



CENTRAL OFFICE 2030 – EFFEKTIVE, NACHHALTIGE UND RESILIENTE TELEKOMMUNIKATIONSNETZE IM ENERGIESYSTEM

Szenarien zur Modellierung von Telekommunikationsnetzen im Energiesystem

Dr. Severin Beucker

Simon Hinterholzer

Julian Balkowski

unter Mitarbeit von:

Saskia Spiegelburg

Marius Tillmanns

IMPRESSUM

KURZTITEL

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENERGIESYSTEM

AUTORINNEN UND AUTOREN

Dr. Severin Beucker (Borderstep Institut)
Simon Hinterholzer (Borderstep Institut)
Julian Balkowski (Borderstep Institut)

unter Mitarbeit von:

Saskia Spiegelburg (E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen)
Marius Tillmanns (E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen)

KONSORTIALFÜHRUNG

Deutsche Telekom AG
Dr. Andreas Gladisch
Winterfeldtstr. 21 | 10781 Berlin | www.telekom.com

PROJEKTPARTNER

Deutsche Telekom AG
Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen
Technische Universität Darmstadt

ZITIERVORSCHLAG

Beucker, S., Hinterholzer, S., Balkowski, J., Spiegelburg, S. & Tillmanns, M. (2024). Szenarien zur Modellierung von Telekommunikationsnetzen im Energiesystem. Berlin: CO 2030 Konsortium.

FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt CO 2030 wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie seinem Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Summary	1
1 Einleitung.....	2
2 Rahmenbedingungen für die Szenarien	4
2.1 Gegenstand der Analyse	4
2.2 Zeitraum von Szenarien	5
2.3 Politische Zielvorgaben für Szenarien	5
2.4 Entwicklung von Telekommunikations- und Energiesystemen	7
2.5 Bewertung von Klimarisiken	9
2.6 Annahmen zur Bereitstellung von Abwärme, Flexibilität und Grünstromversorgung.....	10
3 Leit- und Subindikatoren der Szenarien	11
4 Auswahl und Beschreibung von Szenarien.....	18
4.1 Ambitioniertes Szenario.....	20
4.2 Business-as-usual Szenario	22
4.3 Dynamisches Szenario	24
5 Fazit: Auswirkung auf die Arbeiten in CO 2030	27
Quellen	28
Anhang 1	31

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Entwicklung des Breitbandvolumens in Deutschland, historische Entwicklung und Zukunftsszenarien	19
--	----

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Leit- und Subindikatoren werden für die Entwicklung des Telekommunikations- und Energiesystems.....	12
Tabelle 2: Annahmen zu Szenarien.....	31

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Langfassung
5G	Fünfte Generation des Mobilfunks, Mobilfunkstandard
6G	Sechste Generation des Mobilfunks, Mobilfunkstandard
EB	Exabyte
KI	Künstliche Intelligenz
KSG	Klimaschutzgesetz
PPA	Power Purchase Agreement
PUE	Power Usage Effectiveness
RCP	Repräsentative Konzentrationspfade
SSP	Sozioökonomische Pfade
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VR	Virtuelle Realität
WUE	Water Usage Effectiveness

SUMMARY

Der vorliegende Bericht ist im Rahmen des Forschungsvorhabens „CO 2030: Effektive, nachhaltige und resiliente Telekommunikationsnetze im Energiesystemen“ entstanden¹. Das Vorhaben analysiert, wie zukünftig Telekommunikationsnetze unter sich verändernden informations- und energietechnischen Rahmenbedingungen sowie dem Klimawandel nachhaltig und störungssicher (resilient) betrieben werden können. Dies geschieht am Beispiel der Deutschen Telekom, die als zentraler Akteur der Telekommunikationswirtschaft in Deutschland über das größte Fest- und Mobilfunknetz verfügt. Neben der Analyse verfolgt das Vorhaben auch das Ziel, Konzepte für einen entsprechenden Betrieb von Telekommunikationsnetzen zu entwickeln.

Um Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Telekommunikationsnetzes und seines Umfelds machen zu können, ist es notwendig abzuschätzen, wie sich die Technik, das Telekommunikations- und Energienetz sowie das Klima in Deutschland entwickeln. Dafür werden in diesem Bericht Szenarien definiert, die mögliche Zustände und Rahmenbedingungen für den Betrieb von Telekommunikationsnetzen z.B. im Jahr 2030 zusammenfassen. Beschrieben werden die Szenarien durch die Entwicklung von Einflussfaktoren, die den Kategorien Klima, Energie und Telekommunikation zugeordnet sind. Das Ziel der Beschreibung und Bewertung dieser Faktoren ist es nicht, alle möglichen technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen oder klimatischen Entwicklungen zu erfassen. Dies wäre angesichts der zur Verfügung stehenden Zeit und der Komplexität des Themenfeldes weder möglich noch zielführend.

Stattdessen haben sich die Projektpartner darauf geeinigt, drei mögliche Szenarien (Ambitioniert, Business-as-Usual und Dynamisch) mit einer begrenzten Anzahl von Einflussfaktoren zu erfassen. Diese Szenarien stellen eine Auswahl möglicher Entwicklungen dar, denen vergleichbare Grundannahmen (z.B. Anstieg des Datenverkehrs in den Telekommunikationsnetzen, Ausbau erneuerbarer Energien oder Anstieg von Durchschnittstemperaturen) zugrunde liegen. Die Unterschiede in den Szenarien liegen dagegen in der Geschwindigkeit und Dynamik, mit der sich die Rahmenbedingungen ändern. Diese Informationen sind wichtig, da sie Einfluss darauf haben, wie schnell und an welchen Standorten eine Anpassung des Telekommunikationsnetzes erforderlich sein wird. Die Szenarien bilden damit auch die Grundlage für weitere Arbeitspakete und Ergebnisse wie die Entwicklung von Potenzial- und Risikokarten, die z.B. Möglichkeiten einer regenerativen Energieversorgung, der Nutzung von Abwärme oder einer notwendigen Anpassung der Kühlleistung ausweisen sollen.

¹ Das Forschungsvorhaben CO 2030 wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie seinem Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH gefördert. Forschungspartner sind die Deutsche Telekom AG, das Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, das E.ON Energy Research Center der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen sowie der Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Für weitere Informationen zum Vorhaben siehe: www.centraloffice2030.de

1 Einleitung

Telekommunikationsdienstleistungen sichern Grundbedürfnisse von Menschen und der Wirtschaft nach Informationsaustausch. Sie sind aus der heutigen Lebens- und Wirtschaftsweise nicht mehr wegzudenken. Mit der rasanten Entwicklung dieser Dienstleistungen geht jedoch ein wachsender Energie- und Ressourcenverbrauch einher (Lambert et al., 2012; Lundén, Malmodin, Bergmark, & Lövehagen, 2022; Stobbe et al., 2015). Die komplexe Infrastruktur muss, um mit den gewachsenen Anforderungen an Ausfallsicherheit und Klimaschutz Schritt zu halten, weiterentwickelt werden. Im Projekt CO 2030 werden daher Konzepte für einen nachhaltigen und resilienten Betrieb des Telekommunikationsnetzes und der -infrastruktur entwickelt. Dies geschieht am Beispiel der Deutschen Telekom AG, die über das größte Fest- und Mobilfunknetz in Deutschland verfügt. Über diese Netze werden Internetzugang, Telefonie, Fernsehangebote, Datendienste, etc. für Haushalte und gewerbliche Kunden angeboten.

Die Infrastruktur der Telekom kann in Kern(Core)-, Aggregations- und Zugangsknotenpunkte (Access) unterteilt werden, die hierarchische Vermittlungsebenen darstellen, die wiederum über Datenleitungen (z.B. Glasfaser, Kupfer etc.) miteinander verbunden sind (Kosiankowski, D., Jäger, M., & Düser, M., 2023). Hinzu kommt ein stark wachsendes Mobilfunknetz, das sich in den letzten Jahrzehnten als Ergänzung zum Festnetz entwickelt hat und sowohl technische als auch örtliche Überschneidungen mit dem Festnetz besitzt. Insgesamt hat sich die Netzinfrastruktur für Telekommunikation durch den Technologiewandel der letzten Jahrzehnte stark verändert. Während sie ursprünglich für eine analoge Übertragung von (Telefon-)Gesprächen und Vermittlung ausgelegt war, so dient sie heute der Bereitstellung digitaler Dienste wie Voice-over-IP, Internetzugang, Streaming, etc. Mit dieser Ausweitung der Anwendungen hat sich nicht nur die eingesetzte Technik fundamental verändert, auch der Energiebedarf ist gestiegen (Clausen, Beucker, & Hintemann, 2013; Stobbe et al., 2015). So variiert der elektrische Energiebedarf des Telekommunikationsnetzes der Deutschen Telekom der letzten Jahre zwischen ca. 2,2 bis 2,9 TWh. Durch den Ersatz energieintensiver, analoger Vermittlungstechnik durch Digitalisierung konnte v.a. in den letzten Jahren Energie eingespart werden (Lange, C., 2023). Zukünftig wird jedoch mit einem weiteren Anstieg des Energiebedarfs aufgrund enorm wachsender Datenmengen und Kommunikationsdienstleistungen sowie höherer Anforderungen (z.B. Bandbreite und Latenz) gerechnet (Hintemann et al., 2022).

In Verbindung mit dem Energieverbrauch besteht die große Herausforderung bei der Weiterentwicklung der Telekommunikationsnetze und -infrastrukturen in den nächsten Jahren darin, folgende Ziele sicherzustellen:

- Einen sicheren/resilienten Betrieb der Netze bei sich verändernden Klimabedingungen zu gewährleisten. Dies erfordert die Anpassung bestehender Betriebs- und Versorgungskonzepte (z.B. redundante Energieversorgung, robuste Klimatisierungs- und Kühltechnik für höhere Sommertemperaturen), da diese auch auf bevorstehenden Klimaveränderungen sowie zunehmenden Extremwetterereignissen ausgelegt sein müssen.
- Eine vollständige Versorgung der Standorte und der Infrastruktur mit nachweisbar klimaneutraler, regenerativer Energie bei wachsendem Datenverkehr, höherer Leistungsdichte und zunehmendem Stromverbrauch. Dies ergibt sich sowohl aus unternehmenspolitischen wie auch aus rechtlichen Anforderungen². Zudem gerät die bestehende Praxis der

² Siehe z.B. die Verschärfung umweltpolitischer Ziele auf europäischer (siehe z.B. Green Deal der EU) und auf nationaler Ebene. In Deutschland werden im Klimaschutzgesetz sektorbezogene Ziele für die Emissionsminderung festgelegt und der Entwurf des Energieeffizienzgesetzes sieht vor, in Rechenzentren hohe Versorgungsquoten für erneuerbaren Strom sowie die Abwärmenutzung festzuschreiben.

Ökostromversorgung über Zertifikate zunehmend in die Kritik und es wird ein Bezug von erneuerbaren Energien aus eindeutigen Quellen sowie mit Herkunftsnachweis angestrebt³.

- Eine Integration der Standorte in ein neues, flexibleres Energiesystem. Dies baut auf der Erkenntnis auf, dass in einer auf den erneuerbaren Energien Wind und Fotovoltaik basierenden Versorgung die zeitliche und räumliche Flexibilität des Energieverbrauchs und der -erzeugung von hoher Bedeutung ist.

Das Vorhaben CO 2030 soll die Herausforderung, die aus dem Wandel des Telekommunikations- und Energiesystems entsteht, analysieren und Lösungsmöglichkeiten zur Entwicklung der Telekommunikationsinfrastruktur aufzeigen. Das Borderstep Institut entwickelt dafür mit den Projektpartnern Szenarien, die die mögliche Weiterentwicklung der Telekommunikationsnetze und -infrastrukturen am Beispiel der Deutschen Telekom beschreiben.

In einem ersten Schritt (siehe Kap. 2) werden die Rahmenbedingungen (das zu untersuchende System sowie wichtige Grundannahmen) für die Analyse definiert. Aufbauend auf den Rahmenbedingungen werden Einflussfaktoren beschrieben (siehe Kap. 3), mit deren Hilfe die Szenarien und ihre Entwicklung abgeschätzt werden können. Die Einflussfaktoren können auch als Leitindikatoren für die zukünftige Entwicklung des Telekommunikationsnetzes und des Energiesystems verstanden werden. Die Einflussfaktoren können selber wiederum von Teil-Faktoren und Rahmenbedingungen abhängen (z.B. dem Ausbau erneuerbarer Energien, der Energiepreisentwicklung oder auch Technologieentwicklungen) und sind für die Modellierung und Bewertung der zukünftigen Rolle von Telekom-Standorten im Energiesystem wichtig. Ihre Entwicklung entscheidet darüber, welche Standorte mit welchen Maßnahmen zukünftig zum Klimaschutz und einem stabilen Energiesystem beitragen können.

