aktiv [W]	idle [W]
	2,5	1,5	2	1
Energiebedarf				
pro Installation	14,6 kWh/a		10,6 kWh/a	
gesamter Bestand	1,9 GWh/a		1,9 GWh/a	

Quelle: nach Borderstep Institut 2019, S. 195

⁸⁴ Diese Abschätzung beruht auf nicht öffentlich zugänglichen Verkaufszahlen von Anbietern/Herstellern von Gebäudeautomationssystemen und wurde durch Einzelgespräche mit ausgewählten Herstellern ermittelt.

Smarthomesysteme

Für Smarthomesysteme der Klasse B wird von einer Steuer- und Kommunikationseinheit auf Wohnungsebene ausgegangen, die draht- oder funkgebunden mit Sensoren und Aktoren vernetzt ist. Sie steuert die Heizung (des Einfamilienhauses) oder die Thermostatventile der Heizkörper in der Wohnung. Der Heizbedarf in der Wohnung oder im Haus wird z. B. auf Grundlage von individuellen Profilen, Präsenzerkennung, Temperaturmessungen, Gebäudeparametern und Wetterdaten ermittelt.

Der aktuelle Bestand im Jahr 2019 an Smarthomesystemen in Deutschland wird auf ca. 600.000 geschätzt. Es wird von einem am Endkunden orientierten Smarthomemarkt ausgegangen, der gegenüber dem Smartbuildingmarkt höhere Wachstumsraten aufweist (10%). Unter dieser Annahme werden im Jahr 2025 ca. 1,04 Mio. Systeme installiert sein.⁸⁵ Smarthomesysteme sind ebenfalls kontinuierlich im Betrieb (24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr) und für die aktiven und idle-Zeiten wurden die in Tabelle 5.3 aufgeführten Annahmen getroffen.

Die elektrische Leistungsaufnahme der Systeme wird auf 8 W im Betriebs- und auf 3 W im idle-Zustand geschätzt. Diese Werte beruhen auf aktuellen Herstellerangaben und sind, da die Systeme für den Endkundenmarkt eher auf Komfort und einfache Bedienbarkeit ausgerichtet sind, höher als bei den auf Effizienz ausgelegten Smartbuildingsystemen. Es wird angenommen, dass sich diese Werte bis zum Jahr 2025 aufgrund des technischen Fortschritts auf 6 W im Betriebs- und 2 W im idle-Zustand verbessern. Die zusätzlich benötigten Aktoren und Sensoren weisen wiederum keinen signifikanten zusätzlichen Energiebedarf auf.

Tab. 5.3 Bestand und Energiebedarf von Smarthomesystemen

Smartbuildingsysteme	2019		2025	
Bestand	ca. 600.000		ca. 1.040.000	
Nutzungsmuster	aktiv [h]	idle [h]	aktiv[h]	idle [h]
	4	20	5	19
Leistungsaufnahme	aktiv [W]	idle [W]	aktiv [W]	idle [W]
	8	3	6	2
Energiebedarf				
pro Installation	33,6 kWh/a		24,8 kWh/a	
gesamter Bestand	20,1 GWh/a		25,8 GWh/a	

Quelle: Borderstep Institut 2019, S. 197

Wie in Tabelle 5.3 ausgewiesen, lässt sich aus den beschriebenen Annahmen ein aktueller jährlicher Energiebedarf von 33,6 kWh pro installiertem System ermitteln, was bei einem Bestand von ca. 600.000 Systemen zu einem Gesamtenergiebedarf von etwa 20,1 GWh im Jahr 2019 führt. Bis zum Jahr 2025 steigt dieser Wert aufgrund der Zunahme der Gerätezahl auf 25,8 GWh/a.

Smarte Thermostatventile

Programmierbare (smarte) Thermostatventile steuern einzelne Heizkörper auf der Grundlage der gemessenen Raumtemperatur und eines vorgegebenen Sollwertes ohne Vernetzung mit einer Kontrolleinheit. Teilweise besitzen sie erweiterte Funktionen, mit denen z. B. Lüftungsvorgänge (offene Fenster) erkannt werden können. Diese Systeme sind Beispiele für Klasse C.

⁸⁵ Diese Abschätzung beruht auf nicht öffentlich zugänglichen Verkaufszahlen von Anbietern/Herstellern von Gebäudeautomationssystemen und wurde durch Einzelgespräche mit ausgewählten Herstellern ermittelt.

Darüber hinaus gibt es seit Kurzem smarte Thermostatventile, die mit digitalen Assistenten (z. B. Amazon Echo, Google Home oder Apple HomeKit) kommunizieren können. Zum Teil können diese in einer Art Baukastensystem mit entsprechendem Zubehör zu einem Smarthomesystem der Klasse B zusammengeschaltet werden, wobei die Steuerung nicht in der Wohnung bzw. im Haus, sondern über einen Clouddienst erfolgt. In diesem Fall müsste der Stromverbrauch des Clouddienstes bilanziert werden. Diese Variante wird aufgrund der Neuheit des Angebotes und mangelnder Informationen zu diesen Diensten nicht weiter betrachtet.

Der aktuelle Bestand an smarten Thermostatventilen in Deutschland ist nicht bekannt. Da diese Geräte auch als Massenware über Elektronik- und Baumärkte verkauft werden, kann in Deutschland von einem Bestand von einigen Millionen ausgegangen werden.

Da die Thermostatventile fast ausschließlich über Einwegbatterien mit Strom versorgt werden, entfällt die Betrachtung der Leistungsaufnahme und des Energiebedarfs in der Nutzungsphase. Ein Mehrverbrauch an Strom entsteht im Betrieb nicht. Dennoch können relevante Energieverbräuche und Umweltauswirkungen bei der Produktion sowie bei Recycling bzw. Entsorgung der Geräte und Batterien entstehen. Für eine detaillierte Betrachtung müssten umfassende Lebenszyklusanalysen vorgenommen werden, die im Rahmen des Projekts nicht erstellt werden konnten.

Einsparungen durch Energiemanagement

Welche Einsparpotenziale durch die Nutzung eines hochvernetzten intelligenten Energiemanagements in Gebäuden zu erschließen sind, ist äußerst schwer zu quantifizieren. Letztlich hängt dies nicht nur von den technischen Systemen ab, sondern entscheidend auch von den individuellen Nutzern und deren Bedürfnissen bzw. Entscheidungen. Außerdem werden in der Praxis Energiemanagementsysteme oft als ein Element im Gesamtpaket einer Gebäudesanierung installiert, sodass es kaum möglich ist, den genauen Anteil der einzelnen Maßnahmen an der insgesamt erzielten Einsparung festzustellen.

Daher wird im vorliegenden Bericht lediglich ein beispielhaftes Szenario betrachtet, um die Größenordnung der Einsparungen einschätzen zu können, die bis zum Jahr 2030 möglich wären, wenn die Verbreitung von intelligenten Energiemanagementsystemen intensiv vorangetrieben werden würde. Bei diesen von Beucker 2019 durchgeführten Szenarioanalysen wird davon ausgegangen, dass die in der DIN-Norm (DIN EN 15232) angegebenen Werte für die Einsparungen bei den Systemen der verschiedenen Klassen (A bis C) in der Praxis erreicht werden. Weiterhin wird angenommen, dass ab 2020 jedes Jahr 2% der Gebäude mit dem höchsten Energieverbrauch (vor dem Jahr 1996 erbaute Gebäude, Abb. 5.10) mit Energiemanagementsystemen der Klasse A ausgestattet werden. Dies entspricht einer Anzahl von etwa 300.000 Bestandswohnungen pro Jahr. Demnach würde im Zieljahr 2030 die Anzahl der installierten Energiemanagementsysteme bei etwa 3,3 Mio. liegen.

In diesem Szenario würden im Jahr 2030 durch den Einsatz der Systeme CO₂-Einsparungen in der Höhe von 2,36 Mio. t erzielt werden können (Beucker 2019, S. 3). Bei einem angenommenen Emissionsfaktor von 240 g CO₂ pro kWh Heizenergie (hauptsächlich Erdgas) entspräche dies einer energetischen Einsparung von 9,83 TWh. Dies sind gut 10% der heute im Gebäudesektor verbrauchten Wärmeenergie (826 TWh im Jahr 2016).

Im Vergleich dazu würde der Eigenverbrauch der etwa 3,3 Mio. Energiemanagementsysteme mit etwa 0,04 TWh/a kaum ins Gewicht fallen (für diese Rechnung wurde der für 2025 angenommene Wert von 10,6 kWh/a pro installiertem System aus Tabelle 5.2 verwendet). Auch wenn es sich hierbei lediglich um eine Szenariobetrachtung mit stark vereinfachenden Annahmen handelt, zeigt der Vergleich der Größenordnungen deutlich, dass der Einsatz von IKT im Wärmesektor auch in der Gesamtbilanz zu deutlichen Energieeinsparungen beitragen kann.

5.3.4 Fazit

Die Energiemanagementfunktionen von Smarthome- und Smartbuildingsystemen können durch die Realisierung von Einsparpotenzialen beim Wärmeverbrauch einen wichtigen Beitrag zur Energiewende im Gebäudesektor Deutschlands leisten. Für die energetische Sanierung der Gebäudehülle sind teilweise Jahrzehnte dauernde Instandhaltungszyklen typisch (z. B. bei Dach, Fassade, Fenster). Im Gegensatz dazu ist die Installation von Energiemanagementsystemen relativ kurzfristig umsetzbar. Dies ist insbesondere attraktiv, um zügig Verbrauchssenkungen bei Gebäuden mit schlechten energetischen Eigenschaften realisieren zu können.

Zur Bestimmung des Nettoeffekts muss von den realisierten Energieeinsparungen der für die Vernetzung und das Energiemanagement aufgewendete Verbrauch abgezogen werden. Die in diesem Bericht vorgenommenen Abschätzungen und Berechnungen zeigen, dass dieser Verbrauch kaum ins Gewicht fällt. Smartbuildingsysteme der Automations- und Effizienzklasse A (nach DIN EN 15232) sparen somit über ihren Lebenszyklus deutlich mehr Energie ein als sie verbrauchen. Obwohl der Stromverbrauch bei Smarthomesystemen der Effizienzklasse B etwas höher zu veranschlagen ist, ist es nicht unplausibel, dass auch sie in Summe erhebliche Energiemengen einsparen. Genauere Berechnungen wurden im Rahmen dieses Berichts hierzu allerdings nicht angestellt.

Zur beschleunigten Verbreitung intelligenter Energiemanagementsysteme müssten einige derzeit bestehende Hemmnisse überwunden werden. Hierzu zählen u. a.

- › eine mangelnde Transparenz, sodass die Funktionen und erzielbaren Einsparungen der unterschiedlichen Systeme von den potenziellen Nutzern nur schwer verglichen werden können;
- › das Fehlen offener Standards, sodass ein System meist nicht mit dem eines anderen Herstellers interoperabel ist;
- › Bedenken bei potenziellen Nutzern hinsichtlich des Datenschutzes und der Datensicherheit sowie
- › bei Mietgebäuden das Investor-Nutzer-Dilemma, das Gebäudeeigentümer von energiewirtschaftlich sinnvollen Investitionen abschreckt, da sie nicht adäquat am generierten Nutzen partizipieren.

6 Schlussbetrachtungen

Die Digitalisierung schreitet in enormem Tempo voran. Immer mehr Daten werden täglich in Rechenzentren oder Endgeräten verarbeitet und über Telekommunikationsnetze übertragen. In der Folge erreicht der Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen bereits heute eine energie- und volkswirtschaftlich bedeutende Größenordnung. So verbrauchten die Rechenzentren und Telekommunikationsnetze in Deutschland 2019 ungefähr die Menge an Strom, die im selben Jahr von sämtlichen Windenergieanlagen auf See erzeugt wurde.⁸⁶ Die Frage, ob die fortschreitende Digitalisierung im nächsten Jahrzehnt weltweit zu einem massiven Anstieg des IKT-bedingten Energiebedarfs führt, wie dies in einigen Prognosen vorhergesagt wird, kann gegenwärtig angesichts einer sehr heterogenen Studienlage allerdings nicht seriös beantwortet werden. Klar ist jedoch, dass ein Ansteigen des Energiebedarfs nur verhindert werden kann, wenn vorhandene Effizienzpotenziale konsequent ausgeschöpft werden.

Auch für Deutschland zeigen die im vorliegenden Bericht vorgenommenen Analysen des Energieverbrauchs der IKT-Infrastrukturen (Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) verschiedene mögliche Entwicklungspfade bis 2030 auf. So liegt je nach der weiteren Entwicklung der Energieeffizienz im Vergleich zu 2015 eine Verdreifachung (falls die Energieeffizienz nicht mehr so stark gesteigert werden kann wie in der Vergangenheit), aber auch eine Stabilisierung und leichte Absenkung (bei Ausschöpfung der Energieeffizienzpotenziale) des Energiebedarfs im Bereich des Möglichen. Dies bedeutet einerseits, dass die rasanten Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung nicht automatisch mit steigenden Energiebedarfen in den IKT-Infrastrukturen einhergehen müssen, andererseits aber auch, dass erhebliche Anstrengungen nötig sind, um dieses Ziel auch zu erreichen.

In erster Linie gefordert sind die *Betreiber der IKT-Infrastrukturen*, die innovative Energieeinsparlösungen in die Praxis umsetzen müssen. Hier von Vorteil ist, dass sich effizienzsteigernde Maßnahmen meist von alleine am Markt durchsetzen, sodass eine Unterstützung der Verbreitung solcher Innovationen durch politische Maßnahmen in der Regel nicht notwendig ist. Fraglich ist allerdings, ob die marktgetriebene Diffusion schnell genug erfolgt, um den durch das rasante Wachstum der IKT-Branche induzierten steigenden Energiebedarf durch Effizienzgewinne ausgleichen zu können. Um vor diesem Hintergrund die Diffusion innovativer Lösungen zu beschleunigen, stehen staatlichen Akteuren (Politik, Behörden und weitere Einrichtungen der öffentlichen Hand) unterschiedliche Möglichkeiten offen. Die Maßnahmen sind jeweils auf die infrage stehenden Innovationen abzustimmen, einige übergreifende politische Handlungsfelder sind jedoch u. a.:

- › *Förderung von Forschung und Entwicklung*: Einige technische und organisatorische Einsparoptionen befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung, weitere Effizienzinnovationen werden im Rahmen der angewandten Forschung vorangetrieben und teilweise als Pilotvorhaben in der Praxis bereits erprobt. Die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in diesem Feld werden durch öffentliche Mittel (u. a. im Rahmen der Hightech-Strategie 2025 des Bundes) bereits unterstützt. Ein Ausbau und eine Verstärkung dieses Engagements wären angesichts der Dimension der Problemlage und der damit verbundenen Herausforderungen erwägenswert.
- › *Öffentliche Hand als Pilotanwender*: Für eine Reihe von Einsparoptionen existieren Pilotanwendungen und erste Nischenmärkte, eine breite Diffusion in die Praxis steht allerdings noch aus. Unter anderem liegt dies in Sicherheitsbedenken der Anwender gegenüber neuen Technologien begründet, da bei den Betreibern der IKT-Infrastrukturen eine zuverlässige und ausfallsichere Bereitstellung der Leistung höchste Priorität hat. Staatlich unterstützte bzw. betriebene Pilot- oder Demonstrationsanlagen könnten dazu beitragen, bei potenziellen Anwendern ggf. vorhandene Vorbehalte abzubauen.
- › *Öffentliche Beschaffung*: Damit innovative Lösungen aus ihren Nischenmärkten heraustreten können, muss das Marktangebot an entsprechenden Produkten vergrößert und die Anbieterlandschaft verbreitert werden. Als großer Nachfrager nach IKT-Infrastrukturen und -Dienstleistungen kann die öffentliche Hand die Marktdynamik stimulieren. Darüber hinaus übt auf diese Weise die öffentliche Beschaffung eine Vorbildfunktion aus, die ggf. weitere Marktteilnehmer zum Mitziehen animiert.

⁸⁶ 2019 wurden aus Windenergieanlagen auf See 24,4 TWh eingespeist (Bundesnetzagentur 2021, S. 86).

