

---

## CO<sub>2</sub>-Bilanz einer Kupfer-Glasfaser-Migration in Deutschland

Autoren:  
Gonzalo Zuloaga,  
Thomas Plückebaum,  
Gabriele Kulenkampff,  
Fabian Eltges

Bad Honnef, Dezember 2025

# Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für  
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH  
Rhöndorfer Str. 68  
53604 Bad Honnef  
Deutschland  
Tel.: +49 2224 9225-0  
Fax: +49 2224 9225-63  
E-Mail: [info@wik.org](mailto:info@wik.org)  
[www.wik.org](http://www.wik.org)

## Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführung	Dr. Cara Schwarz-Schilling (Vorsitzende der Geschäftsführung, Direktorin)  Alex Kalevi Dieke (Kaufmännischer Geschäftsführer)
Prokuristen	Prof. Dr. Bernd Sörries  Dr. Christian Wernick  Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Stand: Januar 2025

ISSN 1865-8997

Bildnachweis Titel: © Robert Kneschke - stock.adobe.com

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:

<https://www.wik.org/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege>

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>VII</b>
<b>Summary</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Hintergrund und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Gegenstand der Studie</b>	<b>3</b>
<b>3 Literaturüberblick und Forschungsstand</b>	<b>6</b>
<b>4 Methodische Vorgehensweise</b>	<b>8</b>
4.1 Überblick – Berechnungsansatz und Modellaufbau	8
4.1.1 Netzdimensionierung	9
4.1.2 Mehrperiodenbetrachtung	15
4.2 Energieverbrauch	19
4.2.1 Technologie- und netzelementbezogener Energieverbrauch im Festnetz	19
4.2.2 Schätzung des mobilfunkspezifischen Energieverbrauchs	20
4.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen	21
<b>5 Datengrundlage</b>	<b>23</b>
5.1 Gemeindespezifische Struktur- und Versorgungsdaten	23
5.1.1 Übersicht	23
5.1.2 Haushalten und Breitbandverfügbarkeit	25
5.1.3 Gesamttrassenlängen	27
5.1.4 Erforderliche Datenaufbereitungen	30
5.2 Technische und umweltbezogene Daten einzelner Netzelemente	33
5.2.1 Technische Daten	33
5.2.2 Umweltbezogene Daten	37
<b>6 Analyisierte Szenarien</b>	<b>41</b>
<b>7 Modellergebnisse</b>	<b>44</b>
7.1 Szenario 0 – Zielszenario	44
7.2 Szenario 1 – Migration unter verbleibenden FTTB- und DOCSIS-Anschlüssen	45

7.3 Szenario 2 – Mobilfunklösung in ländlichem Raum	49
7.4 Szenario 3 – Dekarbonisierung	51
<b>8 Fazit und Ausblick</b>	<b>54</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
<b>Annex</b>	<b>59</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung der Zugangsnetzarchitektur und berücksichtigten Netzequipment verschiedener Festnetztechnologien	11
Abbildung 4-2:	Exemplarische Darstellung der Entwicklung des modellierten sequenziellen, vollständig abgeschlossenen Glasfaserausbaus von 2024 bis 2032 (Ausbaustand in %)	16
Abbildung 4-3:	Beispielhafte Darstellung der Kupfer-Glasfaser-Migration pro Gemeinde von 2024 bis 2050 (Aktivierungsquote in %)	18
Abbildung 5-1:	Verteilung der Gemeinden nach FTTB/H-Verfügbarkeitsquote (gesamt: 14,3 Mio. FTTB/H verfügbare Anschlüsse. Stand: 06/2024)	27
Abbildung 5-2:	Streuung der Gesamttrassenlänge in Abhängigkeit von der Gemeindengröße (in Trassenkilometer pro Gemeinde; ausgewiesen für Gemeinden mit unter 500.000 Haushalten; N= 10.771)	29
Abbildung 5-3:	Aktivierungsquote nach Regiotyp – aktive / verfügbare Anschlüsse (Datenstand: 06/2024)	31
Abbildung 7-1:	Szenario 0: Netto-CO <sub>2</sub> -Bilanz des Glasfaserausbaus und Kupfer-Glas-Migration im Zeitverlauf [t CO <sub>2</sub> -eq, kumuliert]	44
Abbildung 7-2:	Szenario 1: Prognostizierter Energieverbrauch in Deutschland über die Anschlussnetztechnologien im Zeitverlauf [MWh/a]	46
Abbildung 7-3:	Durchschnittliche Energieverbräuche pro Nutzer je Anslusstechologie im Zeitverlauf [kWh/Anschluss]	47
Abbildung 7-4:	Energieeffizienz je Anslusstechologie im Zeitverlauf [Wh/GB]	48
Abbildung 7-5:	Szenariovergleich: Energieverbrauch pro Jahr [Gesamt, in MWh/a]	49
Abbildung 7-6:	Mobilfunklösung im ländlichen Raum: CO <sub>2</sub> -Emissionen im Zeitverlauf im Vergleich zum Legacy-Szenario [t CO <sub>2</sub> -eq/a]	50
Abbildung 7-7:	Prognostizierter Emissionsfaktor des Energiemixes zur Erreichung der Klimaziele im Zeitverlauf [bundesweit, kg CO <sub>2</sub> /Wh]	51
Abbildung 7-8:	Dekarbonisierungsszenario: CO <sub>2</sub> -Emissionen im Zeitverlauf gegenüber dem Legacy-Szenario [t CO <sub>2</sub> -eq/a]	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands der Studie	5
Tabelle 5-1:	Überblick der verwendeten Datenquellen auf Gemeindeebene	24
Tabelle 5-2:	Zusammenfassende Kennwerte zur Breitbandversorgung – Anzahl der Haushalte pro Gemeinde und Technologie	26
Tabelle 5-3:	Zusammenfassende Kennwerte zur Trassenkilometer pro Gemeinde	28
Tabelle 5-4:	Gesamtgrenzwerte des Energieverbrauchs von Endkundengeräten (CPE) nach Anschlusstechnologie und Betriebsmodi	34
Tabelle 5-5:	Gesamtgrenzwerte des Energieverbrauchs von Netzwerk Equipment nach Anschlusstechnologie, Portdichtklasse und Betriebsmodi	35
Tabelle 5-6:	Verwendete Emissionsfaktoren und resultierenden CO <sub>2</sub> -Äquivalente aktiver Netzelementen	39
Tabelle 5-7:	Zusammenfassung der verwendeten CO <sub>2</sub> -Emissionen während des Glasfaserausbau nach Netzelement und Anschlusstechnologie	39
Tabelle 6-1:	Übersicht der analysierten Szenarien und die dazugehörigen Annahmen	41
Tabelle A-1:	Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi zentraler Equipment nach Anschlusstechnologie	59
Tabelle A-2:	Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi Endkundengeräte (CPE) nach Anschlusstechnologie	59

## Abkürzungsverzeichnis

5G	Fifth Generation Mobile Communications Standard
AC/DC	Alternating Current / Direct Current
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BU-LRIC	Bottom-Up Long-Run Incremental Costs
CIU	Control and Interface Unit
CMTS	Cable Modem Termination System
CO <sub>2</sub> -eq	Carbon Dioxide Equivalent
CPE	Customer Premises Equipment
CXU	Convergence/Cross-Connection Unit
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
FTTB	Fibre-to-the-Building
FTTC	Fibre-to-the-Curb
FTTEX	Fibre-to-the-Exchange
FTTH	Fibre-to-the-home
GB	Gigabyte
GIS	Geographic Information System
GV-ISys	Gemeindeverzeichnis-Informationssystem
HFC	Hybrid Fibre Coaxial
KVz	Kabelverzweiger
LCA	Life Cycle Assessment
LTE	Long Term Evolution
MB	Megabyte
MPoP	Main Point of Presence
NT	Network Termination
ODP	Optical Distribution Points
OLT	Optical Line Terminal

PM_UPL	Power Management Unit/ Power Supply
PON	Passive Optical Network
PtMP	Punkt-zu-Multipunkt
PtP	Punkt-zu-Punkt
RTR	Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH
UBA	Umweltbundesamt
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
WAN	Wide Area Network
Wh/a	Wattstunden pro Jahr
XGS.PON	10-Gigabit Symmetric Passive Optical Network
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line



## Zusammenfassung

Diese Studie analysiert die energie- und emissionsbezogenen Wirkungen der Kupfer-Glasfaser-Migration im deutschen Anschlussnetz vor dem Hintergrund der klimapolitischen Zielsetzungen des European Green Deal, der seit 2019 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 50 % bis 2030 sowie Klimaneutralität bis 2050 vorsieht. Ziel der Analyse ist es, den Beitrag des Glasfaserausbaus zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen differenziert zu bewerten und auf Basis szenariobasierter Modellrechnungen Maßnahmen zu identifizieren, die diese Effekte gezielt unterstützen.

Methodisch basiert die Studie auf einem Bottom-Up-Modellansatz. In einem ersten Schritt wird über eine detaillierte Netzdimensionierung das Mengengerüst sowohl der passiven Infrastruktur für den FTTH/B-Netzausbau als auch der aktiven Netzkomponenten für den Netzbetrieb ermittelt. Der Ausbau berücksichtigt ausschließlich die noch erforderlichen Trassenkilometer für eine flächendeckende Glasfaserschließung. Das Mengengerüst des Netzbetriebs differenziert nach Zugangstechnologien und wird im Zeitverlauf durch die modellierte Kupfer-Glasfaser-Migration variiert. In einem zweiten Schritt werden diese Mengengerüste mit technologiespezifischen Stromverbräuchen und globalen Emissionsfaktoren für Deutschland verknüpft, sodass sowohl der Energieverbrauch als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Netzausbau und -betrieb jahresbezogen bis 2050 ermittelt werden können. Die zugrundeliegende Datenbasis besteht aus gemeindespezifischen Struktur- und Versorgungsdaten von DESTATIS, dem Breitbandatlas der Bundesnetzagentur sowie technischen und umweltbezogenen Kenndaten einzelner Netzelemente, insbesondere standardisierte Energiegrenzwerte aus dem EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment.

Die Modellergebnisse zeigen, dass eine vollständige Anschlussmigration auf FTTH relevante Energieeinsparpotenziale aufweist, die die Emissionen des Glasfaserausbaus bis 2040 vollständig amortisieren. Somit ist bis 2050 mit einer insgesamt positiven Netto-Bilanz des Glasfaserausbaus durch die Kupfer-Glasfaser-Migration in Deutschland zu rechnen. Ein Verbleib von FTTB-, DOCSIS- oder Mobilfunkanschlüssen würde diese Entwicklung nachteilig beeinflussen und könnte sogar die positive ökologische Netto-Bilanz von Glasfaserausbau- und -Migration gefährden.

Zusätzlich kann die Dekarbonisierung des Energiemixes zum Multiplikator der Migration werden. Die Kupfer-Glasfaser-Migration steigert Energieeffizienz im Netzbetrieb, die Dekarbonisierung trägt ferner dazu bei, dass die erzeugte Energie zunehmend ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt werden kann.

In jedem Fall ist eine Verringerung des Energiebedarfs oder dessen unterproportionalem Wachstum im Verhältnis zur Steigerung der Datenvolumina von wesentlicher Bedeutung, unabhängig davon, wie sauber die Energie erzeugt wird. Elektrische Energie benötigt immer Ressourcen, und sei es zur Herstellung und Aufstellung von photovoltaischen Kollektoren und Speicherverfahren zum Ausgleich zwischen Erzeugungs- und Verbrauchszyklen. Ein Verbrauch für die Telekommunikation bedeutet immer, dass diese ggf. sauber erzeugte Energie für andere Zwecke nicht zur Verfügung steht, sieht man einmal von den Kosten für die Energie ab.

## Summary

This study examines the energy- and emissions-related impacts of the copper-to-fibre migration in the German access network in the context of the climate policy objectives of the European Green Deal, which aims to reduce greenhouse gas emissions by 50 % by 2030 and to achieve climate neutrality by 2050. The analysis seeks to assess, in a differentiated manner, the contribution of fibre deployment to improvements in energy efficiency and reductions in CO<sub>2</sub> emissions, and to identify – based on scenario-based modelling – measures that can effectively enhance these outcomes.

Methodologically, the study applies a bottom-up modelling approach. In a first step, detailed network dimensioning is used to derive the quantity framework for both the passive infrastructure required for FTTH/B deployment and the active network components involved in network operation. The expansion considers exclusively the remaining fiber optic network infrastructure needed to achieve nationwide fibre coverage. The quantity framework for network operation is differentiated by access technology and evolves over time as a result of the modelled copper-to-fibre migration. In a second step, these quantities are combined with technology-specific electricity consumption values and national average emission factors, enabling the quantification of both energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from the network deployment and network operation over multiple periods up to 2050. The analysis is based on municipality-level demographical data from DESTATIS, and coverage data from the *Breitbandatlas* and *Bundesnetzagentur*, complemented by technical and environmental data of individual network elements, particularly from the standardised energy benchmarks from the EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment.

The modelling results show that a complete migration to FTTH offers significant energy savings potential, which will completely offset the emissions from fibre optic network roll-out by 2040. By 2050, fibre optic expansion is expected to have an overall positive net balance in Germany as a result of the migration from copper to fibre optics. Retaining FTTB, DOCSIS or mobile based connections would have a negative impact on this development and could even jeopardise the positive net ecological balance of fibre optic expansion and migration.

In addition, the decarbonisation of the energy mix can become a multiplier for the savings effects of the migration. Copper-fibre migration increases energy efficiency in network operation, while decarbonisation also contributes to the required energy being produced with fewer CO<sub>2</sub> emissions.

In any case, reducing energy consumption or ensuring that it grows at a slower rate than the data volumes increase, is essential, regardless of how cleanly the energy is generated. Energy production always requires resources, whether for the production and installation of photovoltaic collectors or for storage methods to balance generation and consumption cycles.

Consumption for telecommunications always means that this energy, which may have been generated cleanly, is not available for other purposes, apart from the cost of the energy itself.

## 1 Hintergrund und Motivation

Die seit 2025 regierenden Parteien von CDU, CSU und SPD schreiben in ihrem Koalitionsvertrag die Maßgabe vor, den „flächendeckenden Glasfaserausbau FTTH (bis in jede (Miet-)Wohnung) entscheidend voran [zu bringen]“.<sup>1</sup>

Parallel dazu gibt der European Green Deal der Europäischen Kommission seit 2019 vor, Europas Wirtschaft und Gesellschaft auf einen nachhaltigeren Pfad zu begeben, um Emissionen bis 2030 um 50 % zu halbieren und bis 2050 klimaneutral zu machen. Die Kommission hebt dabei die digitale Transformation als „Enabler“ für Veränderungen hervor und möchte diese fördern.<sup>2</sup> In ihrem White Paper zur digitalen Transformation von 2024 hob die Europäische Kommission<sup>3</sup> noch einmal die Rolle der Telekommunikationsindustrie als direkter Verursacher von Stromverbräuchen und Emissionen hervor, der 2023 für 7-9 % des weltweiten Stromverbrauchs und 3 % aller Treibhausgasemissionen verantwortlich sei. Gleichzeitig betont das White Paper aber auch den positiven Einfluss, den der Sektor, z.B. durch das Ermöglichen von Smart Home- oder Smart Mobility-Diensten, auf Nachhaltigkeit nehmen kann, um so Emissionen weltweit um 15 % zu reduzieren.<sup>4</sup> So sieht die Kommission die Abschaltung der Kupfernetze auch im Kontext der Zielerreichung europäischer ökologischen Nachhaltigkeit. Eine Migration auf glasfaserbasierte Anschlüsse, die bis 2030 jedem Haushalt zur Verfügung stehen sollen, solle daher gefördert werden.<sup>5</sup>

Darüber hinaus untersuchten diverse Studien Einsparpotenziale in Stromverbrauch und Emissionen von glasfaser- gegenüber kupferbasierten Anschlussstechnologien.<sup>6</sup> Bei der Übertragung über Glasfasern werden optische Signale (Licht bestimmter Wellenlängen) nahezu verlustfrei und nahezu ungedämpft übertragen, bei der Übertragung über Kupferadern entwickeln sich durch den Stromfluss um die Leiter elektromagnetische Felder, die einen erheblichen Teil der Energie in die Umgebung abstrahlen, und zudem entwickelt sich durch den Stromfluss entlang der Leiter ein Wärmeverlust. Die Übertragung über Kupferdoppeladern ist daher im Vergleich erheblich energieintensiver.

Im Zentrum dieses Diskussionsbeitrags steht daher die Frage nach Einsparpotenzialen in Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen voranschreitenden Glasfaseraus-

<sup>1</sup> CDU, CSU, SPD (2025). Verantwortung für Deutschland, Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. <https://www.cdu.de/app/uploads/2025/04/KoaV-2025-Gesamt-final-0424.pdf>.

<sup>2</sup> Europäische Kommission (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — The European Green Deal (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.

<sup>3</sup> Europäische Kommission (2024). How to master Europe's digital infrastructure needs? White Paper. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/white-paper-how-master-europes-digital-infrastructure-needs>.

<sup>4</sup> Ebenda, S. 16.

<sup>5</sup> Ebenda, S. 31.

<sup>6</sup> Siehe u.a. Obermann (2022), Ficher et al. (2021), Bieser et al. (2020), Aleksic und Lovric (2011), Godlovitch et al. (2023), Breide et al. (2021), Laidler et al. (2019), Anders und Edler (2015), Raspone et al. (2015); Siehe weiterführend Kapitel 3.

bau und Nachfrage nach glasfaserbasierten Anschlüssen. Konkret wird untersucht, wie hoch der Footprint des deutschen Anschlussnetzes im Status quo ist und wie sich dieser unter verschiedenen Ausbauszenarien bis 2050 entwickelt.

Vorlage des zur Anwendung kommenden Modells, das zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen dienen soll, bildet eine Studie der WIK-Consult für die österreichische Regulierungsbehörde RTR aus dem Jahr 2024.<sup>7</sup>

Die weitere Studie gliedert sich wie folgt: Im nachfolgenden zweiten Kapitel werden Gegenstand und Ziel der Untersuchung präzisiert. Kapitel 3 gibt eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Forschung zu den genannten Fragen und den Beitrag, den diese Studie hierzu leisten kann. Kapitel 4 stellt die methodische Vorgehensweise der Modellierung vor und beschreibt, wie über die Mengengerüste Energieverbräuche und schließlich CO<sub>2</sub>-Emissionen hergeleitet werden. Kapitel 5 beschreibt ergänzend die hierzu notwendige Datengrundlage, bevor in Kapitel 6 die untersuchten Modellszenarien beschrieben werden. Die Modellergebnisse werden in Kapitel 7 vorgestellt, die zum Fazit in Kapitel 8 führen.

---

<sup>7</sup> Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Ockenfels, M. (2024a). Ökologische Effekte des Glasfaserausbaus. Studie für die Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH. WIK-Consult GmbH. [https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/Oeko-Effekte\\_20241206\\_Bericht.pdf](https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/Oeko-Effekte_20241206_Bericht.pdf).

## 2 Gegenstand der Studie

Ziel der modellgestützten Untersuchung dieses Diskussionsbeitrages ist es, den ökologischen Fußabdruck verschiedener Anschlusstechnologien (FTTH in PtP- wie auch in PtMP-Topologie, FTTB, FTTC, FTTE<sub>x</sub>, HFC) in Deutschland zu analysieren.<sup>8</sup> Diese Analyse soll bei genauer Abbildung der gegenwärtigen Verfügbarkeits- und aktiven Anschlusszahlen über diese Technologien den gegenwärtigen Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Anschlussnetzes bestimmen. Dieser Fußabdruck des Energieverbrauchs wird daraufhin im Zeitverlauf bis 2050 in seiner Veränderung durch den Netzausbau und die Kundenmigration auf Glasfaseranschlüsse bewertet. Hierfür werden Annahmen über die Ausbau- und Migrationsgeschwindigkeit getroffen. Diese Annahmen münden zunächst in der Definition eines Referenzszenarios, das in Sensitivitätsanalysen mit verschiedenen Ausbaupfaden verglichen wird, um potenzielle Opportunitätskosten des Glasfaserausbaus in Deutschland zu ermitteln.

Kern der Untersuchung im Zeitverlauf ist der Trade-off zwischen den ökologischen Kosten des Glasfaserausbaus (insbesondere getrieben durch Tiefbauarbeiten) und den Stromverbrauchs- und Emissionseinsparungen, die sich aus der Nutzung der glasfaser- gegenüber kupferbasierten Technologien ergeben. Anzumerken ist hierbei die Rolle der aktiven Nutzung, denn während der Ausbau unabhängig von einer späteren aktiven Nutzung Emissionen verursacht, trägt nur die aktive Nutzung der neuen Technologie im Zeitverlauf zu einer relativen Reduktion von Stromverbrauch und Emissionen bei.

Dieser Modellierungsansatz erlaubt darüber hinaus die Untersuchung, nach welchem Zeitraum sich der Glasfaserausbau durch aktive Nutzung einer glasfaser- statt einer kupferbasierten Anschlusstechnologie ökologisch amortisieren kann, bzw. wann der Netto-Effekt der Glasfasererschließung aus ökologischer Sicht positiv ist.

Das verwendete Modell analysiert hierbei Bottom-up auf Basis der tatsächlichen Siedlungsstruktur deutscher Gemeinden sowie modellierter Trassenführung der Glasfaserstrecken die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Glasfaserausbaus sowie auf Basis der bestehenden aktiven Anschlüsse nach Technologie den laufenden Stromverbrauch und die CO<sub>2</sub> Emissionen im Betrieb. Einsparpotenziale können nach unterstelltem Ausbau nur bei Kundenmigration auf die neu ausgebaute Glasfasertechnologie erreicht werden. Ein ausgebauter Anschluss, auf den lange Zeit keine Migration erfolgt, verschlechtert die Möglichkeit die Emissionen des Ausbaus im Zeitverlauf durch reduzierte Emissionen im Betrieb zu amortisieren.

Eingrenzend ist zu festzuhalten, dass das Modell und somit die hier vorliegende Untersuchung ausschließlich der sogenannten „Footprint“ von Ausbau und Betrieb analysieren, und nicht der „Handprint“. Der Footprint erfasst die negativen Umweltauswirkungen eines Produktes oder Sektors, insbesondere Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen, in

---

<sup>8</sup> FWA und Satellitenversorgung sind aufgrund ihrer vernachlässigbaren Relevanz auf dem deutschen Festnetzmarkt in dieser Studie nicht berücksichtigt.

diesem Fall von Telekommunikations-Anschlussnetzen. Der Handprint hingegen bezieht auch potentielle positive Umweltauswirkungen ein, die durch indirekte Effekte in angrenzende Sektoren entstehen können. Da der ITK-Sektor streng verbunden ist mit angrenzenden digitalen Diensten oder dem Energiesektor, sind durch einen zunehmenden Glasfaserausbau weitere Mitnahmeeffekte und Emissionseinsparungen denkbar. Diese könnten etwa aus smarten Messtechniken und der Steuerung dezentraler Energieerzeugung erwachsen oder aus Smart-Home-Anwendungen.