Schließlich werden mit Hilfe der Szenariotechnik ausgewählte und wahrscheinliche Zustände (z.B. ambitionierte Entwicklung oder Business-as-usual) in der Zukunft beschrieben (siehe Kap. 4). In den Szenarien wird mit Hilfe der Einflussfaktoren und ihrer Ausprägung festgehalten, welche klimatischen, technologischen und wirtschaftlichen Trends die Entwicklungen des Telekommunikationsnetzes und des Energiesystems in den nächsten Jahren am wahrscheinlichsten beeinflussen werden. Ziel ist dabei nicht, möglichst viele Kombinationen der Einflussfaktoren zu analysieren, sondern Zustände zu beschreiben, die nach Einschätzung der Expertinnen und Experten des Projektkonsortiums charakteristische und mögliche Entwicklungspfade des Telekommunikationsnetzes abbilden. Diese Pfade weichen voneinander ab, denn sie berücksichtigen, dass die Entwicklung von Technik und Nachfrage nach Telekommunikation ebenso unterschiedlich verlaufen kann, wie der Umbau des Energiesystems und -marktes oder der Klimawandel selbst.

Die Entwicklung der Szenarien bildet wiederum die Grundlage für Folgearbeiten im Projekt CO 2030, z.B. in AP 1 (Bewertung des Potentials für Energie- und Systemdienstleistungen, Entwicklung von Potentialkarten, etc.) sowie in AP 3 (Technologieroadmaps und -radare, Analyse von Abhängigkeiten von Energie- und Telekommunikationsnetzen, etc.).

³ Die Kritik an eindeutigen Herkunftsnachweisen für Ökostrom nimmt stetig zu. Dies gilt insbesondere für den in Norwegen erzeugten Ökostrom, der nach aktuellen Berichten doppelt verbucht wird, da er zum einen von norwegischen Unternehmen in Anspruch genommen und gleichzeitig als Zertifikat verkauft wird (siehe z.B. www.zeit.de/wirtschaft/2023-07/oekostrom-zertifikate-norwegen-klimabilanz, Abruf Dezember 2023). Eine Dekarbonisierung der Energiesysteme erfordert dagegen einen eindeutigen Herkunftsnachweis für erneuerbaren Strom. Initiativen wie „EnergyTag“ (2022) zielen darauf ab, neue Standards für erneuerbaren Strom zu etablieren.

2 Rahmenbedingungen für die Szenarien

2.1 Gegenstand der Analyse

Gegenstand der Analyse ist das Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom, welche aus den folgenden Elementen besteht:

- Ca. 20 Standorte des Kernnetzes (sog. Core-Standorte) mit etwa 1 MW elektr. Leistung. Diese befinden sich in den Zentren großer Städte oder in Ballungsgebieten. Sie dienen der Telekommunikation (TK), der Internetnutzung und der Colocation für andere Netzbetreiber sowie private und gewerbliche Kunden in Großstädten.
- Ca. 900 Standorte des Aggregationsnetzes mit einigen hundert kW elektr. Leistung. Sie dienen v.a. der Unterstützung von Colocation sowie der Bündelung von TK und Datenverkehr privater Kunden in mittleren Städten.
- Mehr als 6.000 Ortsstationen, die je nach Anzahl der Anschlüsse sehr heterogen sind und die v.a. in kleinen Städten und ländlichen Gebieten die Anbindung an das (Aggregations-)Netz sicherstellen.
- Dem Transportnetz (Glasfaser) zwischen den Standorten, über das die eigentliche Kommunikation bzw. der Datentransfer zwischen o.g. Standorten erfolgt. Kupfer- und drahtgebundene Leitungen kommen nur noch teilweise zwischen den Ortsstationen bzw. den Hausanschlüssen und dem Anschluss in den Haushalten zum Einsatz.
- Dem Mobilfunknetz mit ca. 34.000 Sendemasten bzw. Stationen, das neben dem Festnetz eine parallele Dateninfrastruktur bildet. Über dieses Netz werden die mobile Kommunikation sowie der mobile Datenverkehr abgewickelt. Die technischen Einrichtungen des Mobilfunknetzes sind z.T. auf Standorten des Festnetzes (z.B. Aggregationsnetz oder Ortsstationen) sowie unabhängig davon angesiedelt. Zwischen Mobilfunknetz und Festnetz gibt es zahlreiche Beziehungen und Übergabepunkte zur Gesprächsvermittlung und Datenübergabe.

In die Analyse von CO 2030 werden zunächst die größeren Standorte der Deutschen Telekom (ca. ab einer Anschlussleistung von 500 kW) auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland einbezogen, welche zur Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Telekommunikationsdaten dienen. Die Fokussierung auf größere Standorte erfolgt, da davon ausgegangen wird, dass sich diese einfacher als flexible Stromabnehmer und -quellen in das Netz integrieren lassen. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass mit der Weiterentwicklung der Energiewende zukünftig auch deutlich kleinere Standorte (< 100 kW Anschlussleistung) als Flexibilität im Stromnetz interessant werden. So können z.B. mehrere solcher Anlagen im Verbund (virtuelles Kraftwerk) genutzt bzw. vermarktet werden und damit lokal Stromnetze stabilisiert werden.

Auch aus Sicht der Abwärmenutzung ist eine Konzentration auf größere Standorte zunächst vielversprechender, da die Wärme damit eher in städtischen Gebieten mit bereits bestehenden Wärmenetzen anfällt und damit für die Wärmeversorgung genutzt werden kann.

Gesondert betrachtet werden die Standorte des Mobilfunknetzes, die aufgrund ihrer höheren Anzahl und flächigen Verteilung zwar punktuell gesehen keine großen Energieverbräuche verursachen, in Summe (d.h. deutschlandweit) jedoch signifikante und steigende Verbräuche aufweisen. Diese Standorte in eine regenerative und flexiblere Energieversorgung zu integrieren ist eine große Herausforderung.

2.2 Zeitraum von Szenarien

Der Titel des Vorhabens CO 2030 verweist darauf, dass das Jahr 2030 ein wichtiges Referenzjahr für die Szenarien, Einflussfaktoren sowie Konzepte für nachhaltige Telekommunikationsnetze und -infrastrukturen ist. Dies lässt sich aus zahlreichen Zwischenzielen der Klimapolitik und der Energiewende (siehe z.B. KSG) ableiten. Für die Entwicklung des Telekommunikations- und Energiesystems ist zudem das Jahr 2045 eine wichtige Zielmarke, da bis zu diesem Zeitpunkt eine Treibhausgasneutralität erreicht sein und der größte Teil der Energieversorgung regenerativ erfolgen soll (Sensfuß & Maurer, Christoph, 2022). Die Forschungspartner gehen zudem davon aus, dass sich viele langsam absehbare Änderungen im Telekommunikations- und Energiesystem, z.B. der Einsatz neuer energieeffizienter Netztechnik oder flexible, regenerative Energieversorgungsansätze, erst nach dem Jahr 2030 in der gesamten Breite der Infrastruktur niederschlagen werden. Dies ist durch längerfristige Technologiezyklen sowie Investitionsentscheidungen begründet.

Hinzu kommt, dass je nach Quelle die Zieljahre und Zeiträume deutlich variieren. So werden im Klimaschutzgesetz (KSG) der Bundesregierung sowie in den Langfristszenarien für den Ausbau erneuerbarer Energien (Sensfuß & Maurer, Christoph, 2022) die Jahre 2035, 2040 und 2045 genannt. Der Netzentwicklungsplan nennt wiederum nur das Jahr 2030 als Zielmarke (50Hertz, Amprion, TenneT, & TransnetBW, 2019). Die für die Szenarientwicklung in CO 2030 gewählten Jahre 2030 und 2045 werden in mehreren der Quellen genutzt, sie liefern daher nachvollziehbare und kombinierbare Zielmarken.

2.3 Politische Zielvorgaben für Szenarien

Klimapolitische Zielsetzungen

Die in CO 2030 entwickelten Szenarien sollen Aussagen darüber ermöglichen, wie ein zukunftsfähiger Betrieb von Telekommunikationsinfrastrukturen

- (1) unter veränderten Klimabedingungen möglich ist und
- (2) wie dies weitgehend klimaneutral (z.B. durch eine regenerative Stromversorgung und Nutzung der entstehenden Abwärme) erfolgen kann.

Diese Ziele lassen sich aus den klimapolitischen Vorgaben der Bundesregierung ableiten, die die Dekarbonisierung digitaler Infrastrukturen als eine zentrale Aufgabe nennen⁴. Daraus folgt in den nächsten Jahren konsequenterweise das Ziel eines klimaneutralen Betriebs von Rechenzentren sowie Telekommunikationsinfrastrukturen in Deutschland. Ähnliche Vorgaben werden durch die Europäische Union definiert. Dort wird der rechtliche Rahmen für eine weitgehend klimaneutrale Stromversorgung von Rechenzentren sowie einer besseren Nutzung der Abwärme vorbereitet⁵.

Neben den klimapolitischen Zielsetzungen für den Betrieb digitaler Infrastrukturen haben sich viele Betreiber von Rechenzentren in Europa in einer Selbstverpflichtung dazu bekannt, ihre Rechenzentren bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu betreiben. So ist der europäische „Pakt für klimaneutrale Rechenzentren“⁶ eine Selbstregulierungsinitiative, die den Green Deal der EU unterstützt und sicherstellen soll, dass die Rechenzentrumsbranche bis 2050 klimaneutral wird. Bis zum Jahr 2030 sollen

⁴ Siehe das Ziel eines klimaneutralen Betriebs von Rechenzentren ab dem Jahr 2027 in der Koalitionsvereinbarung (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, & FDP, 2021)

⁵ Siehe die Neufassung der Energy Efficiency Directive unter: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en (Abruf Dezember 2023)

⁶ Siehe www.rechenzentren.org/allgemein/climate-neutral-data-centre-pact-gewinnt-an-tempo/#:~:text=Der%20Pakt%20für%20klimaneutrale%20Rechenzentren,bis%202050%20Klimaneutralität%20zu%20erreichen (Abruf Dezember 2023)

sich Rechenzentren demnach vollständig (stündlich verifiziert) mit 100 % CO₂-neutraler Energie versorgen. Vergleichbar sieht das deutsche Energieeffizienzgesetz eine Versorgung von Rechenzentren mit 100 % erneuerbaren Energien (bilanziell) bis zum Jahr 2027 vor (EnEfG, 2023).

Außerdem ergeben sich durch das bereits beschlossene Energieeffizienzgesetz (Deutschland) bzw. der Energy-Efficiency-Directive (EU) neue gesetzliche Vorgaben für den Betrieb von den Rechenzentrumsstandorten, insbesondere für Energie- und Wassereffizienz (PUE, WUE), Abwärmenutzung, Transparenzvorgaben etc. Grüne Zertifikatslösungen für die Versorgung mit erneuerbarem Strom mit jährlicher Bilanzierung sind zudem in letzter Zeit stark in die Kritik geraten, weshalb die Nutzung von Echtzeit-Herkunftsnachweisen für erneuerbare Energie in Rechenzentren wahrscheinlicher wird (siehe Kap. 1).

Digitalpolitik

Neben der Klimapolitik bilden die digitalpolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung sowie der EU den Hintergrund für die Entwicklung und den Ausbau von Telekommunikationsnetzen und -infrastrukturen. Die Europäische Union hat die folgenden Ziele zum Ausbau von Festnetzen und Mobilfunks bis zum Jahr 2025 formuliert (European Commission, 2021):

- Ausbau von 100-Mbit/s-Netzen, die bis 2025 alle europäischen Haushalte erreichen sollen, mit der Möglichkeit, diese Netze aufzurüsten, um wesentlich höhere Geschwindigkeiten zu erreichen,
- Gigabit Konnektivität zur Verbindung aller wichtigen sozioökonomischen Einrichtungen,
- ununterbrochene 5G Abdeckung in allen städtischen Gebieten und auf allen wichtigen terrestrischen Transportwegen zur Verbindung von Menschen und Objekten,
- Zugang zu mobiler Datenkonnektivität überall dort, wo Menschen leben, arbeiten, reisen und sich begegnen.

Parallel hierzu kann davon ausgegangen werden, dass hohe Investitionen im privaten Sektor sowie Forschungsförderung (z.B. Künstliche Intelligenz, Web 4.0/Metaverse, Connected-Mobility) zu einem deutlichen Ausbau digitaler Infrastrukturen führen werden, die wiederum einen Anstieg der zu verarbeitenden und zu transportierenden Datenmengen zur Folge haben.

In ihrer Gigabitstrategie setzt sich die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2025 für 50 % aller Haushalte und Unternehmen in Deutschland einen Glasfaseranschluss verfügbar zu machen – bis 2030 soll Glasfaser flächendeckend (überall wo Menschen leben und arbeiten oder unterwegs die neueste Mobilfunkgeneration nutzen) verfügbar sein (Bundesregierung Deutschland, 2023). Weitere Projekte der Bundesregierung (z.B. elektronische Patientenakte, Ökosystem für Mobilitätsdaten, Digitalpakt Schule, vertrauenswürdige Künstliche Intelligenz, etc.) setzen eine leistungsfähige und zuverlässige digitale Infrastruktur voraus.