- › *Regulierung:* Auch regulatorische Maßnahmen kommen als Mittel zur Unterstützung der Verbreitung von Effizienzinnovationen in Betracht. Die Bandbreite der Möglichkeiten ist groß und reicht je nach Einsparoption und Regulierungsebene (Bund, Länder, Kommunen) von gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz bestimmter Komponenten in den IKT-Infrastrukturen bis zur Verpflichtung zur Erstellung kommunaler Wärmepläne, die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren voranzutreiben.
- › *Abbau bzw. Anpassung innovationshemmender Bestimmungen:* In bestimmten Fällen stehen der Realisierung von innovativen Lösungen auch regulative bzw. rechtliche Hürden im Weg. Beispielsweise stellt die Systematik der Netznutzungsentgelte bzw. der EEG-Umlage derzeit ein wesentliches Hemmnis für die direkte Nutzung von Strom aus erneuerbarer Erzeugung in Rechenzentren dar. Es liegt in der Hand des Gesetzgebers, die Realisierungsbedingungen für die Erprobung und Diffusion entsprechender Konzepte durch eine Anpassung der Rahmenbedingungen zu verbessern.

Nicht nur die Betreiber, sondern auch die *Nutzer/innen der IKT-Infrastrukturen* können einen Beitrag zur Verringerung des IKT-bedingten Energieverbrauchs leisten. So lässt sich beispielsweise der Hauptteil des Energiebedarfs in den Telekommunikationsnetzen auf die private Internet- und digitale Mediennutzung zurückführen. Auch steigt hier der Energieverbrauch seit 2010 kontinuierlich an, wozu u. a. die immer stärkere Nutzung von Audio- und Videostreamingdiensten beiträgt. Problematisch in diesem Zusammenhang wirkt sich die Tatsache aus, dass die Nutzer/innen kaum wahrnehmen, dass sie mit einem Klick unter Umständen einen erheblichen Energieverbrauch bei der IKT-Infrastruktur auslösen. Dabei hätten die Verbraucher/innen durchaus gute Möglichkeiten, um dem Trend des steigenden privaten Datenverkehrs in den Übertragungsnetzen entgegenzuwirken, etwa indem sie Videoinhalte grundsätzlich mit einer möglichst geringen und an die Größe des Displays angepassten Auflösung abspielen. Ein wichtiges Ziel von politischen Initiativen zur Reduktion des Energiebedarfs in den IKT-Infrastrukturen sollte daher darin bestehen, die Verbraucher/innen für das Thema zu sensibilisieren und ihnen Orientierung bei Nutzungsentscheidungen zu geben. Darüber hinaus wären auch Fehlanreize auf Nutzerseite, die den Datenverkehr in die Höhe treiben, zu vermeiden. So sind etwa Flatrates in Mobilfunkverträgen, die den Konsum beispielsweise von Onlinevideos über mobile Zugangspunkte begünstigen, im Hinblick auf den Energieverbrauch als kritisch zu bewerten.

Zum Gesamtenergieverbrauch der IKT-Infrastrukturen tragen neben Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen auch die *Endgeräte* bei. Deren Beitrag wurde am Beispiel der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung detailliert beleuchtet. Auch wenn hier seit 2010 vor allem aufgrund von Effizienzverbesserungen eine abnehmende Tendenz zu beobachten ist, verbrauchen IKT-Endgeräte in privaten Haushalten aktuell in etwa nochmal so viel Energie wie sämtliche Rechenzentren in Deutschland. Auch muss künftig ggf. wieder mit einem Anstieg des Energieverbrauchs gerechnet werden, wozu u. a. die Trends zu immer größeren und damit energieintensiveren TV-Bildschirmformaten sowie der zunehmenden Vernetzung von Geräten beitragen. Nötig sind daher Anstrengungen, um die bisher erreichten Erfolge bei der Senkung des Energieverbrauchs nicht abreißen zu lassen. Politische Möglichkeiten dazu bestehen beispielsweise in der Ausweitung der Verbrauchskennzeichnung durch EU-Energielabels, die bisher nur für Fernsehgeräte und Monitore verpflichtend sind, auf weitere energieintensive Geräte der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung. Auch die Nutzung bzw. Verschärfung der Ökodesign-Vorschriften für großformatige Fernsehgeräte oder für vernetzte Geräte im Hinblick auf die Grenzwerte für die elektrische Leistungsaufnahme während des Betriebs oder im vernetzten Bereitschaftszustand könnte in Betracht gezogen werden.

In Bezug auf den Energieverbrauch von IKT-Infrastrukturen ist die *Blockchaintechnologie* in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert. So zeigt sich am Beispiel von blockchainbasierten Kryptowährungen, wie sich einzelne IKT-Anwendungen innerhalb von nur wenigen Jahren zu enormen Energieverbrauchern entwickeln können. So wird alleine die Kryptowährung Bitcoin aktuell für rund 10 bis 20% des weltweiten Strombedarfs in Rechenzentren verantwortlich gemacht. Darüber hinaus verdeutlicht die Blockchaintechnologie die dringende Notwendigkeit dafür, Nachhaltigkeitsaspekte stärker als bisher bereits während der Konzeptions- und Entwicklungsphase neuer IKT-Anwendungen mitzudenken. Denn in diesen frühen Entwicklungsphasen werden entscheidende Weichen gestellt. So wird etwa beim Design und der Programmierung der Software festgelegt, welche Hardwarekapazitäten vorgehalten bzw. eingesetzt werden und wie viel elektrische Energie letztlich verbraucht wird. Beispielsweise hängt der Stromverbrauch von Blockchainanwendungen maßgeblich von der Wahl des Mechanismus für die Durchführung und Validierung der Transaktionen ab. Zum sehr energieintensiven Proof-of-Work-Mechanismus, auf dem auch das Bitcoin-Netzwerk basiert, gibt es aber zahlreiche Alternativen, mit denen diese Aufgabe sehr viel energieeffizienter bewältigt werden kann. Schließlich verkörpern Blockchainanwendungen und insbe-

sondere Kryptowährungen den dezentralen und oft globalen Charakter vieler moderner IKT-Anwendungen. Hierdurch wird der Spielraum für nationale Regierungen, im Sinne der Nachhaltigkeit steuernd in die Entwicklungen einzugreifen, stark begrenzt. Für die Politik in Deutschland bzw. auf EU-Ebene verbleibt im Wesentlichen das Instrument der marktbezogenen Regulierung des Handels mit energieintensiven Kryptowährungen, um sie damit für die Teilnehmer der Netzwerke weniger attraktiv zu machen.

Die Frage, inwieweit die Nutzung von IKT-Anwendungen *Energieeinsparungen in anderen Wirtschaftsbereichen* ermöglicht, stand nicht im Fokus des Projekts. Die Behandlung dieser Frage für sämtliche Wirtschaft- und Lebensbereiche ist für eine Gesamtbetrachtung der Auswirkungen der Digitalisierung auf die Energiebilanz von höchster Relevanz. Dies hätte jedoch den Rahmen des Projekts bei Weitem gesprengt. Gleichwohl zeigt das im vorliegenden Bericht analysierte Fallbeispiel des Einsatzes von intelligenten Energiemanagementsystem bei der Wärmeversorgung von Gebäuden, dass damit bedeutende Energieeffizienzpotenziale verbunden sein können. In vielen weiteren Wirtschaftsbereichen werden ähnliche Effizienzpotenziale vermutet. Eine zwar aufwendige, aber dennoch lohnende Aufgabe ist es, diese Potenziale zu identifizieren, zu untersuchen und adäquate Rahmenbedingung zur Realisierung entsprechender Lösungen zu schaffen.

Insgesamt wird deutlich, dass die rasant voranschreitende Digitalisierung sämtlicher Lebensbereiche nicht ohne Wirkung auf den Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen und -Endgeräte bleibt. Wie die Analysen in diesem Bericht aber zeigen, gibt es bedeutende Handlungsmöglichkeiten, um den Anstieg des Energieverbrauchs in Grenzen zu halten und im besten Fall sogar wieder etwas zu senken. Dazu ist es aber nötig, dass vorhandene Einsparoptionen konsequent ausgeschöpft, die Entwicklung neuer innovativer Lösungen zielstrebig vorangetrieben und ihre breite Diffusion intensiv gefördert werden. Dies bleibt eine dauerhafte Aufgabe, die von der Politik nach Kräften unterstützt werden sollte.

7 Literatur

7.1 In Auftrag gegebene Gutachten

- Borderstep Institut (2019): Energiebedarf der IKT-Infrastruktur: Stand, Trends und Einsparpotenziale. (Fichter, K.; Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S.; Schramm, S.). Berlin
- Borderstep Institut (2022): Aktualisierung und Ergänzung der TAB-Studie »Energieverbrauch der IT-Infrastruktur«. (Hintemann, R.; Beucker, S.; Schramm, S.; Fichter, K.). Berlin
-

7.2 Literatur aus Aktualisierung

- Alladi, T.; Chamola, V.; Parizi, R. M.; Choo, K.-K. R. (2019): Blockchain Applications for Industry 4.0 and Industrial IoT: A Review. In: IEEE Access 7, S. 176935–176951, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2956748> (14.6.2022)
- Andrae, A. (2020): New perspectives on internet electricity use in 2030. In: Engineering and Applied Science Letters 3(2), S. 19–31
- ARD/ZDF (o. J.): ARD/ZDF Massenkommunikation. Mediennutzung im Corona-Lockdown. www.ard-zdf-massenkommunikation.de/langzeitstudie/ergebnisse-mediennutzung-corona-lockdown (14.6.2022)
- Bendiksen, C.; Gibbons, S. (2019): The Bitcoin Mining Network – Trends, Composition, Average Creation Cost, Electricity Consumption & Sources. June 2019 Update. <https://coinshares.com/assets/resources/Research/bitcoin-mining-network-june-2019-fidelity-foreword.pdf> (14.6.2022)
- Benqassem, S.; Bordage, F.; de Montenay, L.; Delmas-Orgelet, J.; Domon, F.; Lees Perasso, E.; Prunel, D.; Vateau, C. (2021): Digital technologies in Europe: An environmental life cycle approach. GreenIT.fr. Study commissioned by the European Parliamentary group of the Greens/EFA, <http://extranet.greens-efa-service.eu/public/media/file/1/7388> (14.6.2022)
- Berg, A. (2019): Digitalisierung der Wirtschaft. Bitkom. 10.4.2019. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/2019-04/bitkom_charts_hub_-_digitalisierung_der_wirtschaft_10_04_2019_final.pdf (14.6.2022)
- Berg, A. (2020). Digitalisierung der Wirtschaft. Bitkom. 1.4.2020. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/2020-03/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-01-04-2020_final.pdf (14.6.2022)
- Berg, A. (2021). Digitalisierung der Wirtschaft - Wo steht Deutschland nach zwei Jahren Pandemie? Bitkom. 24.11.2021. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/2021-11/bitkom-charts-digitalisierung-der-wirtschaft-24-11-2021_final.pdf (14.6.2022)
- Beucker, S.; Bergesen, J. D.; Gibon, T. (2016): Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. In: Journal of Industrial Ecology 20(2), S. 223–233, <https://doi.org/10.1111/jiec.12378> (14.6.2022)
- Beucker, S.; Hinterholzer, S. (2020): Effects of ICT-Enabled Flexible Energy Consumption on the Reduction of CO2 Emissions in Buildings. In: Chitchyan, R.; Schien, D.; Moreira, A.; Combemale, B. (Hg.): Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability. ICT4S2020: 7th International Conference on ICT for Sustainability. Bristol, New York, S. 1–10, <https://doi.org/10.1145/3401335.3401336> (14.6.2022)
- Beucker, S.; Hinterholzer, S. (2021): Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/2021-11/211111_st_klimaschutz-und-energieeffizienz.pdf (14.6.2022)
- Bevand, M. (2017): Electricity consumption of Bitcoin: a market-based and technical analysis. Blogbeitrag vom 10.3.2017, <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/> (14.6.2022)

- Bieser, J.; Salieri, B.; Hischier, R.; Hilty, L. (2020): Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection? Zürich, St. Gallen, <https://doi.org/10.5167/UZH-191299> (14.6.2022)
- Bitkom (2020): Deutsche Rechenzentren haben höchste Stromkosten in Europa. 24.1.2020, www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-Rechenzentren-haben-hoechste-Stromkosten-in-Europa (14.6.2022)
- Bitkom Research (2021): Nachhaltig geht nur digital. Wie Deutschland mit KI und Co. Die Zukunft gestaltet. Bitkom Research im Auftrag von Tata Consultancy Services Deutschland GmbH, www.bitkom-research.de/de/Trendstudie-Digitalisierung-2021 (14.6.2022)
- Blockchain.com (o. J.): Total Hash Rate (TH/s). www.blockchain.com/charts/hash-rate (14.7.2022)
- BMWSB (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen) (2022). Fairness bei den CO₂-Kosten. Pressemitteilung vom 3.4.2022. Berlin, www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/Webs/BMWSB/DE/2022/04/co2-preis.html (14.6.2022)
- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (o. J.): Blockchain/Distributed-Ledger-Technologie, www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Kryptografie/Blockchain/blockchain.html (14.6.2022)
- Bundesnetzagentur (2021): Die Blockchain-Technologie. Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen. Bonn, www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Blockchain/Links_Dokumente/einfuehrung_bc.pdf (14.6.2022)
- Bundesregierung (2022): Energieeffizienz. Weniger Energieverbrauch, mehr Sicherheit, www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/energie-sparen/energieeffizienz-bundesregierung-2042178 (16.6.2022)
- CBRE Research (2020): Der Markt für Rechenzentren in Deutschland. Spezialimmobilie mit Wachstumspotenzial. CBRE Viewpoint. Deutschland – Markt für Rechenzentren.
- CBRE (2020a): EMEA Data Centres Q3 2020. www.cbre.fr/en/research-and-reports/EMEA-Data-Centres-Q3-2020 (14.6.2022)
- CBRE (2020b): Europe Data Centres Q4 2019. www.cbre.de/en/research/Europe-Data-Centres-Q4-2019 (14.6.2022)
- CCAF (Cambridge Centre for Alternative Finance) (o. J.): Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), <https://ccaf.io/cbeci/index> (14.6.2022)
- Clausen, J.; Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2021): Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung in Rechenzentren in Deutschland. Hintergrundpapier. Berlin
- Climate Neutral Data Centre Pact (2021): Self-Regulatory Initiative. www.climateneutraldatacentre.net/self-regulatory-initiative (14.6.2022)
- co2online (2022): Heizkosten mit Gas steigen weiter: bis zu 119 Prozent Mehrkosten für durchschnittlichen Haushalt. Pressemitteilung 14.4.2022, www.co2online.de/presse/pressemitteilung/beitrag/heizkosten-mit-gas-steigen-weiter-bis-zu-119-prozent-mehrkosten-fuer-durchschnittlichen-haushalt-233 (14.6.2022)
- Cong, L. W.; He, Z. (2019): Blockchain Disruption and Smart Contracts. In: The Review of Financial Studies 32(5), S. 1754–1797, <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz007> (14.6.2022)
- Deetman, S. (2017): Bitcoin Could Consume as Much Electricity as Denmark by 2020. 29.3.2016, www.vice.com/en_us/article/aek3za/bitcoin-could-consume-as-much-electricity-as-denmark-by-2020 (14.6.2022)
- Destatis (2021): Laufende Wirtschaftsrechnungen. Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern, www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Publikationen/Downloads-Ausstattung/ausstattung-privater-haushalte-2150200217004.pdf (14.6.2022)
- Deutsche Telekom (2022): Corporate Responsibility Bericht 2021. Bonn, www.cr-bericht.telekom.com/2021/sites/default/files/pdf/cr_de_2021_dt_final.pdf (14.6.2022)