Der betrachtete Zeithorizont der Untersuchung ist der Status quo der Datenlage in Bezug auf den Netzausbau und Anschlussverteilung im Jahre 2024 bis 2050. In diesen Zeitraum fallen der Trassenbau zur flächendeckenden Versorgung Deutschlands mit FTTH/B, der Ausbau und die Nutzung der aktiven Technik für den Netzbetrieb ebenjenes Netzes sowie die Nutzung der aktiven Technologie der Legacy-Übertragungstechnologien (FTTC, FTTE<sub>x</sub> und DOCSIS) sowie des Mobilfunks statt, nach Maßgabe wie der Mobilfunk als Ersatz für Festnetzanschlüsse genutzt wird (sogenannte stationäre drahtlose Breitbanddienste via LTE/5G, auch als FWA (Fixed Wireless Access) bezeichnet).<sup>9</sup>

Außerdem findet keine vollständige Life Cycle-Analyse (LCA) statt, die neben den ausgewählte Lebenszyklusphasen von Ausbau der Netze und dessen Betrieb auch die Entsorgung der aktiven Systeme und passiven Netzelemente (End-of-Life-Prozesse) umfassen würde. Auch werden Auswirkungen auf den Wasserverbrauch und andere Ressourcen nicht untersucht, gleichfalls nicht die Weiterverwendung der nicht mehr benötigten Kupferkabel nebst Aufwand zum Herausziehen.

Ebenso werden die Energieverbräuche von Endkundengeräten sowie des Kernnetzes einschließlich Server- und Rechenzentrumsinfrastrukturen nicht in die Betrachtung einbezogen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Endkundengeräte wie Router, Bildschirme und Smartphones gemeinsam etwa 60 bis 80 % der sektorspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des IKT-Sektors verursachen, während auf das Anschlussnetz lediglich rund 12 bis 24 % entfallen.<sup>10</sup> Der analytische Fokus liegt dennoch auf dem Anschlussnetz, da sich in diesem Netzsegment die ökologischen Auswirkungen der betrachteten Transformationsprozesse – des FTTH-Ausbaus und der Migration bestehender Zugangstechnologien – unmittelbar und in substanziellem Umfang manifestieren.

Die Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands der Studie ist in der nachstehenden Tabelle zusammenfassend dargestellt.

---

<sup>9</sup> Bundesnetzagentur (2024). Jahresbericht 2024 Telekommunikation.  
<https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2024TK1.pdf>.

<sup>10</sup> Godlovitch, I., Louguet, A., Baischew, D., Wissner, M., Pirlot, A. (2021). Environmental impact of electronic communications, WIK/Ramboll Study for BEREC, Bad Honnef, 21. December 2021, BOR (22) 34.  
[https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/document\\_register\\_store/2022/3/BoR%20%2822%29%2034\\_External%20Sustainability%20Study%20on%20Environmental%20impact%20of%20EC.pdf](https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/document_register_store/2022/3/BoR%20%2822%29%2034_External%20Sustainability%20Study%20on%20Environmental%20impact%20of%20EC.pdf).

Tabelle 2-1: Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands der Studie

	Gegenstand der Studie	Nicht Gegenstand der Studie
<b>Zielgrößen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Energieverbrauch (in Kwh)</li> <li>✓ Treibhausgasemissionen (in CO<sub>2</sub>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ sonstige Umweltindikatoren</li> </ul>
<b>Phase des Lebenszyklus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Netznutzung<sup>11</sup></li> <li>✓ Netzausbau (FTTH/B)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ End-of-Cycle</li> </ul>
<b>Technologien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Glasfaser (FTTH/B)</li> <li>✓ Kupfer (FTTC und FTTE<sub>x</sub>)</li> <li>✓ HFC (DOCSIS)</li> <li>✓ Drahtlos mobilfunkbasiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Satellitennetze</li> <li>✗ FWA</li> </ul>
<b>Netzsegment</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Anschlussnetz (inkl. Kundenmodem)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Aggregations- und Kernnetz</li> <li>✗ Datenzentren</li> <li>✗ Kundenendgeräte</li> </ul>
<b>Zeithorizont</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ IST-Stand 2024</li> <li>✓ Ausbau- und Migrations-szenarien bis 2050</li> </ul>	

Quelle: WIK

<sup>11</sup> Emissionen und Stromverbräuche, die bei der Wartung von Netzequipment entstehen wurden in der vorliegenden Studie nicht näher beleuchtet.



### 3 Literaturüberblick und Forschungsstand

Der gegenwärtige Stand der Forschung zeigt verschiedene Ansätze, um Stromverbräuche und/oder CO<sub>2</sub>-Emissionen von Telekommunikationsnetzen zu evaluieren. Viele bedienen sich modellgestützter Ansätze, um vor allem Anschlussnetze zu bewerten. Überwiegend kommen hierbei Bottom-up gestützte Modellansätze zur Anwendung.

Stobbe et al. (2023) untersuchten in einem Bericht des Fraunhofer-Instituts IZM für das Umweltbundesamt die Umwelteinflüsse der deutschen Mobilfunknetzes für das Jahr 2019 und in einer Entwicklung bis 2030. Auf Basis eines Sachbilanzmodells, das die Herstellungs- als auch Nutzungsphase der wesentlichen Infrastrukturelemente des Mobilfunksektors im Zeitverlauf bilanziert, prognostizieren die Autoren für Deutschland einen Anstieg des Stromverbrauchs von 2019 – 2030 von 2,3 TWh auf 7,5 TWh, um 225 %. Als hauptsächlicher Verursacher des Stromverbrauchs identifizieren die Autoren den operativen Betrieb des Funkzugangsnetzes.

Obermann (2022) untersuchten den Stromverbrauch verschiedener Anschlusstechnologien im Festnetz für Gesamtdeutschland und in Differenzierung nach städtischen und ländlichen Regionen. Die Studie analysiert zunächst netzelementbezogen die Stromverbräuche der Netzelemente der verschiedenen Technologien. Zusätzlich werden Übertragungs- und Anschlusskapazitäten dieser Netzelemente je Anschlusstechnologie ausgewertet, um einen Stromverbrauch je Anschluss je Technologie bei verschiedenen Nutzerzahlen auszuweisen. Die Autoren kommen so zu dem Schluss, dass FTTH-Netze in Bezug auf den Stromverbrauch die effizienteste Anschlusstechnologie darstellen, die selbst den Verbrauch von FTTB-Netzen um den Faktor 2,6, von FTTC-Netzen um den Faktor 3 und von HFC-Netze um den Faktor 6 unterbieten können.

Die Autoren Ficher et al. (2022) nahmen in Ihrer Analyse des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks Backbone-Netze in Frankreich in den Vordergrund ihrer Analyse. Die Autoren nahmen direkte Messungen des Energieverbrauches IP-Verkehr-übertragender Systeme vor, um hieraus CO<sub>2</sub>-Emissionen abzuleiten. Diese setzen die Autoren in Zusammenhang mit übertragenen Datenvolumen. Sie finden heraus, dass die Emissionen je übertragenem GB stark zwischen der Dichte der im Netz angeordneten Übertragungselemente sowie dem Durchsatz des Verkehrs abhängen. Für das französische Backbone ermitteln sie Emissionen von 1,4 gCO<sub>2</sub>/GB zu Spitzenübertragungszeiten und 0,6 gCO<sub>2</sub>/GB außerhalb dieser Zeiten.

In einer Studie von 2020 analysierten die Autoren Bieser et al. (2020) die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 5G-Mobilfunknetzen, die durch den Ausbau und Betrieb dieser Netze entstehen. Sie untersuchten darüber hinaus Einsparpotenziale durch Use Cases von 5G. Die Autoren bewerten die Emissionen differenziert nach den Netzsegmenten Anschluss-, Kern- und Transportnetz des 5G-Mobilfunknetzes. Für jedes Netzsegment nehmen sie ein Mengengerüst für 2020 und 2030 an. Aus diesem Mengengerüst leiten sie Stromverbräuche und so schließlich Emissionen her, die sie auf der Zeitachse verteilen. So prognostizieren die Autoren Emissionswerte von 0,018 Mio. t CO<sub>2</sub>-e/Jahr in der Schweiz bis 2030, die durch Aufbau und Betrieb eines 5G-Netzes entstehen werden. 57 % davon



entfallen auf den Ausbau. Demgegenüber entstünden je nach Szenario Einsparpotenziale von 0,1 – 2,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-e/Jahr, die durch verschiedene Applikationen in den Sektoren Verkehr, Landwirtschaft, Energie, Gebäude, Gesundheit und Unterhaltung ermöglicht werden und die nicht durch bestehende 4G-Netze erbracht werden können.

Godlovitch et al. (2023) untersuchten im Rahmen des Impact Assessment im Kontext der Kostensenkungsrichtlinie für die Europäische Kommission die Umwelt-Auswirkungen des Breitbandausbaus in der EU. Auf Basis einer Literaturrecherche wurden Emissionsverbräuche von 2023-2030 für den Ausbau und Betrieb aller europäischen Anschlussnetze unter verschiedenen Szenarien prognostiziert, wobei Szenarien mit höherer FTTH-Anschlussquote (homes connected) mit niedrigeren Emissionswerten einhergehen. Die summierten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 2023-2030 liegen gemäß der Studie bei ca. 24 Mio. t CO<sub>2</sub>-e.

Die Autoren Breide et al. (2021) verfolgen den Ansatz einer Modellierung über Energieverbräuche in Anschlussnetzen. Hierfür wählen sie eine Beispielregion mit mehreren Gemeinden in Deutschland aus, die aufgrund ihrer Besiedlungsstruktur repräsentativ für Deutschland sein sollen. Über ein Annahmeset je Anschlusstechnologie (etwa Anzahl erreichbarer Anschlüsse mit VDSL, gegeben Längenbeschränkungen) leiten sie Verfügbarkeitszahlen und Anzahl jeweils benötigter Netzelemente (etwa DSLAMs) her. Zusammen mit den Stromverbräuchen je Netzelement leiten sie aus dem Mengengerüst Gesamtstromverbräuche je Technologie und schließlich im Aggregat her, die schließlich in CO<sub>2</sub>-Emissionen übersetzt werden. Die Autoren ermitteln für FTTH in der G.PON-Technologie die geringsten Emissionswerte von 1,685 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr, gefolgt von VDSL2-Vectoring, FTTH-PtP und HFC.

Andrae und Edler (2015) schätzten den Stromverbrauch der globalen Telekommunikation von 2010-2030 ab. Die Autoren treffen Annahmen über Stromverbräuche von Herstellung und Betrieb sowie Energieeffizienzsteigerungen im Zeitverlauf für die verschiedenen Netzsegmente und Netzelemente vom CPE bis zu Datenzentren. Darüber hinaus werden globalere Faktoren einbezogen, wie Abschätzungen über die Entwicklung des globalen Stromverbrauchs, CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Strommixes. Die Autoren ermitteln, dass die globale Telekommunikation bis zu 51 % des globalen Energieverbrauchs sowie 23 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen könnte.

Das Modell, das diesem Diskussionsbeitrag zugrunde liegt, reiht sich in die Reihe der Bottom-up basierten Modelle ein. Es ist dabei der erste Ansatz, der für die Gesamtheit der deutschen Anschlussnetze nicht nur eine Bestandsaufnahme von Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen vornimmt, sondern diese auch über Ausbau- und Take-up-Annahmen im Zeitverlauf bis 2030 darstellt. Zusammen mit vorangehenden Studien, die den Zeitverlauf im größeren Kontext oder Bestandsaufnahmen in kleineren geographischen Ausschnitten analysieren, trägt diese Studie somit zur Vervollständigung des Verständnisses über die Nachhaltigkeit von Telekommunikationsnetzen bei.

## 4 Methodische Vorgehensweise

Die Modellierung zur Bewertung von Stromverbräuchen und CO<sub>2</sub>-Emissionen der TK-Anschlussnetze in Deutschland unterscheidet im Zeitverlauf zwischen dem Netzausbau für FTTH als Ziel-Technologie und dem Betrieb eines Mixes von verschiedenen Übertragungstechnologien. Für den Netzausbau wird als Ausbauziel die Verfügbarkeit von Glasfaser für alle Anschlüsse in Deutschland unterstellt.

Das Modell zur Quantifizierung von Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Netzausbaus basiert auf einem Bottom-Up-Ansatz. Dieses ermittelt ein Mengengerüst für die verschiedenen Netzelemente des Anschlussnetzes. Dieses Prinzip ist ähnlich jenem, das in der Telekommunikationsregulierung in Form von sogenannten BU-LRIC-Modellen zur Kostenmodellierung von Vorleistungsprodukten in Anschlussnetzen (etwa der entbündelten Teilnehmeranschlussleitung) zur Anwendung gebracht wird. Das so ermittelte Mengengerüst wird, anders als bei Kostenmodellen mit Euro-Investitionswerten, in der vorliegenden Modellierung mit Energieverbräuchen bewertet. Diese werden wiederum auf Basis von EU-weit standardisierten Energiegrenzwerten für TK-Equipment (EU Code of Conduct) festgelegt. Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten über den Strommix in Deutschland wird dieser Stromverbrauch schließlich in Emissionen übersetzt. Zur Datengrundlage des Mengengerüsts und der Stromverbräuche der einzelnen Netzelemente sowie deren Übersetzung in CO<sub>2</sub>-Emissionen führt Kapitel 5 detailliert aus.

Die zu dimensionierenden Netzelemente der Trassenführung sind zum einen die Trassen, die durch Tiefbau entstehen, sowie die physischen Netzeinrichtungen, die die aktiven Netzelemente beherbergen.

Somit wird die Untersuchung der Zielfragestellung ermöglicht, wieviel Emissionen der Glasfasernetzausbau in Deutschland verursachen wird und wie die Migration auf die emissionsschonende FTTH-Technologie zur Saldierung dieser Emissionen beitragen kann und inwiefern unterschiedliche Ausbau- und Migrationspfade diese Saldierung maßgeblich beeinflussen können.

### 4.1 Überblick – Berechnungsansatz und Modellaufbau

Das Modell verfolgt, wie eingangs beschrieben, einen Bottom-Up-Ansatz. Die Modellierung erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird über eine Netzdimensionierung das Mengengerüst der passiven Infrastruktur für den Netzausbau sowie der aktiven Netzkomponenten für den Netzbetrieb ermittelt. Das Mengengerüst des Netzausbaus besteht aus dem zum Startpunkt der Modellierung noch notwendigen Trassenkilometer für Gräben und Masten und Kabelanlagen für eine flächendeckende FTTH-Versorgung. Für die Legacy-Anschlusstechnologien wird kein weiterer Netzausbau mehr unterstellt. Das Mengengerüst für den aktiven Netzbetrieb unterscheidet sich über die verschiedenen Anschlussnetztechnologien. Auch dieses Mengengerüst ergibt sich aus der Bottom-Up-Modellierung. Die Endkunden werden im Verhältnis der Anschlusstechnologien auf die

entsprechenden Anschlüsse verteilt. Diese wird über den Zeitverlauf durch die Kupfer-Glasfaser-Migration variiert und ist Gegenstand der Szenarioanalysen.

In einem zweiten Schritt werden die ermittelten Mengengerüste jeweils mit ihren dazugehörigen Emissionen bzw. Stromverbräuchen multipliziert. Der Trassenausbau wird über Emissionen je Kilometer quantifiziert, während der Betrieb der aktiven Netzelemente auf Basis ihres Stromverbrauchs unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Strommixes in CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet wird.

#### 4.1.1 Netzdimensionierung

##### 4.1.1.1 Passive Infrastruktur (FTTH/B Glasfasernetze)

Passive Elemente in Glasfaseranschlussnetzen sind physische Infrastrukturkomponenten, die während des Netzbetriebs die optische Datenübertragung ermöglichen, ohne selbst Strom zu verbrauchen. Zu den zentralen passiven Elementen zählen die **Trassenführung** von Glasfaserleitungen, sowie die **Faserverzweiger**. Während FTTH als Zieltechnologie vorgegeben wird, wird szenarioabhängig auch untersucht, welchen Einfluss der Verbleib von FTTB-Anschlüssen haben kann. Diese Technologie wird daher ebenfalls in diesem Abschnitt beschrieben.

**Trassenführung.** Die Netzdimensionierung der Trassen basiert auf Anschlusszahlen für Deutschland. Die Referenzierung von Anschlussbereichen wird dabei auf Basis von Gemeinden vorgenommen. Auf Basis einer graphentheoretisch optimierten Zuordnung von Endkundenanschlüssen zu MPoP-Standorten wird eine optimale Trassenführung ermittelt, wobei unterstellt wird, dass Glasfaserleitungen in der Regel entlang bestehender Straßen verlaufen. Diese Trassenführung ermittelt ein Mengengerüst von Trassenkilometern je Anschlussbereich. Für diese Dimensionierung wird auf die Ergebnisse der GIS-basierte Modellierung des WIK-Diskussionsbeitrags zu „Kosten von Breitband-Zugangsnetzen“ von 2020<sup>12</sup> zurückgegriffen. Weitere Details zur Ermittlung der Trassenlängen werden in Kapitel 5 (Datengrundlage) ausgeführt.

Die resultierende Gesamtrassenlänge wird in einen bereits realisierten und einen noch auszubauenden Anteil aufgeteilt, wobei die Aufteilung auf Gemeindeebene proportional zur jeweiligen Glasfaserverfügbarkeitsquote erfolgt. Der Anteil der bereits versorgten Haushalte dient dabei als Maß für den bereits realisierten Trassenausbau. Die verbleibende Differenz entspricht der noch ausstehenden Trassenlänge und bildet im Modell

---

<sup>12</sup> Kulenkampff, G., Ockenfels, M., Zoz, K., & Zuloaga, G. (2020). Kosten von Breitband-Zugangsnetzen: Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up-Modellierung und statistische Analyse. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-473-kosten-von-breitband-zugangsnetzen>.

die zentrale Grundlage für die Quantifizierung der Emissionen aus Trassenbau des künftig noch zu realisierenden Glasfaserausbaus.

**Faserverzweiger.** Das Mengengerüst der Faserverzweiger wird auf Basis der Anzahl der in einem Gebiet zu versorgenden Anschlüsse ermittelt. Faserverzweiger, auch als Optical Distribution Points (ODP) bezeichnet, dienen der Verzweigung der Glasfasern und der Verteilung der Signale zu den einzelnen Endnutzern. Die erforderliche Anzahl der Faserverzweiger ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Anschlusszahl eines Gebiets und der maximalen Kapazität der eingesetzten Verzweigertypen. In der Modellierung wird angenommen, dass Faserverzweiger bei FTTH-PtP- und FTTB-Architekturen maximal 360 Anschlüsse bedienen können, während bei FTTH-PtMP ebenfalls Kapazitäten bis 384 Anschlüssen zugrunde gelegt werden. Hier beherbergen die Faserverzweiger auch die Splitter.

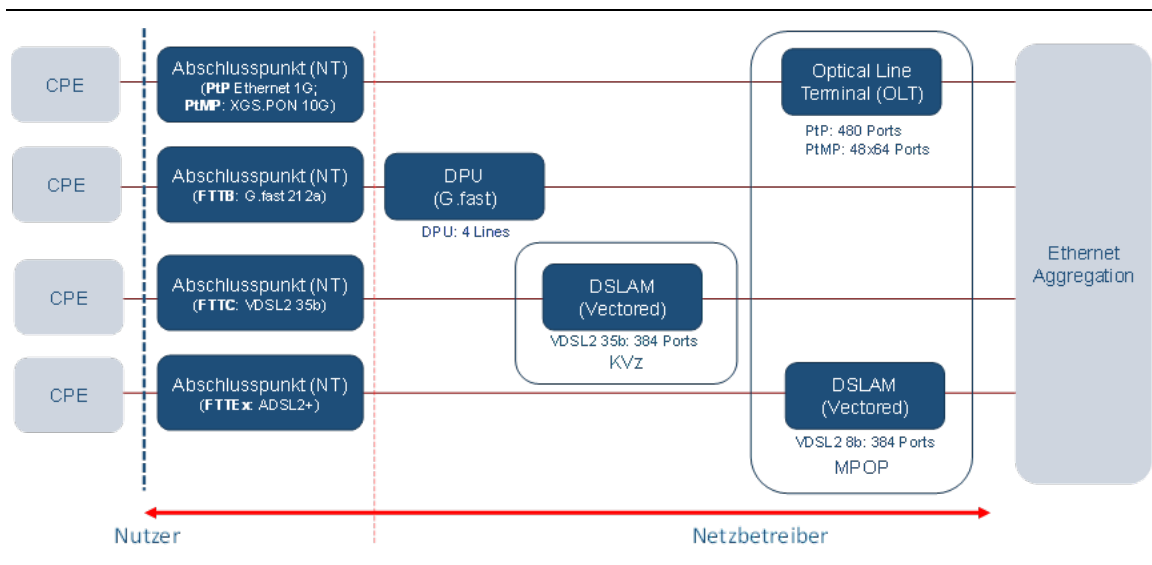
Ein Überbau von Trassen oder Netzelementen des Netzbetriebs wird nicht angenommen.

Die auf diese Weise ermittelten Trassenkilometer und Anzahl Faserverzweiger werden mit einem CO<sub>2</sub>-Verbrauch je Trassenkilometer beaufschlagt, um die gesamten Emissionen des Ausbaus zu ermitteln. Abschnitt 4.2 führt hierzu weiter aus.

#### 4.1.1.2 Netzequipment

Die modellierten Netzelemente des TK-Zugangsnetzes umfassen die Netzelemente vom Netzabschlusspunkt (NT) auf Kundenseite bis unmittelbar vor der Ethernet-Aggregation auf Seiten des Netzbetreibers. Aktive Komponenten innerhalb dieser Systemgrenze werden für die Modellierung berücksichtigt. Sie unterscheiden sich nach Anschlusstechnologie. Die nachfolgende Grafik zeigt schematisch die Netzarchitektur der modellierten Anschlusstechnologien.

Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Zugangsnetzarchitektur und berücksichtigten Netzequipment verschiedener Festnetztechnologien



Quelle: WIK

Der maßgebliche Treiber für die Ermittlung der Anzahl der jeweiligen aktiven Netzelemente ist die Anzahl der aktiven Anschlüsse je Zugangstechnologie, also denjenigen Anschlüssen, die für die Nutzung tatsächlich aktiviert sind, bzw. hierfür kontrahiert sind.

Ein weiteres dimensionierendes Element sind Kapazitätsbeschränkungen einzelner Netzelemente. Sofern die Kapazität einzelner konzentrierender Netzelemente erreicht ist, erfolgt über die Bottom-up-Dimensionierung die Zuweisung einer größeren Netzelementkonfiguration oder eines weiteren Elements. Für die Kapazitätsdimensionierung wird jedem aktiven Anschluss eine durchschnittliche Bandbreite je nach genutzter Technologie unterstellt.

Die Herleitung der Anzahl der aktiven Anschlüsse je Zugangstechnologie erfolgt über die Ableitung des Bottom-Up modellierten Mengengerüsts über Anschlüsse unter Berücksichtigung einer Nutzerverteilung. Diese Nutzerverteilung verändert sich parametergetrieben im Zeitverlauf und ist Gegenstand der Kupfer-Glasfaser-Migration der verschiedenen Szenariorechnungen (siehe Abschnitt 4.1.2).

Je nach Anschlusstechnologie wird nach den benötigten Netzelementen differenziert. Die relevanten und daher modellierten Anschlusstechnologien in Deutschland sind:

- FTTH PtP,
- FTTH PtMP (XGS.PON),
- FTTB
- FTTC
- FTTE<sub>x</sub>
- DOCSIS 3.1<sup>13</sup>
- stationäre mobilfunkbasiert

Je nach Anschlusstechnologie werden unterschiedliche Netzelemente modelliert, die nachfolgend beschrieben werden. Diese stellen die Netzelemente dar, für die ein Mengengerüst Bottom-Up modelliert werden und dessen Stromverbräuche im Rahmen dieser Analyse zu quantifizieren sind. Eine Übersicht über die Anschlussnetztechnologien und deren Leistungsfähigkeit gibt der WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 498 (2023).<sup>14</sup>

#### 4.1.1.2.1 FTTH (Fiber-to-the-Home)

Bei der FTTH-Technologie wird zwischen den Topologien Punkt-zu-Punkt (PtP) sowie Punkt-zu-Multipunkt (PtMP) unterschieden. In der PtP-Topologie wird der Netzabschlusspunkt (Network Termination, NT) mit einer dedizierten Faser je Endkundenanschluss mit dem Optical Line Terminal (OLT) verbunden. Hierfür werden am OLT kundenseitig 480 Ports<sup>15</sup> und eine Portbandbreite von einem Gbps unterstellt.