Auf europäischer Ebene wurden zudem Vorhaben wie GAIA-X initiiert, welche vernetzte Datenräume mit festen Standards und offenen Schnittstellen schaffen sollen. Dies soll dazu dienen, sichere europäische Dienste übergreifend von Anbietern digitaler Kapazitäten (Rechenzentren/Netze) bereitzustellen und einen umfassenden Datenschutz zu gewährleisten (Gaia-X Hub Germany, 2022). Mit den herstellerübergreifenden Standards sollen kleinere (ggf. europäische) Anbieter von Cloud-Diensten besser kooperieren können. Sie sollen damit ein Cloud-Ökosystem bereitstellen können, welches mit dem Umfang großer internationaler Anbieter vergleichbar wird.

2.4 Entwicklung von Telekommunikations- und Energiesystemen

Entwicklung von Telekommunikationsnetzen und -infrastruktur

Für die Entwicklung der Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Struktur des Telekommunikationsnetzes der Deutschen Telekom, bestehend aus Fest- und Mobilfunknetz (siehe oben), weiter besteht und für zukünftige Anforderungen ausgebaut wird. Eine zukünftige Verdichtung oder Disaggregation der Standorte ist demnach abhängig von technischen Entwicklungen und Trends (z.B. neue Router- und Servertechnik, Cloudifizierung, Edge Computing) sowie der Nachfrage nach Telekommunikationsdienstleistungen (z.B. Streaming und Gaming) durch Kunden und den Markt. Für das Mobilfunknetz wird von einer wachsenden Dichte an Basisstationen ausgegangen, die vor allem durch die verstärkte Nutzung neuer Mobilfunktechniken (5G, 6G, etc.) sowie mobiler Anwendungen und Telekommunikationsdienstleistungen durch die Gesellschaft und die Wirtschaft vorangetrieben wird.

Haupttreiber einer steigenden Nachfrage nach Telekommunikationsdienstleistungen werden vermutlich neue, ressourcenintensive Anwendungen (Streaming, Gaming, autonome Anwendungen in Produktion und Verkehr, etc.) sein, die zu einer deutlichen Zunahme des Datenvolumens führen und ggf. auch neue Anforderungen an Signallaufzeiten (Latenzen) stellen (Fredrik et al., 2023). Dies wird sich auf die Ausrüstung der Standorte des Telekommunikationsnetzes auswirken und erfordert leistungsfähigere Router und Server (mit neuen Chiparchitekturen), etc. Ein wesentlicher Teil der Leistungssteigerung in der Informations- und Kommunikationstechnik wird nach aktuellen Prognosen durch Miniaturisierung (Moore's Law) erreicht werden und damit zu einer höheren Leistungsdichte der Technik führen (Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi, & Stickler, 2020).

Die prognostizierte Leistungssteigerung geht mit großer Wahrscheinlichkeit auch mit einem höheren Strombedarf und Abwärme sowie einem wachsenden Kühlbedarf einher. Hinzu kommt, dass durch klimatische Veränderungen (z.B. steigende Durchschnittstemperaturen und sommerliche Extremwerte) die Notwendigkeit einer stärkeren Kühlung von IKT-Standorten ansteigt. So kann ein selbstverstärkender Effekt aus wachsender Leistungssteigerung und höherem Kühlbedarf an IKT und TK-Standorten entstehen. Mit steigenden Temperaturen an und in den Standorten werden damit aber auch effektivere Kühltechniken (z.B. Flüssigkühlung) relevant, mit denen wiederum Abwärme leichter in Wärmenetzen genutzt werden kann.

Im Mobilfunknetz wird der Strombedarf aufgrund vergleichbarer Effekte (Internetdienste und ressourcenintensive Anwendungen) ebenfalls ansteigen (Hintemann et al., 2022). Im Gegensatz zum Festnetz wird sich der Energiebedarf des Mobilfunknetzes jedoch vermutlich diffuser und in der Fläche verteilt entwickeln, da er an den dezentralen Basisstationen auftritt. Während die Zunahme des Energieverbrauchs im Telekommunikationsnetz als relativ wahrscheinlich gilt, besteht Unsicherheit über das Ausmaß und die Höhe der Zunahme. Die Prognosen hierzu weichen stark voneinander ab. Sie variieren zwischen gleichbleibenden Verbräuchen (Lundén et al., 2022) bzw. einer Verdopplung bis Versiebenfachung des Energieverbrauchs (siehe z.B. Hintemann et al., 2022). Grund für die großen Unterschiede sind die zugrunde gelegten Annahmen über die technische Entwicklung und den Datenverkehr.

Für die Erstellung der Szenarien folgt daraus, dass geeignete Indikatoren zur Entwicklung von Telekommunikationsnetzen und -infrastruktur identifiziert werden müssen, um mit der komplexen Wirkung und den Unsicherheiten bei der Vorhersage dieser Zukunftstrends umzugehen. Solche Indikatoren sind z.B. die Entwicklung des Stromverbrauchs und der Abwärmeleistung eines Standorts oder die Traffic-Entwicklung in einem definierten Punkt des Fest- bzw. Mobilfunknetzes.

Entwicklung des Energiesystems

Der Umbau der Energieversorgung in Deutschland wird von zahlreichen klima- und umweltpolitischen Zielen beeinflusst. Diese sind z.B. die im Klimaschutzgesetz formulierten Emissionsminderungsziele (Die Bundesregierung, 2021) und der im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) geregelte Ausbau von erneuerbaren Energien (Bundesjustizministerium, 2014). Darüber hinaus können folgende Studien zur Abschätzung der Entwicklung des Energiesystems herangezogen werden (sog. Big5-Studien):

- „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“, diese untersucht den Einfluss der Energiesektoren Strom, Gebäude, Verkehr und Industrie sowie ihre Wechselwirkungen, um daraus eine Gesamtstrategie zu entwickeln (Dena, 2018).
- „Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“, Studie mit Szenarien für volkswirtschaftlich optimierte CO₂-Reduktionspfade in wichtigen Sektoren Deutschlands (Boston Consulting Group, 2021).
- „Klimaneutrales Deutschland 2045“, die Studie von Agora und der Stiftung Klimaneutralität zeigt auf, dass Klimaneutralität und damit die Erreichung der im KSG formulierten Ziele im Jahr 2045 erreicht werden kann (Dambeck et al., 2021).
- „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“, dahinter steht eine Szenarienanalyse für Transformationspfade zur Klimaneutralität 2045 in Deutschland, die als Modellvergleich im Rahmen des Ariande-Kopernikus-Projekts entstanden ist (Kopernikus-Projekt Ariadne, 2021)
- „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, darin werden Szenarien für die Erreichung der Treibhausgasneutralität in Deutschland mit jeweils stark ausgeprägter Nutzung der Hauptenergieträger Strom, Wasserstoff und synthetische Kohlenwasserstoffe beschrieben (Sensfuß & Maurer, Christoph, 2022).

Darüber hinaus stellt der „Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045“, eine wichtige Quelle dar. In ihm wird die Planung des Höchstspannungsnetzes von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern 50Hertz, Amprion, TenneT und TransnetBW beschrieben (Übertragungsnetzbetreiber, 2023). Während die im KSG genannten sektorbezogenen Ziele für die Emissionsminderung bis zum Jahr 2045 rechtlich verbindlich sind, dienen die Langfristszenarien für die Entwicklung des Energiesystems als Orientierungshilfe für die umweltpolitische Planung und Gesetzgebung. Ob die im KSG und den Szenarien formulierten (Zwischen-)Ziele mit der aktuellen Klima- und Energiepolitik erreicht werden können, ist teilweise umstritten. Eine Verschärfung der Klima- und Energiekrise - die Energiepreisentwicklung der letzten zwei Jahre ist ein Beispiel dafür - kann den Wandel jedoch deutlich beschleunigen. Schon heute führt die Energiewende zu technisch-physikalischen und auch marktlichen Veränderungen im Energiesystem. So sind die hohen Anteile erneuerbarer Energien im Stromnetz, die tages- und jahreszeitlich in unterschiedlichen Mengen zur Verfügung stehen, Ursache für einen beschleunigten Ausbau des Übertragungs- und Verteilnetzes (siehe z.B. Bau der Stromtrassen Südostlink und Sümlink sowie Netzentwicklungsplan⁷). Neben der zentralen Erzeugung erneuerbarer Energien (Wind- oder Solarparks, etc.), nimmt auch die dezentrale Eigenerzeugung in Kommunen sowie durch Privatpersonen zu, was an vielen Stellen eine Modernisierung der elektrischen Verteilnetze erfordert.

Das schwankende Dargebot erneuerbarer Energien verstärkt insgesamt die Preisvolatilität von Strom und schlägt sich zunehmend in Extrema der Strompreise am Energiemarkt⁸ sowie in variablen Tarifen nieder, die auch für Endkunden verfügbar werden. Um Angebot und Nachfrage besser auszugleichen, werden daher auch Speichermöglichkeiten sowie Flexibilitäten beim Stromverbrauch und der -

⁷ Siehe www.netzausbau.de/Wissen/Ausbaubedarf/Netzentwicklungsplan/de.html (Abruf Dezember 2023).

⁸ Siehe die schwankenden Preise für Strom auf dem Spotmarkt www.epexspot.com/en.

erzeugung benötigt. Flexibilitäten können wiederum durch zeitlich variable Strompreise am Elektrizitätsgroßhandel (Spotmarkt), dem Markt für Regelleistung sowie Lastmanagement (z.B. §14a EnWG) finanziell angeregt werden (Severin Beucker et al., 2021). Hieraus resultieren Anreize für die Betreiber von Telekommunikationsnetzen sowie IKT-Infrastrukturen, ihre Anlagen und Technik (z.B. Notstromaggregate, Batterien, Brennstoffzellen, etc.) für eine lastvariable und strommarkbasierte Steuerung zur Verfügung zu stellen.

Durch die anstehende kommunale Wärmeplanung gemäß dem „Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze“ verbessern sich zudem die Bedingungen (Preise, Anschlusskosten, etc.) für die Nutzung von Abwärme aus Telekommunikationsnetzen und IKT-Infrastrukturen. Aufgrund der aktuellen Energiepreisentwicklungen wird davon ausgegangen, dass sich die Strompreise mittelfristig auf moderatem Niveau erhöhen werden (abgesehen von der derzeitigen Normalisierung gegenüber des Energiepreisschocks im Jahr 2022 im Zusammenhang mit dem Russischen Angriffskrieg in der Ukraine). Dieser mittelfristige Trend lässt sich sowohl durch die hohen Investitionen in die Energiewende, als auch durch die steigenden Preise für Emissionszertifikate im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) (Pahle, Sitarz, Osorio, & Görlach, 2022) begründen. Erst längerfristig (ab dem Jahr 2035 bzw. 2040) kann mit sinkenden (wenngleich auch volatilen) Preisen aufgrund eines hohen bzw. überschüssigen Angebots erneuerbarer Energien gerechnet werden.

Für die Entwicklung der Szenarien können daraus Indikatoren zur Entwicklung des Energiesystems abgeleitet werden. Dies sind z.B. die Entwicklung und Volatilität von Energiepreisen (Strom und Wärme), der Ausbaugrad erneuerbarer Energien sowie die räumliche und technische Entwicklung (Temperaturniveau) von Wärmenetzen, welche sich wiederum auf die Nutzbarkeit von Abwärme auswirken.

2.5 Bewertung von Klimarisiken

Der Klimawandel hat einen deutlichen Einfluss auf den zukünftigen Betrieb von IKT-Infrastrukturen. Dies wird z.B. an den steigenden Temperaturen (steigende Durchschnittstemperaturen und Extremwerte) deutlich. Diese stellen schon heute eine Herausforderung für den Betrieb von IKT-Infrastrukturen dar, da sie den Energie- und Kühlbedarf in den Sommermonaten verstärken. Auch zunehmende Dürre kann den Betrieb von IKT-Infrastrukturen einschränken, da eine mangelnde Verfügbarkeit von Wasser, besonders an größeren Standorten, den Einsatz von Wasser als Kühlmittel begrenzen kann. Schließlich wird durch Extremwetterereignisse (Sturm, Hochwasser, Niederschläge, etc.) der Betrieb von Standorten beeinträchtigt. Standorte kritischer Infrastrukturen sind zwar üblicherweise auf statistische Extremwetterereignisse (z.B. 100-jährliches Hochwasser) ausgelegt, wenn diese jedoch häufiger eintreten oder wie im Falle der Aartalflut übertroffen werden, kann dies fatale Auswirkungen für den Betrieb haben.