- Digiconomist (o. J. a). Bitcoin Energy Consumption Index, <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> (14.6.2022)
- Digiconomist. (o. J. b). Ethereum Energy Consumption Index, <https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption> (14.6.2022)
- Dimitrov, D. V. (2019): Blockchain Applications for Healthcare Data Management. In: Healthcare informatics research 25(1), S. 51–56, <https://doi.org/10.4258/hir.2019.25.1.51> (14.6.2022)
- DMB (Deutscher Mieterbund e.V.) (o. J.): Heizspiegel. www.mieterbund.de/service/heizspiegel.html (14.6.2022)
- Dujak, D.; Sajter, D. (2019): Blockchain Applications in Supply Chain. In: Kawa, A.; Maryniak, A. (Hg.): SMART Supply Network. Cham, S. 21–46, https://doi.org/10.1007/978-3-319-91668-2_2 (14.6.2022)
- Eimeren, V. B. van; Kessler, B.; Kupferschmitt, T. (2021): Auswirkungen der Corona-Pandemie auf Mediennutzung, Motive und Bewertungen. Sonderauswertungen der ARD/ZDF-Massenkommunikation Langzeitstudie. In: Media Perspektiven 10-11/2020, www.ard-werbung.de/fileadmin/user_upload/media-perspektiven/pdf/2020/1011-20_Eimeren_Kessler_Kupferschmitt.pdf (14.6.2022)
- etno (European Telecommunications Network Operators' Association) (2022): The State of Digital Communications 2022. 2.2.2022, <https://etno.eu/library/reports/104-state-of-digi-2022.html> (14.6.2022)
- EU-Kommission (2020): Gestaltung der digitalen Zukunft Europas. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2020) 67 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0067&from=EN> (14.6.2022)
- Feldmann, A.; Gasser, O.; Lichtblau, F.; Pujol, E.; Poese, I.; Dietzel, C.; Wagner, D.; Wichtlhuber, M.; Tapiador, J.; Vallina-Rodriguez, N.; Hohlfeld, O.; Smaragdakis, G. (2020): The Lockdown Effect. In: Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference. IMC '20: ACM Internet Measurement Conference. October 2020, S. 1–18
- Gallersdörfer, U.; Klaaßen, L.; Stoll, C. (2020): Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. In: Joule 4(9), S. 1843–1846, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013> (14.6.2022)
- gfu; BVT (Bundesverband Technik des Einzelhandels); GfK (2017): Home Electronics Markt Index Deutschland (HEMIX). Januar 2017 - Dezember 2017, https://gfu.de/wp-content/uploads/2020/03/HEMIX_Q1-Q4_2017.pdf (14.6.2022)
- gfu; BVT; GfK (2018): Home Electronics Markt Index Deutschland (HEMIX). Januar 2018 - Dezember 2018, https://gfu.de/wp-content/uploads/2020/03/HEMIX_Q1-Q4_2018.pdf (14.6.2022)
- gfu; BVT; GfK (2019): Home Electronics Markt Index Deutschland (HEMIX). Januar 2019 - Dezember 2019, https://gfu.de/wp-content/uploads/2020/03/HEMIX_Q1-Q4_2019.pdf (14.6.2022)
- gfu; GfK (2020): Home Electronics Markt Index Deutschland (HEMIX). Januar 2020 - Dezember 2020, https://gfu.de/wp-content/uploads/2021/03/HEMIX_Q1-Q4_2020.pdf (14.6.2022)
- gfu; GfK (2021): Home Electronic Market Index, Quartal 1-4 / 2021, https://gfu.de/wp-content/uploads/2022/03/HEMIX_Q1-4_2021.pdf (14.6.2022)
- Google (2020): Realizing a carbon-free future. Google's Third Decade of Climate Action, www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/carbon-free-by-2030.pdf (14.6.2022)
- Gröger, J.; Liu, R.; Stobbe, L.; Druschke, J.; Richter, N. (2021): Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-cloud-computing (14.6.2022)
- Hatt, T.; Kolta, E. (2020): 5G energy efficiencies: Green is the new black. GMSA Intelligence. London, <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=54165956&file=241120-5G-energy.pdf> (14.6.2022)
- Hintemann, R. (2021): Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an. Borderstep Institut, Berlin, www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf (14.6.2022)

- Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S.; Hinterholzer, S. (2021): Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen. Studie im Auftrag der Hessischen Staatskanzlei, Hessische Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung. Wiesbaden, https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/2021-09/Nachhaltigkeitsstudie_0.pdf (14.6.2022)
- Hintemann, R.; Graß, M.; Hinterholzer, S.; Grothey, T. (2022a): Bitkom-Studie: Rechenzentren in Deutschland 2021 – Aktuelle Marktentwicklungen. Borderstep Institut, Berlin, www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf (14.6.2022)
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S.; Grothey, T. (2022b): Herausforderungen und Chancen durch den Boom beim Neubau von Rechenzentren. Studie im Auftrag der Hessischen Staatskanzlei, Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung. Wiesbaden, https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/2022-05/rechenzentrumsmarkt_hessen.pdf (14.6.2022)
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S.; Montevecchi, F.; Stickler, T. (2020): Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. Berlin, Wien, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1> (14.6.2022)
- IEA (2021): Data Centres and Data Transmission Networks. IEA, Paris, www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks (14.6.2022)
- Jahn, T.; Kerkmann, C. (2022): Technologie: Die Cloud als Klimaretter? Wie Amazon, Microsoft und Google um umweltbewusste Kunden kämpfen. In: Handelsblatt 26.3.2022, www.handelsblatt.com/technik/it-internet/technologie-die-cloud-als-klimaretter-wie-amazon-microsoft-und-google-um-umweltbewusste-kunden-kaempfen/28196144.html (14.6.2022)
- Jung, J. (2022): AWS erweitert Cloud-Infrastruktur in Deutschland. ZDnet.de 17.2.2022, www.zdnet.de/88399420/aws-erweitert-cloud-infrastruktur-in-deutschland (14.6.2022)
- Kemna, R.; Wierda, L.; Li, W.; van den Boorn, R.; van Elburg, M.; Viegand, J.; Wu, A. (2020): ICT Impact study. Final report. Brüssel, [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) (14.6.2022)
- Krause, M.; Tolaymat, T. (2018): Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. In: Nature Sustainability 1(11), S. 711–718, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7> (14.6.2022)
- Livshits, A. (2022): Gescheitertes Bitcoin-Verbot und der Kampf gegen Mining. BTC-Echo 21.3.2022, www.btc-echo.de/news/bitcoin-verbot-eu-btc-mining-137320/ (14.6.2022)
- Masanet, E.; Shehabi, A.; Lei, N.; Smith, S.; Koomey, J. (2020): Recalibrating global data center energy-use estimates. In: Science 367(6481), S. 984–986
- Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien. Technische Hochschule Mittelhessen, www.brekoverband.de/site/assets/files/18892/gutachten_thm_nachhaltigkeit_zugangstechnologien.pdf (14.6.2022)
- Ostler, U. (2021): »Ich bin fassungslos!« Staffan Reveman über grünen Strom für Datacenter. Datacenter Insider. 6.7.2021. www.datacenter-insider.de/ich-bin-fassungslos-staffan-revemann-ueber-gruenen-strom-fuer-datacenter-a-1035567 (14.6.2022)
- 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. Schneider Electric, https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=digitalecoandclimate (14.6.2022)
- Rauchs, M. (2021): The United States has taken the leading position in Bitcoin mining following China's crackdown on mining operations, shows data update from the Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI) at the Cambridge Centre for Alternative Finance. 13.10.2021, www.jbs.cam.ac.uk/insight/2021/geographic-shift (14.6.2022)
- Rauchs, M.; Blandin, A.; Klein, K.; Pieters, G.; Recanatini, M.; Zhang, B. (2018): 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. In: SSRN Journal 3306125, <https://cdn.crowdfundinsider.com/wp-content/uploads/2018/12/2018-ccaf-2nd-global-cryptoasset-benchmarking-study.pdf> (14.6.2022)

- Revevan, S. (2022): Mehr Fortschritt wagen, so der Koalitionsvertrag. Was riskieren Rechenzentren? Datacenter Insider. 18.2.2022, www.datacenter-insider.de/mehr-fortschritt-wagen-so-der-koalitionsvertrag-was-riskieren-rechenzentren-a-1096686 (14.6.2022)
- Saberi, S.; Kouhizadeh, M.; Sarkis, J.; Shen, L. (2019): Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. In: *International Journal of Production Research* 57(7), S. 2117–2135, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261> (14.6.2022)
- Schramm, S. (2021): Klimawirkung des privaten Internet- und Medienkonsums – Exemplarisch dargestellt an sechs Modellhaushalten unterschiedlicher Lebenswelten. CliDiTrans Werkstattbericht. Berlin, www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/10/AP3-3_Private-Internet-und-Mediennutzung_20211015.pdf (14.6.2022)
- Seven One Media (2020): Media Activity Guide 2020. Unterföhring, www.seven.one/documents/20182/6085232/Media+Activity+Guide+2020.pdf/f5d31769-e7f0-97a4-1f7e-254d56000e59?t=1637948730453 (14.6.2022)
- Seven One Media (2021); Media Activity Guide 2021, Unterföhring, www.seven.one/documents/924471/1111769/Media+Activity+Guide+2021.pdf/b9388acc-5e06-51f2-572a-54b4108cb7b4?t=1635262256228 (14.6.2022)
- SPD; Bündnis 90 / Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)
- Stoll, C.; Klaaßen, L.; Gällersdörfer, U. (2019): The Carbon Footprint of Bitcoin. In: *Joule* 3(7), S. 1647–1661, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012> (14.6.2022)
- tagesschau.de (2021a): Google investiert in Standort Deutschland. 31.8.2021, www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/google-cloud-deutschland-investieren-rechenzentren-101.html (14.6.2022)
- tagesschau.de (2021b): China verbietet Transaktionen mit Kryptowährungen. 24.9.2021, www.tagesschau.de/wirtschaft/finanzen/china-kryptowahrungen-101.html (14.6.2022)
- Telefonica (2022): Corporate Responsibility. Report 2021, www.telefonica.de/nachhaltigkeit/reporting.html (14.6.2022)
- UBA (Umweltbundesamt); BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2022): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent. Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 15.3.2022. Berlin, www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent (14.6.2022)
- Vodafone Group PLC (2020): Vodafone Annual Report 2020. We connect for a better future. Newbury, <https://investors.vodafone.com/sites/vodafone-ir/files/vodafone/annual-report/vodafone-annual-report-2020.pdf> (14.6.2022)
- Vranken, H. (2017): Sustainability of bitcoin and blockchains. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, S. 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.04.011> (14.6.2022)
- Vries, A. de (2018): Bitcoin's Growing Energy Problem. In: *Joule* 2(5), S. 801–805, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016> (14.6.2022)
- Wirtschaftswoche (2022): Bitcoin, Ether & Co. Die zehn größten Kryptowährungen nach Marktkapitalisierung 2022. 24.3.2022, www.wiwo.de/finanzen/boerse/bitcoin-ether-und-co-die-zehn-groessten-kryptowahrungen-nach-marktkapitalisierung-2022/27456842.html (14.6.2022)
- Witmer-Goßner, E. (2021): Internet hält Pandemie-Belastung stand. *Cloudcomputing Insider* 7.1.2021, www.cloudcomputing-insider.de/internet-haelt-pandemie-belastung-stand-a-988943 (14.6.2022)

7.3 Weitere Literatur

- Aaron, A.; de Cock, J. (2018): The End of Video Coding? Netflix Technology Blog.
<https://netflixtechblog.com/the-end-of-video-coding-40cf10e711a2> (22.4.2020)
- Acatech (2018): Blockchain. www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/10/acatech-HORIZONTE_Blockchain.pdf (9.6.2020)
- AGF Videoforschung GmbH (o. J.): Sehdauer. www.agf.de/daten/tvdaten/sehdauer/ (10.9.2020)
- Amarnath, A.; Bagherzadeh, J.; Tan, J.; Dreslinski, R. (2019): 3DTUBE: A Design Framework for High-Variation Carbon Nanotube-based Transistor Technology. In: IEEE (Hg.): 2019 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), S. 1–6
- Andrae, A.; Edler, T. (2015): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. In: Challenges 6(1), S. 117–157
- Andrae, A. S. G. (2019): Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030. www.researchgate.net/publication/331047520 (19.2.2020)
- Apple (2017): iPhone 8 Environmental Report.
www.apple.com/euro/environment/pdf/a/generic/products/iphone/iphone_8_PER_sept2017.pdf
(21.9.2020)
- Apple (2018): Apple now globally powered by 100 percent renewable energy. Nine More Apple Suppliers Commit to 100 Percent Clean Energy Production. 9.4.2018, www.apple.com/newsroom/2018/04/apple-now-globally-powered-by-100-percent-renewable-energy/ (24.7.2020)
- Aslan, J.; Mayers, K.; Koomey, J. G.; France, C. (2018): Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates. In: Journal of Industrial Ecology 22(4), S. 785–798
- BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) (2019a): Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0).
www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html (30.4.2020)
- BAFA (2019b): Merkblatt zu den CO₂-Faktoren Energieeffizienz in der Wirtschaft.
www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_merkblatt_co2.pdf?__blob=publicationFile&v=2
(28.4.2020)
- BAFA (2019c): Wärme- und Kältenetze.
www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Waerme_Kaeltenetze/waerme_kaeltenetze_node.html (30.4.2020)
- Baunetz Wissen (o. J.): Grundlagen zur solaren Kälteerzeugung.
www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/solkaelte (12.3.2020)
- BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) (2017): Strategiepapier »Zukunft Wärmenetzsysteme«. www.bdew.de/media/documents/Stn_20170615_Strategiepapier-Zukunft-Waermenetzsysteme.pdf (27.4.2020)
- BDEW (2020): Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern 2019.
www.bdew.de/media/documents/Nettowaermeerz_D_2019_online_o_jaehrlich_Ki_28102020_M8e27th.pdf
(13.11.2020)
- Belkhir, L.; Elmeligi, A. (2018): Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. In: Journal of Cleaner Production 177, S. 448–463
- Bendiksen, C.; Gibbons, S. (2019a): The Bitcoin Mining Network – Trends, Composition, Average Creation Cost, Electricity Consumption & Sources. Dezember 2019 Update.
<https://coinshares.com/assets/resources/Research/bitcoin-mining-network-december-2019.pdf> (23.6.2020)
- Bendiksen, C.; Gibbons, S. (2019b): The Bitcoin Mining Network – Trends, Composition, Average Creation Cost, Electricity Consumption & Sources. June 2019 Update.
<https://coinshares.com/assets/resources/Research/bitcoin-mining-network-june-2019-fidelity-foreword.pdf>
(23.6.2020)