In der PtMP-Topologie handelt es sich um ein Passive Optical Network (PON), bei der, in Abgrenzung zur PtP-Topologie, die Endkundenanbindung über die NT zum OLT zusätzlich über einen Splitter geführt wird. Während auf der Kundenseite des Splitters dedizierte Fasern zum Endkunden geführt werden, werden diese am Splitter zu einer gemeinsamen Faser (Feeder-Faser) in Richtung OLT aggregiert („geteiltes Medium“). Diese Aufteilung von Faserkapazitäten auf verschiedene Endkundenanschlüsse limitiert gegenüber der PtP-Topologie die maximal erreichbaren Übertragungsraten bei gleichzeitiger Nutzung. Der OLT erfüllt in dieser Topologie die zusätzliche Funktion der Kommunikationssteuerung zwischen NT und dem OLT, indem er den einzelnen Anschlüssen auf deren Anfrage hin Zeitslots zur Datenübertragung zuweist. Um dennoch Gigabitfähigkeit

<sup>13</sup> Eine Berücksichtigung von DOCSIS 4.0 und eventuelle Energieeinsparpotenziale gegenüber DOCSIS 3.1 findet in dieser Studie nicht statt, da eine Aufrüstung auf DOCSIS 4.0 in Deutschland nicht geplant ist, sondern eher direkt auf FTTH ausgebaut wird.

<sup>14</sup> Plückebaum, T. (2023). Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 498, Bad Honnef, Mai 2023, [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_498.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_498.pdf).

<sup>15</sup> Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien. Technische Hochschule Mittelhessen, Studie für BREKO. [https://brekoverband.de/wp-content/uploads/2025/03/gutachten\\_nachhaltigkeit\\_2\\_v09\\_final\\_2024-1-22.pdf](https://brekoverband.de/wp-content/uploads/2025/03/gutachten_nachhaltigkeit_2_v09_final_2024-1-22.pdf).

für diese Übertragungstechnologie unterstellen zu können, wird XGS.PON-Equipment mit 10G-Ports unterstellt. Bei einem unterstellten und üblichen Splittingverhältnis von 1:32 kann somit bei einer Gleichzeitigkeit von 20 % eine maximale Bandbreite von etwa 1,5 Gbps je Endkundenanschluss erreicht werden. Bei PtMP werden 48 Feeder-Ports je OLT unterstellt.<sup>16</sup> Bei voll ausgelasteten Splittern von 32 Endkundenanschlüssen ergäbe sich somit eine maximale Kapazität von 1.536 Anschlüssen je PtMP OLT.

#### 4.1.1.2.2 FTTB (Fibre-to-the-Building)

In Unterscheidung zu den FTTH-Anschlussstopologien wird bei FTTB die Glasfaser nicht bis in die Wohnungen, sondern bis in den Gebäudekeller geführt. FTTB gibt es nur in Mehrfamilienhäusern. Die weitere Verbindung im Gebäude, also vom Keller bis in die Wohnungen, wird dann zumeist über vorhandenen Kupferadern geführt. Dies limitiert die Übertragungsraten gegenüber der FTTH-Technologie und erfordert den Einsatz von sogenannten G.Fast-DSLAMs (typischerweise G.Fast 212a) im Gebäudekeller. Über kurze Kupferstrecken erlaubt diese Technologie ebenfalls Übertragungsraten von bis zu 1 Gbps. Für dieses Equipment wird jeweils eine maximale Kapazität von 16 Ports unterstellt. Aufgrund der hier verwendeten Übertragungsraten von bis zu 512 MHz werden hohe Bandbreiten bei verhältnismäßig hoher Verlustleistung auf den Kupferdoppeladern über auch nur kurze Strecken (< 200m) übertragen. Diese Verfahren sind verhältnismäßig energiehungrig.

#### 4.1.1.2.3 FTTC (Fibre-to-the-Cabinet)

Bei der FTTC-Architektur wird der Endkundenanschluss über eine Kupferdoppelader mit dem ersten Konzentrationspunkt im Anschlussnetz, dem Kabelverzweiger (KVz) angeschlossen. Dieser beinhaltet den DSLAM als aktives Equipment. Der KVz wiederum wird über Glasfasern an den MPoP angebunden. Das aktive Equipment im KVz dient zum einen der Umwandlung der elektrischen Übertragung von bis zu 35 MHz über die kupferbasierte Anbindung auf optische Übertragung der Glasfaserkabel, zum anderen dienen sie ggf. der Eliminierung des Nebensprechens der kundenseitigen Kupferleitungen untereinander durch das sogenannte Vectoring. Die Verortung dieses aktiven Equipments sowie die hierin verbauten Schnittstellenkarten mit deren Übertragungsprofilen, steuern die Bandbreiten, die kundenseitig erreichbar werden. Bei kürzeren Distanzen sind performantere, hochfrequenzere Varianten einsetzbar, die dadurch höhere Bandbreiten ermöglicht, aber auch mehr Energie konsumieren. Der FTTC DSLAM in dieser Studie verwendet VDSL2-Vectoring (Profil 35b (35 MHz) – Supervectoring) und hat eine maximale Kapazität von 384 Ports.

---

<sup>16</sup> Obermann (2022).



#### 4.1.1.2.4 FTTE<sub>x</sub> (Fiber-to-the-Exchange)

Bei FTTE<sub>x</sub> handelt es sich um eine Anschlusstechnologie, bei der Glasfaser nur bis zum *Metropolitan Point of Presence* (MPOP) verlegt wird und von dort Kupferleitungen bis zum Endnutzer genutzt werden. Diese Struktur kommt aus dem klassischen Telefonnetz. Das aggregierende Equipment ist ein DSLAM des Profils VDSL2 8b, jedoch ohne die Vectoring-Funktion, der ebenfalls über 384 Ports verfügt und somit ebenfalls 384 Nutzer bedienen kann. Im Gegensatz zu FTTC sind die Kupferleitungen vom DSLAM am MPOP bis zum Abschlusspunkt beim Kunde deutlich länger und die übertragbaren Bandbreiten je nach Entfernung deutlich geringer.

#### 4.1.1.2.5 DOCSIS

DOCSIS ist das Übertragungsprotokoll auf koaxialbasierten Anschlussleitungen. Koaxialbasierte Anschlüsse wurde ursprünglich zur Übertragung von TV-Signalen („Broadcasting“) ausgebaut. Da auch Koaxialkabel aus Kupfer bestehen, gelten auch diese Anschlüsse als „kupferbasiert“. Die Übertragungsraten von koaxialbasierten Diensten können erhöht werden, je näher die Glasfaser netzseitig an die Endkundenanschlüsse herangebaut wird, d. h., je kürzer die Koaxialkabelsegmente werden. Dieser Zusammenhang hat eine gewisse Analogie zur FTTC-Technologie, ist jedoch anders begründet. Das Koaxialkabelsegment bietet eine analoge hochfrequente Übertragung mit bis zu 2,5 GHz und wird als geteiltes Medium betrieben, d.h. alle Endkundenanschlüsse greifen auf dieses leistungsfähige Kabel zu und teilen sich die Bandbreite ähnlich wie bei den x.PON Technologien. Auch hier wird mit einem verhältnismäßig hohen Energieeinsatz übertragen, Längere Koaxialkabelabschnitte brauchen zudem Zwischenverstärker mit entsprechender elektrischer Leistungsaufnahme. Im Koaxialnetz bildet das CMTS (Cable Modem Termination System) das konzentrierende Element im MPoP, das über Glasfasern zu den Glasfaserknoten (Fibre Nodes) geführt wird, an die die Koaxialkabelsegmente angeschlossen werden. Je Knoten können bis zu 250 Anschlüsse<sup>17</sup> angebunden werden, am CMTS jeweils bis zu 64 Glasfaserknoten-Ports (Service Groups) unterstellt. Hierbei ist eine DOCSIS 3.1 Anwendung unterstellt. Die koaxiale Abschlussstruktur ist typischerweise ein sich verzweigender Baum aus einem Koaxialkabel mit Abzweigpunkten und Zwischenverstärkern, das eine Vielzahl von Endteilnehmern erschließt, häufig über mehrere Gebäude verteilt. Hierbei wird ein maximaler Abstand zwischen den Zwischenverstärkern von 350 Metern angenommen.<sup>18</sup> Die Kunden greifen auf diese Struktur über ihre Cable-Modems als Netzabschluss in ihren Wohnungen zu. Die für unsere ener-

---

<sup>17</sup> Breide, S., Helleberg, S., Schindler, J., Waßmuth, A. (2021). Energy Consumption of Telecommunication Networks. Prysmian Group. <https://www.prysmian.com/staticres/energy-consumption-whitepaper/32/>.

<sup>18</sup> Plückebaum, T., Eltges, F., Ockenfels, M. (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. Februar, 2019. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/potenziell-anzunehmende-vorleistungsprodukte-in-kabelnetzen-auf-der-basis-von-docsis>.



getischen Untersuchung derartiger Netze relevanten Komponenten sind das CMTS, der Fibre Node, die Verstärker und die Cable Modems.

#### 4.1.1.2.6 Stationäre mobilfunkbasierte Anschlüsse

Für ca. 2,3 %<sup>19</sup> der deutschen Festnetzanschlüsse, die statt einer drahtgebundenen Festnetzverbindung über eine Mobilfunkverbindung realisiert werden, wird eine abweichende Modellierung vorgenommen. Diese basiert nicht auf der bottom-up Ermittlung des Mengengerüsts der beteiligten Netzelemente, sondern auf einer Top-Down-Abschätzung des Stromverbrauchs auf Basis des übertragenen Datenvolumens. Hierfür bildet der Energieverbrauch des deutschen Mobilfunkmarktes für das Jahr 2024 die Ausgangsbasis. Dieser Verbrauch wurde für das Jahr 2024 in der WIK-Studie von Zuloaga et al. (2024)<sup>20</sup> ermittelt und wird in dieser Studie auf ein Gigabyte (Wh/GB) heruntergebrochen. Zusammen mit Annahmen über den durchschnittlichen Datenverbrauch eines Mobilfunknutzers wird so der Stromverbrauch eines aktiven Anschlusses ermittelt. Diese Vorgehensweise wird in Abschnitt 4.2.2 dargestellt.

### 4.1.2 Mehrperiodenbetrachtung

Die Modellierung des Stromverbrauchs von Netzausbau und -betrieb erfolgt zunächst als Ausgangslage für das Jahr 2024. Ziel ist es jedoch über die Berücksichtigung mehrerer Perioden bis 2050 die Saldierung des Stromverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Netzausbaus von FTTH mit Einsparpotenzialen dieser Anschlusstechnologie im Zeitverlauf zu ermitteln.

Für die Herleitung des Mengengerüsts wird angenommen, dass für jede Gemeinde mindestens ein MPoP existiert und im Zeitverlauf keine weiteren MPoP als die bereits existierenden errichtet werden müssen.

#### 4.1.2.1 Glasfaserausbau im Zeitablauf

In Abschnitt 4.1.1.1 wird beschrieben, wie das Mengengerüst für den Ausbau des passiven Netzes ermittelt wird. Die Mehrperiodenbetrachtung des Netzausbaus wird über ein jährliches Ausbaukontingent bestimmt. Dieses Ausbaukontingent wird in Form von ausbaubaren Trassenkilometern exogen auf 85.000 km pro Jahr festgelegt.<sup>21</sup> Es spiegelt

<sup>19</sup> Bundesnetzagentur (2024).

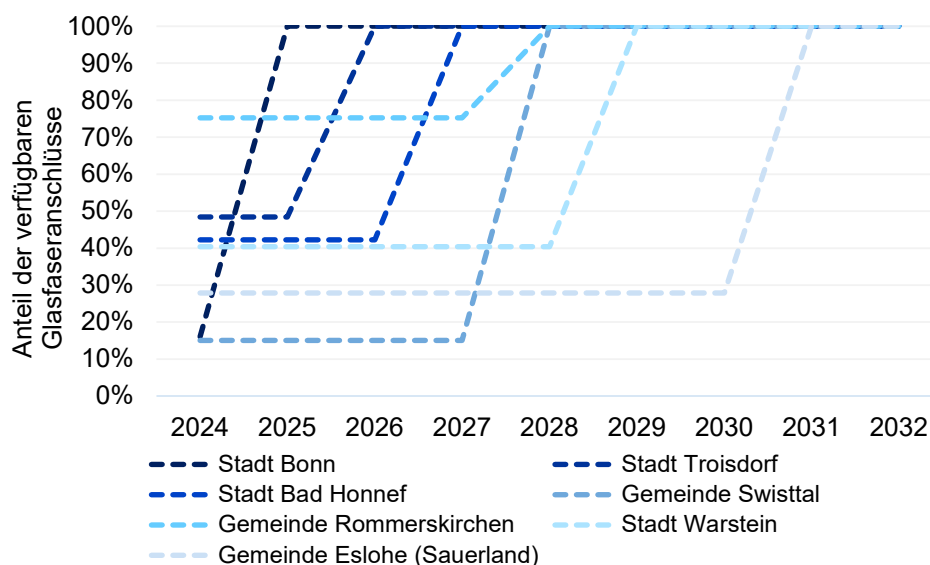
<sup>20</sup> Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Wissner, M. (2024b). Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich. WIK Working Paper Nr. 10. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/wik-working-paper-nr-10-nachhaltigkeit-fest-und-mobilnetze-ueber-unterschiedliche-regionale-strukturen-im-vergleich>.

<sup>21</sup> Telekom (2017) berichtet von einem Rekordjahr beim Glasfaserausbau, in dem rund 40.000 Kilometer Glasfaser neu verlegt wurden. Auf Basis dieses Anhaltspunkts wird für den betrachteten Zeitraum eine Größenordnung von etwa 80.000 Kilometern pro Jahr angesetzt (Telekom, 2017. Record year for fiber-optic expansion (40,000 kilometers of optical fiber installed)).

das jährliche Ausbaupotenzial wider, also wie viele Trassenkilometer bei gegebenen Tiefbaukapazitäten in der Zeitspanne eines Jahres realistischerweise errichtet werden können. Über das Ausbaukontingent können dann all diejenigen Gemeinden versorgt werden, deren noch auszubauende Trassenlängen für eine vollständige Glasfaserversorgung in der Summe innerhalb des Jahresbudgets liegen. Beim gewählten jährlichen Glasfasertrassenkontingent von 85.000 km pro Jahr wird unter Berücksichtigung des bereits abgeschlossenen Ausbaus im Jahre 2032 eine flächendeckende Versorgung erreicht sein.

Die Ausbaureihenfolge der Gemeinden ist hierbei exogen vorgegeben und erfolgt nach Bevölkerungsdichte (Einwohner / km<sup>2</sup>) als Proxy für die Erwartung über Ausbaukosten. Somit soll eine privatwirtschaftliche Ausbaurationalität dargestellt werden. Die nachfolgende Grafik zeigt beispielhaft für eine Auswahl von Gemeinden die Entwicklung des Glasfaserausbaus im Zeitverlauf.

Abbildung 4-2: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des modellierten sequenziellen, vollständig abgeschlossenen Glasfaserausbaus von 2024 bis 2032 (Ausbaustand in %)



Quelle: WIK

Gemäß dem Kriterium der Einwohnerdichte würde wie in Abbildung 4-2 dargestellt die dicht besiedelte Stadt Bonn früh im Zeitverlauf ausgebaut werden, der Ausbau der weniger dicht besiedelten Gemeinden Eslohe oder Warstein würde sich im Zeitverlauf derweil

weiter hintenanstellen. Darüber hinaus zeigt die Grafik die unterschiedlichen Ausgangslagen in Bezug auf die bestehende Verfügbarkeit von Glasfaseranschlüssen.

### Modellierung der Kupfer-Glasfaser-Migration

Im Modell wird eine Migration auf die Glasfasertechnologien FTTH als Zieltechnologie vorausgesetzt. Demnach wird angenommen, dass die Endnutzer zunehmend von den Legacy- zur glasfaserbasierten Anschlusstechnologie im Zeitverlauf migrieren. Diese Migration ist primär durch die Nachfrage nach der neuen Anschlusstechnologie getrieben. Die Nachfragemodellierung bildet primär den Bedarf nach glasfaserbasierten Anschlüssen ab und ist per Annahme durch Externalitäten getrieben. Hintergrund ist die Annahme, dass die zunehmende Verfügbarkeit von Diensten, die hohe Bandbreiten erfordern, den Bedarf nach hochbitratigen FTTH-Anschlüssen treibt. Darüber hinaus können das Marketing der Netzbetreiber und die allgemeine Verfügbarkeit (nicht innerhalb der eigenen Gemeinde) den Wunsch nach einem Glasfaseranschluss treiben. Eine forcierte Migration wird nicht unterstellt und daher nicht untersucht. Die beschriebenen Annahmen spiegeln somit eine freiwillige Endkundenmigration wider.

Entsprechend wird die Kupfer-zu-Glasfaser-Migration in dieser Studie vereinfachend durch drei Faktoren bestimmt:

- i) Glasfaserverfügbarkeit in der Gemeinde,
- ii) vorherrschende Aktivierungsquote innerhalb der Gemeinde; und
- iii) Zeitverlauf (bzw. das jeweilige Jahr) als Proxy für den technologischen Wandel und für allgemeinen Bedarf nach leistungsfähigen Anschlusstechnologien.

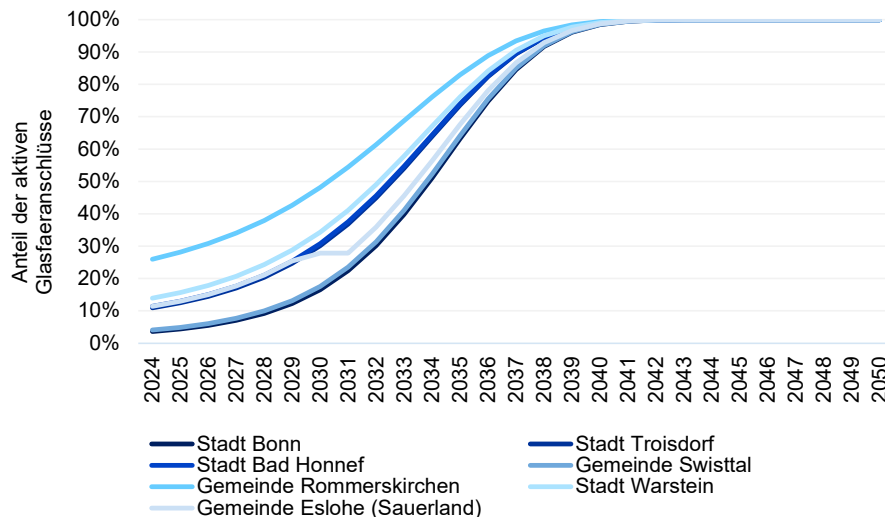
Daher wird der Nachfragepfad nach Glasfaser und die damit einhergehende Aktivierungsquote über die folgende exogene Funktion vorgegeben.

$$Aktivierung (\%)_{Jahr\ t, Gemeinde\ K} = (Aktivierung (\%)_{Jahr\ t-1, Gemeinde\ K})^{Coeff\ [0;1]}$$

Die Anwendung dieses Nachfragepfades wird für jede Gemeinde individuell angewendet und unterscheidet sich dabei jeweils allein in der Ausgangslage der Nachfrage nach Glasfaser im Jahre 2024. Durch die Wahl des Koeffizienten wird für alle Gemeinden ein nicht-linearer zeitlicher Verlauf unterstellt, der einem S-Kurvenmuster folgt, d.h. eine anfänglich langsame Migration, eine Phase beschleunigter Diffusion und schließlich eine Sättigung über die Zeit. Gemeinden, die erst zu einem späteren Zeitpunkt erschlossen werden, weisen dadurch einen Nachholeffekt („catching-up“) auf.

Die nachfolgende Grafik zeigt beispielhaft den Verlauf der Glasfaser-Migration für ausgewählte Gemeinden.

Abbildung 4-3: Beispielhafte Darstellung der Kupfer-Glasfaser-Migration pro Gemeinde von 2024 bis 2050 (Aktivierungsquote in %)



Quelle: WIK

In Abbildung 4-3 wird am Beispiel der Gemeinde Eslohe (Sauerland) ein Fall gezeigt, in dem die mangelnde Verfügbarkeit von Glasfaser die Migration vorübergehend behindert. In diesem Falle wäre die Nachfrage nach glasfaserbasierten Anschlüssen gegeben, eine mangelnde Verfügbarkeit beschränkt jedoch deren aktive Nutzung.

Somit wird die Nachfrage nicht über die Verfügbarkeit von Glasfaseranschlüssen definiert. Sondern die Nachfrage nach einem Glasfaseranschluss kann schon vor dessen Verfügbarkeit entstehen. In einem solchen Fall wäre die aktive Nutzung durch die Verfügbarkeit gebremst.

Über diesen Nachfragepfad und damit einhergehende Aktivierungsquote wird die Anzahl der aktiven Glasfaseranschlüsse für jedes Jahr bestimmt. Die Verteilung der in Glasfaser migrierenden Anschlüsse erfolgt proportional zu den jeweils vorhandenen Bestandstechnologien und bleibt über den gesamten Migrationspfad hinweg konstant. Die Migration wird damit technologieneutral modelliert: Es findet keine prioritäre Migration aus einzelnen spezifischen Zugangstechnologien wie FTTB, FTTC, FTTE<sub>x</sub> oder DOCSIS statt. Stattdessen spiegelt die Zusammensetzung der migrierenden Anschlüsse zu jedem Zeitpunkt die bestehenden technologischen Anteile wider. Diese Proportionalität wird im Zeitverlauf beibehalten, bis sämtliche zu migrierende Anschlüsse vollständig auf Glasfaser umgestellt sind.

## 4.2 Energieverbrauch

### 4.2.1 Technologie- und netzelementbezogener Energieverbrauch im Festnetz

Der Energieverbrauch der Netzelemente ist durch vier wesentliche Komponenten getrieben, die in der vorliegenden Modellierung berücksichtigt wurden:

1. Grundlast (Wattstunden),
2. Maximaler Energieverbrauch pro Port (Wattstunden/Port),
3. Nutzungsintensität (prozentuale Abschläge vom maximalen Wert),
4. Stromumwandlungsverluste sowie die
5. zeitliche Referenzierung.

Die Grundlast beschreibt den Stromverbrauch, den die Netzelemente immer haben, unabhängig etwa von der Anzahl beschalteter Ports.

Darüber hinaus steigt der Stromverbrauch mit jedem genutzten Port. Dieser Wert beschreibt den maximalen Energieverbrauch pro Port, der von einem Netzelement erreicht werden kann, wenn es vollständig ausgelastet ist. Der Gesamtverbrauch steigt, je mehr Ports aktiv sind. Die Anzahl der aktiven Ports ergibt sich zum einen aus den aktiven Anschlusszahlen je Technologie sowie ihren jeweiligen Kapazitätsanforderungen, da für jede Anschlusstechnologie unterschiedliche Netzelementen mit unterschiedlichen Portdichten unterstellt werden.

Hierbei wurde ein einheitliches und standardisiertes Equipment unterstellt. So wird angenommen, dass dieselbe Art von Geräten pro Anschlusstechnologie verwendet wird.