Die Betrachtung von Klimarisiken in der Szenarioentwicklung von CO 2030 orientiert sich an den sozioökonomischen Pfaden (SSP) und repräsentativen Konzentrationspfaden (RCP), die vom Weltklimarat (IPCC) verwendet werden⁹. Daraus wird der Verlauf der Treibhausgaskonzentration für verschiedene Szenarien abgeleitet. Der 6. IPCC-Bericht veröffentlicht Bandbreiten, in denen sich die modellierten globalen Temperaturstiege auf kurzfristige Sicht (2012 - 2040), bis zur Mitte (2041 - 2060) sowie bis zum Ende des Jahrhunderts (2081 - 2100) je nach Pfad voraussichtlich bewegen werden. Im Vergleich zum Referenzzeitraum 1850 - 1900 geht der Weltklimarat je nach Szenario von einem globalen Temperaturanstieg von 1,6 °C bis 2,4 °C bis zur Mitte des Jahrhunderts aus.

⁹ Siehe „Summary for Policymakers“ des IPCC unter: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf (Abruf Dezember 2023)

2.6 Annahmen zur Bereitstellung von Abwärme, Flexibilität und Grünstromversorgung

Um zu bewerten, welche Wirkungen die Szenarien in Bezug auf das Lastmanagement von Strom auf eine Versorgung von Telekommunikationsstandorten mit erneuerbaren Energien oder auf nutzbare Abwärmemengen haben, müssen die Annahmen zu den Standorten weiter präzisiert werden. Für die weitere Betrachtung werden daher Standorte ab einer elektrischen Anschlussleistung von 100 kW berücksichtigt, da bei kleineren Leistungen die Wirtschaftlichkeit von energie- und klimarelevanten Maßnahmen (z.B. Höhe der Lastverschiebung oder des Abwärmepotenzials) unter gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich weniger rentabel erscheinen. Dementsprechend fokussieren die Szenarien, sowie die im Lauf des Vorhabens zu entwickelnden Umsetzungskonzepte, auf größere Standorte mit höheren Anschlusszahlen (Telefon, Internet, etc.), Datenmengen und damit höherem Energiebedarf.

Für die Abwärmenutzung stellt die Entfernung zu einem potenziellen Wärmenetz oder Wärmenutzer in der Regel einen kritischen Faktor für die Wirtschaftlichkeit dar. Deshalb werden in diesem Schritt Abwärmenutzer im Umkreis von ca. einem Kilometer um den Standort berücksichtigt. Hierzu werden Wärmeverbräuche von Gebäuden (Wohn- und Nichtwohngebäude) mit Ortsbezug aus dem EU Projekt Hotmaps verwendet (Hotmaps-Projekt, 2021). Es wird angenommen, dass die Wärmeverbräuche saisonal mit der Außentemperatur schwanken, während Wärme aus den Core- und Aggregationsstandorten des Telekommunikationsnetzes gemäß dem jahreszeitlichen Profil der Standorte abgegeben wird. Wie viele Gebäude durch die Abwärme der Standorte versorgt werden können, hängt wiederum von der täglich abgegebenen Wärmemenge ab, da die Option größerer Wärmespeicher in diesem Schritt vernachlässigt wird. Die verfügbare Abwärme muss somit in der Lage sein, die Spitzenlast der Gebäude (tagesscharf) zu decken. Daraus ergibt sich insbesondere im Sommer ein Anteil an überschüssiger Wärme, der für Abwärmenutzung nicht zurückgewonnen werden kann.

Die durch Rückgewinnung an den Core- und Aggregationsstandorten erzeugte Wärme kann als klimaneutral betrachtet werden, da sie ohnehin als Nebenprodukt des Anlagenbetriebs der Deutschen Telekom anfällt und ansonsten an die Umwelt abgegeben wird. Wird sie genutzt, kann Wärme aus konventioneller, CO₂-intensiver Erzeugung (z.B. Gas) ersetzt werden. Die tatsächliche Nutzbarkeit der Abwärme hängt jedoch stark von den Gebäuden und ihrer Bauweise bzw. dem Sanierungszustand sowie der verwendeten Heiztechnik und der Temperaturen im Heizsystem ab. Es wird angenommen, dass die Abwärme vor allem in Gebäuden mit bisher fossiler Wärme eingesetzt wird. Für einzelne Stichjahre wird daher ein „verdrängter“ Wärmemix mit einem durchschnittlichen CO₂-Faktor (gCO₂/kWh_{Wärme}) angenommen:

- 2030: 240 gCO₂/kWhWärme¹⁰
- 2045: 120 gCO₂/kWhWärme¹¹

Für die Bereitstellung von Flexibilität werden Nachfrageprofile für die Jahre 2030 und 2045 erstellt. Je nach Standort (vor oder hinter einem Netzengpass) kann der Bedarf nach Flexibilität (insbesondere für Engpassmanagement) variieren. Hierzu werden Daten der prognostizierten Redispatch-Maßnahmen zugrunde gelegt. Sollte es zukünftig mehrere Strompreiszonen o.ä. innerhalb Deutschlands geben, würden weitere ortsabhängige Flexibilitätsanreize dazu kommen.

Für die strommarktbezogene Flexibilität kann der CO₂-Faktor mit einer dynamischen Bilanzierung berechnet werden und potenzielle CO₂-Einsparungen eines flexiblen Betriebs quantifiziert werden, vergleichbar mit (Beucker & Hinterholzer, 2022; DIN SPEC 91410-2, 2021).

¹⁰ Verdrängung von Erdgas, Faktor aus Gebäudeenergiegesetz (siehe GEG Anlage 9)

¹¹ Verdrängung von einer Mischung aus Erdgas, Wärmepumpen, Solarthermie etc.; Annahme 50 % des Erdgas Emissionsfaktors

3 Leit- und Subindikatoren der Szenarien

Die in Kap. 2 beschriebenen Annahmen bilden das Fundament zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Telekommunikations- und Energiesystems. Für eine detaillierte Bewertung der Entwicklung werden Leitindikatoren in drei Kategorien (Telekommunikationssystem, Energiesystem, Klimarisiken) in weitere Subindikatoren unterteilt. Mit Hilfe der Leit- und Subindikatoren sollen einzelne Faktoren und ihr Einfluss auf die Entwicklung von Telekommunikationsnetzen und -infrastrukturen ermittelt und bewertet werden. Die Struktur aus Leit- und Subindikatoren wurde gemeinsam von den Projektpartnern entwickelt und verabschiedet. Für ihre Auswahl war maßgeblich, dass diese

- (1) messbare Größen darstellen, die durch eine Zahl bzw. Einheit ausgedrückt werden können, und
- (2) dass es eine verlässliche Quelle (z.B. aus Datenbanken oder Literatur) gibt, mit der die Entwicklung abgeschätzt werden kann.

Die Leit- und Subindikatoren können sowohl für die Szenarien auf nationaler Ebene als auch für die Bewertung eines nachhaltigen und resilienten Betriebs einzelner Standorte (z.B. der Core-Standorte) genutzt werden. Je nach Ziel können sie daher aggregiert oder mit lokalem/ regionalem Bezug erfasst werden. In den nachfolgenden Szenarien (siehe Kap. 4) werden die Indikatoren zunächst zur Beschreibung von möglichen Entwicklungen und Trends auf nationaler Ebene genutzt. Eine Differenzierung nach regionalen oder standortspezifischen Unterschieden kann in weiteren Arbeitsschritten (z.B. Entwicklung von Potentialkarten oder Standortauswahl (siehe AP 1)) vorgenommen werden.

Folgende Leit- und Subindikatoren werden für die Entwicklung des Telekommunikations- und Energiesystems erfasst:

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENGERGIESYSTEM

Tabelle 1: Leit- und Subindikatoren werden für die Entwicklung des Telekommunikations- und Energiesystems

Kategorie	Leitindikatoren [Einheit]	Sub-Indikatoren	Auswirkungen auf Szenario-/ Potentialanalyse
I Klima			
Entwicklung von Klima und Klimarisiken	Temperatur-entwicklung [°C]	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlungshaushalt/ Energieeinstrahlung • Umwandlung latenter Wärme • Mischungseffekte 	<p>höhere Kühlbedarfe</p> <p>erhöhte Lufttemperatur kann ebenfalls die Kühlungsoptionen reduzieren</p>
	Dürre, Bodenfeuchteindex [SMI]	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturentwicklung • Niederschlagsentwicklung • Bodenfeuchte • (Boden-)Trockenheit <p>Mögliche Einheiten u.a. abhängig von Art der Dürre (meteorologisch, hydrologisch, landwirtschaftlich, ökologisch oder sozioökonomisch)</p> <p>Einheit hydrologische Dürre: Bodenfeuchteindex (SMI)</p> <ul style="list-style-type: none"> • SMI 0,20 – 0,30 = ungewöhnliche Trockenheit • SMI 0,10 – 0,20 = moderate Dürre • SMI 0,05 – 0,10 = schwere Dürre • SMI 0,02 – 0,05 = extreme Dürre • SMI 0,00 – 0,02 = außergewöhnliche Dürre 	<p>bei zunehmender Dürre kann Wasser für die Kühlung knapp werden</p>

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENGERGIESYSTEM

		Einheit meteorologische Dürre: Standardized Precipitation Evapotraspiration Index (SPEI) in %	
	Hochwasser/Überschwemmungen [Anzahl Flusshochwasserereignisse/Jahr]	<p>Mögliche Einheiten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Flusshochwasserereignisse pro Jahr • Anzahl Starkregenereignisse pro Jahr • (Wasserstände Oberflächengewässer?) • (Anzahl Hochwassereignisse?) • (Grundwasserstände?) <p>Subindikatoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niederschlagentwicklung (lokal) • Bodenfeuchte • Stand des Grundwasserspiegels 	<p>Auswahl der Standorte (Liegenschaften bzw. Grundstücke in erhöhten Standorten werden bevorzugt etc.)</p> <p>Notwendige Schutzmaßnahmen vor Hochwasser um stabile Telekommunikation zu gewährleisten</p> <p>Störwirkbreite</p> <p>Netzplanung muss auf den Ausfall angepasst werden</p>
	Sturm/Wind [km/h]	<p>Anzahl jährlich gravierender Sturmereignisse</p> <p>relevante Windstärken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 103 bis 117 km/h: orkanartige Stürme • über 117 km/h: Orkane <p>Subindikatoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperaturentwicklung • Anzahl an Stürmen/ Orkanen • Netzausfälle/Netzstörungen 	<p>bei Sturm Unterbrechung der Stromversorgung möglich aufgrund von Zerstörung Freileitungen</p> <p>Risiken für Gebäude wie bspw. Schäden am Dach</p>
II Energie			
	Netzengpassentwicklung [MW]	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Energiepreise • Bedarfsentwicklung der Regelleistung (PRL, SRL, MRL) 	<p>Monitoringsysteme für TK StO (Smart Grid Controller)</p> <p>Flexible Lasten</p>

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENERGIESYSTEM

Entwicklung Energiesystem		<ul style="list-style-type: none"> • Energiemengenentwicklung für Redispatch, • Netzreserve und Einspeisemanagement • Netzausbau in km • Preisvolatilität 	<p>(Steuerung/Anpassung von Lastprofilen)</p> <p>Verfügbarkeit von Flächen in DT StO; Bedarf für Energiesystemanbieter, weitere Player im Energiemarkt</p>
	<p>Ausbau Erneuerbare Energien</p> <p>Installierte Leistung pro Fläche [kW/km²]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Technologien: Wind onshore, Wind offshore, PV • Räumliche Auflösung: NUTS3 oder PLZ-Ebene <p>Kapazitätsfaktoren [%]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für bestimmte Wetterjahre • Relevant für Detailbetrachtung in zeitlicher Auflösung bzw. mit Zeitkopplung sowie Strommarktsimulation <p>Einflussfaktoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Gestehungskosten • Verfügbarkeitsfaktor • Performanceratio • Technologische Entwicklung bzgl. Leistung (kWp/kWh) 	<p>Potential für Versorgung der Standorte mit lokalem EE-Strom</p> <p>Energieautarkiegrad</p> <p>Möglichkeit den Standort als Flexibilisierungsoption in das Energiesystem zu integrieren</p>
	<p>Netzanschluss Strom</p> <p>Anzahl Umspannwerke pro Fläche [1/km²]</p>	<p>Anzahl Umspannwerke pro Fläche [1/km²]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Räumliche Auflösung: NUTS3 oder PLZ-Ebene • Für bestimmte Spannungsebenen bspw. 110kV <p>Subindikatoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausbau erneuerbarer Energien • Netzengpassentwicklung/Bedarfsentwicklung Regelleistung und Energiemengen Redispatch 	<p>Anschlussfähigkeit der Standorte an das Stromsystem</p>