- Beucker, S. (2019): Reduktion von CO₂-Emissionen im Gebäudebestand durch digitales Energiemanagement. Berlin, [www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/08/Reduktion-von-CO₂-Emissionen-durch-Energiemanagement_20190812.pdf](http://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/08/Reduktion-von-CO2-Emissionen-durch-Energiemanagement_20190812.pdf) (17.6.2020)
- Beucker, S.; Bergesen, J. D.; Gibon, T. (2016): Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. In: *Journal of Industrial Ecology* 20(2), S. 223–233
- Beucker, S.; Hinterholzer, S. (2019): Building Energy Management Systems and their Role in the Energy Transition. Results from Research Projects and Applications in Germany. Proceedings of the 6th International Conference on ICT for Sustainability. http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_11.pdf
- Beucker, S.; Hinterholzer, S.; Schweinoch, M.; Zernahle, O. (2017): Messkonzepte für Mieterstrom. In: Behr, I.; Großklos, M. (Hg.): *Praxishandbuch Mieterstrom. Fakten, Argumente und Strategien*. Wiesbaden, S. 81–98
- Bevand, M. (2017): Electricity consumption of Bitcoin: a market-based and technical analysis. Blogbeitrag vom 10.3.2017. <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/> (2.7.2020)
- Bio by Deloitte; Fraunhofer IZM (Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration) (2015): Ecodesign preparatory study on enterprise servers and data equipment (Berwald, A.; Faninger, T.; Bayramoglu, S.; Tinetti, B.; Mudgal, S.; Stobbe, L.; Nissen, N.). Luxembourg
- Bitkom (2013): Betriebssicheres Rechenzentrum. Leitfaden. Version Dezember 2013. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/LF-Betriebssicheres-Rechenzentrum.zip (8.10.2020)
- Bitkom (2017): Kinder und Jugendliche zocken täglich rund zwei Stunden. www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Kinder-und-Jugendliche-zocken-taeglich-rund-zwei-Stunden.html (11.9.2020)
- Bitkom (2018a): Technologie Trends. Server, Speicher, Netzwerk. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/2018-12/181212_LF_Technology_Trends%20%283%29.pdf (26.2.2020)
- Bitkom (2018b): Zukunft der Consumer Technology – 2018. Marktentwicklung, Trends, Mediennutzung, Technologien, Geschäftsmodelle. Berlin, www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/180822-CT-Studie-2018-online.pdf (2.10.2020)
- Bitkom (2018c): Home Smart Home: Jeder Vierte ist auf dem Weg zum intelligenten Zuhause. 7.8.2018, www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Home-Smart-Home-Jeder-Vierte-ist-auf-dem-Weg-zum-intelligenten-Zuhause.html (17.6.2020)
- Bitkom (2019a): Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren. Positionspapier. (30.4.2020)
- Bitkom (2019b): 3 von 10 Deutschen haben ein smartes Zuhause. 27.8.2019, www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/3-von-10-Deutschen-haben-ein-smartes-Zuhause (16.6.2020)
- Bitkom (2020): Die Gaming-Trends 2020. www.bitkom.org/sites/default/files/2020-08/bitkom-prasentation-gaming-trends-2020_final.pdf (11.9.2020)
- Bitkom; KPMG (2019): Cloud Monitor 2019. Eine Studie von Bitkom Research im Auftrag von KPMG. Pressekonferenz. www.bitkom.org/sites/default/files/2019-06/bitkom_kpmg_pk_charts_cloud_monitor_18_06_2019.pdf (15.4.2020)
- BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Berlin, www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (29.10.2020)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2014a): Mehr aus Energie machen. Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/nationaler-aktionsplan-energieeffizienz-nape.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (13.5.2020)
- BMWi (2014b): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (10.6.2020)
- BMWi (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klima-neutralen Gebäudebestand. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=25 (5.5.2020)

- BMWi (2020a): Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. 23.10.2020, Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=131 (25.11.2020)
- BMWi (2020b): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Stand: August 2020, Berlin, www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019-excel.xlsx?__blob=publicationFile&v=25 (30.11.2020)
- BMWi; BMF (Bundesministerium der Finanzen) (2019): Blockchain-Strategie der Bundesregierung. Wir stellen die Weichen für die Token-Ökonomie. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/blockchain-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (29.6.2020)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin, https://web.archive.org/web/20101214094757if_/http://www.bmu.de:80/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf (12.6.2020)
- Borderstep Institut (2020): Innovatives Konzept zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren. www.borderstep.de/projekte/abwaermenutzung-mit-hot-fluid-adsorptionskaelte-system-hotflad/ (11.5.2020)
- Breiling, M.; Struharik, R.; Loreto, M. (2019): Machine Learning: Elektronenhirn 4.0. In: *Elektronik* (9), S. 50–55
- Breiter, S.; Ostler, U. (2018): Haushoher Vorteil für Lithium-Ionen-Technik im Rechenzentrum. *Datacenter-Insider*. www.datacenter-insider.de/haushoher-vorteil-fuer-lithium-ionen-technik-im-rechenzentrum-a-680519/ (15.7.2020)
- Bundesnetzagentur (o. J.): Regelenergie. www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Engpassmanagement/Regelenergie/regelenergie-node.html (18.5.2020)
- Bundesnetzagentur (2015): Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2014/2015. Bonn, www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2015/TB_TK_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (28.4.2020)
- Bundesnetzagentur (2017): Bundesnetzagentur verbessert die Bedingungen zur Teilnahme an den Regelenergiemärkten Strom. 28.6.2017, www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2017/28062017_Regelenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (28.4.2020)
- Bundesnetzagentur (2019a): Jahresbericht 2018. 20 Jahre Verantwortung für Netze. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn, www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2019/JB2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (6.9.2019)
- Bundesnetzagentur (2019b): Tätigkeitsbericht. Telekommunikation 2018/2019. Bonn, www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2019/TK_20182019.pdf?__blob=publicationFile&v=9 (17.4.2020)
- Bundesnetzagentur (2020a): Jahresbericht 2019. www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (18.2.2021)
- Bundesnetzagentur (2020b): Regelarbeitsmarkt gestartet. www.smard.de/page/home/topic-article/444/196354 (25.11.2020)
- Bundesnetzagentur (2020c): Teilnehmerentwicklung im Mobilfunk. Anzahl der Teilnehmer nach Netzbetreibern und Quartal gemäß den Veröffentlichungen der Netzbetreiber. 26.2.2020, www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktbeobachtung/Deutschland/Mobilfunkteilnehmer/Mobilfunknehmer.html?nn=268208 (17.4.2020)

- Bundesnetzagentur (2021): Monitoringbericht 2020.
www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (29.1.2021)
- Cantrell, B.; Ostler, U. (2017): Neue Stromversorgungsarchitekturen drücken die Datacenter-Kosten. Software Defined Power und Direkte Wandlung für Rechenzentren. DataCenter-Insider. www.datacenter-insider.de/neue-stromversorgungsarchitekturen-druecken-die-datacenter-kosten-a-590569/ (15.3.2020)
- CCAF (Cambridge Centre for Alternative Finance) (o. J.): Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, <https://cbeci.org/> (10.6.2020)
- Cisco (2018a): Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. San Jose, https://virtualization.network/Resources/Whitepapers/0b75cf2e-0c53-4891-918e-b542a5d364c5_white-paper-c11-738085.pdf (15.4.2020)
- Cisco (2018b): Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. San Jose, <https://cyrekdigital.com/pl/blog/content-marketing-trendy-na-rok-2019/white-paper-c11-741490.pdf> (28.4.2020)
- Cisco (2018c): VNI Complete Forecast Highlights. Germany – Business Highlights. www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Germany_Business_Highlights.pdf (15.9.2020)
- Cisco (2018d): VNI Complete Forecast Highlights. Germany – Consumer Highlights. www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Germany_Consumer_Highlights.pdf (15.9.2020)
- Cisco (2019): VNI Mobile Forecast Highlights. www.cisco.com/content/dam/assets/sol/sp/vni/forecast_highlights_mobile/pdf/Germany_Consumer_Mobile_Traffic.pdf (15.9.2020)
- Clausen, J.; Beucker, S. (2019): Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Dänemark. Berlin, www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/06/W%C3%A4rmeversorgung-Daenemark-Go-19-6-2019.pdf (29.4.2020)
- Condliffe, J. (2017): Why Some Autonomous Cars Are Going to Avoid the Internet. Alphabet's autonomous car company, Waymo, has admitted that it keeps its cars offline to prevent them from being hacked. 10.1.2017, www.technologyreview.com/2017/01/10/154642/why-some-autonomous-cars-are-going-to-avoid-the-internet/ (28.4.2020)
- Cook, G.; Lee, J.; Tsai, T.; Kong, A.; Deans, J.; Johnson, B.; Jardim, E. (2017): Clicking Clean: Who is winning the race to build a green Internet? Greenpeace, Washington, D.C. <https://secured-static.greenpeace.org/austria/Global/austria/dokumente/Clicking%20Clean%202017.pdf> (15.4.2020)
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (o. J.): Erlösrechner Regelleistung. www.dsm-bw.de/erloese-erzielen/markt-fuer-regelleistung/erloesrechner-regelleistung/ (23.10.2020)
- Dena (2018): Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. dena-Gebäudereport kompakt 2018. Berlin, www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9254_Gebaedereport_dena_kompakt_2018.pdf (5.5.2020)
- Deutsche Telekom (2018): Corporate Responsibility Bericht 2017. Bonn, www.cr-bericht.telekom.com/site18/sites/default/files/pdf/cr_de_2017_dt_final.pdf (17.4.2020)
- Deutsche Telekom (2020): Corporate Responsibility Bericht 2019. Bonn, www.cr-bericht.telekom.com/site20/sites/default/files/pdf/cr_de_2019_dt_final.pdf (29.5.2020)
- Die mediananstalten – ALM GbR (2020): Digitalisierungsbericht 2020. Audio. Berlin, www.die-mediananstalten.de/fileadmin/user_upload/die_mediananstalten/Publikationen/Digitalisierungsbericht_Audio/DigiBericht_2020_AUDIO_D_final_WEB.pdf (14.9.2020)
- Difu (Deutsches Institut für Urbanistik) (2018): Deutschland ist Spitzenreiter in der Mieterquote. Standpunkt. (Pätzold, R.) <https://difu.de/nachricht/deutschland-ist-spitzenreiter-in-der-mieterquote> (15.6.2020)
- Digiconomist (o. J.): Bitcoin Energy Consumption Index. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> (10.6.2020)

- Dmitriev, S. (o. J.): Autonomous cars will generate more than 300 TB of data per year. www.tuxera.com/blog/autonomous-cars-300-tb-of-data-per-year/ (28.4.2020)
- DUH (Deutsche Umwelthilfe e.V.) (2020): Grüne Fernwärme. Klimafreundliche Alternativen zu Kohle und Erdgas. Positionspapier, 7.9.2020. www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energiewende/2020_DUH_Positionspapier_Gruene-Fernwaerme.pdf (26.10.2020)
- Durth, R. (2017): Sanieren oder nicht sanieren – Welche Gründe entscheiden über die energetische Sanierung von Wohngebäuden? KfW Research, Fokus Volkswirtschaft Nr. 194, www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2017/Fokus-Nr.-194-Dezember-2017-Sanierungshemmnisse.pdf (12.6.2020)
- Durth, R. (2019): Gebäude, die nicht zum Wohnen dienen, haben eigene Sanierungshemmnisse. KfW Research, Fokus Volkswirtschaft Nr. 269, www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2019/Fokus-Nr.-269-Oktober-2019-NWG.pdf (12.6.2020)
- Enhardt, S. (2019): Erfolg für Next Kraftwerke – OLG Düsseldorf kippt Mischpreisverfahren für Regelernergie. In: PV-Magazin 22.07.2019
- EK (Europäische Kommission) (o. J.): Digital Scoreboard. Households with fixed broadband connection, by all households. <https://digital-agenda-data.eu/charts/see-the-evolution-of-an-indicator-and-compare-countries> (9.9.2020)
- EU (Europäische Union) (2020): Energiekennzeichen. https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/energy-labels/index_de.htm#shortcut-2 (22.9.2020)
- Eurostat (2020): Supply, transformation and consumption of electricity. Last update: 29-06-2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/home> (2.7.2020)
- Evans, R.; Gao, J. (2016): DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. DeepMind Blog. <https://deepmind.com/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40> (23.4.2020)
- Exler, A.; Ostler, U. (2016): Wer heute noch löscht, steht auf dem Schlauch. DataCenter-Insider. www.datacenter-insider.de/wer-heute-noch-loescht-steht-auf-dem-schlauch-a-547783/ (30.3.2020)
- Fichter, K.; Clausen, J. (2013): Erfolg und Scheitern »grüner« Innovationen. Warum einige Nachhaltigkeitsinnovationen am Markt erfolgreich sind und andere nicht. Marburg
- Fichter, K.; Clausen, J.; Eimertenbrink, M. (2009): Energieeffiziente Rechenzentren Best-Practice-Beispiele aus Europa, USA und Asien. Berlin, www.koinno-bmwi.de/fileadmin/user_upload/publikationen/Energieeffiziente_Rechenzentren_Best_Practice_Beispiele_aus_Europa_USA_und_ASien.pdf (29.4.2020)
- Funke, T.; Hintemann, R.; Kaup, C.; Maier, C.; Müller, S.; Paulußen, S.; Süß, J.; Terrahe, U. (2019): Abwärmenutzung im Rechenzentrum. Ein Whitepaper vom NeRZ in Zusammenarbeit mit dem eco – Verband der Internetwirtschaft e. V. Berlin, Köln, https://ne-rz.de/wp-content/uploads/2019/07/Whitepaper_Abwaermenutzung_2019.pdf (29.4.2020)
- Galler, R.; Ostler, U. (2014): Was ist Datacenter Infrastructure Management (DCIM)? Datacenter-Insider. www.datacenter-insider.de/was-ist-datacenter-infrastructure-management-dcim-a-431393/ (21.4.2020)
- Geißler, O.; Ostler, U. (2018a): Was ist freie Kühlung? DataCenter-Insider. www.datacenter-insider.de/was-ist-freie-kuehlung-a-677160/ (5.3.2020)
- Geißler, O.; Ostler, U. (2018b): Was ist Orchestrierung? Datacenter-Insider. www.datacenter-insider.de/was-ist-orchestrierung-a-683610/ (23.4.2020)
- Gentsch, I.; Tarach, J.; Ostler, U. (2020): Eignen sich Lithium-Ionen-Batterien für USV-Anlagen in großen Rechenzentren? Datacenter-Insider. www.datacenter-insider.de/eignen-sich-lithium-ionen-batterien-fuer-usv-anlagen-in-grossen-rechenzentren-a-927012/ (15.7.2020)
- George, A.; Ferrand, G. (2017): Cost study of AC vs DC data center power topologies based on system efficiency. Singapur, Oslo, www.eltek.com/globalassets/media/downloads/white-papers_case-studies/cost-study-on-ac-vs-dc-data-center-based-on-system-efficiency---an-eltek-white-paper.pdf (13.5.2020)
- GeSI (Global Enabling Sustainability Initiative); Accenture Strategy (2015): #SMARTer 2030: ICT Solutions for the 21st Century Challenges. Brüssel, http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report2.pdf (7.4.2020)

- GeSI; Deloitte (2019): Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030. Brüssel, <https://gesi.org/research/download/36> (8.4.2020)
- GeSI; The Boston Consulting Group (2012): GeSI SMARTer 2020: the role of ICT in driving a sustainable future. Brüssel, http://image-src.bcg.com/Images/SMARTer_2020_The_Role_of_ICT_in_Driving_a_Sustainable_Future_December_2012_tcm9-101095.pdf (8.4.2020)
- GeSI; The Climate Group (2008): SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. Brüssel, <https://gesi.org/research/download/7> (8.4.2020)
- Gfu (gfu – Consumer & Home Electronics GmbH) (2019): Bildqualität, Materialien, Bauformen – Entwicklungen im TV-Sektor 2019. Consumer & Home Electronics GmbH, <https://gfu.de/bildqualitaet-materialien-bauformen-entwicklungen-im-tv-sektor-2019/> (8.9.2020)
- Google (2020): Schnellerer Umstieg auf CO₂-emissionsfreie Energie. Energie ohne CO₂-Emissionen. <https://sustainability.google/intl/de/progress/energy/> (30.11.2020)
- Graaf, D. de (2017): Natürliche Kältemittel: was sonst? www.lanline.de/natuerliche-kaeltemittel-was-sonst/ (5.3.2020)
- Gröger, J.; Köhler, A.; Naumann, S.; Filler, A.; Guldner, A.; Kern, E.; Hilty, L.; Maksimov, Y. (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. TEXTE Nr. 105/2018, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-12_texte_105-2018_ressourceneffiziente-software_0.pdf (17.12.2020)
- Grote, L.; Hoffmann, P.; Tänzer, G. (2015): Abwärmenutzung – Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Saarbrücken, www.izes.de/sites/default/files/publikationen/20150901_BMUB_Studie_Abwaerme_V.1.1.pdf (28.4.2020)
- Hacksteiner, M.; Duer, F.; Ayatollahi, I.; Bleicher, F. (2017): Automatic Assessment of Machine Tool Energy Efficiency and Productivity. In: *Procedia CIRP* 62, S. 317–322
- Häuslein, S.; Ostler, U. (2019): Megware kühlt den Linux-Cluster im Leibniz-Rechenzentrum. *DataCenter-Insider*. www.datacenter-insider.de/megware-kuehlt-den-linux-cluster-im-leibniz-rechenzentrum-a-849533/ (11.5.2020)
- Hills, G.; Lau, C.; Wright, A.; Fuller, S.; Bishop, M.; Srimani, T.; Kanhaiya, P.; Ho, R.; Amer, A.; Stein, Y.; Murphy, D. et al. (2019): Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors. In: *Nature* 572(7771), S. 595–602
- Hilty, L.; Lohmann, W.; Behrendt, S.; Evers-Wölk, M.; Fichter, K.; Hintemann, R. (2015): Grüne Software. Ermittlung und Erschließung von Umwelt-schutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/publikationen/gruene-software (27.5.2020)
- Hintemann, R. (2017a): Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation. Update 2017. Berlin, www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2017/Studien/2017/Kurzstudie-RZ-Markt-Bitkom-final-20-11-2017.pdf (14.4.2020)
- Hintemann, R. (2017b): Energieeffizienz und Rechenzentren in Deutschland. Weltweit führend oder längst abgehängt. Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren
- Hintemann, R.; Clausen, J. (2014): Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und Wettbewerbssituation. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (BITKOM). Berlin, www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Rechenzentren-in-Deutschland-Wirtschaftliche-Bedeutung-und-Wettbewerbssituation.html (14.4.2020)
- Hintemann, R.; Clausen, J. (2018a): Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb. Borderstep Institut, Berlin, www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf (7.4.2020)