Die Nutzungsintensität zeigt den tatsächlichen Anteil der Kapazität, der im Vergleich zur maximalen Kapazität verwendet wird. Dieser Wert hängt vom Nutzerverhalten ab und beeinflusst den Energieverbrauch pro Port direkt. Bei einer höheren Auslastung pro Port steigt der Energieverbrauch der Netzkomponente. Dagegen kann dies nachts zu Zeiten niedrigen Verkehrsaufkommens zu signifikanten Energieeinsparungen beitragen. In diesen Fällen könnten Energiesparmodi (Low Power Modes) eingeschaltet werden. Low Power Modes sind Betriebszustände, in denen ein Netzgerät seine Funktionalität auf ein Minimum reduziert, um Energie zu sparen. Typischerweise bleiben grundlegende Funktionen, wie die Fähigkeit zur Wiederaufnahme der vollen Betriebsleistung bei Bedarf, erhalten, während nicht-essenzielle Prozesse und Leistungsintensitäten gedrosselt werden.

Ein weiterer relevanter Faktor des Energieverbrauchs im Netzbetrieb sind Stromumwandlungsverluste, die bei der Umwandlung von Wechselstrom, wie er vom Energieversorger angeliefert wird, auf Gleichstrom, wie es für den Betrieb der Netzelemente benötigt

wird, entstehen. Dieser Verlust wird nach Ermittlung des gesamten Stromverbrauchs im Netzbetrieb als prozentualer Abschlag einheitlich über alle Netzelemente hinweg berücksichtigt.<sup>22</sup>

Die zeitliche Referenzierung, bzw. der Auswertungszeitraum des Stromverbrauchs der Netzelemente, wirkt sich ebenfalls auf die Quantifizierung des Gesamtstromverbrauchs über das Jahr hinweg aus. So gibt es insbesondere über das Jahr hinweg saisonale Schwankungen. In dieser Modellierung wurde annahmegetrieben ein repräsentativer Tag in seinem Energieverbrauch quantifiziert und auf einen Jahresverbrauch hochgerechnet. Besonderheiten wie Ferienzeiten, Großevents, Notlagen oder Ausfälle blieben hierbei unberücksichtigt.

#### 4.2.2 Schätzung des mobilfunkspezifischen Energieverbrauchs

Während für die Ermittlung der Energieverbräuche der verschiedenen Festnetztechnologien eine Bottom-Up basierte Modellierung eines Mengengerüsts durchgeführt wird, wird der Energieverbrauch des Mobilfunks anhand eines Top-Down-Ansatzes bestimmt.

Der Energieverbrauch wird in dem Maße berücksichtigt, wie der Mobilfunk als Ersatz für Festnetzanschlüsse in Deutschland genutzt wird. Dieser Anteil beträgt 2,3 %. Eine Bottom-Up basierte Modellierung des Mengengerüsts des Mobilfunknetzes für 2,3 % der deutschen Festnetzanschlüsse würde den Umfang dieser Studie übersteigen. Daher wird ein vereinfachter Top-Down-Ansatz verfolgt, bei dem der gesamte Energieverbrauch des deutschen Mobilfunksektors für das Jahr 2024 je GB (Datenvolumen) ermittelt wird. Der Energieverbrauch je GB Datenvolumen im Mobilfunk wird dann über das durchschnittliche jährliche Datenvolumen je Anschluss für einen solchen Anschluss hochgerechnet. Dieser wird dann mit der Anzahl der Mobilfunkanschlüsse als Festnetzersatz ausmultipliziert. Das Wachstum des mobilen Datenvolumens vom 2022 auf 2023 wird für den gesamten Zeitraum fortgeschrieben.<sup>23</sup> Im Zeitverlauf wird eine verbesserte Energieeffizienz sowie ein steigendes Datenvolumen unterstellt<sup>24</sup>. So wird konkret angenommen, dass das Datenvolumen bis 2050 um 200 %, der Energieverbrauch indes nur um 25 % steigen wird.<sup>25</sup>

---

<sup>22</sup> In dieser Studie wird von einer Umwandlungsverlust von 15% aus (Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V. W., Wahr, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpfer, M., & Nissen, N. F. 2023. Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (Projekt UTAMO) (Texte 26/2023). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobil-funk>).

<sup>23</sup> Der Datenvolumenwachstum zwischen den Jahren 2022 und 2023 beträgt 35,80% gemäß Bundesnetzagentur (2024).

<sup>24</sup> Siehe hierzu auch Zuloaga et al. (2025b).

<sup>25</sup> Zuloaga et al. (2024a).

### 4.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in zwei Hauptbereiche unterteilt: den Netzbetrieb und den Netzausbau. Beide Bereiche tragen auf unterschiedliche Weise zu den Gesamtemissionen eines Anschlussnetzes bei. Im Folgenden wird die Methodik zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus diesen beiden Phasen des Lebenszyklus dargestellt.

Der Energieverbrauch, der durch den Betrieb der verschiedenen Netztechnologien entsteht, umfasst alle aktiven, energierelevanten Netzkomponenten im laufenden Betrieb. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Netzbetriebs werden durch folgende Formel berechnet:

$$CO_2 (\text{Netzbetrieb}) = \text{Energieverbrauch (kWh)} \times CO_2 \text{ eq/kWh}$$

Die ermittelten Energieverbräuche werden in CO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet. Hierfür wird der globale durchschnittliche Strommix für Deutschland im Jahres 2024 herangezogen. Dieser Emissionsfaktor, der durch das Umweltbundesamt veröffentlicht wird, beträgt für dieses Jahr 427 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh.<sup>26</sup>

Es ist dabei ausdrücklich zu beachten, dass in der vorliegenden Studie ein nationaler Durchschnittswert und kein netzbetreiberspezifischer Emissionsfaktor verwendet wird. In der Praxis können die tatsächlichen Emissionsintensitäten einzelner Netzbetreiber erheblich von diesem Wert abweichen, etwa wenn der Strombezug vollständig oder überwiegend aus erneuerbaren Energien erfolgt. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Interpretation der Modellergebnisse werden in Abschnitt 7.3 diskutiert.

Für CO<sub>2</sub>-Emissionen im Netzausbau (FTTH) wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zusammenhang mit der physischen Netzwerkinfrastruktur betrachtet, der zur Bereitstellung eines Glasfasernetzes erforderlich ist. Diese Berechnungen beziehen sich auf den Material- und Bauaufwand, der durch die Herstellung und die Installation der physischen Infrastruktur entsteht.

CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Produktion von Netzelementen bezieht sich auf die ermittelte Anzahl der physischen Einheiten, die für die Errichtung von Glasfaseranschlussnetzen erforderlich sind. Dazu zählen beispielsweise Verteilerkästen, Netzequipment oder Kundenmodems. Diese Netzelemente werden in ihrer Gesamtheit (Mengengerüst) betrachtet, um den Materialaufwand und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu bestimmen.

$$CO_2 (\text{Netzelemente}) = \text{Anzahl der Netzelemente} \times CO_2 \text{ eq/ Einheit}$$

---

<sup>26</sup> Umweltbundesamt (2025). Entwicklung des spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2024.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13\\_2025\\_cc.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2025_cc.pdf).

Sollten für Netzelemente nur spezifische Daten zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilogramm vorliegen, wird das Gewicht des jeweiligen Netzelements in die Berechnungen einbezogen und entsprechend in die Formeln integriert.

CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verlegung von Trassen beziehen sich auf die gesamten Glasfasertrassen, die im Rahmen des FTTH-Netzausbaus verlegt werden und die damit einhergehende CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Trassenkilometer.

$$CO_2 (Trassen) = Trassenlänge (km) \times CO_2 eq / km$$

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Trassenausbau werden direkt als solche abgeleitet. Auf Basis einer Studie der WIK-Consult für die Europäische Kommission zur Kostensenkungsrichtlinie wird ein Wert von 5.358 kg CO<sub>2</sub>/km angewendet.<sup>27</sup>

---

**27** Godlovitch, I., Kroon, P., Strube Martins, S., Ockenfels, M., Plückebaum, T., Schäfer, S., Lucidi, S., Schwarz-Schilling, C., Herrera, F., Juškevičius, R., Pasquali, F., & Tambjerg, L. (2023). Support study for the review of the Broadband Cost Reduction Directive: Final report. Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, European Commission.  
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/410af620-b71f-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en>.



## 5 Datengrundlage

Die Netzmodellierung zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen basiert auf zwei komplementären Datenebenen:

- (1) gemeindespezifische Struktur- und Versorgungsdaten sowie
- (2) technische und umweltbezogene Daten einzelner Netzelemente.

Die gemeindespezifischen Struktur- und Versorgungsdaten dienen dazu, das Mengengerüst der jeweils kupfer- oder glasfaserbasierten Netzarchitektur im Rahmen einer skalenadäquaten Dimensionierung des Anschlussnetzes je Gemeinde abzuleiten. Auf dieser Grundlage wird die erforderliche Anzahl an Netzelementen pro Technologie und Gemeinde bestimmt. Berücksichtigt werden insbesondere nachfragebestimmende Kennwerte wie Einwohnerzahl sowie Haushalts-, Wohnungs- und Gebäudezahlen. Ergänzend fließen infrastrukturelle Indikatoren ein, insbesondere gemeindegenaue Breitbandverfügbarkeit und Trassenlängen.

Die technischen und umweltbezogenen Parameter der Netzelemente umfassen Leistungs- und Kapazitätskennwerte, energiebezogene Grenzwerte sowie emissionsbezogene Faktoren.

In den folgenden Abschnitten werden diese Datenebenen detailliert beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Modellierung spezifiziert.

### 5.1 Gemeindespezifische Struktur- und Versorgungsdaten

#### 5.1.1 Übersicht

Für die Analyse wurden verschiedene Datensätze auf Gemeindeebene zusammengeführt, die demographische, geographische und infrastrukturelle Merkmale der Gemeinden in Deutschland abbilden. Dieses Granularitätsniveau wurde gewählt, da es weitgehend institutionell gesicherte, öffentlich zugängliche und bundesweit verfügbare Daten bietet.<sup>28</sup>

Die folgende Tabelle stellt eine zusammenfassende Übersicht über die verwendeten Datenquellen dar.

---

<sup>28</sup> Falls in den verwendeten Quellen vorhanden, wurden Angaben zu den „gemeindefreien Gebieten“ nicht berücksichtigt. Da es sich hierbei überwiegend um unbewohnte Flächen (z. B. Wälder oder Gewässer) handelt, wurden sie von der Analyse ausgeschlossen.

Tabelle 5-1: Überblick der verwendeten Datenquellen auf Gemeindeebene

Datenkategorie	Indikator	Quelle	Datenstand	Veröffentl.
Amtliche Basisdaten	Einwohnerzahl	DESTATIS <a href="#">GV-Isys</a> / <a href="#">BBSR</a> <sup>29</sup>	12/2023	02/2025
	Fläche	DESTATIS <a href="#">GV-Isys</a> / <a href="#">BBSR</a>	12/2023	02/2025
Haushaltszählung	Anzahl Haushalten	DESTATIS <a href="#">Zensus 2022</a>	05/2022	06/2024
Gebäude- und Wohnungszählung	Anzahl Wohnungen	DESTATIS <a href="#">Zensus 2022</a>	05/2022	06/2024
	Anzahl Wohngebäude	DESTATIS <a href="#">Zensus 2022</a>	05/2022	06/2024
TK-Versorgung	Breitbandverfügbarkeit	BMDV und BNetzA <a href="#">Breitbandatlas</a> <sup>30</sup>	06/2024 <sup>31</sup>	12/2024
TK-Infrastruktur	Gesamtrassenlängen	WIK- <a href="#">Forschungsprojekt Nr. 473</a>	2018-2019	12/2020

Quelle: WIK

Wie in der obigen Tabelle dargestellt, stammen die amtlichen Basisdaten sowie die Haushalts-, Wohnungs- und Gebäudezählungen aus Statistischem Bundesamt (DESTATIS). Die Angaben zur Breitbandverfügbarkeit werden dem Breitbandatlas (BMDV und BNetzA) entnommen. Für die Trassenlängen im Anschlussnetz auf Gemeindeebene liegt keine institutionell konsolidierte Quelle vor; sie werden daher alternativ auf Grundlage einer GIS-basierten Erhebung aus einem früheren WIK-Forschungsprojekt verwendet.<sup>32</sup>

Da die Gemeindedaten von verschiedenen Institutionen erhoben werden, die jeweils eigene Erhebungszyklen, methodische Ansätze und Veröffentlichungstakte verfolgen, ist eine einheitliche zeitliche Konsistenz nicht vollständig herstellbar. Die Zuständigkeiten unterschiedlicher Institutionen und Fachbereiche bedingen den Einsatz mehrerer Quellen und führen zwangsläufig zu Abweichungen im zeitlichen Bezug.<sup>33</sup>

<sup>29</sup> Die Aktualisierung einer Gebietseinheit liegt in der Verantwortung der Primärquelle und erfolgt nach deren Zulieferung (u.a. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bundesamt für Kartographie (BKG), Institut für Beratung- Information-Kommunikation (BIK)) jährlich durch Destatis oder bei Gebietsänderungen in GV-ISys durch die Statistischen Landesämter (DESTATIS).

<sup>30</sup> Für die Städte Berlin, Hamburg, Bremen, Köln und München weist der Breitbandatlas die Verfügbarkeiten (in %) auf Bezirksebene aus. Auf diese feinere Differenzierung wird verzichtet, da die übrigen herangezogenen Daten nicht auf dieser Ebene vorliegen.

<sup>31</sup> Zum Zeitpunkt der Datenerhebung für diese Studie standen die hier verwendeten Daten als aktuelle Version zur Verfügung. Im weiteren Projektverlauf wurden neuere Daten mit dem Stand 12/2024 veröffentlicht.

<sup>32</sup> Tatsächliche Infrastrukturdaten, wie sie im Infrastrukturatlas bereitgestellt werden, sind als Planungsinstrument für den Gigabitausbau nur für eine eingeschränkte Nutzergruppe zugänglich, nicht öffentlich verfügbar und werden daher durch georeferenzierte Ergebnisse früherer Forschungsprojekte approximiert.

<sup>33</sup> Amtliche Basis- und Zensusdaten zeichnen sich durch hohe Qualität und langfristige Stabilität aus, sind jedoch nur in größeren Abständen verfügbar und werden mit Zeitverzug veröffentlicht.

Als Referenzpunkt der Analyse wird der Datenstand 06/2024 des Breitbandatlas herangezogen, da insbesondere die Glasfaserversorgung kurzfristig dynamische Veränderungen aufweist. Für die übrigen Indikatoren ist hingegen davon auszugehen, dass deren abweichende Erhebungszeitpunkte die Interpretation der Ergebnisse nicht signifikant beeinflussen, weil sie (Bevölkerung, Haushalte, Wohnungen, Gebäude) typischerweise in einem kurzen Zeitraum (2022 bis 2024) nur geringe Veränderungen aufzeigen.

In diesem Zeitraum kam es außerdem zu wenigen Änderungen der Gemeindegrenzen, vor allem bei vergleichsweise bevölkerungsschwachen Gemeinden. Diese wurden mithilfe des Umsteigeschlüssels des BBSR berücksichtigt,<sup>34</sup> um Daten über unterschiedliche Gebietsstände konsistent zu transformieren.

In den folgenden Abschnitten wird diese Datenbasis thematisch weiter ausgeführt.

### 5.1.2 Haushalten und Breitbandverfügbarkeit

Auf dieser Grundlage wird für die Analyse eine zentrale Datenbasis genutzt: die gemeinschaftlichen Prozentangaben zur Breitbandversorgung mit den betrachteten Festnetztechnologien (Glasfaser, Kupfer und Koaxialkabel). Die Datenquellen zur Verfügbarkeit und aktiven Nutzung je Anschlusstechnologien unterscheiden hierbei nicht zwischen FTTH und FTTB. Zusammen mit der jeweiligen Zahl der Haushalte pro Gemeinde lässt sich damit der technologisch differenzierte Versorgungsstand auf Gemeindeebene quantitativ bestimmen. Die folgende Tabelle zeigt die zusammenfassenden Kennwerte dieser Datenbasis.

---

Versorgungsdaten zur Breitbandverfügbarkeit werden von der zuständigen Regulierungsbehörde halbjährlich auf Grundlage von Unternehmensmeldungen erhoben und aktualisiert.

**34** Die Zusammensetzung von Gemeinden kann sich im Zeitverlauf durch Gebietsreformen verändern. Statistische Daten orientieren sich dabei in der Regel an der zum Zeitpunkt der Erhebung gültigen administrativen Abgrenzung. In dieser Studie werden sowohl Daten mit Gebietsstand 2022 (Zensusdaten) als auch Daten mit Gebietsstand 2023 (Destatis und Breitbandatlas) verwendet. Um eine konsistente Verknüpfung dieser unterschiedlichen Gebietsstände zu gewährleisten – beispielsweise bei Gemeindegemeinschaften oder -teilungen (vollständig oder teilweise) – wurde der Umsteigeschlüssel des BBSR herangezogen. Die Anpassungen erfolgen dabei flächen- und bevölkerungsproportional, sodass die Daten auf die jeweils aktuelle Gemeindeebene übertragen werden können (BBSR. Jährliche Umsteigeschlüssel vom 2020 bis 2023).

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/umstiegsschlüssel/umsteigeschlüssel.html>

Tabelle 5-2: Zusammenfassende Kennwerte zur Breitbandversorgung – Anzahl der Haushalte pro Gemeinde und Technologie

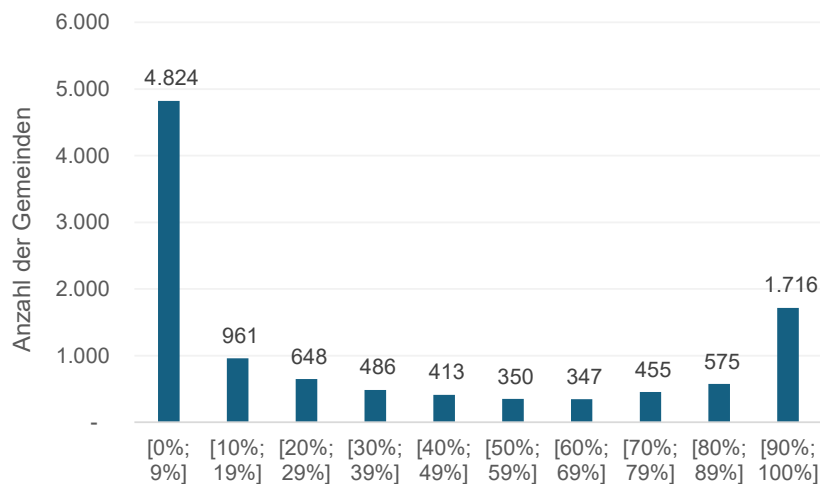
	FTTH/B	FTTC	DOCSIS	Sonstige (über 16 Mbps)
Minimum	0	0	0	0
Maximum	698.566	1.799.790	1.764.112	1.893.192
Mittelwert	1.334	3.274	2.355	3.584
Aggregat	14.370.499	35.276.454	25.380.279	38.618.495

Quelle: WIK auf Basis der Haushaltszählung von DESTATIS (2022). Zensus 2022, Stichtag 15. Mai 2022. <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/> und Breitbandversorgung nach Festnetztechnologie der des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) und der Bundesnetzagentur (BNetzA) (2024a). Breitbandatlas. Datenstand 06/2024. <https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/start.html>.

Abbildung 5-1 fasst grundlegende statistische Kennwerte zur Anzahl der versorgten Haushalte je Gemeinde über die Zugangstechnologien zusammen: FTTH/B, FTTC, DOCSIS und sonstige Festnetztechnologien. Mit durchschnittlich 3.274 Haushalten je Gemeinde ist FTTC am häufigsten verfügbar, gefolgt von den sonstigen Technologien (3.584) sowie DOCSIS (2.355), während FTTH/B mit durchschnittlich 1.334 Haushalten pro Gemeinde den geringsten Durchschnittswert aufweist. Die aggregierten Haushaltszahlen verdeutlichen sowohl die Gesamtdimension als auch die derzeitige Doppelversorgung durch parallel betriebene Anschlusstechnologien: FTTC (35,3 Mio.) und sonstige Technologien (38,6 Mio.) haben den größten Anteil, gefolgt von DOCSIS (25,4 Mio.). FTTH/B weist mit 14,4 Mio. die geringste Gesamtzahl auf. Dies bestätigt, dass FTTH/B im Beobachtungszeitraum im Vergleich zu den Bestandstechnologien noch eine geringere Marktverfügbarkeit aufweist.

Da zwischen den Gemeinden teils erhebliche Unterschiede auftreten, insbesondere im Hinblick auf die Glasfaserverfügbarkeit, zeigt die nachstehende Abbildung die Verteilung der insgesamt 10.775 analysierten Gemeinden nach ihrer Glasfaserversorgungsquote (FTTB/H), gemessen als Anteil der Haushalte je Gemeinde.

Abbildung 5-1: Verteilung der Gemeinden nach FTTB/H-Verfügbarkeitsquote (gesamt: 14,3 Mio. FTTB/H verfügbare Anschlüsse. Stand: 06/2024)



Quelle: WIK auf Basis der gemeindeschaffen Prozentangaben zur Breitbandversorgung nach Festnetztechnologie der des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) und der Bundesnetzagentur (BNetzA) (2024a). Breitbandatlas. Datenstand 06/2024. <https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/start.html>.

Die Abbildung zeigt die Häufigkeitsverteilung der Gemeinden über zehn Intervalle der FTTB/H-Verfügbarkeitsquote. Der größte Anteil entfällt auf die Kategorie mit einer Glasfaserabdeckung von 0 bis 9%: 4.824 Gemeinden weisen einen sehr niedrigen Versorgungsgrad auf. Mit zunehmender Versorgungsquote nimmt die Zahl der Gemeinden zunächst ab. Im hohen Versorgungsbereich steigt die Anzahl wieder an: in der obersten Kategorie von 90 bis 100% befinden sich 1.716 Gemeinden. Damit zeigt die Verteilung zwei Konzentrationen mit einem ausgeprägten Schwerpunkt im sehr niedrigen Versorgungsbereich und einem zweiten Konzentrationsbereich im fast flächendeckend versorgten Segment.

### 5.1.3 Gesamtrassenlängen

Die Ermittlung der Gesamtrassenlängen pro Gemeinde basiert auf den Ergebnissen der WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473 *Kosten von Breitband-Zugangsnetzen* (2020).<sup>35</sup> Grundlage war eine georeferenzierte Modellierung der Festnetzanschlüsse in Deutschland unter Nutzung hausnummerngenauer Adresspunkte des GIS-Datensatzes *TomTom Multi-net* (Releasestand 2018). Diese Adresspunkte dienen dazu, die geographische Verteilung der Anschlüsse möglichst realitätsnah abzubilden. Dabei wird unterstellt, dass sich die zugrunde liegenden Geodaten – insbesondere Adresspunkte und Straßenverläufe –

<sup>35</sup> Kulenkampff et al. (2020).

in den letzten Jahren nicht in einem Umfang verändert haben, der die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse wesentlich einschränken würde.

Im ersten Schritt wurden die Adresskoordinaten den nächstgelegenen Straßenabschnitten zugeordnet. Dies war notwendig, da Glasfaserleitungen in der Regel entlang von Straßen verlaufen. Die Zuordnung erfolgte über eine Nearest-Neighbour-Suche, bei der senkrechte Verbindungen von der Adresse zur Straße berechnet wurden. Auf diese Weise ließ sich sowohl der Anknüpfungspunkt an das Straßennetz bestimmen als auch die zusätzliche Distanz erfassen, die vom Gebäudestandort bis zur Straße überbrückt werden muss („Lotlängen“).