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENGERGIESYSTEM

	<p>Netzanschluss Wärme</p> <p>Verfügbarkeit von Wärmenetzen [ja/nein-Kriterium]</p>	<p>Räumliche Auflösung: NUTS3 oder PLZ-Ebene</p> <p>Ggf. je Region: weitere Wärmesenken nach Sektoren (bspw. Haushalte und Industrie)</p> <p>Einflussfaktoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kommunale Wärmeplanung • Wärmewende • Durchdringungsgrad der Wärmepumpe 	<p>Anschlussfähigkeit der Standorte an ein Wärmenetz für Abwärmenutzung</p> <p>Wärmespeicherungs- und Abwärmenutzungsgrad an den individuellen Standorten</p>
Entwicklung Energie- markt	<p>Strom- und Wärme- preis (national, Lo- kal, regional) [EUR/MWh]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Zertifikateregulierung • Entwicklung des Energiemarktdesigns (variable Tarife, Netzentgeltzonen etc.) • Ausbau erneuerbarer Energien 	<p>Auswirkungen auf die mittelfristige Strombeschaffung (5 Jahres Sicht)</p> <p>Zertifikate, PPAs</p> <p>Wärmeabgabe</p> <p>Aspekte der Regulierung (Green Deal, Energieeffizienzgesetz -> Reporting, Grenzwerte)</p>
	<p>Strompreis (Gebots- zone DELU)</p> <p>Strompreis Großhan- del [EUR/MWh]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Strompreis Großhandel [EUR/MWh] • Räumliche Auflösung: NUTS0/Deutschland • Relevant für Detailbetrachtung in zeitlicher Auflösung bzw. mit Zeitkopplung (Preisschwankungen) <p>Weitere Eingangsdaten, die harmonisiert werden müssen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Preis • Brennstoffpreise (Kohle, Gas, Öl usw.) • Nettostrombedarf Deutschland • Austauschpotentiale Nachbarländer 	<p>Flexibilitätsanreize für Standorte in zeitlicher Auflösung</p> <p>Emissionsreduktionpotential im deutschen Strommix sowie in der Stromversorgung der Standorte</p> <p>Kostensenkungspotential für Stromversorgung der Standorte</p> <p>Volkswirtschaftliches Kostensenkungspotential für das Stromsystem</p>

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENERGIESYSTEM

III TELEKOMMUNIKATION			
<p>Entwicklung von Technik und Netz</p>	<p>Entwicklung Energie-/Stromverbrauch (je Standort)</p> <p>[Energieverbrauch in kWh/MWh/GWh pro Jahr]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Abwärmepotenzial • Entwicklung Flexibilitätpotenzial (nach Standorttyp) • Anzahl der HVT-Standorte >100 kW Stromanschluss • Disaggregation • Anzahl/Entwicklung der DC StO; Anschlussleistung • Klassifizierung der DT StO (Parameter: Lokation, el. Leistung, Klimatechnik etc.) <p>Abwärmepotenzial in kWh/MWh/GWh pro Jahr</p> <p>Flexibilitätpotenzial in regelbare Leistung in kW/MW/GW und (typische) verschiebbare Arbeit in kWh/MWh/GWh oder Dauer</p> <p>Einflussfaktoren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leistungsdichten der Komponenten (technologische Entwicklung, Energieeffizienzgrad etc.) • Netzausbau • Flexibilisierungsgrad • Eigenstrom und -Wärmeversorgung (eigene PV-Anlagen, Abwärmenutzung etc.) 	<p>Welche Leistungsdichten pro Rack (kW pro Rack) sind zukünftig zu erwarten; welche Grenzen sind zu sehen; welche Kühl-/Klima Technologien sind noch möglich</p>
	<p>Netzanschluss Telekommunikation</p> <p>Abbildung der Glasfasernetztrassen und Verschneidung mit Regionen [1/km²]</p>	<p>Räumliche Auflösung: NUTS3 oder PLZ-Ebene</p> <p>Bevölkerungs- oder Industriedichten</p> <p>Einflussfaktoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Netzengpassentwicklung • Ausbau erneuerbarer Energien 	<p>Anschlussfähigkeit der Standorte an Telekommunikationsnetz</p>

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENGERGIESYSTEM

<p>Entwicklung Telekommunikationsmarkt</p>	<p>Traffic-Entwicklung in Fest- und Mobilnetz (Endkunden und Firmenkunden) [in Gbit/s; Tbit/s; CAGR oder Datenvolumen: EB, TB pro Zeitraum (Monat, Jahr); CAGR]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Energie pro Datenvolumen • Verkehrsentwicklung • Dienste-Entwicklung • Serviceentwicklung (AI, AR/VR, ...) mit besonders hohen Datenraten bzw. Prozessorleistung • Services/Dienste: Audio, Video, Social Networking, Web Browsing <p>Einflussfaktoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bevölkerungsentwicklung • lokale Leistungsdichte • Anzahl Unwetterkatastrophen 	<p>Entwicklung/Optimierung von Standorten (Anzahl) -> Container-Lösungen</p>
--	--	--	---

Quelle: Eigene

4 Auswahl und Beschreibung von Szenarien

Aufbauend auf den in Kap. 2.6 beschriebenen Indikatoren werden drei Szenarien (Ambitionierte Szenario, Business-as-usual Szenario und Dynamisches Szenario) für die Entwicklung des Telekommunikationsnetzes und der -infrastruktur der Deutschen Telekom vorgeschlagen. In den Szenarien werden unterschiedliche Ausprägungen der Leitindikatoren zusammengefasst. Die Szenarien wurden gemeinsam im Projektkonsortium entwickelt. Sie kombinieren Annahmen aus bestehenden Berichten (z.B. Entwicklung der Durchschnittstemperatur in Deutschland gemäß IPCC, Ausbauziele für erneuerbare Energien) und rechtlichen Rahmenbedingungen (z.B. KSG und EnEFG) mit Abschätzungen zur Technologie- sowie Marktentwicklung (z.B. Entwicklung von Datenverkehr in TK-Netzen, dem Energiebedarf der Datennetze sowie Energiepreisen).

In allen Szenarien wird davon ausgegangen, dass das Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom bis spätestens zum Jahr 2045 vollständig mit erneuerbaren Energien versorgt wird, da das KSG und europäische Vorgaben dies fordern. Abweichungen gibt es in Bezug auf die Geschwindigkeit, mit der die Zwischenziele erreicht werden. Die zentralen Annahmen der Szenarien sind in Anhang 1 dokumentiert. Die drei Szenarien sind:

- Das **Ambitionierte Szenario**: Es beschreibt eine Entwicklung, in der trotz eines Anstiegs der zu verarbeitenden Datenmenge im Telekommunikationsnetz um 100 % der Mehrverbrauch an Energie im Fest- und Mobilfunknetz nur moderat (um 25 % bis 2045) ansteigt. Grund hierfür sind technische Innovationen in der Netzwerk- und Servertechnik und hohe Effizienzanstrengungen (z.B. energieeffizientere Router und Server). Gleichzeitig wird das Fest- und Mobilfunknetz bis zum Jahr 2030 vollständig mit erneuerbaren Energien (aus Eigenerzeugung und PPA's mit stundenscharfen Herkunftsnachweis) versorgt. Die entstehende Abwärme der Core-Standorte sowie der großen Aggregationsstandorte des Festnetzes (ab ca. 1 MW Anschlussleistung) wird in Nahwärmenetze eingespeist. Flexibilitäten in Verbrauch, Erzeugung und Speicherung an den Standorten werden genutzt, um am Energiemarkt oder an Netzausgleichsmaßnahmen teilzunehmen. Ursache hierfür sind ökonomische und rechtliche Anreize, die ein lastadaptives Verhalten belohnen und so neue Investitions- und Finanzierungsmodelle für flexible Energieerzeugungs- und Speicheranlagen an den Standorten des Festnetzes ermöglichen.
- Das **Business-as-usual Szenario**: Es geht davon aus, dass sich durch die stark steigenden zu verarbeitenden Datenmengen (Anstieg um 200 %) im Telekommunikationsnetz der Energieverbrauch im Fest- und Mobilfunknetz um 50 % bis 2045 erhöht. Dies ist v.a. darauf zurückzuführen, dass der Energiebedarf der Netzwerktechnik aufgrund der abschwächenden Effizienzgewinne, welche den Datenzuwachs nicht kompensieren, zunimmt. In dem Szenario wird jedoch ebenfalls davon ausgegangen, dass das Fest- und Mobilfunknetz bis zum Jahr 2045 vollständig mit erneuerbaren Energien versorgt wird. Dies ist jedoch aufgrund der höheren Energiebedarfe mit höherem Aufwand verbunden. Die entstehende Abwärme und Flexibilitätsmechanismen im Stromnetz werden zumindest an einigen lukrativen Standorten genutzt und es bestehen ökonomische und rechtliche Anreize dafür.
- Das **Dynamische Szenario**, das von einer weniger planbaren Entwicklung von Telekommunikations- und Internetdiensten durch technologische und marktliche Sprünge ausgeht. Ursache hierfür können z.B. extrem steigende Datenraten und Energieverbräuche durch neue rechenintensive Telekommunikations- und Internetdienste (z.B. durch künstliche Intelligenz, VR-Anwendungen oder vernetztes Fahren) sein. Aufgrund der stark gestiegenen Datenraten

SCENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENERGIESYSTEM

(300 %) wird ein deutlicher Ausbau des Fest- und Mobilfunknetzes notwendig und es wird eine deutlich leistungsfähigere Netzwerktechnik benötigt. Dementsprechend steigt der Stromverbrauch für den Betrieb des Fest- und des Mobilfunknetzes bis zum Jahr 2045 um 100 % gegenüber 2022. Durch den insgesamt stark gestiegenen Energieverbrauch in Deutschland hat sich der Energiemarkt verändert (mehrere regionale Strompreiszonen, variable Preise und Netzentgelte). Auch in diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass das Fest- und Mobilfunknetz bis zum Jahr 2045 vollständig (jedoch nur bilanziell) mit erneuerbaren Energien versorgt wird. Die Nutzbarkeit von Abwärme und Flexibilitätsmechanismen ist aufgrund der dynamischen Entwicklung schwerer planbar, aufgrund des hohen Energieverbrauch jedoch erforderlich.

Ein wesentlicher Faktor für den Betrieb der Datennetze ist die Entwicklung des Datenvolumens. Gleichzeitig hängt die Entwicklung des Datenverkehrs von zahlreichen technologischen und marktlichen Faktoren ab und kann nur begrenzt vorausgesagt werden. In den Szenarien werden unterschiedliche Verläufe berücksichtigt. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Entwicklung des Breitbandvolumens in Deutschland, historische Entwicklung und Zukunftsszenarien



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis (BNetzA, 2024)

Die konservativste Entwicklung schreibt dabei das rückläufige Wachstum der Jahre 2020-2023 fort. Die „lineare Entwicklung“ nimmt dagegen die Zunahme von 2022 auf 2023 als linearen Koeffizienten. Das dynamische Wachstum geht von exponentiellem Wachstum, aber leicht rückläufigem Wachstumskoeffizienten entsprechend der Entwicklung in den Jahren 2016 - 2023 aus.

4.1 Ambitioniertes Szenario

BESCHREIBUNG SZENARIO (2030/2045)

Im ambitionierten Szenario nimmt die zu verarbeitende Datenmenge im Telekommunikationsnetz in Deutschland gegenüber dem Jahr 2023 bis zum Jahr 2045 um ca. 100 % zu. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung der eingesetzten Technologien (neue Server, Router, Kühlung, etc.) gelingt es, den etwas erhöhten Datenverkehr im Festnetz bis 2030 mit einem geringen Mehrverbrauch an Energie (5 %) gegenüber dem Jahr 2023 umzusetzen. In der Zeit bis zum Jahr 2045 steigt der Energieverbrauch des Festnetzes um weitere 5 % gegenüber dem Jahr 2022 an. Durch die Beschränkung von Bandbreiten für besonders datenintensive Anwendungen im Fest- und Mobilfunknetz ist es möglich, den Zuwachs bei Datenverkehr bis zum Jahr 2045 mit dem vorhandenen Glasfasernetz zu bewältigen.

Im Mobilfunknetz gelingt es ebenfalls, trotz eines Anstiegs des Datenvolumens neuer energieintensiver Mobilfunkstandards (5G, 6G, etc.) sowie kleinerer Funkzellen, den Anstieg des Energieverbrauchs bis zum Jahr 2045 auf 10 % gegenüber dem Jahr 2022 zu begrenzen.

Bis zum Jahr 2030 wird zudem das gesamte Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom (Festnetz und Mobilfunk) mit klimaneutralem Strom aus regenerativen Quellen versorgt. Dies erfolgt sowohl aus eigenerzeugter Energie (z.B. Photovoltaik in den Liegenschaften der Telekom) als auch über lokale und regionale Erzeuger (z.B. über PPA's oder Lieferungen mit stündlichem Herkunftsnachweis).