- Hintemann, R.; Clausen, J. (2018b): Potenzial von Energieeffizienztechnologien bei Colocation-Rechenzentren in Hessen. Berlin, www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/04/TLH-Studie_Colocation_Hessen_final-screen.pdf (26.2.2020)
- Hintemann, R.; Fichter, K.; Schlitt, D. (2014): Adaptive computing and server virtualization in German data centers – Potentials for increasing energy efficiency today and in 2020. In: Gómez, J.; Sonnenschein, M.; Vogel, U.; Winter, A.; Rapp, B.; Giesen, N. (Hg.): Proceedings of the 28th Conference on Environmental Informatics – Informatics for Environmental Protection, Sustainable Development and Risk Management. Oldenburg
- Hintemann, R.; Fichter, K.; Stobbe, L. (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. Förderkennzeichen 370 893 302. Umweltbundesamt, TEXTE Nr. 55/2010, Dessau, www.uba.de/uba-info-medien/4037.html (7.4.2020)
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2018): Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten. Kurzstudie im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (BUND). www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/07/energiewende_studie_vernetzte_produkte.pdf (22.9.2020)
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2019): Energy Consumption of Data Centers Worldwide – How will the Internet become Green? In: Wolff, A. (Hg.): Proceedings of the 6th International Conference on ICT for Sustainability. Lappeenranta, Finland, June 10-14, 2019. In: http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_16.pdf (7.4.2020)
- Huillet, M. (2020): Bitcoin Suisse-Gründer: Bitcoin wird auf Proof-of-Stake übergehen. Cointelegraph 14.4.2020. <https://de.cointelegraph.com/news/bitcoin-will-follow-ethereum-and-move-to-proof-of-stake-says-bitcoin-suisse-founder> (30.6.2020)
- IEA (International Energy Agency) (2007): Mind the Gap. Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency. In support of the G8 Plan of Action. Paris, www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264038950-en.pdf?expires=1592228883&id=id&accname=ocid43023314&checksum=B070EF134AAC2FD6DEE7E80851080BAC (15.6.2020)
- IEA (2020): Carbon intensity of electricity generation in selected regions in the Sustainable Development Scenario, 2000-2040. 21.9.20, www.iea.org/data-and-statistics/charts/carbon-intensity-of-electricity-generation-in-selected-regions-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2040 (20.10.2020)
- IEE (Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme) (2016): Projekt: Energieautarke Mobilfunkbasisstationen. www.iee.tu-clausthal.de/fileadmin/Projekte/Spielmann_EPlus.pdf (20.10.2020)
- ITWissen.info (2018): CPU (central processing unit). www.itwissen.info/CPU-central-processing-unit-Zentraleinheit.html (3.3.2020)
- ITWissen.info (2019): ULV-Prozessor. www.itwissen.info/ULV-Prozessor-ultra-low-voltage-ULV.html (3.3.2020)
- IWR (Institut der Regenerativen Energiewirtschaft) (2016): Siemens baut Windpark für Googles Datenzentren. Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien, 5.7.2016, www.iwr.de/news.php?id=31592 (24.7.2020)
- IWR (2017): Microsoft und GE sorgen für erstes Windkraft-Speicherprojekt in Europa. 10.10.2017, www.iwr.de/news.php?id=34564 (24.7.2020)
- Jalali, F.; Hinton, K.; Ayre, R.; Alpcan, T.; Tucker, R. (2016): Fog Computing May Help to Save Energy in Cloud Computing. In: IEEE J. Select. Areas Commun. 34(5), S. 1728–1739
- Jodl, M. (2019): Dieser Mobilfunk-Standort läuft mit Brennstoffzelle. www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/mobilfunk-standort-brennstoffzelle-577054 (31.3.2020)
- Jones, N. (2018): The Information Factories. Data centres are chewing up vast amounts of energy – so researchers are trying to make them more efficient. In: Nature (561), S. 163–166
- Kahle, C. (2011): E-Plus betreibt Basisstation ohne Stromanschluss. 5.9.2011, <https://winfuture.de/news,65341.html> (20.10.2020)
- Kalz, D.; Klein, K.; Palzer, A.; Schlösser, T.; Schumacher, P.; Sterchele, P.; Stinner, S.; Yu, Y.; Kallert, A. (2018): Netzdienliche Gebäude und Quartiere. Gebäude entlasten Stromnetze. BINE Informationsdienst Nr. Themeninfo I/2018, Karlsruhe,

- www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Themeninfos/Themen_0118/themen_0118_internetx_neu.pdf
(16.6.2020)
- Kamiya, G. (2019): Bitcoin energy use – mined the gap. IEA. www.iea.org/commentaries/bitcoin-energy-use-mined-the-gap (15.6.2020)
- Kantar; die mediananstalten – ALM (2019): VIDEO Digitalisierungsbericht 2019. die mediananstalten – ALM, www.die-medienanstalten.de/fileadmin/user_upload/die_medienanstalten/Publikationen/Digibericht_Video_19/Medienanstalten_Chartreport_Digitalisierungsbericht_Video_2019_web.pdf (24.4.2020)
- Kern, E.; Hilty, L.; Guldner, A.; Maksimov, Y.; Filler, A.; Gröger, J.; Naumann, S. (2018): Sustainable software products—Towards assessment criteria for resource and energy efficiency. In: *Future Generation Computer Systems* 86, S. 199–210
- Klee, C. (2019): Ethereum: Neuer ProgPoW-Algorithmus ist ASIC-resistent. BTC Echo, 7.1.2019, www.btc-echo.de/ethereum-neuer-progpow-algorithmus-ist-asic-resistent/ (30.6.2020)
- Klee, C. (2020): Großkunde investiert 30 Millionen in Hochleistungs-Rechenzentrum der Northern Data AG. BTC Echo, 21.4.2020, www.btc-echo.de/grosskunde-reserviert-100-mw-vor-bitcoin-halving-northern-data/ (3.3.2021)
- Köhn, M.; Gröger, J.; Stobbe, L. (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes »Green Cloud-Computing«. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/politische-handlungsempfehlungen-green-cloud-computing_2020_09_07.pdf (23.9.2020)
- Koomey, J. (2008): Worldwide electricity used in data centers. In: *Environmental Research Letters* 3(3), S. 34008
- Koomey, J.; Berard, S.; Sanchez, M.; Wong, H. (2011): Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. In: *Annals of the History of Computing* 33(3), S. 46–54
- Krause, M.; Tolaymat, T. (2018): Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. In: *Nature Sustainability* 1(11), S. 711–718
- Lange, C.; Kosiankowski, D.; Betker, A.; Simon, H.; Bayer, N.; von Hugo, D.; Lehmann, H.; Gladisch, A. (2014): Energy Efficiency of Load-Adaptively Operated Telecommunication Networks. In: *Journal of Lightwave Technology* 32(4), S. 571–590
- Lange, S.; Pohl, J.; Santarius, T. (2020): Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? In: *Ecological Economics* 176, S. 106760
- Lenovo (2016): Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet. ThinkPad X1 Yoga 2nd Gen. www.lenovo.com/medias/PCF-ThinkPad-X1-Yoga-2nd.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8NzcyMzQzfGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnnoYTAvaGE2Lzk0ODYxNTQ0MzI1NDIucGRmfGZmMDQ0YmE3NDEzMWFIMTdmNTQ4NjMzMmNIM2U4NmU1YWNI NDRhMTg1MTBkMzgzZWI4NDQwZDc1MTY0ZDE2ZTk (21.9.2020)
- Li, M.-Y.; Su, S.-K.; Wong, H.-S. P.; Li, L.-J. (2019): How 2D semiconductors could extend Moore's law. In: *Nature* 567(7747), S. 169–170
- Livshits, A. (2019): Bitmain eröffnet Bitcoin-Mining-Anlage in Texas. BTC Echo vom 22.10.2019. www.btc-echo.de/bitmain-eroeffnet-bitcoin-mining-anlage-in-texas/ (30.6.2020)
- LRZ (2014): Energieeffiziente Rechenzentrumsinfrastruktur. www.lrz.de/wir/green-it/ee-infrastruktur/ (6.5.2020)
- Luber, S.; Karlstetter, F. (2018): Was ist Fog Computing? *Cloudcomputer-Insider*, 22.7.2028, www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-fog-computing-a-736757/ (20.4.2020)
- Maaß, C. (2020): Wärmeplanung: Grundlagen einer neuen Fachplanung. In: *Zeitschrift für Umweltrecht* 2020(1), S. 22–31
- Malmodin, J.; Lunden, D. (2016): The energy and carbon footprint of the ICT and E&M sector in Sweden 1990–2015 and beyond. www.ericsson.com/4a9f28/assets/local/news/2016/09/energy-and-carbon-footprint-ict-em-sector-sweden-1990-2015.pdf (7.4.2020)

- Malmodin, J.; Lunden, D. (2018): The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. In: *Sustainability* 10(9), S. 3027
- McCook, H. (2018): The Cost & Sustainability of Bitcoin.
www.academia.edu/37178295/The_Cost_and_Sustainability_of_Bitcoin_August_2018_ (7.7.2020)
- Mitschak, L.; Ostler, U. (2019): Krypto-Mining fordert die Rechenzentrumstechnik heraus. *Datacenter Insider*.
www.datacenter-insider.de/krypto-mining-fordert-die-rechenzentrumstechnik-heraus-a-785519/ (22.6.2020)
- Mocnej, J.; Pekar, A.; Seah, Winston KG; Zolotova, I. (2017): Network Traffic Characteristics of the IoT Application Use Cases.
<https://pdfs.semanticscholar.org/0a21/8ccd9503905ccd0e35e5bf87df9a6b768b63.pdf> (28.4.2020)
- mpfs (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest) (2018): JIM-Studie 2018. Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland. Stuttgart, www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2018/Studie/JIM2018_Gesamt.pdf (11.9.2020)
- Müller, D.; Ostler, U. (2016): Brennstoffzellen – neue Energie für Rechenzentren. Der Diesel ist Technik des 19. Jahrhunderts. *Datacenter Insider*, 15.8.2016 www.datacenter-insider.de/brennstoffzellen-neue-energie-fuer-rechenzentren-a-545526/ (31.3.2020)
- Nolte, F. (2018): Rechenzentrum in DC-Technik. In: *etz. elektrotechnik & automatisierung*, 1.11.2018
- NORDLIGHT research (2018): Verbraucherinteresse an Smart-Home-Produkten hoch – Kaufbereitschaft und Nutzung aber noch gering. 5.6.2018, www.nordlight-research.com/de/publikationen/presse/presse-detail/verbraucherinteresse-an-smart-home-produkten-hoch-kaufbereitschaft-und-nutzung-aber-noch-gering.html (17.6.2020)
- Nowitzky, G. (2012): Kühlung aus der Tiefe. www.it-zoom.de/it-mittelstand/e/kuehlung-aus-der-tiefe-4663/ (12.3.2020)
- Ostler, U. (2019a): Aus dem Auto ins Rechenzentrum – die CO₂-freie Energie-versorgung per Brennstoffzelle. Pilotprojekt zu stationären Brennstoffzellensystemen. *Datacenter Insider*, 5.12.2019, www.datacenter-insider.de/aus-dem-auto-ins-rechenzentrum-die-co2-freie-energieversorgung-per-brennstoffzelle-a-889503/ (30.3.2020)
- Ostler, U. (2019b): Nvidia-VP zu Energie-Effizienz, Cloud und der KI-Beschleuniger-Konkurrenz. *DataCenter Insider*, 26.9.2019, www.datacenter-insider.de/nvidia-vp-zu-energie-effizienz-cloud-und-der-ki-beschleuniger-konkurrenz-a-868471/ (3.3.2020)
- Pawlik, R.; Büttner, F. (2017): Die CPU als Durchlauferhitzer. Steigende Leistungsdichte treibt den Bedarf an wassergekühlten Systemen. In: Jannot, T.; Novak, R.; Eichberger, F. (Hg.): *Rechenzentren und Infrastruktur. Server, Kabel und Cloud-Computing. Eine Themenbeilage der Heise Medien GmbH & Co. KG*, S. 16
- Pehnt, M.; Bödeker, J.; Arens, M.; Jochem, E.; Idrissova, F. (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens »Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative«. Heidelberg, Karlsruhe, www.ifeu.de/wp-content/uploads/Nutzung_industrieller_Abwaerme.pdf (28.4.2020)
- Petschke, B. (2015): Actual Status: DC Power for Data Centers.
http://repository.stulz.com/BA5D25E7/&ved=2ahUKewjumYm2suPjAhWLZFAKHT-KuDm04FBAWMAN6BAGIEAE&usq=AOvVaw04L_bUQ2Op9F0fAzZ-ny5w (13.5.2020)
- Petschke, B. (2019): Freie Kühlung im Rechenzentrum: Mehr Kosteneffizienz durch dynamische Regelung. www.stulz.de/de/newsroom/neuigkeit/freie-kuehlung-im-rechenzentrum-mehr-kosteneffizienz-durch-dynamische-regelung-2126/ (5.3.2020)
- 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. In: *Sustainability* 10(7), S. 2494
- Poirot, V.; Ericson, M.; Nordberg, M.; Andersson, K. (2019): Energy efficient multi-connectivity algorithms for ultra-dense 5G networks. In: *Wireless Network*