Im zweiten Schritt wurden auf Basis der Gebäudestandorte und einer Schätzung der Anschlussnachfrage je Gebäude individuelle Anschlussbereiche abgegrenzt und für alle Anschlussbereiche glasfaserbasierte Anschlussnetze entlang des Straßennetzes berechnet (Routing aller Gebäude zum zugeordneten Aggregationspunkt (MPoP)). Durch diese Berechnung entstand eine georeferenzierte und bottom-up basierte Schätzung der erforderlichen Lot- und Trassenlängen, um einzelne Anschlüsse mit dem Netz zu verbinden.

Abschließend wurden die ermittelten Trassenführungen und Lotanbindungen mit den Verwaltungsgrenzen der Gemeinden auf dem GIS-Layer trassengenau verschnitten. Damit konnten die Werte für Trassen- und Lotlängen auf Gemeindeebene aggregiert ausgewiesen werden.<sup>36</sup> Die folgende Tabelle zeigt die zusammenfassenden Kennwerte dieser Datenbasis.

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Kennwerte zur Trassenkilometer pro Gemeinde

	Trassenlänge	# Gemeinde
Minimum	0	24
Maximum	15.512	1 (Berlin, Stadt)
Mittelwert	99,3	10.775
Aggregat	1.070.162	10.775

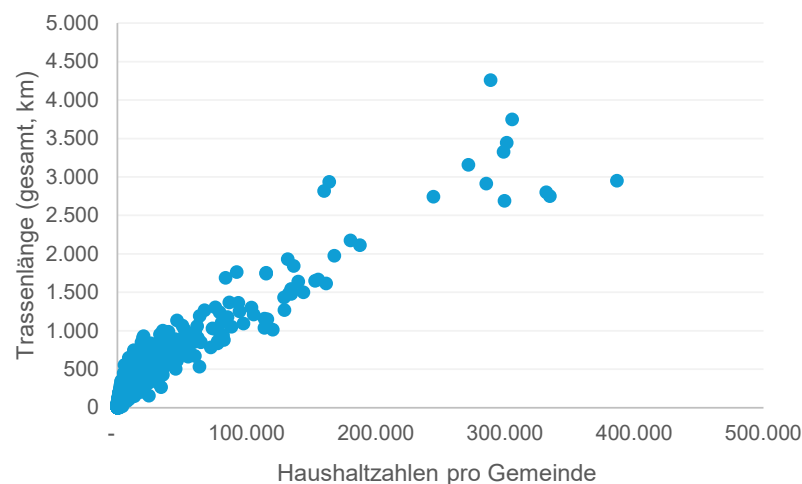
Quelle: WIK auf Basis von Kulenkampff et al. (2020). Kosten von Breitband-Zugangsnetzen. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-473-kosten-von-breitband-zugangsnetzen>.

<sup>36</sup> Die aus der GIS-Modellierung abgeleiteten Lot- und Trassenlängen wurden um folgende Korrekturen ergänzt, um die Ergebnisse stärker an realistische bauliche Gegebenheiten anzupassen (1) bei den Lotlängen wurde je Straßenseite eine halbe Fahrbahnbreite (6,5 m / 2) sowie eine Gehwegbreite (2,5 m) abgezogen. Hintergrund dieser Anpassung ist, dass die ursprüngliche GIS-Berechnung die Lotlänge bis zur geometrischen Mittellinie der Straße erfasst. In der Realität verlaufen Leitungen jedoch üblicherweise am Straßenrand oder unter dem Gehweg; (2) Zusätzlich wurden Korrekturen für beidseitige Verlegungen im Straßennetz vorgenommen. Solche Verlegungen ergeben sich modellendogen aus der Netzstruktur, beispielsweise wenn Anschlüsse auf beiden Straßenseiten erschlossen werden müssen. Um diese Fälle abzubilden, wurde eine durchschnittliche Straßenquerungslänge von 7,5 m angesetzt. Damit wird die zusätzliche Strecke erfasst, die bei Querungen regelmäßig anfällt und im reinen Routingmodell nicht berücksichtigt wäre.

Tabelle 5-3 weist die statistischen Kennwerte der ermittelten Trassenlängen auf Gemeindeebene aus. Die Werte zeigen eine deutliche Spannweite zwischen den Gemeinden: In 24 Gemeinden liegt die Trassenlänge bei null, während das Maximum mit 15.512 Kilometer in der Stadtgemeinde Berlin erreicht wird. Der Mittelwert beträgt 99,3 Trassenkilometer pro Gemeinde. Aggregiert ergibt sich eine Gesamtlänge von rund 1,07 Millionen Trassenkilometern über alle 10.775 Gemeinden.

Zur Veranschaulichung der Streuung stellt die nachfolgende Abbildung den Zusammenhang zwischen der Gesamttrassenlänge je Gemeinde und deren Größe, gemessen an der Anzahl der Haushalte grafisch dar.

Abbildung 5-2: Streuung der Gesamttrassenlänge in Abhängigkeit von der Gemeindegröße (in Trassenkilometer pro Gemeinde; ausgewiesen für Gemeinden mit unter 500.000 Haushalten; N= 10.771)<sup>37</sup>



Quelle: WIK auf Basis der GIS-basierten Trassenlängen in Kulenkampff et al. (2020). Kosten von Breitband-Zugangsnetzen. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-473-kosten-von-breitband-zugangsnetzen>.

Abbildung 5-2 zeigt einen ausgeprägten positiven Zusammenhang: Gemeinden mit höherer Haushaltszahl verfügen tendenziell über längere Gesamttrassen. Zugleich weist die Punktwolke eine deutliche Streuung um diese Grundtendenz auf, was auf strukturelle Unterschiede zwischen den Gemeinden hinweist, etwa hinsichtlich Siedlungsdichte oder räumlicher Ausdehnung. Niedrigere Trassenlängen bei hoher Haushaltszahl könnten sich durch eine höhere bauliche Dichte erklären lassen, die geringere Trassenlängen pro Haushalt ermöglicht. Umgekehrt könnten niedrigere Dichten in ländlicher geprägten Gemeinden typischerweise zu verhältnismäßig höheren Trassenlängen pro Haushalt führen.

<sup>37</sup> Aus Darstellungsgründen wurden die vier größten Gemeinden (Berlin, Hamburg, München und Köln) in der Abbildung nicht ausgewiesen, da sie als Ausreißer auftreten und die übrigen Datenpunkte visuell überlagern würden. Diese vier Gemeinden sind zwar graphisch nicht dargestellt, in der quantitativen Analyse jedoch vollständig berücksichtigt.

Die hier ermittelte Gesamtrassenlänge bildet die Grundlage für eine Zielversorgung mit vollständigem Glasfaserausbau (FTTH/B). Da öffentlich verfügbare Daten keine räumlich zuordenbaren Informationen über bereits realisierte Glasfasertrassen enthalten, kann die bereits ausgebaute Trasseninfrastruktur nicht geographisch verortet und den Gemeinden eindeutig zugewiesen werden. Um eine quantitative Abschätzung zur ermöglichen, wird die bereits realisierte Trassenlänge proportional aus der Gesamtrassenlänge abgeleitet, und zwar anhand der jeweiligen Glasfaserverfügbarkeitsquote pro Gemeinde (aus dem vorherigen Abschnitt 5.1.2), d.h. der Anteil der Haushalte einer Gemeinde, die bereits mit Glasfaser versorgt sind, dient als gemeindespezifischer Skalierungsfaktor zur Bestimmung der bereits realisierten Trassenlänge. Die noch auszubauende Trassenlänge ergibt sich damit als Differenz zwischen insgesamt erforderlicher und bereits realisierter Länge.

Diese Aufteilung in realisierte und zukünftig auszubauende Trassenlängen des Glasfaserausbaus bildet im Mehrperiodenmodell die Grundlage für die CO<sub>2</sub>-Berechnungen, da in der Analyse auf die Emissionen des noch ausstehenden Glasfaserausbaus quantitativ abgestellt wird.

#### 5.1.4 Erforderliche Datenaufbereitungen

##### **Aktivierungsquote nach Anschlusstechnologie**

Die Modellierung des Energieverbrauchs von Festnetzinfrastrukturen erfordert nicht nur Informationen darüber, wie viele Haushalte mit Glasfaser versorgt sind, sondern insbesondere Daten darüber, wie viele Haushalte mit welcher Anschlusstechnologie tatsächlich aktiv verbunden sind. Erst die Zahl der aktivierten Anschlüsse bestimmt den Umfang des aktiven Netzbetriebs und damit den realen Energieeinsatz. Entsprechende Aktivierungsdaten sind jedoch weder im Breitbandatlas noch auf Gemeindeebene verfügbar. Die Bundesnetzagentur kann diese Informationen ausschließlich in hoch aggregierter Form auf Regiotyp-Ebene bereitstellen.

Regiotypen beschreiben unterschiedliche Siedlungsformen und wurden in Abstimmung mit der Bundesnetzagentur auf Basis von sechs Bevölkerungsdichtklassen abgeleitet. Diese Klassen ergeben sich aus den Einwohnerzahlen und Gemeindeflächen gemäß DESTATIS (GV-ISys, 2023) unter Anwendung der von Stobbe et al. (2023) definierten Dichtegrenzen.<sup>38</sup> Die Regiotypen gliedern sich wie folgt:<sup>39</sup>

- Ländlich
  - Regiotyp 1: 0–149 Einwohner/ km<sup>2</sup>
  - Regiotyp 2: 150–299 Einwohner/ km<sup>2</sup>

---

<sup>38</sup> Stobbe et al. (2023).

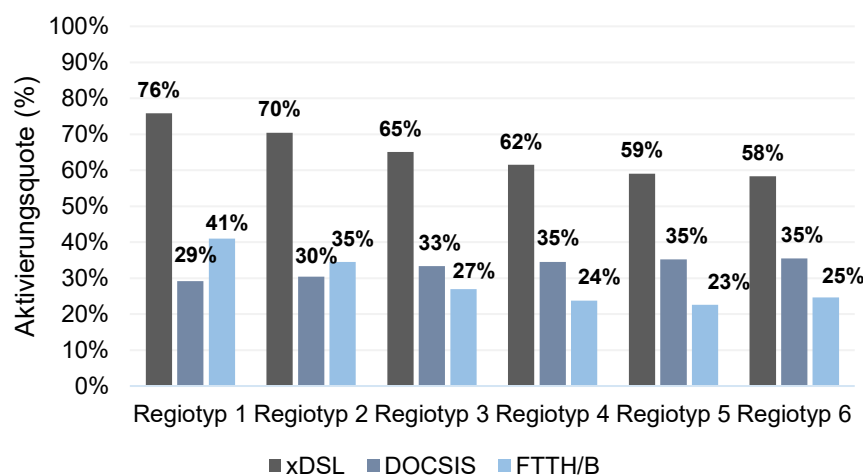
<sup>39</sup> Diese Klassifikation ist differenzierter als der fachübergreifend standardisierte EUROSTAT Urbanisierungsgrad ([Degree of Urbanisation](#)), da bei Stobbe et al. (2023) sechs statt drei Regiotypen unterschieden werden. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass sich diese Klassifikation ausschließlich auf die Bevölkerungsdichte stützt, während der Urbanisierungsgrad zur internationalen Vergleichbarkeit



- Vorstädtisch
  - Regiotyp 3: 300–749 Einwohner/ km<sup>2</sup>
  - Regiotyp 4: 750–1.199 Einwohner/ km<sup>2</sup>
- Städtisch
  - Regiotyp 5: 1.200–2.699 Einwohner/ km<sup>2</sup>
  - Regiotyp 6: ≥ 2.700 Einwohner/ km<sup>2</sup>

Da die zugrunde liegenden Daten nur auf Regiotyp-Ebene vorliegen, wurden Aktivierungsquoten je Regiotyp berechnet, also das Verhältnis aktiver zu verfügbarer Anschlüsse. Entsprechend variieren die Aktivierungsquoten in dieser Studie nicht auf Gemeinde-, sondern auf Regiotyp-Ebene. Die daraus resultierenden Unterschiede werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 5-3: Aktivierungsquote nach Regiotyp – aktive / verfügbare Anschlüsse (Datenstand: 06/2024)



Quelle: WIK auf Basis der auf Regiotyp aggregierten Daten der Bundesnetzagentur (2024). Anzahl der aktiven Anschlüsse. Datenstand 06/2024.

Abbildung 5-3 zeigt die Aktivierungsquoten für die betrachteten Festnetztechnologien xDSL, DOCSIS und FTTH/B über die sechs Regiotypen hinweg. Deutlich erkennbar ist ein differenziertes Technologiemuster in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur. In ländlichen Regiotypen (Regiotyp 1 und 2) weisen insbesondere xDSL-Anschlüsse hohe Aktivierungsquoten auf, während FTTH/B und DOCSIS dort deutlich geringere Werte erreichen. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte sinken die Aktivierungsquoten von xDSL, wohingegen DOCSIS in vorstädtischen und städtischen Gebieten stabile mittlere Werte zeigt. FTTH/B bleibt über alle Regiotypen hinweg auf einem vergleichsweise niedrigen Aktivierungsniveau, erreicht jedoch in dünn besiedelten Räumen leicht höhere Quoten. Die Abbildung verdeutlicht somit, dass sich die tatsächliche Nutzung der Anschluss-

unterschiedlicher Gemeindegrößen auf Mindestbevölkerungsschwellen innerhalb von 1-km<sup>2</sup>-Bevölkerungsrasterzellen basiert.

technologien erheblich zwischen unterschiedlichen Siedlungstypen unterscheidet und für die Modellierung des aktiven Netzausbaus entsprechend berücksichtigt werden muss.

Da diese Daten im Unterschied zu anderen netzdimensionierungsrelevanten Parametern nicht gemeindeweise vorlagen, war eine methodische Aufbereitung erforderlich, um sie in das gemeindebasierte Modell der Netzdimensionierung zu integrieren. Das Vorgehen wird im Anhang detailliert dokumentiert.

### **Aufschlüsselung aggregierter Festnetztechnologien**

Die öffentlich verfügbaren Daten erfassen bestimmte Anschlusstechnologien nicht in der für diese Studie erforderlichen Differenzierung, sondern fassen diese teilweise zusammen. Da die energetischen Unterschiede zwischen den einzelnen Technologien in Teilen erheblich sind, ist im Modell eine genauere Unterscheidung notwendig.

Konkret betrifft dies drei Bereiche:

- FTTH (*Fibre-to-the-Home*) und FTTB (*Fibre-to-the-Building*) üblicherweise gemeinsam als FTTH/B ausgewiesen.
- Zusätzlich werden FTTH-Anschlüssen ohne Differenzierung nach Bauweise, d. h. *Point-to-Point* (PtP) und *Point-to-Multipoint* (PtMP) erfasst.
- FTTE<sub>x</sub> (*Fibre-to-the-Exchange*, typischerweise mit ADSL) und FTTC (*Fibre-to-the-Cabinet*) werden gemeinsam unter xDSL ausgewiesen; sonst wird FTTE<sub>x</sub> unter der Kategorie „sonstige Technologie“ erfasst.

Für eine modellgerechte Differenzierung dieser Technologien werden zusätzliche Datenquellen sowie öffentlich verfügbare Marktinformationen herangezogen. Diese werden im Anhang detailliert ausgeführt.

### **Verteilung der drahtlosen mobilfunkbasierten Festnetzanschlüsse**

Für die Datenaufbereitung im Bereich der drahtlosen, mobilfunkbasierten Festnetzanschlüsse besteht eine zentrale Herausforderung darin, dass weder der Breitbandatlas noch die von der Bundesnetzagentur bereitgestellten Daten zu aktiven Anschlüssen diese Anschlussform vorliegen haben bzw. von anderen Festnetztechnologien abgrenzen. Aus diesem Grund stützt sich die vorliegende Studie auf die bundesweit ausgewiesene Zahl mobilfunkbasierter Festnetzanschlüsse aus dem Jahresbericht Telekommunikation 2024 der Bundesnetzagentur.<sup>40</sup> Dort wird ihr Anteil mit 2,3 Prozent aller aktiven Festnetzanschlüsse angegeben, was bei insgesamt 38,6 Millionen aktiven Anschlüssen einer Gesamtzahl von 887.800 mobilfunkbasierten Anschlüssen entspricht.

Für die modelltechnische Verwendung ist jedoch eine gemeindescharfe Verteilung erforderlich. Diese wurde auf Grundlage der Annahme vorgenommen, dass mobilfunkbasierte

---

<sup>40</sup> Bundesnetzagentur (2024).

Festnetzanschlüsse überwiegend in ländlichen Räumen genutzt werden. Während Stobbe et al. (2023) Gemeinden mit einer Bevölkerungsdichte von unter 300 Einwohnern pro km<sup>2</sup> als ländlich definieren, wäre diese Abgrenzung aufgrund ihres großen Umfangs für eine differenzierte Modellierung zu breit. Daher wurde eine engere Definition angesetzt: es wurden ausschließlich jene Gemeinden berücksichtigt, die im unteren Quartil der Bevölkerungsdichteverteilung liegen, was einer Bevölkerungsdichte von höchstens 51 Einwohnern pro km<sup>2</sup> entspricht und 25 Prozent aller Gemeinden umfasst.

In allen übrigen Gemeinden mit einer Bevölkerungsdichte von mehr als 51 Einwohnern pro km<sup>2</sup> (75 % der Gemeinden) wurden keine mobilfunkbasierten Festnetzanschlüsse verortet.<sup>41</sup>

## 5.2 Technische und umweltbezogene Daten einzelner Netzelemente

### 5.2.1 Technische Daten

Technische Parameter wie Kapazitäten, Portdichten sowie die elektrische Leistungsaufnahme verschiedener Netzelemente wurden auf Basis von aktuellen Referenzwerten aus standardisierten Verhaltenskodex der Europäische Kommission (EU-Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment) sowie ergänzender Herstellerinformationen erhoben. Diese stellen die Basis für die Ermittlung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der unterschiedlichen technologiebezogenen Netzkomponenten dar.

#### 5.2.1.1 EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment

Der *EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment*<sup>42</sup> ist eine freiwillige Selbstverpflichtungsvereinbarung der Europäischen Kommission für die Hersteller von Telekommunikationsequipment und für Telekommunikationsnetzbetreiber, die technische Leitlinien und maximale Energieverbrauchsgrenzwerte für Netzkomponenten definiert. Ziel ist die Reduktion des Energieverbrauchs in Telekommunikationsnetzen bei gleichgebliebener Leistungsfähigkeit und Servicequalität. Die Unterzeichner verpflichten sich, die Vorgaben bei mindestens 90 Prozent der eingesetzten

<sup>41</sup> Zur Verteilung auf die identifizierten Gemeinden wurde ein Skalierungsfaktor berechnet, definiert als Verhältnis der 887.800 Anschlüsse zur Gesamtzahl der Haushalte in den ausgewählten ländlichen Gemeinden (1,2 Mio. Haushalte). Dieser Faktor gibt an, welcher Anteil der Haushalte in den betreffenden Gemeinden mobilfunkbasierte Festnetzanschlüsse aufweisen müsste, damit in der Summe bundesweit die Zielgröße von 887.800 erreicht wird. Die gemeindescharfe Zuweisung erfolgte, indem die jeweilige Haushaltszahl der ausgewählten Gemeinden mit diesem Faktor multipliziert wurde.

<sup>42</sup> Europäische Kommission, Joint Research Centre. (2024). Code of conduct on energy consumption of broadband equipment (Version 9.0). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136991>.

Netzausrüstung einzuhalten. Diese Studie nutzt den Code of Conduct als technische und standardisierte Referenzquelle für Daten zu energieverbrauchsbezogenen Grenzwerten.

Der aktuelle Code of Conduct (2024) umfasst nahezu alle Netzkomponenten (*Broadband Equipment*) des Anschlussnetzes und unterscheidet zwischen

- Endkundengeräten (*Customer Premises Equipment, CPE*) und
- Netzwerk Equipment.

Für **Endkundengeräte (CPE)** legt er technologie- und funktionsspezifische maximale Energieverbrauchswerte fest, differenziert nach normalem Betriebsmodus (*on-State*) und Bereitschaftsmodus (*ready-State*).<sup>43</sup> Diese Studie berücksichtigt ausschließlich die Modemfunktionalität, also den Energieverbrauch der grundlegenden zentralen CPE-Funktionen und des jeweiligen technologiespezifischen WAN/Uplink-Interfaces (z.B. Ethernet PtP, xPON, G.Fast, xDSL, DOCSIS, 5G). Energieverbrauch aus Zusatzfunktionen wie WLAN, Powerline, USB oder Bluetooth bleiben in dieser Studie unberücksichtigt, da sie nutzerspezifisch variieren und nicht im Verantwortungsbereich der Netzbetreiber liegen. Die berücksichtigten energetischen Gesamtgrenzwerte für die Endkundengeräte (CPE) sind in der folgenden Tabelle nach Anschlusstechnologie und Betriebsmodi differenziert dargestellt.

Tabelle 5-4: Gesamtgrenzwerte des Energieverbrauchs von Endkundengeräten (CPE) nach Anschlusstechnologie und Betriebsmodi

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTx	DOCSIS	Drahtlos mobil
	Ethernet 1G	XGS-PON	G.Fast (212a)	VDSL2 (35b)	ADSL2+	DOCSIS 3.1	5G
On-State [W]	4,0	4,4	4,6	4,0	2,1	11,7	5,6
Ready-State [W]	3,4	3,4	4,3	3,7	1,9	8,2	3,2

Quelle: WIK-Berechnung der Grenzwerte für zentrale CPE-Funktionen und Interface (connected) auf Basis von Europäische Kommission, Joint Research Centre. (2024). Code of conduct on energy consumption of broadband equipment (Version 9.0). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136991>. Grenzwertstufe für das Jahr 2025. Für FTTH wird zudem die Nutzung eines *Deep-Sleep-Modus* berücksichtigt. Dieser entspricht etwa 2 Prozent der aktiven Leistungsaufnahme bei PtMP-Architekturen und rund 4 Prozent bei PtP-Architekturen (Lannoo, B., 2015: How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks, S. 11). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-015-0504-4>.

Für zentrales **Netzwerk Equipment** wie *Optical Line Terminals (OLT)*, *Distribution Point Units (DPU)*, *Digital Subscriber Line Access Multiplexers (DSLAM)* oder *Cable Modem Termination Systems (CMTS)* stellt der Code of Conduct standardisierte Messwerte

<sup>43</sup> Im ready-State findet keine Datenübertragung statt, das Gerät ist jedoch ohne Neukonfiguration oder manuelle Eingriffe bereit, Daten zu übertragen.

bereit. Diese basieren auf ETSI EN 303 215,<sup>44, 45</sup> die Messungen bei vollständig bestückten Geräten unter definierten Lastbedingungen vorschreibt. Die Verbrauchsangaben erfolgen pro Gerät und pro Port. Differenziert wird nach Übertragungstechnologie, Portdichte, maximaler Bandbreitenkapazität und Betriebsmodi. Die Betriebsmodi sind von der Netzlast abhängig und reichen von maximaler Auslastung (*Full-Load*) über reduzierte Aktivität (*Low-Load*) bis hin zur Inaktivität (*Stand-by*).

Tabelle 5-5: Gesamtgrenzwerte des Energieverbrauchs von Netzwerk Equipment nach Anschlusstechnologie, Portdichtklasse und Betriebsmodi

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTx	DOCSIS
	OLT PtP Ethernet. 1G	OLT PtMP XGS.PON	DPU G.Fast (212a)	VDSL2 (35b)	VDSL2 (8b)	CMTS & Fibre node
Anzahl Ports [#] <sup>46</sup>	> 300	> 32	5 bis 48	> 128	> 128	bis 256 SG
Full-Load [W/ Port]	1,6	6,0	4,9	1,9	1,1	104
Low-Power [W/ Port]	1,1*	./.	./.	1,4	0,8	./.
Stand-by [W/ Port]	1,1*	./.	./.	0,5	0,5	/.