Die entstehende Abwärme der mittleren und großen Standorte des Festnetzes (Core- und Aggregationsstandorte > 100 kW Anschlussleistung) wird im ambitionierten Szenario im Jahr 2045 in Wärmnetzen recht umfangreich (> 40) genutzt, soweit die geographischen Gegebenheiten (Nähe zum Einspeisepunkt) dies erlauben. Gründe hierfür sind sowohl gesetzliche Verpflichtungen zur Nutzung der Abwärme sowie die kommunale Wärmeplanung, die eine Integration und dauerhafte Abnahme der Wärme durch lokale Versorger ermöglicht hat und mit Hilfe von zentralen Wärmespeichern in Fernwärmenetzen die Schwankungen des Wärmebedarfs ausgleicht.

Der Strompreis hat sich durch den Ausbau der erneuerbaren Energien nach dem Jahr 2030 stabilisiert und liegt im Durchschnitt im Jahr 2030 bei 55 € pro MWh und 2045 bei 53 €/MWh. Er unterliegt jedoch auch in den Jahren 2030 bis 2045 deutlichen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Außerdem sind zusätzliche marktliche Anreize für ein stromnetzdienliches Verhalten (z.B. Flexibilitäts- und/oder Einspeisevergütung) geschaffen worden. Dies hat zur Folge, dass es sich sowohl für industrielle als auch private Verbraucher wirtschaftlich lohnt, sich durch einen zeitlich begrenzten Bezug oder die Einspeisung von Strom lastadaptiv zu verhalten.

Die Deutsche Telekom hat daher die Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) an den mittleren und großen Standorten des Festnetzes neu strukturiert. Sie setzt dort nun Aggregate (Generatoren, Batterien, Brennstoffzellen, etc.) ein, die auf der Niederspannungsebene in das Stromnetz eingebunden sind und durch den Netzbetreiber oder Aggregatoren (bzw. über ein Tochterunternehmen der Telekom) als flexible Einspeiser bzw. Stromerzeuger genutzt und deren Kapazität damit am Energiemarkt gehandelt werden kann. Die neuen Redundanzkonzepte müssen als Minimum bisherige Standards weiterhin mit gleicher Zuverlässigkeit erfüllen, weshalb für den Zweck der Flexibilität die Aggregate ca. 50 % größer ausgelegt wurden, als dies für die alleinige

Notstromversorgung nötig wäre. Insgesamt ist es der Telekom damit gelungen, einen klimaneutralen Betrieb ihrer Infrastruktur bis zum Jahr 2045 umzusetzen.

Um zusätzlich das Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur des Unternehmens resilienter gegen den Klimawandel (Extremwetterereignisse, Hitzewellen, etc.) zu machen, wurden Technik und Gebäude (z.B. Schutz vor Überflutung) an besonders gefährdeten Standorten angepasst und in Einzelfällen verlagert. Hierfür waren teilweise erhebliche Investitionen nötig. Dies gilt z.B. für die Neuauslegung und Anpassung von Kühl- und Klimatechnik an den innerstädtischen Core- und Aggregationsstandorten.

Aufgrund der insgesamt sinkenden Emissionen in Deutschland gemäß den Vorgaben des KSG, sind die Folgen des stattfindenden Klimawandels (insbesondere Hitzewellen und Extremwetterereignisse) jedoch gemildert und beherrschbar geblieben.

ENTWICKLUNG VON LEITINDIKATOREN

I Klima

Im ambitionierten Szenario wird die Erreichung des 2 Grad Ziels¹² angenommen. Dementsprechend erhöht sich die Durchschnittstemperatur in Deutschland (um 1,5 °C bis 2030 und um 1,7 °C bis 2045, Leitindikator Temperatur), was auch eine deutliche Überschreitung der sommerlichen Durchschnitts- und Höchsttemperaturen an lokalen bzw. regionalen Standorten zur Folge hat. Dies erfordert deutlich höhere Kühlleistungen an den größeren innerstädtischen Standorten des Telekomnetzes, denn nicht nur die Durchschnitts- und Maximaltemperaturen im Sommer steigen, sondern auch die Abwärme der IKT-Infrastruktur benötigt eine höhere Kühlleistung.

Ebenfalls Bestandteil der prognostizierten Klimaentwicklung ist eine Zunahme von Starkregenereignissen und Stürmen (Leitindikator Hochwasser und Leitindikator Sturm), was an exponierten Standorten eine zusätzliche bauliche Sicherung der TK-Infrastruktur der Telekom (sowohl Fest- wie auch im Mobilfunknetz), z.B. in Form von Überflutungsschutz von Gebäuden oder Sicherung von Mobilfunkstationen, erfordert.

II Energie

Für das ambitionierte Szenario wird davon ausgegangen, dass sich der Energieverbrauch im Netz der Deutschen Telekom moderat erhöht. Dieser steigt bis 2030 um 5 % auf ca. 1,9 TWh und um weitere 5 % bis zum Jahr 2045 auf 2,0 TWh. Zeitgleich entwickelt sich das Stromnetz gemäß des Netzentwicklungsplans¹³. Dies bedeutet, dass im Jahr 2037 und 2045 eine deutlich höhere Leitungsdichte im Übertragungs- und Verteilnetz besteht (Leitindikator Netzanschluss Strom). Gleichzeitig erfolgt ein starker Ausbau der erneuerbaren Energie von rund 134 GW im Jahr 2022 auf 630 GW im Jahr 2045 (Leitindikator Ausbau Erneuerbare Energien). Diese beiden Entwicklungen führen dazu, dass ein hoher Bedarf an Energiespeicherung sowie Lastmanagement/ Flexibilität im Stromnetz erforderlich ist, um Angebot und Nachfrage nach Strom regional sowie überregional auszugleichen (Leitindikator Netzengpassentwicklung).

Der Strompreis beträgt in diesem Szenario durchschnittlich 76 €/MWh in 2030 und 63 €/MWh in 2045. Der hohe Bedarf an Speicherung sowie Lastmanagement/ Flexibilität wirkt sich auf die Strompreise aus und führt zu tages- und jahreszeitlich schwankenden Preisen. So sind am

¹² Siehe Artikel 2 der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC): <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf> (Abruf Dezember 2023)

¹³ Siehe <https://www.netzentwicklungsplan.de> (Abruf Dezember 2023)

Strommarkt weiterhin starke Schwankungen möglich (Leitindikator Strompreis). Weitere Einnahmemöglichkeiten durch Flexibilität ergeben sich aus variablen Netzentgelten oder Dienstleistungen, die in Abhängigkeit von der Lage zu Netzengpässen variieren.

Eine vergleichbare Entwicklung findet in den Wärmenetzen und auf dem Wärmemarkt statt. Die kommunale Wärmeplanung in Verbindung mit KSG und wirksamer CO₂-Preise hat zu einem stärkeren Ausbau lokaler (Niedertemperatur-)Wärmenetze (Leitindikator Netzanschluss Wärme) sowie der generellen Einspeiseerlaubnis und besseren wirtschaftlichen Bedingungen von Abwärmenutzung (Leitindikator Wärmepreis) geführt. Abwärme mit mehr als 40 °C wird je nach Temperaturniveau im Jahr 2030 bzw. 2045 mit einem Preis zwischen 50 und 100 Euro/MWh vergütet. In manchen Regionen bieten Netzbetreiber selbst oder Intermediäre an, den Rechenzentren die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (30 °C Vorlauf/ 20 °C Rücklauf) abzunehmen und je nach Anwendungsfall/Heizkurve mit Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau zu heben.

III Telekommunikation

Im ambitionierten Szenario nimmt der Bedarf nach Telekommunikations- und Internetdiensten im deutschen Telekommunikationsnetz um rund 100 % (von ca. 130 EB/a im Jahr 2023 auf 260 EB/a im Jahr 2045, Leitindikator Traffic-Entwicklung) zu. Durch den Einsatz energieeffizienter Server und Router sowie neuen Kühltechniken (z.B. Wasserkühlung) ist es im Festnetz gelungen, den erhöhten Datenverkehr mit einem moderaten Mehrverbrauch an Energie zu bewältigen (siehe oben). Der Anstieg des Energieverbrauchs im Netz der deutschen Telekom erfordert jedoch neben Effizienzmaßnahmen auch eine Beschränkung von Bandbreiten für besonders datenintensive Anwendungen im Fest- und Mobilfunknetz (z.B. Begrenzung der Übertragungsbandbreiten für Streaming und VR-Anwendungen) (Leitindikator Traffic-Entwicklung).

Im Mobilfunknetz ist es ebenfalls gelungen, trotz eines Anstiegs des Datenvolumens neuer energieintensiver Mobilfunkstandards (5G, 6G, etc.) sowie kleinerer Funkzellen, den Anstieg des Energieverbrauchs zu begrenzen (Leitindikator Energieverbrauch).

4.2 Business-as-usual Szenario

BESCHREIBUNG SZENARIO (2030/2045)

Im Business-as-usual Szenario nimmt die zu übertragende Datenmenge im Telekommunikationsnetz in Deutschland (z.B. Streaming, Gaming, VR-Anwendungen) bis zum Jahr 2045 deutlich um ca. 250 % gegenüber dem Jahr 2023 zu. Der erhöhte Datenverkehr im Fest- und Mobilfunknetz und langsamer werdende Effizienzsteigerung hat einen Ausbau der Core- und Aggregationsstandorte des Telekomnetzes und einen deutlichen Mehrverbrauch an Energie zur Folge. Dieser steigt gegenüber dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2030 um 20 % und bis 2045 um weitere 30 %. Die für den Datentransport sowie die Verarbeitung benötigten Technologien (Server, Router, Kühlung, etc.) sind zwar leistungsfähiger und effizienter geworden, es wird aber keine außergewöhnlichen Anstrengungen zur Senkung des Energieverbrauchs vorgenommen. Zudem wurden die Bandbreiten für besonders datenintensive Anwendungen im Fest- und Mobilfunknetz nicht beschränkt. Dadurch ist auch der Stromverbrauch im Mobilfunknetz bis zum Jahr 2045 um 50 % angestiegen. Dies wird v.a. durch energieintensivere Mobilfunkstandards (5G, 6G, etc.) sowie kleinerer Funkzellen verursacht.

Auch im Business-as-usual Szenario wird das gesamte Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom (Festnetz und Mobilfunk) mit klimaneutralem Strom aus regenerativen Quellen versorgt. Allerdings wird dies erst im Jahr 2045 und aufgrund des höheren Energiebedarfs mit höheren Kosten erreicht. Die Versorgung erfolgt sowohl aus eigenerzeugter Energie (z.B. Photovoltaik in den Liegenschaften der Telekom) als auch über lokale und regionale Erzeuger (z.B. über PPA's oder Lieferungen mit stündlichem Herkunftsnachweis). Aufgrund des insgesamt wachsenden Stromverbrauchs in Deutschland sind die Kosten für die Beschaffung von Energie und die Herkunftsnachweise für eine erneuerbare Erzeugung stark gestiegen.

Der Strompreis hat sich durch den Ausbau der erneuerbaren Energien nach dem Jahr 2030 stabilisiert. Er unterliegt jedoch auch im Jahr 2045 tages- und jahreszeitlichen Schwankungen und schafft so Anreize für ein stromnetzdienliches Verhalten (z.B. Flexibilitäts- und/oder Einspeisevergütung). Es wird von einer einheitlichen Strompreiszone ausgegangen.

Die entstehende Abwärme der mittleren und großen Standorte des Festnetzes (Core- und Aggregationsstandorte > 500 kW Anschlussleistung) wird im Jahr 2045 z.T. in Wärmenetzen genutzt. Dies ist v.a. an ausgewählten Core-Standorten der Fall, an denen die Abwärme aus wirtschaftlichen und technischen Gründen (räumliche Nähe und niedrige Temperatur des Wärmenetzes) einfach in Netze eingespeist werden kann.

Insgesamt ist es der Telekom gelungen, einen klimaneutralen Betrieb ihrer Infrastruktur bis zum Jahr 2045 umzusetzen. Die mittel- bis langfristigen Kosten für Beschaffung von Energie sowie die Herkunftsnachweise für eine erneuerbare Erzeugung sind jedoch höher als im ambitionierten Szenario.

Um das Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom resilienter gegen den Klimawandel (Extremwetterereignisse, Hitzewellen, etc.) zu machen, wurden gefährdete Standorte angepasst und in Einzelfällen verlagert. Da die Durchschnitts- sowie die Maximaltemperaturen stärker gestiegen sind als im ambitionierten Szenario, müssen in diesem mehr Investitionen getätigt werden. Dies gilt insbesondere für Anpassung von Kühl- und Klimatechnik an den innerstädtischen Core- und Aggregationsstandorten.

Die Emissionen in Deutschland sinken langsamer und die im KSG vorgegebenen Ziele werden nicht vollständig erreicht. Trotzdem sind die Folgen des stattfindenden Klimawandels beherrschbar geworden. Hitzewellen und Extremwetterereignisse stellen jedoch eine dauerhafte Belastung für die Telekommunikationsnetze dar, die kontinuierliche Nachbesserungen erfordern.