- Prakash, S.; Baron, Y.; Liua, R.; Proske, M.; Schlösser, A. (2014a): Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT – cost/benefit analysis. Final report. Luxembourg
- Prakash, S.; Hipp, T.; Borgstedt, S.; Roden, I.; Gröger, J.; Schlösser, A.; Proske, M. (2014b): Ermittlung und Erschließung des Energie- und Ressourceneffizienzpotenzials von Geräten der Unterhaltungselektronik. Arbeitspaket 4: Nutzerprofile, www.oeko.de/oekodoc/2102/2014-660-de.pdf (11.9.2020)
- Püschel, T. (2019): Bachmann GmbH. Interview am 8.8.2019, durchgeführt von Borderstep Institut
- Rauchs, M.; Blandin, A.; Klein, K.; Pieters, G.; Recanatini, M.; Zhang, B. (2018): 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. In: SSRN Journal
- Reetz, F. (2019): Blockchain & das Klima. Warum die nationale Blockchain-Strategie Innovations- und Klimapolitik zusammenbringen sollte. Stiftung Neue Verantwortung. Berlin, www.stiftung-nv.de/sites/default/files/blockchain_und_das_klima.pdf (11.6.2020)
- Regelleistung.net (2019): Bedarfe Q3/2019 SRL/MRL. www.regelleistung.net/ext/tender/remark/news/425 (23.10.2020)
- RenewIT (2013): Advanced concepts and tools for renewable energy supply of IT Data Centres. www.renewit-project.eu/ (13.10.2020)
- Rentrop, C.; Augsten, S. (2018a): Methoden für die effiziente Programmierung. Dev-Insider. www.dev-insider.de/methoden-fuer-die-effiziente-programmierung-a-783176/ (23.4.2020)
- Rentrop, C.; Augsten, S. (2018b): Programmieren für die Umwelt. Dev-Insider. www.dev-insider.de/programmieren-fuer-die-umwelt-a-783169/ (23.4.2020)
- Revemann, S.; Ostler, U. (2019): 7 Mio Tonnen CO₂! Und wir treffen auf Ignoranz & Betrug, nicht auf Einsicht & Ideen. Diskussion auf dem DataCenter Day 2019 gewünscht. 10.9.2019, www.datacenter-insider.de/7-mio-tonnen-co2-und-wir-treffen-auf-ignoranz-betrug-nicht-auf-einsicht-ideen-a-862989/ (24.7.2020)
- Rüdiger, A.; Ostler, U. (2019a): Was ist Silicon Photonics? DataCenter Insider. www.datacenter-insider.de/was-ist-silicon-photonics-a-890632/ (3.3.2020)
- Rüdiger, A.; Ostler, U. (2019b): Was ist und wie funktioniert Adiabatik? DataCenter-Insider. www.datacenter-insider.de/was-ist-und-wie-funktioniert-adiabatik-a-845438/ (5.3.2020)
- Safarik, M.; Honke, M.; Steffan, C. (o. J.): Flüssigeis zur Kälte- und Wärmeversorgung. Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH. Dresden, www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/170130_Broschuere_Vakuumeis_de.pdf (5.3.2020)
- Santarius, T. (2015): Der Rebound-Effekt. Dissertation. Metropolis-Verlag für Ökonomie Gesellschaft und Politik GmbH
- Schaub, B.; Schmitt, S. (2020): Tokenisierung in Europa. Marktgröße erreicht 1,4 Billionen Euro im Jahr 2024. Private Banking Magazin. 26.3.2020. www.private-banking-magazin.de/tokenisierung-in-europa-marktgroesse-erreicht-14-billionen-euro-im-jahr-2024/ (25.6.2020)
- Schiller, K. (2020): Bitcoin Halving 2020 – Das Wichtigste zum nächsten Event. Blockchainwelt. Beitrag vom 22.5.2020. <https://blockchainwelt.de/bitcoin-halving-2020/> (6.7.2020)
- Schödwell, B.; Zarnekow, R.; Liu, R.; Gröger, J.; Wilkens, M. (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Forschungskennzahl 3715316010. Umweltbundesamt, TEXTE Nr. 19/2018, Dessau, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf (3.4.2020)
- Schönfelder, F.; Ostler, U. (2020): Heiße Luft im Rechenzentrum – zu viel, zu teuer, zu belastend. DataCenter-Insider. www.datacenter-insider.de/heisse-luft-im-rechenzentrum-zu-viel-zu-teuer-zu-belastend-a-899390/ (5.3.2020)
- Sedlmeir, J.; Buhl, H.; Fridgen, G.; Keller, R. (2020): The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. In: Business & Information Systems Engineering
- Seven One Media GmbH (2018): Media Activity Guide 2018. Trends in der Mediennutzung. Unterföhring, www.sevenonemedia.de/documents/924471/1111769/Media+Activity+Guide+2018 (9.9.2020)

- Seven One Media GmbH (2019a): Media Activity Guide 2019.
www.sevenonemedia.de/documents/924471/1111769/Media+Activity+Guide+2019 (10.9.2020)
- Seven One Media GmbH (2019b): View Time Report 2019.
www.sevenonemedia.de/documents/924471/1111769/ViewTime+Report+2019 (10.9.2020)
- Shehabi, A.; Smith, S.; Sartor, D.; Brown, R.; Herrlin, M.; Kooomey, J.; Masanet, E.; Horner, N.; Azevedo, I.; Lintner, W. (2016): United States Data Center Energy Usage Report. LBNL Nr. 1005775,
https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-1005775_v2.pdf (5.9.2019)
- Statista (2020): Digital Market Outlook: Smart Home. Mai 2020, <https://de.statista.com/outlook/279/137/smart-home/deutschland> (17.6.2020)
- Statistisches Bundesamt (2019a): Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen.
www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html (1.7.2020)
- Statistisches Bundesamt (2019b): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit Haushalte und Familien. Ergebnisse des Mikrozensus. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/Downloads-Haushalte/haushalte-familien-2010300187004.pdf (9.9.2020)
- Statistisches Bundesamt (2020a): Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik – Deutschland. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-infotechnik-d.html (8.9.2020)
- Statistisches Bundesamt (2020b): Ausstattung privater Haushalte mit Unterhaltungselektronik – Deutschland. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-unterhaltungselektronik-d.html (8.9.2020)
- Statistisches Bundesamt (2020c): Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS).
www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Einkommen-Einnahmen-Ausgaben/Methoden/einkommens-verbrauchsstichprobe.html (8.9.2020)
- Steinhaus, I. (2013): Das nächste große Ding ist winzig. www.it-zoom.de/it-director/e/das-naechste-grosse-ding-ist-winzig-5089/ (3.3.2020)
- Stobbe, L.; Proske, M.; Nissen, N.; Zedel, H.; Rohde, C.; Leimbach, T.; Beckert, B.; Rung, S.; Ehret, W.; Knauer, L.; Schmale, C.; Tillack, D. (2015a): IT2Green – Energieeffiziente IKT für Mittelstand, Verwaltung und Wohnen. Ergebnisse und Erkenntnisse. www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/it2green-begleitforschung-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (26.10.2020)
- Stobbe, L.; Proske, M.; Zedel, H.; Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S. (2015b): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. – Abschlussbericht –. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie Projekt-Nr. 29/14. Berlin,
www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (10.9.2019)
- Stoll, C.; Klaaßen, L.; Gallersdörfer, U. (2019): The Carbon Footprint of Bitcoin. In: Joule 3(7), S. 1647–1661
- Techcentral.ie (2019): Amazon to spin up Cork wind farm. Second Irish facility to provide 68,000MWh of clean energy annually. 1.8.2019, www.techcentral.ie/amazon-to-spin-up-cork-wind-farm/ (24.7.2020)
- Tesla Motorclub Blog (2018): How much data does your HW2+ Tesla upload? pyraca, Nov 12, 2018 #6.
<https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/how-much-data-does-your-hw2-tesla-upload.135001/> (28.4.2020)
- The Shift Project (2019): Lean ICT – Towards Digital Sobriety. Report of the Working Group Directed by Hugues Ferreboeuf for the Think Tank The Shift Project. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf (7.4.2020)
- Theis, T.; Wong, H.-S. (2017): The End of Moore's Law: A New Beginning for Information Technology. In: Comput. Sci. Eng. 19(2), S. 41–50
- Thomas Krenn AG (o. J.): Kostenvergleich Tier-III RZ. www.thomas-krenn.com/redx/tools/mb_image.php/cid.y4995f815e42984cf/Folie2_Tabelle.jpg (7.5.2020)

- TMR (Transparency Market Research) (2018): Global Micro Data Center Market: Savvy Players Strive to Enhance Service Capabilities to Expand Customer Base. 26.3.2018, www.sbwire.com/press-releases/global-micro-data-center-market-savvy-players-strive-to-enhance-service-capabilities-to-expand-customer-base-954286.htm
- Tsai, H.; Ambrogio, S.; Narayanan, P.; Shelby, R.; Burr, G. (2018): Recent progress in analog memory-based accelerators for deep learning. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51(28), S. 283001
- TU Berlin (Technische Universität Berlin); IZE (Innovationszentrum Energie) (2008): Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren. www.energie.tu-berlin.de/uploads/media/Konzeptstudie_EiR_20090807.pdf (12.3.2020)
- UBA (Umweltbundesamt) (2020): Bilanz 2019: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom (28.4.2020)
- Van Heddeghem, W.; Lambert, S.; Lannoo, B.; Colle, D.; Pickavet, M.; Demeester, P. (2014): Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012. In: *Computer Communications* 50, S. 64–76
- VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) (2019): Roter Faden durch das Thema Blockchain. Frankfurt a. M., <https://www.vde.com/resource/blob/1880776/1c616e33e550c2f387202e7b8b8ad53a/roter-faden-blockchain-download-data.pdf> (17.6.2020)
- Verbraucherzentrale Bundesverband (2020): Die Empfangsarten – analog oder digital. www.verbraucherzentrale.de/wissen/digitale-welt/fernsehen/die-empfangsarten-analog-oder-digital-6438 (1.10.2020)
- Vodafone (2017): Sustainable Business Report 2017. www.vodafone.com/content/dam/vodcom/sustainability/pdfs/sustainablebusiness2017.pdf (23.4.2020)
- Vodafone (2019): Sustainable Business Report 2019. www.vodafone.com/content/dam/vodcom/sustainability/pdfs/sustainablebusiness2019.pdf (23.4.2020)
- Vranken, H. (2017): Sustainability of bitcoin and blockchains. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, S. 1–9
- Vries, A. de (2018): Bitcoin's Growing Energy Problem. In: *Joule* 2(5), S. 801–805
- Wahlroos, M.; Pärssinen, M.; Manner, J.; Syri, S. (2017): Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. In: *Energy* 140, S. 1228–1238
- Waldrop, M. (2016): The chips are down for Moore's law. In: *Nature* 530(7589), S. 144–147
- Weckbrodt, H. (2018): »Cloud & Heat« Dresden sieht sich auf dem Sprung zum Großunternehmen. Lokales/Rechenkraft aus dem Container. In: *Dresdner Neueste Nachrichten*, 25.7.2018, <https://www.dnn.de/lokales/dresden/cloud-und-heat-dresden-sieht-sich-auf-dem-sprung-zum-grossunternehmen-SLIEVH2LM5KZ3HW7TX36RLD2OY.html> (11.11.2020)
- Weiler, A. (2017): Smart-Home-Markt soll sich verdreifachen. 4,3 Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2022. 21.9.2017, www.channelpartner.de/a/smart-home-markt-soll-sich-verdreifachen,3332620 (11.11.2020)
- Weiß, R.; Fichter, K.; Clausen, J. (2012): Einfluss von Gründer-Pionieren bei der Markteinführung von Nachhaltigkeitsinnovationen. Beitrag für das G-Forum 2012. Berlin, www.borderstep.de/wp-content/uploads/2014/07/Weiss-Fichter-Clausen_Gruender-Pioniere-2012.pdf (11.11.2020)
- Wenger, T.; Tokarski, K. (2020): Kryptowährungen. In: Schellinger, J.; Tokarski, K.; Kissling-Näf, I. (Hg.): *Digitale Transformation und Unternehmensführung*. Wiesbaden, S. 249–284
- Windeck, C. (2017): Effiziente OCP-Server: Mit 48 Volt bis zum Prozessor. www.heise.de/newsticker/meldung/Effiziente-OCP-Server-Mit-48-Volt-bis-zum-Prozessor-3647680.html (15.4.2020)
- Windkraft-Journal (2020): Im Rechenzentrum blasen Wind und Algen die Elektronen durch die Chips. 2.9.2020, www.windkraft-journal.de/2020/09/02/im-rechenzentrum-blasen-wind-und-algen-die-elektronen-durch-die-chips/152677 (11.11.2020)

Womersley, R. (2017): When will Exponential Mobile Growth Stop? Lichtenau,
www.lstelcom.com/fileadmin/content/lst/marketing/media/2017_LStelcom_Report_WhenWillExponentialMobileGrowthStop.pdf (28.4.2020)

Yaga, D.; Mell, P.; Roby, N.; Scarfone, K. (2018): Blockchain technology overview. Gaithersburg, MD

8 Anhang

8.1 Liste der teilnehmenden Experten am Workshop

Zur Diskussion und Validierung der in Kapitel 3.1 in Form von Technologieradaren aufbereiteten Reduktionsoptionen fand am 1. Oktober 2019 ein Expertenworkshop in Berlin statt. Im Rahmen des Workshops wurden außerdem die technologischen oder organisatorischen Optionen mit den größten Energieeinsparpotenzialen und den höchsten Handlungsbedarfen identifiziert. Die Tabelle 8.1 listet die teilnehmenden Experten in alphabetischer Reihenfolge auf.

Tab. 8.1 Liste der teilnehmenden Experten am Workshop vom 1.10.2019

Name	Institution/Unternehmen
Dr. Jens Clausen	Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit
Prof. Dr. Klaus Fichter	Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit
Thomas Grunwald	Schneider Electric GmbH
Dr. Ralph Hintemann	Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit
Johannes Krafczyk	T-Systems International GmbH
Volker Liebenhagen	Riello Power Systems GmbH
Ken Jesse Lindenberg	TU Berlin
Achim Pfeleiderer	STULZ GmbH
Staffan Reveman	Reveman Energy Academy
Pascal Weibel	Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) der Bay. Akademie der Wissenschaften
Bernd Wunder	Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie IISB

8.2 Abbildungen

	Seite
Abb. Z.1 Szenarien zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland bis 2030.....	7
Abb. A.1 Vergleich aktueller Prognosen des Energiebedarfs der IKT-Infrastrukturen in Deutschland mit den Prognosen aus dem Jahr 2019 (vorliegender TAB-Bericht).....	26
Abb. A.2 Berechnungen des jährlichen Stromverbrauchs des Bitcoin-Netzwerks.....	32
Abb. A.3 Durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer Medienangebote (Angaben in Minuten).....	36

	Seite
Abb. A.4	Veränderungen des Energiebedarfes durch die COVID-19-Pandemie in einem Beispielhaushalt mit intensiver Mediennutzung 38
Abb. A.5	Beitrag von Smartbuildingtechnik zur Erreichung der Emissionsminderungsziele im Gebäudesektor 41
Abb. 2.1	IKT-Infrastrukturen als Teils des IKT-Systems – vereinfachte Darstellung..... 46
Abb. 2.2	Erwartete Entwicklung des Strombedarfs der gesamten IKT weltweit gemäß Andrae & Edler (2015)..... 48
Abb. 2.3	Strombedarf der IKT 2025 49
Abb. 2.4	Aufbau eines Rechenzentrums mit Input und Output..... 52
Abb. 2.5	Struktur des Modells zur Bestimmung des Energiebedarfs von Rechenzentren 53
Abb. 2.6	Bestand an Rechenzentren in Deutschland nach Größenklassen..... 54
Abb. 2.7	Anteil von Colocation- und Cloudrechenzentren in Deutschland..... 55
Abb. 2.8	Energiebedarf der Rechenzentren nach Einzelkomponenten 56
Abb. 2.9	Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland nach Größenklassen..... 57
Abb. 2.10	Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland: Anteil der Colocationrechenzentren 58
Abb. 2.11	Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland: Anteil der Cloudrechenzentren 59
Abb. 2.12	Aufteilung des Energiebedarfs der Rechenzentren weltweit auf verschiedene Anwendungen 61
Abb. 2.13	Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland..... 69
Abb. 2.14	Szenarien zum Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland bis 2030..... 74
Abb. 2.15	Datenvolumen im deutschen Internet..... 76
Abb. 2.16	Varianten des Wachstums des Datenverkehrs..... 77
Abb. 2.17	Szenarien zum Energiebedarf der Telekommunikationsnetze in Deutschland bis 2030 79
Abb. 2.18	Szenarien zum Energiebedarf der IKT-Infrastrukturen in Deutschland bis 2030..... 81
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Gesamtsystems von Hardware, Software und Management von IKT-Infrastrukturen 84

	Seite
Abb. 3.2	Technologieradar für das Handlungsfeld IKT-Hardware 86
Abb. 3.3	Technologieradar für das Handlungsfeld Kühlung und Klimatisierung 89
Abb. 3.4	Technologieradar für das Handlungsfeld Stromversorgung 92
Abb. 3.5	Technologieradar für das Handlungsfeld Management, Netzwerkarchitekturen und Software 96
Abb. 3.6	Vergleich Wechsel- und Gleichstromversorgung im Rechenzentrum..... 110
Abb. 4.1	Stromerzeugung und Strompreis vom 8.7.2020 bis 8.10.2020 122
Abb. 4.2	Strombedarf eines Rechenzentrums 2018 124
Abb. 4.3	Lastverlauf beim Mobilfunkverkehr..... 125
Abb. 5.1	Aufbau einer Blockchain..... 137
Abb. 5.2	Geschätzte gesamte Hashrate im Blockchainnetzwerk..... 144
Abb. 5.3	Geschätzter Strombedarf der Bitcoin-Blockchain 146
Abb. 5.4	Energiebedarfe der Unterhaltungselektronik 2018 158
Abb. 5.5	Energiebedarfe und Bestand Flachbildfernsehgeräte 2018..... 159
Abb. 5.6	Vergleich der Prognosen von Stobbe et al. (2015b) (grau) mit den in dieser Analyse erzielten Ergebnissen (schwarz)..... 160
Abb. 5.7	Energiebedarfe der IKT-Endgeräte 2018..... 160
Abb. 5.8	Gesamtenergiebedarfe durch private Internet- und digitale Mediennutzung in Deutschland im Zeitverlauf 164
Abb. 5.9	Endenergiebezogener Gebäudeenergieverbrauch in Deutschland, Bezugsjahr 2019 171
Abb. 5.10	Bestand und Energieverbrauch von Wohngebäuden nach Baujahr..... 172
Abb. 5.11	System- und Automationsklassen für das Energiemanagement in Gebäuden 176