Quelle: WIK auf Basis von Europäische Kommission, Joint Research Centre. (2024). Code of conduct on energy consumption of broadband equipment (Version 9.0). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136991>. Grenzwertstufe für das Jahr 2025. SG = *Service Group*. \*Für FTTH PtP wird ein Anteil von zwei Dritteln der aktiven Leistungsaufnahme angenommen (Wang et al., 2015: Power Consumption Analysis of FTTH Networks, S. 3). <https://lup.lub.lu.se/search/files/5834821/8230657.pdf>.

Dargestellt sind die technisch maximal zulässigen, technologie- und betriebsmodusspezifischen Energieverbrauchsgrenzwerte, die unmittelbar aus dem EU Code of Conduct abgeleitet wurden. Um vom maximalen auf den durchschnittlichen Energieverbrauch zu schließen, werden die jeweiligen Betriebsmodi mit einem Gewichtungsfaktor auf Basis der angenommenen täglichen Nutzungsdauer verrechnet (siehe Methodik in Abschnitt 4.2). Dieser nutzungsdauerbasierte Gewichtungsfaktor ist weitgehend technologieunabhängig<sup>47</sup> und skaliert somit die oben dargestellten Maximalwerte entsprechend

<sup>44</sup> ETSI EN 303 215 (2014). Environmental Engineering (EE) Measurement methods and limits for power consumption in broadband telecommunication networks equipment. V1.2.11 (2014-12). [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/303200\\_303299/303215/01.02.11\\_20/en\\_303215v010211a.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303200_303299/303215/01.02.11_20/en_303215v010211a.pdf).

<sup>45</sup> In Bezug auf Umgebungsbedingungen wie Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit und Betriebsspannung. Zusätzlich sind Messungen unter unterschiedlichen Lastprofilen durchzuführen, basierend auf realen Nutzerverkehrsszenarien. Hierbei werden nicht-relevante Komponenten wie AC/DC-Wandler, Batterien oder Kühlsystemen, die nicht direkt den Netzbetrieb betreffen, von der Messung ausgeschlossen.

<sup>46</sup> Die in dieser Studie konkrete angesetzte Anzahl von Ports pro Netzkomponente orientiert sich im Wesentlichen an Obermann (2022) (siehe Abschnitt 4.2.1.1).

<sup>47</sup> FTTH PtP stellt in unserer Studie die einzige Ausnahme dar. Hier wird angenommen, dass CPE über neuartige energiesparende *Sleep-Mode*-Funktionen verfügen und aufgrund dedizierter Leitungen häufiger in den Sleep-Mode wechseln können. Die zugrunde gelegte Nutzungsdauer orientiert sich daher

nach unten. Dies entspricht der Frage, wie viele Stunden pro Tag Geräte typischerweise mit hoher, geringer oder minimaler Auslastung betrieben werden.

Für die Nutzungsdauer existiert keine technisch standardisierte Referenzquelle wie die des EU Code of Conduct, da sie stark nutzerabhängig ist. Die Literatur liefert jedoch erste Hinweise auf typische Größenordnungen. Eine entsprechende Übersicht der angenommenen Nutzungsdauern der verschiedenen Betriebsmodi ist im Annex dokumentiert.

### 5.2.1.2 Hersteller-Sheets

Zusätzlich zu dem *EU (2024) Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment* wurden in der vorliegenden Studie Herstellerinformationen zu Netzelementen in Anschlussnetzen genutzt. Hierbei wurden technische Spezifikationen und Energieverbrauchsdaten von Netzwerkgeräten der Hersteller Cisco,<sup>48</sup> Huawei<sup>49</sup> und Nokia<sup>50</sup> herangezogen. Einige Hersteller-Sheets bieten detaillierte Angaben zum Stromverbrauch und zur Leistungsaufnahme der Geräte, teilweise maximale und typische Strombedarfe von einzelnen Modulen. Die herstellerspezifischen Angaben sind über die Netzelemente und Hersteller hinweg nicht einheitlich erfasst, so dass eine systematische Auswertung nicht erfolgen kann; sie dienen allerdings als Grundlage für eine stichprobenartige Validierung von Energieangaben, wie sie im EU Code of Conduct (2024) definiert sind.

Dort, wo detaillierte Energieangaben vereinzelter Module vorhanden sind, lag der Fokus auf der Erfassung von Grundlasten zentraler Netzelemente, wie *Optical Line Terminals* (OLT) und *Digital Subscriber Line Access Multiplexers* (DSLAM). Die Grundlast beschreibt den grundlegenden Energieverbrauch eines Netzelementes, bevor es mit Endkundenschnittstellen beschaltet wird, sozusagen den Energieverbrauch im Leerlauf.

In der Analyse der Energieverbrauchsgrundlast von diesen Netzelementen wurde eine detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Module vorgenommen, wie sie in den technischen Datenblättern der Hersteller ausgewiesen sind. Hierzu zählen die Module CXU (*Convergence/Cross-Connection Unit*) bzw. Switching Matrix, Fan/ Chassis, CIU (*Control and Interface Unit*) sowie das PM\_UPL (*Power Management Unit/ Power Supply*). Diese

---

an der durchschnittlichen Offline-Zeit in Deutschland, was einem Anteil von rund 59 Prozent der Tagesstunden entspricht im Jahr 2024 (69,3 Stunden pro Woche Online, Postbank. (22. September, 2025). Durchschnittliche Nutzungsdauer des Internets pro Woche in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2025 (in Stunden) [Graph]. In Statista. Zugriff am 11. Dezember 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/875957/umfrage/dauer-der-internetnutzung-pro-woche-in-deutschland/>).

48 Cisco (n.d.). Cisco cBR-8 Converged Broadband Router Data Sheet. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/me-4600-series-multiservice-optical-access-platform/datasheet-c78-730445.pdf>; Cisco (n.d.). Cisco ME 4600 Series Optical Line Terminal Datasheet. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/me-4600-series-multiservice-optical-access-platform/datasheet-c78-730445.pdf>.

49 Huawei (n.d.). Huawei OptiXstar P613E-E ONU Datasheet. <https://e.huawei.com/en/products/optical-terminal/optixstar-p613e-e>; Huawei (n.d.). Huawei SmartAX MA5801-FL16 Datasheet. <https://e.huawei.com/en/products/optical-access/ma5801-fl16?section=specification>.

50 Nokia Siemens Networks Multi-Service IP DSLAM Surpass hiX 5625 (Chassis M400) Release 2.7.

Module wurden als feste, energieverbrauchsrelevante Komponenten identifiziert, deren Energieverbrauch unabhängig von der Nutzungsintensität der Geräte kontinuierlich besteht.

Die auf Basis von Herstellerangaben abgeleiteten Grundlastwerte unterschiedlichen zentralen Netzwerk Equipment sind im Anhang dokumentiert.

## 5.2.2 Umweltbezogene Daten

In der vorliegenden Studie wurde eine Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgenommen, die sowohl die

- Herstellung und Installation von Netzelementen während der Ausbauphase
- als auch den Energieverbrauch im Netzbetrieb umfasst.

Dadurch kann der jeweilige Ressourcenverbrauch in CO<sub>2</sub>-Äquivalente überführt werden. Auf eine eigenständige, vollumfängliche LCA-Berechnung wurde verzichtet. Damit ist gemeint, dass keine vollständige Lebenszyklusanalyse im engen methodischen Sinn durchgeführt wurde, also keine detaillierte Erfassung und Bilanzierung sämtlicher Input- und Outputströme über alle Lebensphasen hinweg (Rohstoffgewinnung, Produktion, Transport, Nutzung, Entsorgung) jedes einzelnen Elements. Stattdessen stützt sich die Studie auf Sekundärdaten aus einem systematischen Desktop-Research, die für die relevanten Emissionsquellen bereits aggregierte CO<sub>2</sub>-Äquivalente bereitstellen.

### 5.2.2.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Herstellung und Installation von Netzelementen

**Trassenlängen** (5.358 kg CO<sub>2</sub>-eq/ km). Die Trassierungsarbeiten umfassen Tiefbau, Kabelverlegung und Oberflächenwiederherstellung und stellen einen wesentlichen und besonders emissionsintensiven Bestandteil des Netzausbaus dar. Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Trassenkilometer wurde auf die Studie von Godlovitch et al. (2021) zurückgegriffen, die im Auftrag der Europäischen Kommission erstellt wurde und auf Datengrundlagen von ICF und EcoAct basiert.<sup>51</sup>

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Emissionswerte pro Kilometer erheblichen methodischen und kontextspezifischen Schwankungen unterliegen. Die Wahl der Verlegungsmethode (konventioneller offener Graben, *Micro Trenching*, *Narrow Trenching*), die Breite und Tiefe des Grabens, der Oberflächentyp (z. B. Asphalt oder Grünflächen) sowie der Umgang mit Aushubmaterial (etwa Wiederverfüllung) beeinflussen die resultierenden

---

<sup>51</sup> Godlovitch et al. (2023).



Emissionen deutlich. Entsprechend reicht die in der Literatur dokumentierte Spannbreite von rund 1.700 bis 14.700 kg CO<sub>2</sub> pro Kilometer.<sup>52, 53</sup>

Der in der EU-Studie verwendete Wert von 5.358 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Kilometer ist nach Godlovitch et al. (2021) ein oberflächenübergreifender Mischwert, der hauptsächlich auf konventioneller Exkavation mit Wiederverwendung des Aushubmaterials basiert. Auch wenn dieser Wert nicht die gesamte Variabilität möglicher Trassierungsverfahren abbildet, stellt er eine für Deutschland geeignete und methodisch konsistente Orientierungsgröße dar, ohne dass hochgradig kontextspezifische Einzelfälle modelliert werden müssen. Dies gilt umso mehr, als bestimmte alternative Verfahren wie Mikrotrenching einer kommunalen Genehmigungspflicht unterliegen und daher nicht flächendeckend einsetzbar sind.

**Faserverteiler** (166 kg CO<sub>2</sub>-eq). Für Faserverteiler, die als Knotenpunkte für die Verteilung von Glasfaserkabeln dienen, wurden die Emissionswerte aus der FiberBroadband (2024) Studie übernommen.<sup>54</sup> Diese Datenquelle liefert spezifische CO<sub>2</sub>-Berechnungen für Komponenten, die im Rahmen des Glasfaserausbaus genutzt werden. Die Angabe von 166 kg CO<sub>2</sub>-eq bezieht sich auf die Produktion und Installation eines typischen Faserverteilers für FTTH und FTTB.<sup>55</sup> In diesen Berechnungen sind Materialverbrauch, Produktionsprozesse sowie die Installation vor Ort enthalten.

**Aktive Netzelemente** (OLT, DPU, Modems). Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aktiver Netzelemente wurden unterschiedliche Werte angesetzt, je nach Art und Funktion der Geräte. Diese Variabilität ergibt sich aus den unterschiedlichen Gerätegrößen und Konfigurationen, wie sie im Klimabeitragsmodell des Online-Händlers Galaxus (2020) dargestellt sind.<sup>56</sup> In diesem Modell werden verschiedene Annahmen zu Produktions- und Lieferprozessen auf Basis der Bilanzierungs- und Reporting-Standards Greenhouse Gas Protocol und ISO 14040 Life Cycle Assessment für elektronische Geräte getroffen, um die jeweiligen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu quantifizieren:<sup>57</sup>

---

<sup>52</sup> Rambech, E., & Vandenbussche, V. (2022). Klimafotavtrykk fra utrulling av fiber (Versjon 01). Endrava. [https://teknorge.no/wp-content/uploads/Endrava-Rapport-Klimafotavtrykk-av-utrulling-av-fiber\\_rev01.pdf](https://teknorge.no/wp-content/uploads/Endrava-Rapport-Klimafotavtrykk-av-utrulling-av-fiber_rev01.pdf).

<sup>53</sup> Sörries, B., Wissner, M., von Preysing, C., Neuhaus, J., Hoff, T., & Berg, M. (2024). Metastudie zum nachhaltigen Ausbau von Gigabitnetzen. WIK-Consult; PwC. [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Studien/2024/WIK-C\\_PwC\\_Metastudie\\_Juni2024.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Studien/2024/WIK-C_PwC_Metastudie_Juni2024.pdf).

<sup>54</sup> Fiber Broadband (2024). Fiber Broadband Deployment is Paramount To Achieving Zero Carbon Footprint. [https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2024/07/FBA-059\\_Sustainability\\_WhitePaper\\_FIN.pdf](https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2024/07/FBA-059_Sustainability_WhitePaper_FIN.pdf).

<sup>55</sup> Auf Basis von WIK-Experteneinschätzungen sind die Unterschiede zwischen Faserverzweiger für FTTH PtP, PtMP und FTTB für den Zweck dieser Studie vernachlässigbar.

<sup>56</sup> Galaxus ist ein in der Schweiz ansässiges E-Commerce-Unternehmen, das vor allem für den Vertrieb von Elektronikartikeln, Haushaltsgeräten, Möbeln und vielen weiteren Konsumgütern bekannt ist. Das Unternehmen legt einen starken Fokus auf Nachhaltigkeit und CO<sub>2</sub>-Transparenz, weshalb es in seinen Shops oft Angaben zur Klimabilanz und Umweltfreundlichkeit der angebotenen Produkte macht. Zudem veröffentlicht das Unternehmen in regelmäßigen Abständen Berichte und Modelle zur CO<sub>2</sub>-Bilanz seiner Produkte, insbesondere im Bereich der Elektronik.

<sup>57</sup> Galaxus (2020). Unser Klima-Beitragsmodell. <https://www.galaxus.de/de/page/unser-klima-beitragsmodell-16329>.



Tabelle 5-6: Verwendete Emissionsfaktoren und resultierenden CO<sub>2</sub>-Äquivalente aktiver Netzelementen

Netzkomponente	Anzahl der Gerätevarianten (#)	Ø-Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]	Gerätegewicht [kg]	Emissionen pro Gerät [kg CO <sub>2</sub> -eq]
OLT (PtP)	3	145,6	26,0	3.786
OLT (PtMP)	3	145,6	5,0	728
DPU (G.fast)	3	145,6	19,0	2.767
Modem (PtP)	8	214,5	0,176	38
Modem (PtMP)	8	214,5	0,220	47
Modem (G.fast)	8	214,5	0,350	75

Quelle: WIK auf Basis von unterschiedlichen Gerätevarianten bei Galaxus, <https://www.galaxus.de/>.

Tabelle 5-6 zeigt die in der Studie verwendeten durchschnittlichen Emissionsfaktoren sowie die daraus abgeleiteten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Gerät. Die Berechnung basiert auf der Kombination gerätespezifischer Gewichte mit technologieeinheitlichen Emissionsfaktoren pro Kilogramm Hardware. Die zugrunde liegenden Emissionsfaktoren wurden aus Mittelwerten marktüblicher Gerätevarianten abgeleitet.<sup>58</sup>

Bei OLTs und DPUs führt das deutlich höhere Gerätegewicht zu entsprechend hohen Emissionswerten im Bereich von mehreren Hundert bis mehreren Tausend Kilogramm CO<sub>2</sub>-eq pro Einheit. Endkundengeräte wie Modems sind hingegen deutlich kleiner und leichter und verursachen daher pro Gerät nur vergleichsweise geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die nachstehende Tabelle fasst die in dieser Studie verwendeten CO<sub>2</sub>-Werte für den noch ausstehenden Glasfaserausbau nach Anschlusstechnologie zusammen.

Tabelle 5-7: Zusammenfassung der verwendeten CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Glasfaserausbau nach Netzelement und Anschlusstechnologie

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB
Trassen [kg CO <sub>2</sub> -eq/km]	5.358	5.358	5.358
Faserverteiler [kg CO <sub>2</sub> -eq]	166	166	166
OLT [kg CO <sub>2</sub> -eq]	3.786	728	2.767
Modem [kg CO <sub>2</sub> -eq]	38	47	75

Quelle: WIK

<sup>58</sup> Es wurden Geräte verschiedener Anbieter berücksichtigt, darunter AVM, Draytek, Huawei, Telekom, TP-Link, Ubiquiti, und ZTE. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung lagen jedoch nicht für alle untersuchten Modelle vollständige Emissionsdaten vor; verwertbar waren 11 von insgesamt 22 Geräten.

#### 5.2.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energieverbrauch

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energieverbrauch wurde der aktuellste verfügbare globale Emissionsfaktor für Deutschland des Umweltbundesamts (2025) für das Jahr 2024 herangezogen.<sup>59</sup> Dieser beträgt 427 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh und umfasst sowohl die direkte Stromerzeugung als auch die vorgelagerten Prozesse des deutschen Strommixes. Der Emissionsfaktor reflektiert die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität des in Deutschland verbrauchten Stroms und wird in umweltbezogenen Wirkungsabschätzungen häufig als Referenzgröße zur Quantifizierung energiebasierter Emissionen verwendet.

Der Wert von 427 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh dient in dieser Studie als mittlerer Emissionsansatz für den Betrieb der Netzelemente. Abweichungen sind möglich, wenn einzelne Netzbetreiber einen spezifischen Strommix mit beispielsweise höherem Anteil erneuerbarer Energien nutzen.

---

<sup>59</sup> Umweltbundesamt (2025).

## 6 Analysierte Szenarien

Um die Forschungsfragen im Kontext der Nachhaltigkeit von Anschlussnetzen zu analysieren, werden verschiedene Ausbauszenarien definiert. Diese Szenarien variieren in Bezug auf den Ausbau und Migrationspfad von den Legacy-Technologien auf glasfaserbasierte Anschlusstechnologien.

Die nachfolgende Tabelle fasst die analysierten Szenarien zusammen. Das Szenario 0 beschreibt hierbei das angestrebte Szenario einer vollständigen Endkundenmigration auf FTTH-basierte Anschlüsse.

Tabelle 6-1: Übersicht der analysierten Szenarien und die dazugehörigen Annahmen

Szenario Name	Ziel-Tech.	Ausbau-umfang	Ausbau-reihenfolge	Migration-sumfang	Emissi-onsfaktor
<b>Sz.0.</b> Vollständige Migration auf FTTH	FTTH	100% Ausbau	höchste Bevölkerungsdichte zuerst	100% DOCSIS migriert	konstant bis 2050
<b>Sz. 1.</b> „Legacy-Szenario“: Szenario mit verbleibendem FTTB und DOCSIS	FTTH und FTTB			nur 50% DOCSIS migriert	
<b>Sz.2.</b> Einsatz vom mobilfunkbasierten Festnetzersatz zur Abdeckung im ländlichen Raum		nur in Gemeinden <~100 Einw./ km <sup>2</sup> (76% Ausbau)		Mobilfunk-basierte Anschlüsse migrieren nicht	
<b>Sz.3</b> Dekarbonisierung					sinkender Emissionsfaktor

Quelle: WIK

Allen Szenarien ist gemein, dass glasfaserbasierte Technologien als Zieltechnologien der Migration definiert werden.

In **Szenario 0** wird das Zielszenario mit einer vollständigen Migration auf FTTH modelliert. Hierbei werden alle Anschlüsse in Deutschland bis 2032 mit FTTH versorgt. Ferner migrieren alle Anschlüsse der Legacy-Anschlusstechnologien von FTTE<sub>x</sub>, FTTC und DOCSIS (3.1) auf FTTH. Eine Berücksichtigung von FTTB findet in diesem Szenario nicht statt. Die Ausbaureihenfolge erfolgt in diesem Szenario nach Bevölkerungsdichte (Einwohner / km<sup>2</sup>).

**Szenario 1** zeichnet ein Szenario („Legacy“-Szenario), in welchem die Migration auf FTTH nicht vollständig gelingt und sowohl FTTB und DOCSIS 3.1 als Alternativen weiterhin genutzt werden. Während auch in diesem Szenario bis 2032 ein vollständiger Trassenausbau von Glasfaser abgeschlossen sein wird, erfolgt jedoch kein flächendeckender

Ausbau von FTTH. So wird für Mehrfamilienhäuser mit sieben und mehr Wohneinheiten ein FTTB-Ausbau unterstellt. Gleichzeitig wird unterstellt, dass lediglich 50 % der heutigen DOCSIS-Anschlüsse auf glasfaserbasierte Anschluss Technologien migrieren.

Dieses Szenario stellt eine Entwicklung dar, die sich stark am Status Quo der Nutzerverteilung in deutschen Anschlussnetzen orientiert. In Bezug auf den FTTB-Ausbau soll es verdeutlichen, welche ökologischen Auswirkungen die Hindernisse haben können, mit denen sich glasfaserausbauende Unternehmen heute konfrontiert sehen, wenn sie die Glasfaser bis in die Wohnungen von Mehrfamilienhäusern bringen möchten.<sup>60</sup> Hieran gekoppelt ist in diesem Szenario auch die Konsequenz, dass DOCSIS als Anschluss-technologie lange wettbewerbsfähig bleibt, da qua Annahme eben keine vollständige FTTH-Migration stattfindet. In gewisser Hinsicht lässt sich dieses Szenario somit als Ausgangslage verstehen, die im Zeitverlauf fortgeschrieben wird.

Weitere Szenarioanalysen werden vergleichend mit diesem Szenario angestellt, das als fortgeschriebene Ausgangslage interpretiert werden kann.

In **Szenario 2** wird in ländlichen Gebieten auf einen Glasfaserausbau verzichtet; stattdessen erfolgt die Bereitstellung von Festnetzanschlüssen über stationäre, mobilfunkbasierte Technologien. Dies sind Lösungen mit stationären Geräten, die als Router funktionieren, jedoch ihre Konnektivität nicht aus Festnetztechnologien, sondern dem Mobilfunk beziehen. In anderen europäischen Ländern wie etwa Österreich ist dies heute bereits eine weit verbreitete Lösung (sie sind in Österreich als „Cubes“ bekannt).<sup>61</sup> Bestehende Mobilfunkanschlüsse werden somit in dieser Betrachtung nicht migriert. Im Jahr 2024 existierten in Deutschland rund 887.000 mobilfunkbasierte Festnetzanschlüsse, was etwa 2,3 % aller Festnetzanschlüsse entspricht; diese werden in der Modellierung den 25 % ländlichsten Gemeinden zugeordnet. Szenario 2 untersucht mobilfunkbasierte Festnetzersatzlösungen als dauerhaften und leistungsfähigen Versorgungsansatz, weitet deren Einsatz daher auf weitere ländliche Gemeinden aus und untersucht diesen Ansatz unter ökologischen Gesichtspunkten. Die Schwelle der Bevölkerungsdichte, bei welcher Mobilfunklösungen unterstellt werden, wird gegenüber Szenario 1 von 51 auf etwa 100 Einwohner je km<sup>2</sup> angehoben, sodass mobilfunkbasierte Anschlüsse nicht nur in den 25 %, sondern in den 50 % ländlichsten Gemeinden zum Einsatz kommen. Dies entspricht einem Anschlusspotenzial von rund 4,2 Mio. beziehungsweise etwa 11 % aller Anschlüsse in Deutschland. Hiervon betroffen sind rund 158.000 noch ausstehenden Trassenkilometer, was etwa 24 % der insgesamt verbleibenden Trassenkilometer des Glasfaserausbaus entspricht. Diese können im Glasfaserausbau eingespart werden, da sie durch Mobilfunk substituiert werden.

**Szenario 3** bildet eine fortschreitende Dekarbonisierung des Strommixes in Deutschland ab und dient der Sensitivierung der Ergebnisse gegenüber veränderten Annahmen zur Entwicklung der Emissionsfaktoren. Hierzu wird ein sinkender CO<sub>2</sub> Emissionsfaktor

---

<sup>60</sup> Siehe hierzu auch Neumann et al. (2023).