ENTWICKLUNG VON LEITINDIKATOREN

I Klima

Im Business-as-usual Szenario wird angenommen, dass das 2 Grad Ziel¹⁴ nicht erreicht wird. Demnach steigt die Durchschnittstemperatur in Deutschland bis zum Jahr 2030 um 1,6 °C und um 2,4 °C bis zum Jahr 2045 (Leitindikator Temperatur). Dies hat auch einen deutlichen Anstieg der sommerlichen Höchsttemperaturen an innerstädtischen Core- und Aggregationsstandorten zur Folge und führt dort zu einem stark erhöhten Kühlbedarf in den Sommermonaten.

¹⁴ Siehe Artikel 2 der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC): <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf> (Abruf Dezember 2023)

Auch in diesem Szenario wird von einer Zunahme an Starkregenereignissen und Stürmen (Leitindikator Hochwasser und Leitindikator Sturm) ausgegangen, wodurch eine zusätzliche bauliche Sicherung der TK-Infrastruktur (sowohl Fest- wie auch im Mobilfunknetz), z.B. in Form von Überflutungsschutz von Gebäuden oder Sicherung von Mobilfunkstationen, notwendig wird.

II Energie

Für das Business-as-usual Szenario wird davon ausgegangen, dass sich der Energieverbrauch der Deutschen Telekom für das Telekommunikationsnetz stärker erhöht als im ambitionierten Szenario. Er steigt zunächst auf rund 2,2 TWh im Jahr 2030 und dann auf 2,7 TWh im Jahr 2045. Das Stromnetz entwickelt sich demnach gemäß des Netzentwicklungsplans (Leitindikator Netzanschluss Strom). Der Ausbau der erneuerbaren Energie folgt dem ambitionierten Szenario (Leitindikator Ausbau Erneuerbare Energien).

Der höhere Strombedarf in Verbindung mit steigendem Kühlbedarf macht die Energiespeicherung sowie das Lastmanagement (Flexibilität) an den Core- und Aggregationsstandorten der Telekom notwendig. Damit kann besser auf Angebot und Nachfrage nach Strom regional sowie überregional reagiert werden (Leitindikator Netzengpassentwicklung). Anreize für ein lastadaptives Verhalten entstehen zudem durch variable Strompreise und Netzentgelte.

Die Entwicklung in den Wärmenetzen ist unabhängig davon und folgt dem ambitionierten Szenario. Einziger Unterschied ist, dass aufgrund des höheren Energieverbrauchs und dem steigenden Kühlbedarf an den Telekom-Standorten die Menge der nutzbaren Abwärme steigt.

III Telekommunikation

Im Business-as-usual Szenario nimmt der Bedarf nach Telekommunikations- und Internetdiensten in Deutschland bis zum Jahr 2045 um 200 % zu. Das transportierte Datenvolumen steigt damit auf 490 EB/a im Jahr 2045 (Leitindikator Traffic-Entwicklung). Der erhöhte Datenverkehr im Fest- und Mobilfunknetz hat einen stärkeren Ausbau der Core- und Aggregationsstandorte des Telekomnetzes und einen deutlichen Mehrverbrauch an Energie zur Folge. Ursache hierfür ist v.a. der höhere Stromverbrauch von Servern, Routern und Kühlung.

Die Bandbreiten für besonders datenintensive Anwendungen im Fest- und Mobilfunknetz sind ebenfalls gestiegen und verursachen v.a. im Mobilfunknetz Energiemehrverbrauch (Leitindikator Traffic-Entwicklung).

4.3 Dynamisches Szenario

BESCHREIBUNG SZENARIO (2030/2045)

Im dynamischen Szenario nimmt der Bedarf nach Telekommunikations- und Internetdiensten in Deutschland im Vergleich zum Business-as-usual Szenario nochmals zu. Das Datenvolumen in den Netzen steigt bis zum Jahr 2045 um 480 % bezogen auf das Jahr 2023 an. Grund hierfür ist die starke Nutzung der Netze durch datenintensive Dienste (z.B. vernetztes Fahren, VR- oder KI-Anwendungen, Gaming, Verschlüsselungstechniken). Obwohl das Fest- sowie das Mobilfunknetz mit Reserven geplant und gebaut wurden, führt der starke Anstieg der datenintensiven Dienste dazu, dass die Netzinfrastruktur (sowohl Fest- als auch Mobilfunknetz) deutlich ausgebaut werden muss.

Dies führt wiederum zu einem starken Mehrverbrauch an Energie. Er steigt gegenüber dem Jahr 2023 zunächst um 40 % bis zum Jahr 2030 und dann nochmals um 60 % bis zum Jahr 2045 an. Der Energieverbrauch wird folglich durch technische Fortschritte (Server, Router, Kühlung, etc.) gemildert und steigt nicht im gleichen Maße an wie das Datenvolumen.

Auch im dynamischen Szenario wird bis zum Jahr 2045 das gesamte Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur der Deutschen Telekom (Festnetz und Mobilfunk) mit klimaneutralem Strom aus regenerativen Quellen versorgt. Durch den Mehrverbrauch ist es jedoch anspruchsvoller geworden, dies über eigenerzeugte Energie oder regionale Erzeugung (z.B. über PPA's mit stündlichem Herkunftsnachweis) umzusetzen. Die Emissionen können daher z.T. nur bilanziell (z.B. über Zertifikate bzw. Stromimporte) neutralisiert werden.

Parallel zum steigenden Stromverbrauch entsteht auch deutlich mehr Abwärme mit höherer Temperatur an den mittleren und großen Standorten des Festnetzes (Core- und Aggregationsstandorte > 100 kW Anschlussleistung). Die Anzahl der mittleren Aggregationsstandorte ist zudem gestiegen. Dies führt zu mehr nutzbarer Abwärme aus dem Telekommunikationsnetz, die im Rahmen der kommunalen Wärmeversorgung genutzt werden kann.

Da auch das Mobilfunknetz stark ausgebaut und verdichtet wurde, ist auch hier der Energieverbrauch bis zum Jahr 2045 um 75 % angestiegen. Zudem fällt an zahlreichen kleineren Standorten des Mobilfunknetzes mehr Abwärme an, die lokal in Gebäuden genutzt werden kann. Insgesamt wird daher im dynamischen Szenario mehr Abwärme durch das Telekommunikationsnetz und die -infrastruktur erzeugt. Diese wird jedoch aufgrund der größeren Menge sowie der höheren Temperatur auch effizienter genutzt.

Im dynamischen Szenario hat sich der Strompreis bis 2045 stabilisiert, jedoch auf hohem Niveau von durchschnittlich 92 €/MWh. Ursache hierfür ist, dass durch den wachsenden Strombedarf in der Gesellschaft mehr in den Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Netze investiert werden muss als in den beiden vorangegangenen Szenarien. Um Anreize für mehr Effizienz und Flexibilität zu schaffen, wurden drei Strompreiszonen in Deutschland eingeführt, vergleichbar mit dem Vorschlag der Übertragungsnetzbetreiber in der Konfiguration 3 (TenneT, 2022). Dies hat zur Folge, dass sich der Stromhandel viel stärker an den regionalen Gegebenheiten (Angebot/Nachfrage) orientiert und überregionaler Handel nur noch mit begrenzten Kapazitäten stattfinden kann. Der Strompreis unterliegt deutlichen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen und es bestehen starke marktliche Anreize für ein stromnetzdienliches Verhalten (z.B. Flexibilitäts- und/oder Einspeisevergütung). Investitionen der Deutsche Telekom in Aggregate und Technik für eine lastvariable USV (z.B. Batterien oder Brennstoffzellen) an ihren Core- und Aggregationsstandorten hängen damit stark von den Anreizen in der jeweiligen Strompreiszone ab. Bis zum Jahr 2045 sind der durchschnittliche Strompreis aufgrund der dann zusätzlich verfügbaren Erzeugungskapazitäten auf 67 €/MWh ab.

Auch in diesem Szenario wird ein klimaneutraler Betrieb der Telekommunikationsinfrastruktur bis zum Jahr 2045 umgesetzt. Da die Infrastruktur jedoch deutlich ausgebaut und erweitert wurde, sind die erforderlichen Investitionen für einen resilienten Betrieb gegenüber dem Business-as-usual Szenario nochmals angestiegen. Ursache hierfür ist vor allem die erweiterte Netzinfrastruktur mit mehr Standorten. Um den Betrieb der verteilten Infrastruktur (insbes. Mobilfunknetz) gegen die Folgen des Klimawandels (Extremwetterereignisse, Hitzewellen, etc.) abzusichern, sind daher auch zusätzliche Investitionen zur Sicherung gefährdeter Standorte notwendig geworden.

Gemäß den Vorgaben des KSG sinken die Emissionen in Deutschland. Hitzewellen und Extremwetterereignisse stellen auch in diesem Szenario eine Belastung für die Telekommunikationsnetze dar und führen kontinuierlich zu kostenintensiven Anpassungsmaßnahmen (z.B. durch Anpassung und Schutz der Standorte vor Extremwetterereignissen oder der Anpassung der Kühltechnik). Der Aufwand für die Anpassungsmaßnahmen ist jedoch etwas geringer als im Fall des Business-as-usual Szenarios, da auch die Extremwetterereignisse und die Temperatur geringer ausfallen und die Versorgung der Core- und Aggregationsstandorte der Telekom durch verschiedene Energiemanagement- und Flexibilisierungsmaßnahmen resilienter geworden ist.

ENTWICKLUNG VON LEITINDIKATOREN

I Klima

Im dynamischen Szenario wird davon ausgegangen, dass das 2 Grad Ziel bis zum Jahr 2045 erreicht wird. Die Durchschnittstemperatur in Deutschland steigt demnach um 1,5 °C bis zum Jahr 2030 und um 2 °C bis 2045 (Leitindikator Temperatur). Auch die maximalen Sommertemperaturen an den innerstädtischen Standorten der Telekom steigen an, jedoch nicht so stark wie im Business-as-usual Szenario. In Folge bewegt sich auch der Kühlbedarf an den Core- und Aggregationsstandorten im Mittelfeld der beiden vorangegangenen Szenarien.

Im dynamischen Szenario wird von einer Zunahme an Starkregenereignissen und Stürmen (Leitindikator Hochwasser und Leitindikator Sturm) ausgegangen. Aufgrund der stärkeren Klimaschutzmaßnahmen, fallen diese jedoch etwas weniger deutlich aus als im Business-as-usual Szenario.

II Energie

Im dynamischen Szenario steigt der Energiebedarf der Deutschen Telekom auf 2,4 TWh im Jahr 2030 bzw. 3,3 TWh in 2045. Dies wird durch den starken Anstieg des Datenvolumens im Netz der Deutschen Telekom hervorgerufen. Parallel dazu erfolgt jedoch im dynamischen Szenario auch ein schnellerer und stärkerer Ausbau der erneuerbaren Energien auf 695 GW im Jahr 2045 (Leitindikator Ausbau Erneuerbare Energien). Dies hat zeitgleich einen zügigeren Ausbau des Stromnetzes zur Folge als im Netzentwicklungsplan vorgesehen. Beide Entwicklungen bewirken, dass ein hoher Bedarf an Energiespeicherung sowie Lastmanagement/ Flexibilität im Stromnetz erforderlich ist, um Angebot und Nachfrage nach Strom regional sowie überregional auszugleichen (Leitindikator Netzengpassentwicklung).

Durch die Einführung der drei Strompreiszonen ist der Bedarf für Energiespeicherung sowie Lastmanagement/ Flexibilität im Stromnetz stark vom Angebot und der Nachfrage in der jeweiligen Strompreiszone abhängig (Leitindikator Netzengpassentwicklung).

Da im dynamischen Szenario mehr Abwärme aus den Core- und Aggregationsstandorten (> 100 kW Anschlussleistung) verfügbar ist, kann diese auch effizienter genutzt werden. Dies geschieht sowohl in Wärmenetzen als auch direkt in Gebäuden.

III Telekommunikation

Der Bedarf nach Telekommunikations- und Internetdiensten ist im dynamischen Szenario im Vergleich zu den vorangegangenen Szenarien nochmals deutlich angestiegen. Er hat sich auf 790 EB/a im Jahr 2045 gesteigert (Leitindikator Traffic-Entwicklung) und zu einer Verdopplung der Netzinfrastruktur (sowohl Fest- als auch Mobilfunknetz) geführt. Die Bandbreiten für besonders datenintensive Anwendungen im Fest- und Mobilfunknetz sind ebenfalls gestiegen.