8.3 Tabellen

	Seite
Tab. A.1 Anzahl der Gebrauchsgüter je 100 Haushalte (Ausstattungsbestand).....	34
Tab. 2.1 CO ₂ -Fußabdruck des IKT-Sektors gemäß den GeSI-Berichten	50
Tab. 2.2 Energiebedarf der Mobilfunknetze in Deutschland	64
Tab. 2.3 Energiebedarf des Festnetzes in Deutschland.....	66
Tab. 2.4 Energiebedarf des Kabelnetzes.....	68
Tab. 5.1 Kennzahlen für die Berechnung des Energiebedarfs der Endgeräte.....	157
Tab. 5.2 Bestand und Energiebedarf von Smartbuildingsystemen	180
Tab. 5.3 Bestand und Energiebedarf von Smarthomesystemen.....	182
Tab. 8.1 Liste der teilnehmenden Experten am Workshop vom 1.10.2019	213

8.4 Glossar

- 2-D-Materialien: Materialien, die aus nur einer geordneten Lage von Atomen bestehen. 2-D-Materialien ermöglichen eine weitere Verkleinerung von Chipstrukturen und könnten so die Gültigkeit des Mooreschen Gesetzes für eine gewisse Zeit verlängern (Li et al. 2019).
- adiabate Kühlung (Verdunstungskühlung): Verdunstet Wasser, entzieht es der Umgebung Wärme. Dieser Effekt lässt sich zur Erhöhung der Effizienz der freien Kühlung (Kap. 3.1.2) ausnutzen. Im Fall der direkten freien Kühlung wird die Außenluft durch Besprühen mit Wasser gekühlt und dann durch das Rechenzentrum geleitet. Bei der indirekten freien Kühlung wird die Außenluft, die zur Kühlung des Kühlmittels aus dem Serverraum eingesetzt wird, durch Besprühen mit Wasser gekühlt (Rüdiger/Ostler 2019b).
- All Flash: Flashspeicher werden in USB-Sticks, Speicherkarten oder in Solid State Drives (SSD) als Alternative zu klassischen Festplatten eingesetzt. Flashspeicher benötigen im Gegensatz zu Festplatten keine Mechanik und weisen dadurch Geschwindigkeitsvorteile, höhere Kapazitäten, niedrige Ausfallraten und auch einen niedrigeren Energieverbrauch auf. Aktuell sind sie allerdings noch teurer als die konventionellen Systeme. Es wird erwartet, dass Flashspeicher bis 2025 Festplatten fast komplett verdrängt haben werden (Bitkom 2018a, S. 7), was sich positiv auf den Energiebedarf von Rechenzentren auswirken wird.
- Blockheizkraftwerk (BHKW): Bei BHKW wird die mechanische Energie eines Verbrennungsmotors zur Stromerzeugung genutzt, die Abwärme wird als Wärmeenergie bereitgestellt.
- Cloudcomputing: IT-Ressourcen und -Dienstleistungen wie Rechenleistung, Speicherplatz oder Anwendungen werden nicht durch eigene (lokale) Hardware, sondern über das Internet durch zentrale Rechenzentren bereitgestellt.
- Cloud Native Programming: Die Ausschöpfung der Vorteile von cloudbasierten IKT-Infrastrukturen (u. a. flexible Skalierbarkeit, geografisch verteilte Bereitstellung, hohe Resilienz) stellt hohe Anforderungen an die Entwicklung entsprechender Anwendungen. Native Cloudanwendungen sind speziell dafür ausgelegt und zeichnen sich etwa durch den Einsatz von standardisierten Anwendungsschnittstellen (APIs) oder Orchestrierungssystemen aus. Diverse Programmiersprachen ermöglichen ein solches Cloud Native Programming.
- Containervirtualisierung: Vom Prinzip her vergleichbar mit der Servervirtualisierung, allerdings findet die Virtualisierung auf einer anderen Abstraktionsebene statt. Während ein virtueller Server ein isoliertes System mit eigenem Betriebssystem darstellt, handelt es sich bei einem Container um eine isolierte Anwendung.
- Converged Infrastructure: Bei der Converged Infrastructure werden die Systemelemente Hardware, Software und Operations gemeinsam betrachtet, um die Komponenten in Abhängigkeit der jeweiligen Aufgaben und Anforderungen an das Rechenzentrum optimal aufeinander abstimmen und dadurch möglichst effizient betreiben zu können.
- CPU (Central Processing Unit): Der Hauptprozessor ist die zentrale Komponente eines Computers. Es ist ein Mikroprozessor, der den gesamten Rechner und seine Rechenoperationen überwacht, steuert, die Ergebnisse und Zwischenergebnisse speichert und die jeweils benötigten Daten für die Rechenoperationen vorrätig hält (ITWissen.info 2018).
- Datacenter Infrastructure Management (DCIM): Softwareprodukte, die den Administratoren einen ganzheitlichen Überblick über die Infrastruktur und die Leistung eines Rechenzentrums bieten sollen. Sie erlauben u. a. die Abbildung der eingesetzten Systemkomponenten und die Überwachung wichtiger Leistungs- und Umweltparameter (z. B. Stromverbrauch einzelner Geräte, Leistung von Kühlmittelpumpen, Temperaturverteilung) (Galler/Ostler 2014). Ziel von DCIM-Lösungen ist es, das Gesamtsystem zu optimieren und möglichst energieeffizient zu betreiben.
- DC-DC-USV im Serverschrank: Werden die Server durch eine dezentrale USV im Serverschrank direkt mit Gleichstrom aus der USV versorgt, wird von einer DC-DC-USV gesprochen. Zwischen USV und Server muss der Strom nicht mehr in Wechselstrom umgewandelt werden, wodurch Umwandlungsverluste entfallen.

- dezentrale USV im Serverschrank: Eine dezentrale USV in jedem Serverschrank stellt eine Alternative oder eine zusätzliche Sicherheit zu einer zentralen USV dar. Die einfache Skalierbarkeit schafft eine bessere Auslastung als bei einer zentralen USV, wodurch Effizienzpotentiale gehoben werden können.
- direkte Spannungswandlung: Gewöhnliche Server werden mit Wechselspannung von z. B. 230 oder 400 Volt versorgt. In den Servern wandeln Netzteile die Wechselspannung in 12 Volt Gleichspannung um, die wiederum durch weitere Spannungsregler in die Betriebsspannung von Prozessoren, Speicherchips etc. (z. B. 0,9 oder 1,2 Volt) umgewandelt wird. Ein Ansatz, um Übertragungs- und Wandlungsverluste dieser Mehrfachwandlung zu reduzieren, ist die direkte Spannungsumwandlung. Hier werden die Server mit Gleichstrom (z. B. 48 Volt) versorgt, der erst dicht am Verbraucher (Prozessor, Speicherchips etc.) auf die benötigte Betriebsspannung umgewandelt wird. Netzteile in den Servern entfallen, wodurch sich die Effizienz der Stromversorgung steigern lässt (Windeck 2017).
- dynamische Kühlwassertemperaturen: Kühlsystem, bei dem die Eintrittstemperatur des Kühlwassers in ein Rechenzentrum je nach tatsächlich abzuführender Wärmelast angepasst wird. Bei geringer Wärmelast ist eine höhere Eintrittstemperatur zulässig. Steigt die Last, kann es erforderlich sein, die Eintrittstemperatur zu senken, um Temperaturgrenzwerte an den IT-Komponenten einzuhalten. Durch dynamische Kühlwassertemperaturen lässt sich die Energieeffizienz von Kühlsystemen erheblich steigern, etwa indem die Jahresbetriebsstunden einer indirekten freien Kühlung maximiert werden (Kap. 3.1.2).
- dynamische Lufttemperaturen: Analog zu dynamischen Kühlwassertemperaturen kann bei Systemen mit Luftkühlung die Eintrittstemperatur der Luft ins Rechenzentrum an die abzuführende Wärmelast angepasst werden. Dadurch kann ein Rechenzentrum z. B. mit höheren Zuluft- bzw. Umgebungstemperaturen direkt gekühlt werden, was den Energiebedarf für die Kühlung reduziert.
- dynamische Umluftmengen: Die Auslastung vieler IT-Komponenten im Rechenzentrum und damit der Bedarf für Kühlung und Klimatisierung schwankt je nach Nutzungsmuster über die Zeit. Unter dynamischen Umluftmengen wird eine zeitlich dynamische Steuerung des Antriebs (Ventilatoren) der Luftzirkulation je nach Bedarf verstanden.
- Edge Computing: Dezentrale Datenverarbeitung am Rande (Edge) des Netzwerks. Mit steigendem Datenaufkommen wird es zunehmend wichtiger, Daten möglichst direkt am Entstehungsort (vor)zuverarbeiten, um beispielsweise das Datenvolumen vor der Übertragung in ein zentrales Rechenzentrum zu reduzieren.
- Einhausung Kalt-/Warmgang: Konstruktionsdesign für Serverschränke, um die Kühl- und Abluft getrennt zu führen. Aus Effizienzgründen sind Serverschränke in Rechenzentren so angeordnet, dass jeweils die Seiten, an denen die kühle Luft angesaugt wird, gegenüberstehen. Zwischen den Serverschränken entsteht hier ein sogenannter Kaltgang. Auf den Seiten, an denen die erwärmte Luft abgegeben wird, entsteht der Warmgang. Durch die Einhausung der Kalt- und Warmgänge wird vermieden, dass sich kalte und warme Luft vermischen, was zu Effizienzeinbußen führen würde.
- Energy Efficient Ethernet: Industriestandard (IEEE 802.3az), der ein wichtiger Baustein für die Etablierung lastadaptiver Telekommunikationsnetzwerke darstellt. Eine wesentliche Errungenschaft dieses Standards ist die Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme, wenn kein aktiver Datentransport über die Ports eines Ethernet-Netzwerkgerätes erfolgt.
- GPU (Graphics Processing Unit): Prozessoren, die für die Berechnung von Grafiken optimiert sind. Während eine (single core) CPU über ein komplexes Rechenwerk verfügt, das gleichzeitig nur eine Berechnung durchführen kann, arbeiten in einer GPU viele einfachere Rechenwerke parallel (Breiling et al. 2019, S. 50). Bestimmte rechenintensive Aufgaben können so um ein Vielfaches schneller und energieeffizienter als mit normalen CPUs durchgeführt werden.
- Grundwasserkühlung: Grundwasser weist ganzjährig eine weitgehend konstante Temperatur auf. Bei der Grundwasserkühlung wird einem Brunnen entnommenes Grundwasser zur Kühlung eines sekundären Kreislaufs verwendet und danach über einen Schluckbrunnen wieder in den Grundwasserstrom eingespeist. Der sekundäre Kreislauf speist das Klimasystem des Rechenzentrums. Die Grundwasserkühlung benötigt lediglich Strom für die Pumpen. Zudem sind, da das Grundwasser in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird, Verunreinigen und ein Absinken des Grundwasserspiegels ausgeschlossen. Eine Grundwasserkühlung setzt allerdings geeignete hydrogeologische Voraussetzungen z. B. in Bezug auf die Wassermenge und -temperatur am Standort voraus (Nowitzky 2012).

- Hardwarebeschleunigung (Hardware Acceleration): CPUs sind für vielseitige Anwendungsbereiche konzipiert und damit sehr flexibel. Bestimmte Aufgaben können jedoch von spezifisch optimierten Hardware-Logikbausteinen mit einer geringeren Anzahl von Schritten schneller bzw. effizienter berechnet werden. Beispiele hierfür sind Grafikberechnungen durch GPUs oder Kodierungs-/Dekodierungsvorgänge durch speziell dafür entwickelte Chips. Die Auslagerung solcher Berechnungen aus dem Hauptprozessor wird als Hardwarebeschleunigung bezeichnet.
- intelligente Stromverteiler im Serverschrank: Intelligente Stromverteiler in den Serverschränken ermöglichen ein kontinuierliches Monitoring des Strombedarfs der einzelnen Systeme. In der Regel liefern intelligente Stromverteiler noch weitere Informationen wie beispielsweise die Temperatur und Auslastung.
- Kälteerzeugung mit Geothermie: Mit Geothermieranlagen kann Wärme dem Boden nicht nur entnommen, sondern auch zugeführt werden. Das Verfahren eignet sich primär für kleine Rechenzentren oder für Bürogebäude mit integriertem Rechenzentrum. Rechenzentrum und Gebäude können im Sommer mit Geothermie gekühlt werden, im Winter wird die Abwärme des Rechenzentrums zusammen mit Erdwärme zum Heizen genutzt.
- kältemaschinenfreies Rechenzentrum: Rechenzentren, die ganz ohne den Einsatz von Kältemaschinen auskommen. Je nach lokalen Umgebungsbedingungen wird mit freier Kühlung (Kap. 3.1.2), adiabatischer Kühlung, (Grund-)Wasserkühlung oder durch Kälteerzeugung mit Geothermie gekühlt.
- Kältespeicher: Mit Kältespeichern lässt sich die Nutzung der Kälte in Zeiträume verlagern, in denen es Kostenvorteile bietet, keine Kältemaschinen zu betreiben. Auch ein Abfangen von Lastspitzen oder eine Überbrückung von Ausfällen in der Kälteerzeugung ist möglich. Kältespeicher lassen sich z. B. mit Flüssigeis realisieren, das pumpfähig ist und eine hohe Energiedichte besitzt. Beim Vakuumeisverfahren wird zur Eisproduktion Wasser bei etwa $-0,5\text{ °C}$ im Vakuum verdampft. Der umliegenden Flüssigkeit wird so Wärmeenergie entzogen und es bilden sich Eispartikel (Safarik et al. o. J.).
- kohlenstoffbasierte CPU: Aus Kohlenstoffnanoröhrchen gefertigte Prozessoren sollen es ermöglichen, die Zahl der Transistoren pro Chipfläche im Vergleich zur Siliziumtechnik zu erhöhen und dabei gleichzeitig den Energiebedarf zu reduzieren. Aktuelle Forschungsprozessoren sind allerdings noch nicht so leistungsfähig wie siliziumbasierte CPUs (Amarnath et al. 2019; Hills et al. 2019).
- Kompressionskältemaschine: Aggregat zur Kälteerzeugung, das zur Kühlung von Rechenzentren eingesetzt wird. Das Funktionsprinzip ist vergleichbar dem eines Kühlschranks. Es basiert auf dem Phasenwechsel eines Kühlmittels, das im Kreislauf geführt wird: Kühlmittel in einem Wärmetauscher im Serverraum wird durch Druckabsenkung zum Verdampfen gebracht. Dabei nimmt es Wärme aus der Serverluft auf. Das gasförmige Kühlmittel wird aus dem Gebäude geführt und durch Druckerhöhung zum Kondensieren gebracht. Dabei gibt es Wärme an die Umgebungsluft ab. Das gekühlte flüssige Kühlmittel wird wieder in den Serverraum geführt, womit sich der Kreislauf schließt. Zur Verdichtung des gasförmigen Kühlmittels werden strombetriebene Kompressoren eingesetzt. Eine Variante sind Kompressionskältemaschinen im Außenraum, die Wasser abkühlen, das zur Kühlung des Rechenzentrums eingesetzt wird.
- KPI-basiertes Energieeffizienzmanagement: Ein ganzheitliches Energiemanagement in Rechenzentren stellt eine komplexe Aufgabe dar, da der Energiebedarf von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Key-Performance-Indikatoren (KPI) werden genutzt, um die Energieeffizienz innerhalb einer definierten Systemgrenze (z. B. Kühlung, Stromversorgung) technologieneutral zu bewerten.
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK): Erweiterung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK): Die von einer Kraft-Wärme-Anlage (z. B. einem Blockheizkraftwerk) erzeugte Wärmeenergie wird zum Antrieb einer wärmegetriebenen Kältemaschine (z. B. eine Sorptionskältemaschine, siehe solare Kühlung) genutzt. Vorteil der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ist, dass Strom, Wärme und Kälte bereitgestellt werden.
- künstliche Intelligenz: Moderne Rechenzentren sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, die kontinuierlich Leistungs- und Umweltparameter messen und Prozesse überwachen (siehe auch Datacenter Infrastructure Management). Komplexe Analyseverfahren auf Basis von Methoden der künstlichen Intelligenz bieten die Möglichkeit, die hierbei anfallenden Rohdaten etwa im Hinblick auf noch ungenutzte Energieeinsparpotenziale auszuwerten. Erste Ansätze hierzu befinden sich in der Phase der Pilotanwendung. Beispielsweise soll es laut Evans/Gao (2016) durch Anwendung von Methoden des Maschinellen Lernens gelungen sein, den Energieverbrauch für die Kühlung eines Rechenzentrums um 40 % zu senken.