<sup>61</sup> Zuloaga et al. (2024a).

zugrunde gelegt, dessen Absenkung den Zielen und Zwischenzielen des deutschen Klimaschutzgesetzes (2021) folgt. Somit wird eine Reduktion der strombezogenen Treibhausgasemissionen um mindestens 60 % bis 2030 gegenüber dem Referenzjahr 1990, um 88 % bis 2040 sowie die Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 unterstellt. Die für die genannten Jahre angesetzten Emissionsfaktoren werden dem Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) entnommen, das von Öko-Institut et al. (2021) im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde.<sup>62</sup>

---

**62** Repenning, J., Harthan, R., Blanck, R., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Gockeler, K., Gorz, W. K., Hacker, F., Hennenberg, K., Hörl, W., Kasten, P., Kreye, C., Lüdtke, S., Matthes, F. C., Moosmann, L., Nissen, C., & ... Zerrahn, A. (2023). Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 (Climate Change, Nr. 30/2023). Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023\\_07\\_04\\_climate\\_change\\_30\\_2023\\_klimaschutzinstrumente.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf).

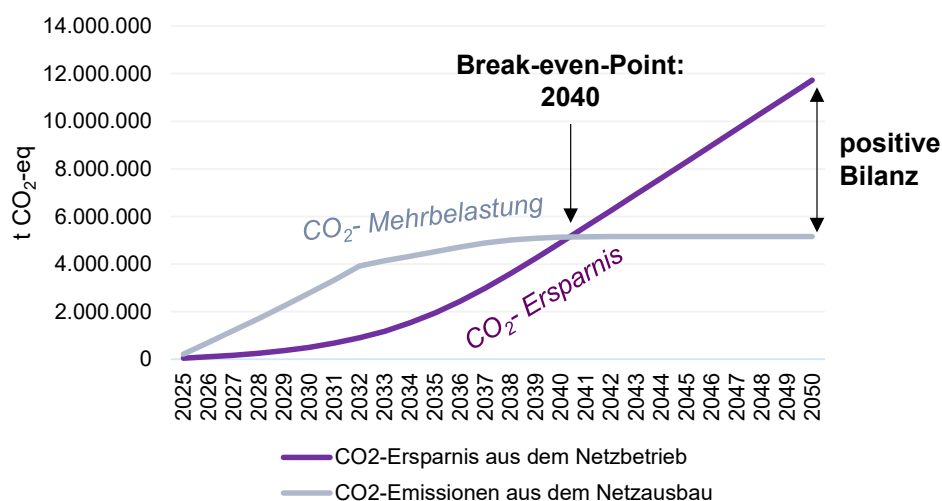
## 7 Modellergebnisse

In den Modellergebnissen wird zunächst das Basisszenario bzw. Referenzszenario ausführlich beschrieben. Nachfolgend werden die Sensitivitätsergebnisse vergleichend dargestellt.

### 7.1 Szenario 0 – Zielszenario

In diesem Szenario wird beim Glasfaserausbau konsequent auf FTTH gesetzt und auch heute bestehende FTTB-Anschlüsse werden auf FTTH umgerüstet. Ferner migrieren alle Endkundenanschlüsse vom Mobilfunk und den Legacy-Anschlusstechnologien auf FTTH. Aus dem Glasfaser-Trassenausbau sowie dem Roll-out der Netzkomponenten für den Netzbetrieb resultieren insgesamt Emissionen von rund 6,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq. Der Trassenausbau wird bis 2032 als abgeschlossen modelliert, der Ausbau der Netzelemente wird 2042 als abgeschlossen angenommen, was dem Zeitpunkt entspricht zu welchem > 99 % der Anschlüsse vollständig migriert sind. Mit zunehmender Migration greifen energiesparende Effekte, die aus der höheren Energieeffizienz der FTTH- gegenüber anderen Technologien resultieren. Diese Stromverbräuche wiederum können unter Berücksichtigung des Strommixes in Emissionen transformiert werden. Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen des Netzbetriebs als Folge der Migration können somit mit den Emissionen des Ausbaus saldiert werden. Diese Saldierung zeigt eine vollständige Amortisation der CO<sub>2</sub>-Aufwendungen des Ausbaus durch den effizienteren Netzbetrieb bis 2040. Nach 2040 ist die Bilanz des Glasfaserausbaus (mit anschließender Migration) positiv.

Abbildung 7-1: Szenario 0: Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz des Glasfaserausbaus und Kupfer-Glas-Migration im Zeitverlauf [t CO<sub>2</sub>-eq, kumuliert]



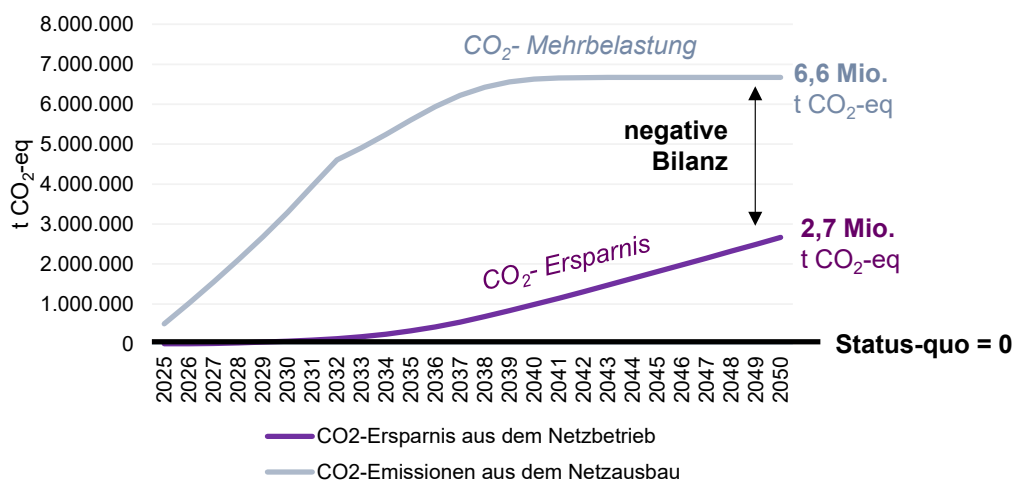
Quelle: WIK

## 7.2 Szenario 1 – Migration unter verbleibenden FTTB- und DOCSIS-Anschlüssen

Während im Zielszenario davon ausgegangen wird, dass sämtliche Anschlüsse auf FTTH migrieren, soll in diesem Szenario ein Szenario betrachtet werden, in welchem FTTB und DOCSIS relevant bleiben. stellt eine Entwicklung dar, die sich stark am Status Quo der Nutzerverteilung in deutschen Anschlussnetzen orientiert. In Bezug auf den FTTB-Ausbau soll es Hindernisse verdeutlichen, mit denen sich glasfaserausbauende Unternehmen heute konfrontiert sehen auf dem Weg die Glasfasern bis in die Wohnungen von Mehrfamilienhäusern zu bringen. Hieran gekoppelt ist in diesem Szenario auch die Konsequenz, dass DOCSIS als Anschlusstechnologie lange wettbewerbsfähig bleibt, da qua Annahme eben keine vollständige FTTH-Migration stattfindet. In gewisser Hinsicht lässt sich dieses Szenario somit als Ausgangslage verstehen, die im Zeitverlauf fortgeschrieben wird.

In diesem Szenario wird keine positive Bilanz aus Ausbau und Energieeinsparungen im Netzbetrieb erzielt, wie nachfolgende Abbildung darstellt.

Szenario 1: Nettobilanz des Glasfaserausbaus und Kupfer-Glasfaser-Migration im Zeitverlauf [t CO<sub>2</sub>-eq, kumuliert]



Quelle: WIK

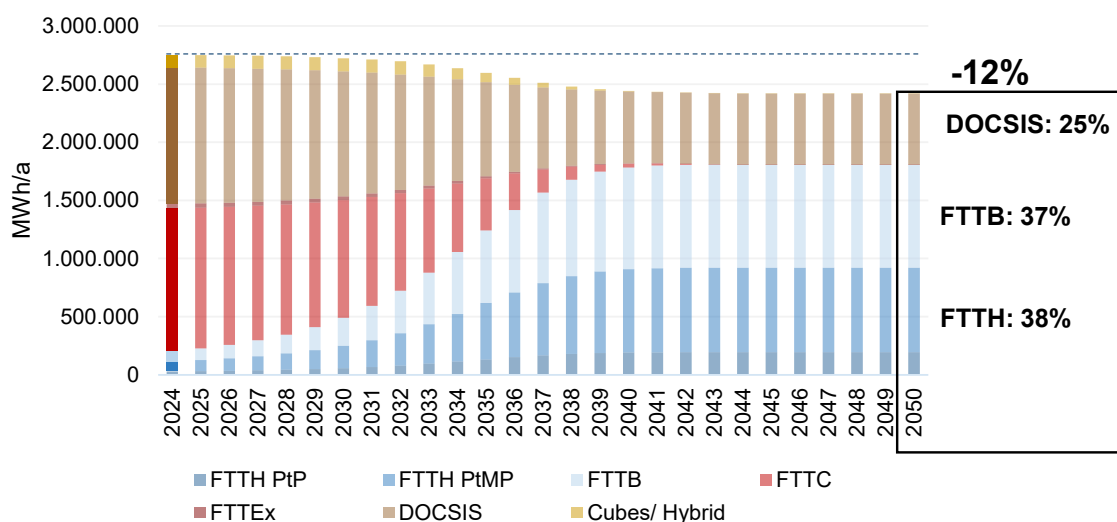
Unter den pessimistischen Annahmen dieses Szenarios zeigt sich, dass der Break-even-Point, also der Zeitpunkt, zu dem die betrieblichen Emissionseinsparungen die emissionsbedingte Mehrbelastung aus dem Ausbau kompensieren, deutlich jenseits des Jahres 2050 liegt. In diesem Szenario führt die Glasfaser-Migration bis 2050 zu energiebedingten Einsparungen von 2,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq kumuliert gegenüber dem Status quo. Folglich können die durch die aktive Nutzung der glasfaserbasierten Anschlüsse erzielten Emissionsminderungen die im Ausbau verursachten Emissionen innerhalb des betrachteten Zeithorizonts (ca. 6,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq) nicht ausgleichen. Gleichzeitig weist der an-

steigende Verlauf der Einsparungskurve darauf hin, dass sich langfristig eine vollständige Amortisation der durch den Ausbau induzierten Emissionen einstellen kann, sofern die angenommenen Effizienzgewinne im Netzbetrieb realisiert werden.

Da in diesem Szenario nicht ausschließlich FTTH-Anschlüsse verbleiben, lassen sich hieran die Energieverbräuche der verschiedenen Anslusstechologien beleuchten und begründen, warum der Verbleib von FTTB- und DOCSIS-Anschlüssen die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Anschlussnetze in Deutschland bis 2050 negativ beeinflussen kann.

Die nachfolgende Grafik zeigt die Entwicklung der kumulierten Energieverbräuche aller aktiven Nutzer im Zeitverlauf für die verschiedenen Anschlussnetztechnologien dieses Szenarios.

Abbildung 7-2 Szenario 1: Prognostizierter Energieverbrauch in Deutschland über die Anschlussnetztechnologien im Zeitverlauf [MWh/a]



Quelle: WIK

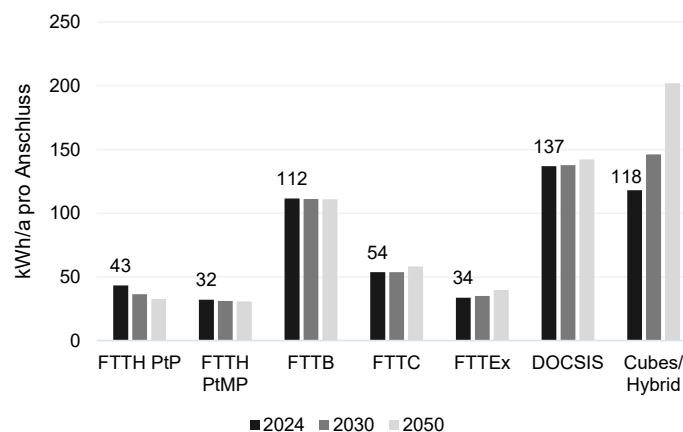
Abbildung 7-2 illustriert für Szenario 1 die Entwicklung des gesamten Energieverbrauchs des Anschlussnetzes in Deutschland vom Ausgangspunkt 2024 bis 2050. Diese Entwicklung wird durch die Migration von den Legacy-Infrastrukturen bewirkt. Diese Migration ist im Jahre 2040 weitestgehend abgeschlossen, sodass die kumulierten Emissionen ab hier stagnieren. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine Reduktion der Energieverbräuche um 12 % gegenüber der Ausgangslage 2024. Während kupferbasierte Technologien (FTTC, FTTEEx) sukzessive an Bedeutung verlieren, verlagert sich der Energieverbrauch zunehmend auf Glasfaser- und koaxiale Infrastrukturen. Dies ist der unterstellten Migration geschuldet, die eine gesteigerte Nachfrage nach hochbitratigen Anschlüssen im Zeitverlauf vorgibt (siehe Abschnitt 0). Nach Abschluss der Migration im Jahr 2050 entfällt auf DOCSIS-Anschlüsse trotz eines Anteils von lediglich rund 10 % an allen Anschlüssen etwa ein Viertel (25 %) des gesamten Energieverbrauchs. FTTB-Anschlüsse stellen mit



rund 19 % einen vergleichsweise geringen Anteil an den Anschlüssen, verursachen jedoch etwa 37 % des Energieverbrauchs.<sup>63</sup> Demgegenüber entfallen auf FTTH-Anschlüsse rund 71 % der Anschlüsse, bei einem Energieverbrauchsanteil von etwa 38 %. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich der Energieverbrauch der Zugangsinfrastruktur nicht proportional zur Anschlussverteilung entwickelt und dass insbesondere verbleibende DOCSIS- sowie FTTB-Lösungen langfristig überproportional für den Gesamtenergieverbrauch verantwortlich wären. Nachfolgend wird detaillierter über die Energieverbräuche je Anslusstechnologie im Zeitverlauf ausgeführt.

Eine weitere Vergleichsperspektive ist der Energieverbrauch je Anschluss. Der zunehmende Ausbau von Glasfaser und die dazugehörige Migration erhöht die Anzahl der aktiven Nutzer glasfaserbasierter Anschlüsse. Im Zeitverlauf verbessern die gestiegenen Nutzerzahlen die Skalenvorteile. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Energieverbräuche je Anslusstechnologie im Zeitverlauf über die Anschlussnetztechnologien.

Abbildung 7-3 Durchschnittliche Energieverbräuche pro Nutzer je Anslusstechnologie im Zeitverlauf [kWh/Anschluss]



Quelle: WIK

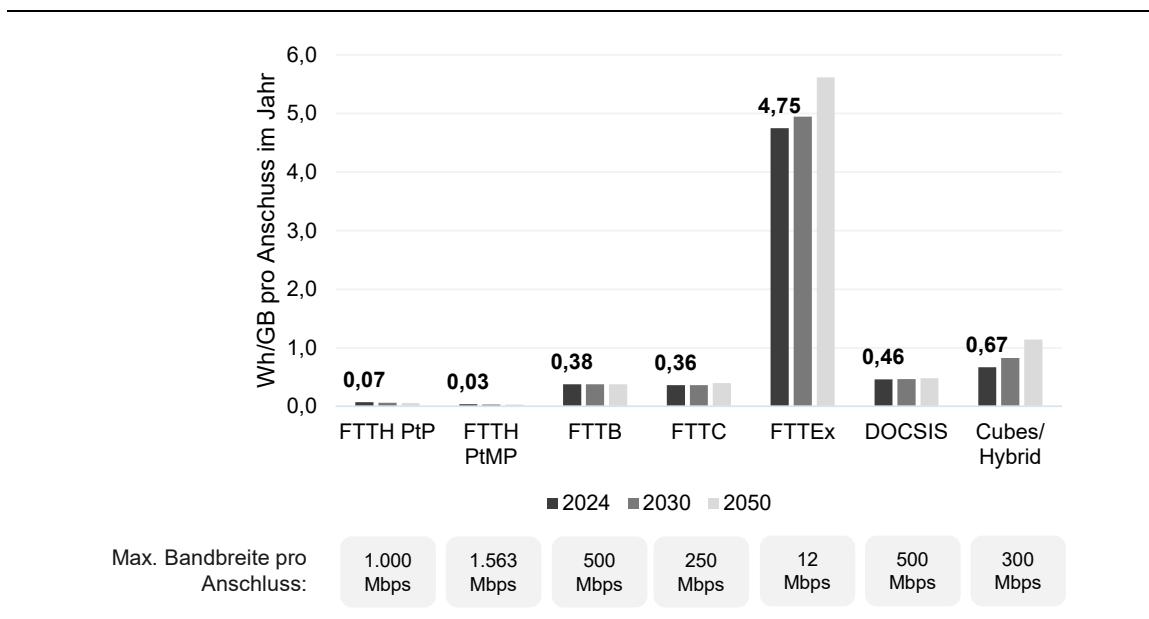
Die Abbildung 7-3 zeigt, dass FTTH den geringsten Energieverbrauch pro Anschluss aufweist, gefolgt von FTTEEx- und FTTC-Architekturen. Beide Zugangstechnologien sind damit energieeffizienter als FTTB. Bei FTTB-Anschlüssen ist zu berücksichtigen, dass G.fast-Übertragungssysteme mit deutlich höheren Frequenzen betrieben werden als VDSL2 bei FTTC oder FTTEEx. Der Hochfrequenzbetrieb von G.fast (typischerweise bis 106 MHz bzw. 212 MHz) führt zu erheblich höheren Leitungsdämpfungen und Verlustleistungen im kupferbasierten Teilnehmeranschluss im Vergleich zu VDSL2-Vectoring, das Frequenzen bis maximal 35 MHz nutzt. Den höchsten Energieverbrauch pro Anschluss weisen DOCSIS-basierte Kabelnetze sowie stationäre, mobilfunkbasierte

<sup>63</sup> Ein verbleibender Anteil von 19 % FTTB-Anschlüssen ist Ausdruck einer Fortschreibung des Status Quo. Aus dem Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2024/2025 der BNetzA geht hervor, dass im zweiten Quartal 2025 1,2 von insgesamt 5,8 Mio. glasfaserbasierten Anschlüssen auf FTTB entfielen. Dies entspricht 21 % aller FTTH/B-Anschlüsse.

Zugangstechnologien auf. Somit verdeutlicht der Vergleich, dass FTTB und DOCSIS, neben Mobilfunklösungen, die höchsten Energieverbräuche pro Nutzer auslösen.

Neben dem Energieverbrauch pro Nutzer stellt die folgende Abbildung die Energieeffizienz der betrachteten Zugangstechnologien dar, gemessen als spezifischer Energieverbrauch in Wattstunden pro übertragenem Gigabyte (Wh/GB) in drei Zeitscheiben.

Abbildung 7-4: Energieeffizienz je Anschlusstechnologie im Zeitverlauf [Wh/GB]

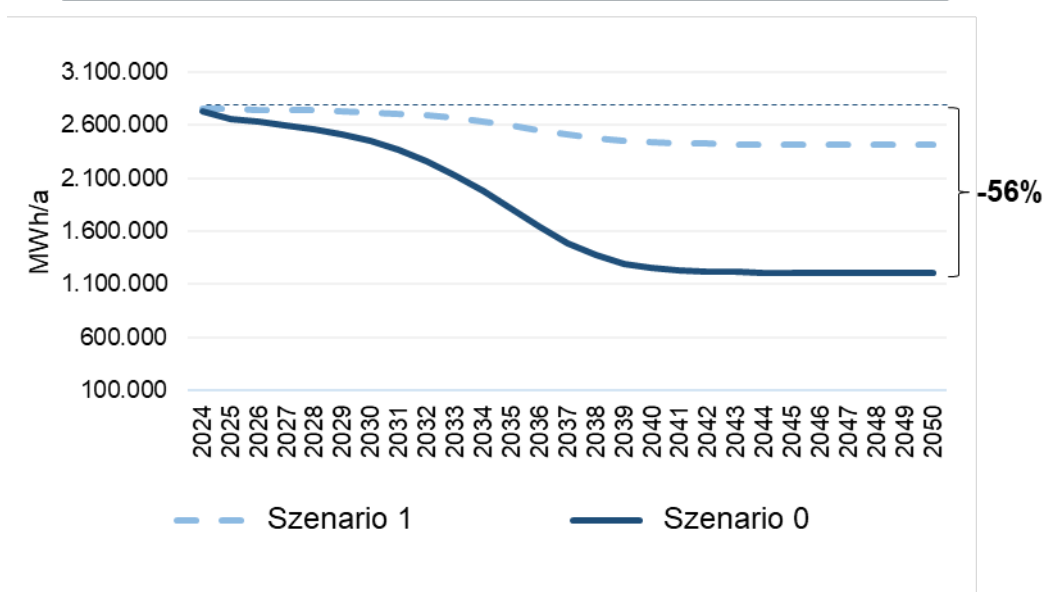


Quelle: WIK

Die Werte in Abbildung 7-4 gelten unter der Annahme einer vollständigen Bandbreitenauslastung eines Anschlusses. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass FTTH mit Werten im Bereich von rund 0,03 bis 0,07 Wh/GB im Zeitverlauf eine sehr hohe Effizienz aufweisen, während FTTB- und DOCSIS-Anschlüsse mit etwa 0,3 bis 0,5 Wh/GB einen deutlich höheren spezifischen Energieverbrauch aufweisen. Kupferbasierte Technologien wie FTTEEx erreichen mit bis zu rund 5 Wh/GB die schlechteste Energieeffizienz. Insgesamt zeigt sich, dass FTTH im Vergleich zu FTTB und DOCSIS um den Faktor fünf bis fünfzehn energieeffizienter ist. Ein sinkender (steigender) spezifischer Energieverbrauch der Übertragungstechnologien wird dabei durch Skaleneffekte erzielt, also einer Aufteilung von fixen Energieverbräuchen für gewisse Netzelemente auf eine zunehmende (abnehmende) Anzahl aktiver Anschlüsse je Technologie.

Abschließend stellt nachfolgende Abbildung den jährlichen Energieverbrauch im Vergleich zwischen Zielszenario und „Legacy“-Szenario dar.

Abbildung 7-5: Szenariovergleich: Energieverbrauch pro Jahr [Gesamt, in MWh/a]



Quelle: WIK

Die Abbildung stellt die Entwicklung des jährlichen Energieverbrauchs (MWh/a) im Anschlussnetz im Zeitraum von 2024 bis 2050 für das Zielszenario der vollständigen FTTH-Migration und das Szenario 1 mit verbleibenden FTTB- und DOCSIS-Anschlüssen dar. Die vollständige Ablösung von DOCSIS sowie der Verzicht auf FTTB ergeben eine deutlich steilere Reduktionsdynamik im Energieverbrauch. Insgesamt kann unter vollständiger FTTH-Migration eine Reduktion des jährlichen Energieverbrauchs zwischen 2024 und 2050 von rund 56 % erreicht werden. Bei einem Verbleib von FTTB- und DOCSIS-Anschlüssen liegt diese Reduktion bei lediglich 12 %.

Die weiteren Szenariovergleiche werden mit dem Legacy-Szenario angestellt, um Verbesserungspotenziale gegenüber diesem Szenario aufzuzeigen.