5 Fazit: Auswirkung auf die Arbeiten in CO 2030

Aus den Szenarien wird deutlich, dass die Entwicklung der Einflussfaktoren maßgeblich über das Eintreten der verschiedenen Zustände entscheidet, und diese trotz Gemeinsamkeiten voneinander abweichen. Dies zeigt auch grundlegende Herausforderung bei der Einschätzung der Einflussfaktoren und der Entwicklung der Szenarien auf, die in den nachfolgenden Schritten bzw. Arbeitspaketen von CO 2030 berücksichtigt werden:

- Einige der Faktoren (z.B. der Ausbau erneuerbarer Energien, Strompreis oder Abwärmenutzungspotenzial) lassen sich besser abschätzen, da hierfür bereits gesetzliche Rahmenbedingungen oder Vorgaben (z.B. KSG oder kommunale Wärmeplanung) existieren. Bei anderen Faktoren (z.B. der Trafficentwicklung im TK-Netz) ist die Abschätzung schwieriger, da sie stärker von der Nachfrage an den Märkten und der Entwicklung neuer Technologien abhängen. Methodisch kann dies unterschiedlich kompensiert werden. Während sich gut abschätzbare Faktoren beispielsweise im Rahmen von Modellen und Potentialkarten (siehe AP 1 und AP 2) prognostizieren und darstellen lassen, so ist dies bei den schwieriger abzuschätzenden Faktoren (z.B. der Trafficentwicklung im TK-Netz) nur bedingt sinnvoll. In diesem Fall können wahrscheinliche Entwicklungen aber über Technologieradare sowie Experten- und Stakeholderworkshops (siehe AP 2 und 4) erfasst werden.
- Generell gilt, dass zeitlich näher liegende Entwicklungen leichter und präziser bewertet werden können, als solche, die weiter in der Zukunft liegen. Grund hierfür ist, dass sich z.B. zahlreiche energiesystemische und marktliche Entwicklungen durch Gesetzgebung und Normung verlässlich abschätzen lassen. Ähnlich verhält es sich mit der unmittelbaren Entwicklung der Telekommunikationsnetze und der eingesetzten Technik (z.B. Server, Router, Mobilfunkantennen) deren Entwicklung in der nahen Zukunft durch Zulieferer und Ausrüster vorgeben ist.
- Kaum zu prognostizieren sind sogenannte ‚Wild Cards‘. Damit werden in der Szenariotechnik Ereignisse bezeichnet, deren Eintreten zwar nicht sehr wahrscheinlich ist, die jedoch starke Veränderungen nach sich ziehen können (Ute von Reibitz, 1992). Ein Beispiel hierfür ist der starke Energiepreisanstieg in Folge des Ukrainekrieges oder die bisher nicht vorhergesehene rasche Beschleunigung des Klimawandels und seiner Effekte. Während die ersten beiden Szenarien (‚Ambitioniertes Szenario‘ und ‚Business-as-usual Szenario‘) tendenziell stärker von kontinuierlichen und vorhersagbaren Entwicklungen ausgehen, so sind im dritten Szenario (‚Dynamisches Szenario‘) Elemente, die starke Veränderungen nach sich ziehen können, vorhanden, so z.B. der stark wachsende Bedarf nach Telekommunikations- und Internetdiensten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die entwickelten Szenarien eine gute Grundlage für die Modellierung eines nachhaltigen und resilienten Betriebs des Telekommunikationsnetzes und der -infrastruktur liefern. Je nach Szenario und Einflussfaktoren sind für die Modellierung weitere Analyseschritte in den Arbeitspaketen 1, 2, und 4 sowie verschiedene Methoden (z.B. Entwicklung von Potentialkarten, Technologieradare oder Experten- und Stakeholderworkshops) notwendig, um die Einflussfaktoren und ihre Entwicklung abzuschätzen.

QUELLEN

- 50Hertz, Amprion, TenneT, & TransnetBW. (2019). NETZENTWICKLUNGSPLAN STROM 2030—VERSION 2019, ZWEITER ENTWURF (ZAHLEN · DATEN · FAKTEN). Berlin. Abgerufen von <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene/netzentwicklungsplan-2030-2019>
- Beucker, S., & Hinterholzer, S. (2022). Decarbonization Potential of Building Automation: Results of a German Study and Outlook. *2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 119–127. <https://doi.org/10.1109/ICT4S55073.2022.00023>
- BNetzA. (2024). Bundesnetzagentur—Digitales und Telekommunikation—Datenvolumen in Festnetzen. Abgerufen 17. Januar 2024, von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Datenportal/1_Digitales_Telekommunikation/_svg_TK/TK_Festnetz/Datenvolumen%20Festnetz/Datenvolumen%20Festnetz.html
- Boston Consulting Group. (2021). *KLIMAPFADE 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft* [Gutachten für den Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI)]. Abgerufen von <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>
- Bundesjustizministerium. (2014). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz—EEG 2014). Abgerufen 11. November 2014, von http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf
- Bundesregierung Deutschland. (2023, Februar 24). Gigabitstrategie | Bundesregierung. Abgerufen 23. August 2023, von Die Bundesregierung informiert | Startseite website: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/digitaler-aufbruch/gigabitstrategie-2017464>
- Clausen, J., Beucker, S., & Hintemann, R. (2013). CO₂-Einsparung durch IKT und in der IKT in Hessen Entwicklungspotenziale und Handlungsoptionen Studie im Auftrag der Aktionslinie Hessen-IT. Berlin. Abgerufen von www.hessen-it.de/mm/mm001/CO2_Final.pdf
- Dambeck, H., Ess, F., Falkenberg, H., Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., ... Lechtenböhrer, S. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045 Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Berlin: Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie. Abgerufen von Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie website: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- Dena. (2018). Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Abgerufen von Deutsche Energie-Agentur GmbH website: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- Die Bundesregierung. (2021). Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) zuletzt geändert August 2021. Abgerufen von www.gesetze-im-internet.de/ksg/
- DIN SPEC 91410-2 Energieflexibilität- Teil 2: Identifizierung und Bewertung von Flexibilität in Gebäuden und Quartieren. (2021). Berlin. <https://doi.org/10.31030/3249462>
- European Commission. (2021). Connectivity for a European Gigabit Society—Brochure | Shaping Europe’s digital future. Abgerufen 23. August 2023, von <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/connectivity-european-gigabit-society-brochure>
- Fredrik, A., Oskar, D., Anders, F., Kang, D. H., Konander, J., Pradas, J. L., & Sun, Y. (2023). *Future network requirements for extended reality use cases*. Ericsson. Abgerufen von Ericsson website:

- <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/future-network-requirements-for-xr-apps>
- Gaia-X Hub Germany. (2022, Oktober 20). Was ist Gaia-X? - Gaia-X Hub Germany. Abgerufen 23. August 2023, von <https://gaia-x-hub.de/was-ist-gaia-x/>
- Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland (Energieeffizienzgesetz—EnEfG). , (2023).
- Hintemann, R., Beucker, S., Hinterholzer, S., Grothey, S., Niebel, T., Axenbeck, J., & Sack, R. (2022). Dena Analyse: Neue Energiebedarfe digitaler Technologien—Untersuchung von Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs. Berlin: Borderstep Institut, Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Deutsche Energieagentur.
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., Montevecchi, F., & Stickler, T. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*. Berlin, Vienna: Borderstep Institute & Environment Agency Austria. Abgerufen von Borderstep Institute & Environment Agency Austria website: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-183168542>
- Hotmaps-Projekt. (2021). Hotmaps. Abgerufen von Hotmaps website: <https://www.hotmaps-project.eu/hotmaps-project/>
- Kopernikus-Projekt Ariadne. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne Report*. Potsdam. Abgerufen von <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/>
- Kosiankowski, D., Jäger, M., & Düser, M. (2023). *Entwicklungstrends in Tele-kommunikationsnetzen*. Berlin.
- Lambert, S., van Heddeghem, W., Vereecken, W., Lanoo, B., Colle, D., & Pickavet, M. (2012). Worldwide electricity consumption of communication networks. *Optics Express*, 20(26), B513–B527.
- Lange, C. (2023). Untersuchung und Modellierung zu Energiebedarf und -effizienz in Telekommunikationsnetzen [Abschlussbericht]. Berlin: Hochschule für Wirtschaft und Technik.
- Lundén, D., Malmodin, J., Bergmark, P., & Lövehagen, N. (2022). Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators. *Sustainability*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052637>
- Pahle, M., Sitarz, J., Osorio, S., & Görlach, B. (2022). The EU-ETS price through 2030 and beyond: A closer look at drivers, models and assumptions Input material and takeaways from a workshop in Brussels. Brüssel: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Abgerufen von Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung website: https://ariadneprojekt.de/media/2023/01/Ariadne-Dokumentation_ETSWorkshopBruessel_December2022.pdf
- Sensfuß, F. & Maurer, Christoph. (2022, November). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*. Karlsruhe. Abgerufen von <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- Severin Beucker, Hannes Doderer, Alexander Funke, Hendrik Kondziella, Christopher Koch, Jörn Hartung, ... Niko Rogler. (2021). *Flexibilität, Markt und Regulierung*. [Synthesebericht]. Berlin: WindNODE-Konsortium. Abgerufen von WindNODE-Konsortium website: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/01/FMR_ES.pdf
- 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).

- Stobbe, L., Hintemann, R., Proske, M., Clausen, J., Zedel, H., & Beucker, S. (2015). *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland—Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Berlin: Fraunhofer IZM und Borderstep Institut. Abgerufen von Fraunhofer IZM und Borderstep Institut website: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- TenneT. (2022). TSOs propose methodology, assumptions and alternative configurations for the upcoming European bidding zone review. Abgerufen 18. Januar 2024, von <https://www.tenneT.eu/news/tsos-propose-methodology-assumptions-and-alternative-configurations-upcoming-european-bidding>
- Übertragungsnetzbetreiber. (2023). *Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 (2023), zweiter Entwurf*. Abgerufen von https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-07/NEP_2037_2045_V2023_2_Entwurf_Teil1.pdf
- Ute von Reibitz. (1992). *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung (2.)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

ANHANG 1

Tabelle 2: Annahmen zu Szenarien

		Heute	Ambitioniertes Szenario		BAU-Szenario		Dynamisches Szenario	
		2022	2030	2045	2030	2045	2030	2045
I Klima								
Durchschnittstemperatur D	°C		1,5	1,7	1,6	2,4	1,5	2
<p>Quellen:</p> <p>Zusätzliche Informationen bzgl. der zugrundeliegenden Szenarien für die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur Quelle: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf</p> <p>Temperaturveränderungen im Vergleich zur Referenzperiode 1850-1900 2030 fällt in den Zeitraum "Near term 2021-2040", 2045 fällt in den Zeitraum "Mid-term 2041-2060"</p> <p>Ambitioniertes Szenario: SSP1-2.6 deutliche Anstrengungen beim Klimaschutz, einschließlich negativer Emissionen BAU-Szenario: SSP5-8.5 "Weiter-so-wie-bisher"-Szenario/pessimistischstes Szenario, z.B. Fortsetzung Klimapolitik von 2010, noch lang andauernde Förderung fossiler Energieträger Dynamisches Szenario: SSP2-4.5 mittleres Szenario, Höhepunkt der Emissionen wird um 2040 erreicht, danach Rückgang der Emissionen</p>								
II Energie								
Bedarf elektr. Energie gesamt DTAG	GWh	2.266,00						
Bedarf elek. Energie TK DTAG	GWh	1.812,80	1.934,26	2.206,18	2.206,18	2.719,20	2.356,64	3.172,40

SZENARIEN ZUR MODELLIERUNG VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZEN IM ENERGIESYSTEM

Bedarf elek. Energie Festnetz DTAG	GWh	1.196,45	1.256,27	1.435,74	1.435,74	1.794,67	1.555,38	2.093,78
Bedarf elek. Energie Mobilnetz DTAG	GWh	616,35	677,99	770,44	770,44	924,53	801,26	1.078,62
Bedarf für elektrische Energie beruht auf Basisdaten des Jahres 2022 (siehe Lange (2023)) sowie Vorgaben aus KSG und EnEg.								
Ausbau Erneuerbare Energien								
Ausbau EE	Wind on-shore [GW]	58,042	tbd	160	115	160	tbd	180
	Wind off-shore [GW]	8,129	tbd	70	30	70	tbd	70
	PV [GW]	67,490	tbd	400	215	400	tbd	445
Summe		133,661		630	360	630		695
Quellen EE Ausbau		<i>Quelle: Kraftwerksliste BNetzA, Stand: 17.11.2023</i>	<i>Big5-Studien (siehe S. 7)</i>	<i>Quelle: NEP2023 = mittleres Szenario</i>	<i>Quellen: EEG; WindSeeG; NEP2023</i>	<i>Big5-Studien (siehe S. 7)</i>	<i>Quelle: NEP2023</i>	
III Telekommunikation								
Traffic- Entwicklung Festnetze in Deutschland	EB/a	130		260		450		790
Quelle: Jährliches Datenvolumen in deutschen Telekommunikationsnetzen im Jahr 2022 siehe Lange (2023)								