Low Voltage CPUs: Prozessoren, die insbesondere für den Einsatz in Notebooks entwickelt wurden. Die Prozessoren haben eine geringere Leistungsausstattung und arbeiten mit einer niedrigeren Spannung und Taktrate. Low Voltage CPUs haben dadurch einen geringeren Stromverbrauch und eignen sich auch für passiv gekühlte Systeme (ITWissen.info 2019). Sie können auch zum Aufbau energieeffizienter Microserver eingesetzt werden.

Microserver: Serversysteme, deren Baugröße im Vergleich zu klassischen Serverbauarten (19-Zoll-Server, Towerserver) deutlich kleiner ist. Microserver können Server in sehr kleinen Gehäusen sein, aber auch beispielsweise aus einer mit Prozessoren bestückten Steckplatine bestehen, die wie ein Computercluster zu größeren Einheiten zusammengefasst werden kann. Durch den Einsatz von stromsparenden, ursprünglich für mobile Anwendungen entwickelte Prozessoren können Microserver sehr energieeffizient betrieben werden (Steinhaus 2013).

modular aufgebaute USV: Häufig sind Anlagen der USV überdimensioniert, da sie für eine dynamisch wachsende IT ausreichend Kapazität bereithalten sollen. Solche Anlagen werden im meist sehr ineffizienten Teillastbereich betrieben. Eine modular skalierbare USV-Lösung kann auf die tatsächliche Last ausgelegt werden und bei zusätzlicher IT nach Bedarf erweitert werden.

Mooresches Gesetz: Mit der als Mooresches Gesetz (Moore's Law) bezeichneten Entwicklung wird die periodische Verdoppelung der Zahl an Transistoren auf gleichbleibender Chipfläche und bei gleichbleibenden Kosten bezeichnet. Diese Gesetzmäßigkeit gilt seit 50 Jahren. Es wird aber davon ausgegangen, dass das Mooresche Gesetz seine Gültigkeit bald verlieren könnte, da sich die Miniaturisierung immer mehr den physikalischen Grenzen annähert. Mittlerweile bestehen die Strukturen auf den Chips nur noch aus wenigen Atomlagen.

Multiconnectivity: Aufgrund der hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Latenz der 5G-Technologie werden sich 5G-Mobilfunkendgeräte gleichzeitig mit mehreren Mobilfunkbasisstationen verbinden können. Dabei induziert jedoch jede dieser Verbindungen einen Energieverbrauch. Poirot et al. (2019) berichten über die Entwicklung spezieller Algorithmen, durch welche die aus der Multi-Connectivity resultierenden systematischen Mehrverbräuche reduziert werden sollen. Gleichwohl führt dieser Ansatz aber vermutlich bestenfalls zu einem geringeren Anstieg des Energieverbrauchs der 5G- gegenüber der 4G-Technologie, eine absolute Senkung der Leistungsaufnahme erscheint unwahrscheinlich.

Multistandardbasisstationen: Mobilfunkbasisstationen, bei denen die Hardware für die verschiedenen Mobilfunkstandards (z. B. 2G, 3G und 4G) geeignet ist. Im Vergleich zum Betrieb von getrennten Funkanlagen für jeden Funkstandard kann so Energie eingespart werden. Der Mobilfunkanbieter Vodafone (2019, S. 30) beispielsweise betreibt bereits 97 % seiner Funkanlagen als Multi-Standard Basisstationen. Auch andere Mobilfunkanbieter setzen die Technologie ein.

natürliche Kältemittel: Ein wesentlicher Nachteil herkömmlicher Kältemittel in Kältemaschinen auf Basis von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) ist deren hohe Klimaschädlichkeit, falls sie durch Leckagen oder bei Wartungsarbeiten in die Atmosphäre entweichen. Das Treibhauspotenzial der meisten HFKW liegt um den Faktor 1.000 und mehr über jenem von CO₂. Natürliche Kältemittel wie CO₂, Propan, Ammoniak oder Wasser, die nur ein geringes oder gar kein Treibhauspotenzial besitzen, bieten hier eine klimaschonende Alternative (Graaf 2017).

neuromorphe Prozessoren: Prozessoren, deren Architektur von der Funktionsweise des menschlichen Gehirns inspiriert ist. Einfache Rechenwerke (Neuronen) und Speicherelemente (Synapsen) werden in großer Anzahl miteinander verknüpft, um ein massives Parallelrechnen zu ermöglichen (Tsai et al. 2018, S. 1 f.). Weil die Berechnungen dort stattfinden, wo die Speicher sind (In-Memory-Computation), reduziert sich außerdem der Aufwand für den Informationstransport. Dadurch arbeiten neuromorphe Prozessoren sehr energieeffizient. Gegenüber herkömmlichen Prozessoren sollen in Zukunft Energieeinsparungen um mehr als den Faktor 100 möglich sein (Breiling et al. 2019, S. 54 f.).

nicht flüchtiger Speicher (Persistent Memory): Neue Speichertechnologie, die durch eine deutliche Verringerung der Reaktionszeiten im Vergleich zu SSDs die Verarbeitungsgeschwindigkeit bei datenintensiven Arbeitslasten erhöhen kann (Bitkom 2018a, S. 8).

- Orchestrierungssysteme:** Orchestrierung beschreibt ein flexibles Kombinieren unterschiedlicher IKT-Ressourcen und -Dienste zu Geschäftsprozessen (Geißler/Ostler 2018b). Insbesondere das Management von virtualisierten IT-Ressourcen, die physisch oft heterogen und dezentral bereitgestellt werden und dennoch schnelle und zuverlässige Dienste ermöglichen sollen, erfordert ein hohes Maß an Automatisierung. Es existieren vielfältige Systeme, um diese Orchestrierungsaufgaben möglichst agil und effizient auszuführen.
- PCM-(Phase-Change-Material-)Kälteanlagen:** Diese arbeiten mit Latentwärmespeichern, bei denen Wärmeenergie durch Änderung des Aggregatzustandes eines Mediums (zumeist fest/flüssig) entweder gespeichert oder abgegeben wird. Beim Schmelzen nimmt das Medium (z. B. Salzhydrate oder Paraffine) Wärmeenergie auf, beim Erstarren wird die Wärmeenergie wieder abgegeben. Latentwärmespeicher werden beispielsweise eingesetzt, um die elektrischen Lastspitzen einer Kompressionskältemaschine während heißer Sommertage zu reduzieren. Der bekannteste Latentwärmespeicher ist der Kältespeicher mit Flüssigeis (TU Berlin/IZE 2008, S. 32 f.).
- Quantencomputer:** Computer, dessen Funktion auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruht. Durch die Verarbeitung von quantenmechanischen Zuständen können bestimmte Probleme der Informatik (z. B. die Suche in extrem großen Datenbanken) viel effizienter gelöst werden als mit klassischen Computern. Quantencomputer befinden sich noch im Forschungsstadium, es gibt erste Prototypen.
- schnelle Bypassumschaltung:** Bei der USV im Double-Conversion-Modus (siehe USV) werden die Elektronikkomponenten im Rechenzentrum bei einem Stromausfall ohne jegliche Unterbrechung mit Strom aus den Akkus versorgt. Die dabei entstehenden Umwandlungsverluste wirken sich allerdings insbesondere im Teillastbetrieb negativ auf die Effizienz der Stromversorgung aus. Die Entwicklungen in der Leistungselektronik ermöglichen mittlerweile Umschalteneinrichtungen, die bei einem Stromausfall ohne Verzögerung eine Versorgung durch die USV gewährleistet, während im Normalbetrieb die Geräte direkt mit Netzstrom versorgt werden (Bypass).
- Servervirtualisierung:** Virtualisierung abstrahiert von der tatsächlich vorhandenen Hardware und stellt logische Systeme zur Verfügung. Bei der Servervirtualisierung wird ein physischer Server so aufgeteilt, dass dem Anwender mehrere logische Server (sogenannte virtuelle Server oder Maschinen) zur Verfügung gestellt werden, auf denen z. B. verschiedene Betriebssysteme installiert werden können. Mithilfe der Livemigration können logische Server unterbrechungsfrei zwischen verschiedenen physischen Servern verschoben werden. Dies erlaubt es u. a., die tatsächlich vorhandenen Hardwareressourcen besser auszulasten (Hintemann et al. 2014).
- Siliziumphotonik (Silicon Photonics):** Technologie, bei der Informationen zwischen oder innerhalb von Computerchips mit Licht anstatt mithilfe von Elektronen übertragen werden. Dazu werden elektronische Halbleiterbauelemente mit optischen Technologien der Photonik auf dem gleichen Chip oder auf der gleichen Platine kombiniert. Dies ermöglicht einen schnelleren und energieeffizienteren Informationstransport innerhalb der Systeme (Rüdiger/Ostler 2019a). Bis die Integration von halbleiterbasierten und photonischen Bauteilen auf einem einzigen Chip gelingt, ist allerdings noch viel Forschung notwendig. Eine Abschätzung des möglichen Beitrags zur Steigerung der Energieeffizienz ist daher noch kaum möglich.
- Software Defined Everything (SDx):** Technologien zur Verwaltung von IKT-Ressourcen mithilfe von Software. Die Anfänge von SDx lagen im Netzwerkbereich: Mit Software Defined Networking (SDN) können Administratoren softwarebasiert den Netzverkehr steuern, ohne einzelne physische Netzkomponenten manuell konfigurieren zu müssen. SDx umfasst mittlerweile die meisten Aspekte des Rechenzentrums, vom Software Defined Storage (SDS) bis hin zur Automatisierung und zum Management der kompletten Infrastruktur.
- softwaredefinierte Stromversorgung:** Die Komponenten der Stromversorgung werden über Software in das Management des Rechenzentrums eingebunden. Die erweiterten Steuerungsfunktionen erlauben die Optimierung der Stromversorgung in Abhängigkeit von den jeweiligen Betriebsbedingungen. So kann beispielsweise Energie durch die Absenkung der Betriebsspannung bei Prozessoren, die nicht unter Vollast laufen, eingespart werden (Cantrell/Ostler 2017).
- solare Kühlung:** Es gibt unterschiedliche Wege, um mit Sonnenenergie zu kühlen: Durch Photovoltaik erzeugter Strom kann zum Betrieb von Kompressionskältemaschinen eingesetzt werden. Durch thermische Solaranlagen gewonnene Wärmeenergie kann zum Antrieb von Sorptionskältemaschinen eingesetzt

werden, bei denen der Wärmetransport auf thermochemischen Verfahren basiert. Thermomechanische Systeme schließlich funktionieren ähnlich wie Kompressionskältemaschinen, nutzen aber (solare) Wärmeenergie anstelle von Strom zum Antrieb von Kompressoren (Baunetz Wissen o. J.).

Standby-ready-Architekturen: Die Leistungsfähigkeit von Rechenzentren und Datennetzen wird kontinuierlich erweitert, um selbst bei Spitzenauslastung keine Engpässe oder zeitliche Verzögerungen zu verursachen. Dies führt jedoch in Zeiten schwacher Auslastung zu energetischer Ineffizienz, da IKT-Hardware in der Regel auch im Leerlaufzustand eine hohe Leistungsaufnahme aufweist (oft ca. 50 % der Nennleistung). Das Konzept der Standby-Ready-Architekturen steht für die Idee, durch ein automatisiertes Management einen Teil der nicht benötigten Hardware in einen niedrigeren Bereitschaftszustand zu versetzen, um so in Zeiten schwacher Auslastung die Leistungsaufnahme zu senken.

System on a Chip: Integration aller oder eines großen Teils der Funktionen eines programmierbaren elektronischen Systems auf einem Chip. System-on-a-Chip-Lösungen werden insbesondere bei mobilen Systemen eingesetzt, um diese möglichst klein und energieeffizient zu bauen. Mittlerweile existieren solche Lösungen auch für Rechenzentren.

transformatorlose USV: Die Spannungsumwandlung in USV erfolgt bislang meist mit einem Transformator. Dazu alternativ können Bauteile der Leistungselektronik (z. B. Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) verwendet werden, die eine Umformung elektrischer Energie mit geringeren Wandlungsverlusten erlauben.

unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV): Elektronikkomponenten in einem Rechenzentrum sind auf eine vollständig USV angewiesen. Fällt der Strom auch nur kurzzeitig aus, werden laufende Anwendungen unterbrochen und Daten gehen verloren. Eine typische USV in großen Rechenzentren wird technisch durch Akkuanlagen und Diesel-Notstromaggregate realisiert. Die Akkuanlage arbeitet üblicherweise in einem Double-Conversion Modus. Hierbei wird der gesamte aus dem Versorgungsnetz bezogene Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt, mithilfe von Akkus stabilisiert und dann wieder in Wechselstrom für die Versorgung der Geräte umgewandelt. Dadurch kann auch bei einem abrupten Abbruch der Netzspannung ohne jegliche Unterbrechung Strom aus den Akkus bezogen werden. Parallel dazu werden zum Zeitpunkt des Stromausfalls die Notstromaggregate in Betrieb genommen, die wenige Minuten später die Stromversorgung des Rechenzentrums übernehmen.

unterschiedliche Kühlzonen im Rechenzentrum: Um die Betriebsanforderungen unterschiedlicher IT-Geräte in einem Rechenzentrum zu gewährleisten, wird eine zentrale Klimatisierung auf das thermisch empfindlichste Gerät ausgerichtet. Durch die Einrichtung thermisch getrennter Kühlzonen und Aufteilung der Geräte gemäß ihren jeweiligen Anforderungen kann der Energieeinsatz für die Kühlung reduziert werden.

Videokompression: An der Verbesserung bestehender und Entwicklung neuer Technologien für die Videokompression wird kontinuierlich gearbeitet. Wichtiger Treiber ist die steigende Nutzung von Videoportalen und -streamingdiensten. Effiziente Videokompressionsverfahren sind sowohl für mobile Anwendungen bei ggf. niedrigen Datenübertragungsraten als auch für die (künftige) Nutzung von hochqualitativen und datenintensiven Videotechnologien wie 4K Ultra HD, 360-Grad-Video oder Virtual Reality notwendig (Aaron/Cock 2018). Fortschritte bei der Videokompression wirken sich direkt auf das zu übertragende Datenvolumen und damit auf den Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen aus. Allerdings besteht die Gefahr des Reboundeffekts, wonach infolge der dadurch ermöglichten Qualitätsverbesserungen die Nutzung entsprechender Angebote stark ansteigt.

wassergekühlte Umrichter: Die Umwandlung von Strom (Wechsel-/Gleichstrom, Spannungsänderung) ist mit Energieverlusten verbunden, die in Form von Wärmeenergie abgegeben werden. Durch eine Wasserkühlung der Anlagen könnte diese Wärmeenergie im Vergleich zur Luftkühlung effizienter abgeführt und ggf. verwertet werden.