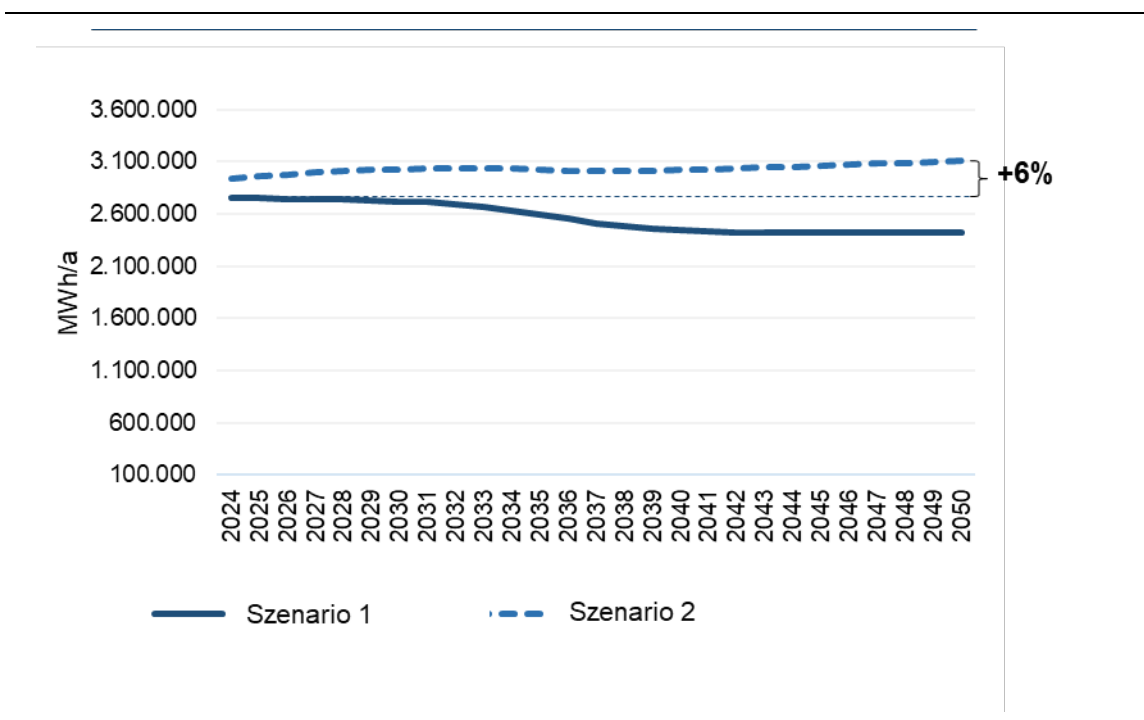
### 7.3 Szenario 2 – Mobilfunklösung in ländlichem Raum

In diesem Szenario werden stationäre mobilfunkbasierte Verbindungen als dauerhafte Lösung für die Breitbandkonnektivität im ländlichen Raum und damit als Festnetzsubstitut angenommen. Die bestehenden 2,3 % der Anschlüsse, die in Deutschland Mobilfunk statt einer kabelgebundenen Verbindung nutzten, werden demnach nicht migriert. Ergänzend wird in allen dünn besiedelten Gemeinden mit weniger als etwa 100 Einwohnern je km<sup>2</sup> stationäre mobilfunkbasierte Anschlüsse unterstellt. Somit wird in diesem Szenario kein flächendeckender Glasfaserausbau angestrebt. Die Modellierung eventuell notwendiger Nachverdichtungen bestehender Funkzellen, um dem gestiegenen Datenvolumen durch stationäre Mobilfunkanschlüsse gerecht zu werden, wird jedoch nicht durchgeführt.

Das bedeutet, dass die vorliegenden Modellergebnisse eher einen optimistischen Fall darstellen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf vergleichend zwischen dem Basisszenario bzw. Referenzszenario und dem beschriebenen Mobilfunk-Szenario auf.

Abbildung 7-6: Mobilfunklösung im ländlichen Raum: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf im Vergleich zum Legacy-Szenario [t CO<sub>2</sub>-eq/a]



Quelle: WIK

zeigt, dass sich im hier untersuchten Szenario gegenüber dem Basisszenario kurzfristig Emissionsvorteile ergeben, da die Fertigstellung des Glasfaserausbaus zeitlich vorgezogen wird und infolgedessen ein erheblicher Teil der ansonsten erforderlichen Tiefbaumaßnahmen entfällt. Der Wegfall von rund 150.000 Trassenkilometern, was etwa 20 % des ursprünglich vorgesehenen Ausbaumumfangs entspricht, führt zu einmaligen Einsparungen von rund 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub>. Langfristig kehrt sich dieser Effekt jedoch um. Da mobilfunkbasierte Anschlüsse im stationären Betrieb gegenüber den meisten kabelgebundenen Zugangstechnologien eine geringere Energieeffizienz aufweisen (siehe Vergleich im Abschnitt 7.2),<sup>64</sup> steigt der Energieverbrauch im Netzbetrieb im Zeitverlauf an. Bis zum Jahr 2050 liegt der Energieverbrauch in diesem Szenario um rund 6 % über dem Niveau von 2024. Die anfänglichen Emissionsvorteile aus dem reduzierten Netzausbau werden

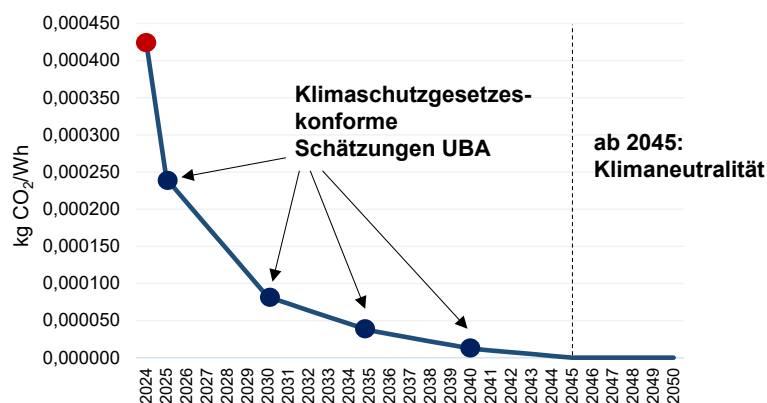
<sup>64</sup> Selbst unter der modelltechnischen Annahme, dass sich die Energieeffizienz mobilfunkbasierter Technologien entsprechend den bisherigen Trends im betrachteten Zeithorizont weiter verbessert, d. h. der Energieverbrauch pro übertragenem Gigabyte sinkt (vgl. die Modellierung in Abschnitt 4.2.2).

somit zunehmend durch den dauerhaft höheren und jährlich steigenden Energiebedarf des Netzbetriebs überkompensiert.

## 7.4 Szenario 3 – Dekarbonisierung

In diesem Szenario wird die Verbesserung des Emissionsfaktors über den Strommix unterstellt. Grundlage hierfür sind die vom Umweltbundesamt (UBA) verwendeten Annahmen, die auf das gesetzlich verankerte Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 abzielen. Der für dieses Szenario angesetzte zeitliche Verlauf des Emissionsfaktors basiert auf den Projektionen des Öko-Instituts et al. (2021), die im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurden und die zur Einhaltung der nationalen Klimaziele sowie der definierten Zwischenziele erforderlich sind. Dieser prognostizierte Rückgang des Emissionsfaktors wird in der nachfolgenden Grafik dargestellt und dient in diesem Szenario als Grundlage für die Umrechnung des modellierten Energieverbrauchs in CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>65</sup>

Abbildung 7-7: Prognostizierter Emissionsfaktor des Energiemixes zur Erreichung der Klimaziele im Zeitverlauf [bundesweit, kg CO<sub>2</sub>/Wh]



Quelle: WIK-Darstellung auf Basis von Zahlen des UBA (Gockeler, K., Gorz, W. K., Hacker, F., Hennenberg, K., Hörl, W., Kasten, P., Kreye, C., Lüdtkke, S., Matthes, F. C., Moosmann, L., Nissen, C., & ... Zerrahn, A. 2023. Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 (Climate Change, Nr. 30/2023). Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023\\_07\\_04\\_climate\\_change\\_30\\_2023\\_klimaschutzinstrumente.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf).

Die Abbildung 7-7 zeigt einen raschen Rückgang des Emissionsfaktors im Zeitverlauf bis zur Erreichung der Klimaneutralität ab dem Jahr 2045. Damit verdeutlicht die Abbildung die Geschwindigkeit der Dekarbonisierung, die notwendig ist, um die gesetzlich verankerten Klimaziele zu erfüllen.

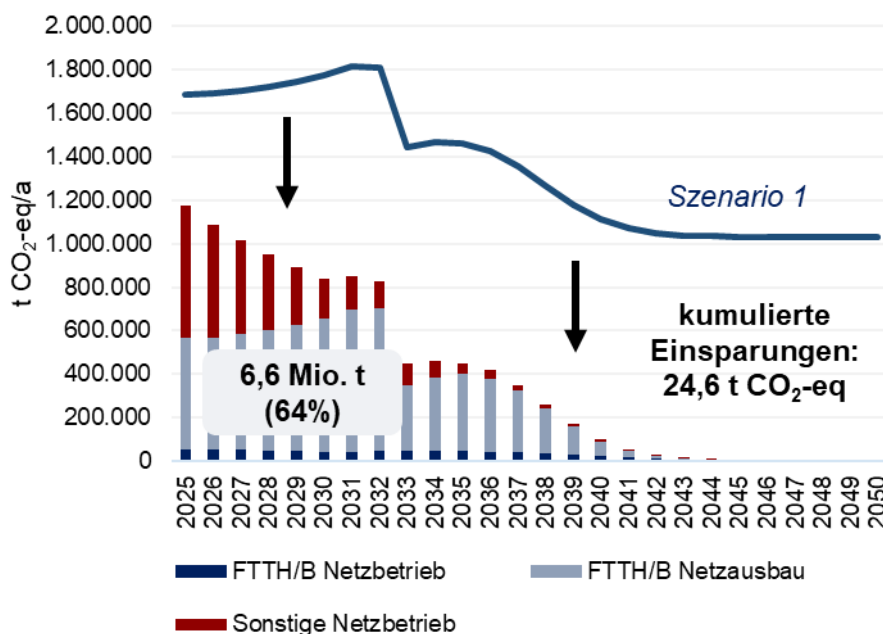
<sup>65</sup> Zwischen den vom Umweltbundesamt (UBA) ausgewiesenen Projektionspunkten für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 wird eine lineare Extrapolation vorgenommen.

Vor diesem Hintergrund bildet der dargestellte Dekarbonisierungspfad die Rahmenbedingung für die Bewertung der Emissionswirkungen der Energieeinsparungen aus der Kupfer-Glasfaser-Migration dieses Szenarios. Mit zunehmender Dekarbonisierung der Energieerzeugung werden die Ziele gesteigerter Energieeffizienz deutscher Anschlussnetze und deren Emissionen ebenso zunehmend entkoppelt.

Unabhängig von der Kupfer-Glasfaser-Migration führt der dargestellte Dekarbonisierungspfad durch die Absenkung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks des Energieverbrauchs zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion in Höhe von 24,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf im Vergleich zum Legacy-Szenario.

Abbildung 7-8: Dekarbonisierungsszenario: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf gegenüber dem Legacy-Szenario [t CO<sub>2</sub>-eq/a]



Quelle: WIK

Die Abbildung 7-8 zeigt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Anschlussnetz unter der Annahme eines dekarbonisierten Strommixes bei gleichzeitig konstanten Emissionen aus der Ausbauphase.<sup>66</sup> Da die durch den Netzausbau verursachten Emissionen in Höhe

<sup>66</sup> Die Emissionen der Ausbauphase werden als konstant angenommen, da empirische Studien zu CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Trassenverlegung zeigen, dass die Spannweite der Emissionen maßgeblich durch unterschiedliche Verlegemethoden bestimmt wird und deutlich weniger durch zeitliche Entwicklungen (vgl. Solivan 2015; Rambech & Vandenbussche 2022). In der praktischen Umsetzung ist zudem davon auszugehen, dass der Einsatz erneuerbarer Energien bei Tiefbauarbeiten bislang nur eine untergeordnete Rolle spielt. Es liegen keine belastbaren Hinweise darauf vor, dass sich diese Rahmen-

von 6,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq keiner Dekarbonisierung unterliegen, gewinnen sie relativ zu den insgesamt stark sinkenden betrieblichen Emissionen deutlich an Bedeutung. In der Folge steigt ihr Anteil an den kumulierten Gesamtemissionen des Anschlussnetzes von ursprünglich rund 19 % auf etwa 64 %.

Im gesamten Zeitverlauf hinweg zeigt sich in dieser Darstellung der modellierten Emissionen eine deutliche Einsparung gegenüber dem Legacy-Szenario, die sich im Wesentlichen aus der schnellen angestrebten Dekarbonisierung der Stromerzeugung und weniger aus der Kupfer-Glasfaser-Migration ergibt.

Sofern der zugrunde gelegte sektorale oder netzbetreiberspezifische Emissionsfaktor bereits vollständig oder weitgehend dekarbonisiert ist, entstehen – wie in Abbildung 7-8 dargestellt – über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg keine CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Netzbetrieb, unabhängig vom jeweiligen Stadium der Kupfer-Glasfaser-Migration. In diesem Fall entfalten zusätzliche Energieeinsparungen keine weitere emissionsmindernde Wirkung, da der Stromverbrauch bereits emissionsfrei ist.

Die Annahme über die zunehmende Dekarbonisierung der Stromerzeugung würde auch für das Zielszenario greifen. Daher kann aus diesem Szenariovergleich abgeleitet werden, dass die Dekarbonisierung szenariounabhängig zum Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität der deutschen Anschlussnetze flankierend zur Migration beitragen kann. Hieraus darf wiederum nicht gefolgert werden, dass die Migration auf die Dekarbonisierung des Energiemixes warten solle, da hierdurch ohnehin Emissionseinsparungen erwartet werden dürfen. Im Gegenteil ist viel mehr hierdurch abzuleiten, dass eine Migration auf FTTH-basierte Anschlüsse zeitlich möglichst zeitnah stattfinden sollte, da die Dekarbonisierung erst im Zeitverlauf ihre volle Wirksamkeit entfaltet. Somit sind in der kurzen Frist hauptsächlich durch Migrationseffekte Energie- und Emissionseinspareffekte erzielbar.

Zur Zielerreichung höherer Energieeffizienz trägt die Dekarbonisierung nicht bei. Je mehr die Dekarbonisierung voranschreitet muss viel mehr die Reduktion des Energieverbrauchs als eigenständige Zielgröße und nicht nur als Übersetzungsbasis für die Emissionsquantifizierung betrachtet werden.

---

bedingungen bis zur Fertigstellung des Glasfaserausbaus – angenommen bis 2032 – grundlegend ändern werden.

## 8 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass bei einer vollständigen Kupfer-Glasfaser-Migration auf FTTH-basierte Anschlüsse durch den energieeffizienteren Netzbetrieb dieser Technologie bereits im Jahre 2040 die Emissionen des Ausbaus vollständig amortisiert werden können.

In einem Szenario, in dem die heutige Ausgangslage mit relevanten Anteilen von FTTB und DOCSIS 3.1-Anschlüssen fortgeschrieben wird, würde indes bis 2050 keine vollständige Amortisation der ausbaubedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden. Wie die Analysen zeigen, stellen FTTB und DOCSIS neben Mobilfunklösungen die energieintensivsten Technologien je Anschluss dar. Somit kann gefolgert werden, dass das Ziel des Koalitionsvertrags den „*flächendeckenden Glasfaserausbau bis in jede (Miet-)Wohnung*“ zu bringen, nicht nur unter Konnektivitäts- sondern auch unter ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll gewählt ist.

In einer weiteren Szenarioanalyse wurde der Glasfaserausbau im ländlichen Raum teilweise durch Mobilfunklösungen ersetzt. Die Ergebnisse dieses Szenarios zeigen, dass durch den gesparten Trassenausbau kurzfristig Emissionen eingespart werden, diese aber bereits nach kurzer Frist durch den höheren Energieverbrauch von mobilfunk- gegenüber glasfaserbasierten Anschlüssen wieder saldiert werden. Somit stellt sich dieses Szenario mittel- und langfristig schlechter dar, als das Zielszenario der vollständigen FTTH-Migration.

Das Einsparpotenzial von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann weiterhin durch die klimapolitisch geforderte Dekarbonisierung des Energiemixes flankiert werden. Sie stellt einen wirksamen Hebel zur Reduktion der Emissionen in der langen Frist dar. Insbesondere in der kurzen Frist, müssen Einsparpotenziale insbesondere durch eine Migration auf FTTH-basierte Anschlüsse erreicht werden. Diese Migration sollte daher zeitlich möglichst zeitnah stattfinden. Gleichzeitig entkoppelt die Dekarbonisierung zunehmend die Ziele von gesteigerter Energieeffizienz und Emissionsreduktionen. Somit ist im Zeitverlauf die Energieeffizienz ebenso zunehmend als eigenständiges Ziel für die deutschen Anschlussnetze anzustreben. Ein Energieverbrauch für die Telekommunikation bedeutet immer, dass diese ggf. sauber erzeugte Energie für andere Zwecke nicht zur Verfügung steht, sieht man einmal von den Kosten für die Energie ab.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass eine vollständige Migration auf FTTH deutliche ökologische Vorteile gegenüber Szenarien mit verbleibenden FTTB-, DOCSIS- oder Mobilfunkanschlüssen besitzt. Die Dekarbonisierung des Energiemixes kann flankierend zu Emissionsreduktionen in deutschen Anschlussnetzen beitragen. Je früher indes FTTH-Ausbau und -Migration vorangetrieben werden, desto größer sind die positiven ökologischen Effekte auch Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen.



## Literaturverzeichnis

- Anders, S. and Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. Challenges 6(1):117-157. DOI: 10.3390/challe6010117. <https://www.mdpi.com/2078-1547/6/1/117>.
- Bieser, J., Salieri, B., Hischier, R. (2020). Next generation mobile networks. Problem or opportunity for climate protection? [https://www.researchgate.net/publication/344948545\\_Next\\_generation\\_mobile\\_networks\\_Problem\\_or\\_opportunity\\_for\\_climate\\_protection](https://www.researchgate.net/publication/344948545_Next_generation_mobile_networks_Problem_or_opportunity_for_climate_protection).
- Breide, S., Helleberg, S., Schindler, J., Waßmuth, A. (2021). Energy Consumption of Telecommunication Networks. Prysmian Group. <https://www.prysmian.com/staticres/energy-consumption-whitepaper/32/>.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (n.d.). Jährliche Umsteigeschlüssel vom 2020 bis 2023. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raubeobachtung/Raumabgrenzungen/umstiegsschlüssel/umsteigeschlüssel.html>
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (n.d.). Referenztabellen zu Raumgliederungen des BBSR. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raubeobachtung/Raumabgrenzungen/downloads/download-referenzen.html>.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022). Gigabitstrategie der Bundesregierung. Stand: 13.07.2022. [https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/gigabitstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/gigabitstrategie.pdf?__blob=publicationFile).
- Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und Bundesnetzagentur (2024a). Breitbandatlas. Datenstand 06/2024. <https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/start.html>.
- Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und Bundesnetzagentur (2024b). Breitbandatlas. Methodenbericht. [https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/Dokumente/Methodenbericht\\_BBA.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/Dokumente/Methodenbericht_BBA.pdf?__blob=publicationFile&v=8).
- Bundesnetzagentur (2024). Jahresbericht 2024 Telekommunikation. <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2024TK1.pdf>.
- Bundesnetzagentur (2025). Jahresbericht 2024/2025 Telekommunikation. <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2025/TaetigkeitsberichtTK2024-2025.pdf>.
- Bundesnetzagentur. (n.d.). Anzahl der aktiven Anschlüsse auf Regiotypenebene. Datenstand 06/2024.
- CDU, CSU, SPD (2025). Verantwortung für Deutschland, Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. <https://www.cdu.de/app/uploads/2025/04/KoaV-2025-Gesamt-final-0424.pdf>.
- Cisco (n.d.). Cisco cBR-8 Converged Broadband Router Data Sheet. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/me-4600-series-multiservice-optical-access-platform/datasheet-c78-730445.pdf>.

- Cisco (n.d.). Cisco ME 4600 Series Optical Line Terminal Datasheet. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/me-4600-series-multiservice-optical-access-platform/datasheet-c78-730445.pdf>.
- DESTATIS (2022). Zensus 2022, Stichtag 15. Mai 2022. <https://ergebnisse.zensus2022.de/daten-bank/online/>.
- ETSI EN 303 215 (2014). Environmental Engineering (EE) Measurement methods and limits for power consumption in broadband telecommunication networks equipment. V1.2.11 (2014-12). [https://www.etsi.org/de-liver/etsi\\_en/303200\\_303299/303215/01.02.11\\_20/en\\_303215v010211a.pdf](https://www.etsi.org/de-liver/etsi_en/303200_303299/303215/01.02.11_20/en_303215v010211a.pdf).
- Europäische Kommission (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — The European Green Deal (COM(2019) 640 final).. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
- Europäische Kommission (2024). How to master Europe's digital infrastructure needs? White Paper. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/white-paper-how-master-europes-digital-infrastructure-needs>.
- Europäische Kommission, Joint Research Centre. (2024). Code of conduct on energy consumption of broadband equipment (Version 9.0). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136991>.
- Fiber Broadband (2024). Fiber Broadband Deployment is Paramount To Achieving Zero Carbon Footprint. [https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2024/07/FBA-059\\_Sustainability\\_WhitePaper\\_FIN.pdf](https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2024/07/FBA-059_Sustainability_WhitePaper_FIN.pdf).
- Ficher, M. Berthoud, F. Ligozat, A., Sigonneau, P., Wisslé, M., Tebbani B. (2021). Assessing the carbon footprint of the data transmission on a backbone network. 24th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks, Mar 2021, Paris, France. <https://hal.science/hal-03196527/document>.
- Galaxus (2020). Unser Klima-Beitragsmodell. <https://www.galaxus.de/de/page/unser-klima-beitragsmodell-16329>.
- Godlovitch, I., Kroon, P., Strube Martins, S., Ockenfels, M., Plückebaum, T., Schäfer, S., Lucidi, S., Schwarz-Schilling, C., Herrera, F., Juškevičius, R., Pasquali, F., & Tambjerg, L. (2023). Support study for the review of the Broadband Cost Reduction Directive: Final report. Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/410af620-b71f-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en>.
- Godlovitch, I., Louguet, A., Baischew, D., Wissner, M., Pirlot, A. (2021) Environmental impact of electronic communications, WIK/Ramboll Study for BEREC, Bad Honnef, 21. December 2021, BOR (22) 34. [https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document\\_register\\_store/2022/3/BoR%20%2822%29%2034\\_External%20Sustainability%20Study%20on%20Environmental%20impact%20of%20EC.pdf](https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2022/3/BoR%20%2822%29%2034_External%20Sustainability%20Study%20on%20Environmental%20impact%20of%20EC.pdf).
- Huawei (n.d.). Huawei OptiXstar P613E-E ONU Datasheet. <https://e.huawei.com/en/products/optical-terminal/optixstar-p613e-e>.
- Huawei (n.d.). Huawei SmartAX MA5801-FL16 Datasheet. <https://e.huawei.com/en/products/optical-access/ma5801-fl16?section=specification>.

- Kulenkampff, G., Ockenfels, M., Zoz, K., & Zuloaga, G. (2020). Kosten von Breitband-Zugangsnetzen: Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up-Modellierung und statistische Analyse. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-473-kosten-von-breitband-zugangsnetzen>.
- Lannoo, B. (2015), How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-015-0504-4>.
- Moayeri, B. (2024). Die immer noch unterschätzten IT-Energiekosten. Der Netzwerk Insider, <https://www.comconsult.com/wp-content/uploads/2024/05/in2406.pdf>.
- Neumann, K.-H., Strube Martins, S., Schwarz-Schilling, C., Eltges, F. (2023). Gebäudeinterne Infrastruktur – ein notwendiger Schritt zur Entwicklung von FTTH. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 499. [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_499.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_499.pdf)
- Nokia Siemens (n.d.). Networks Multi-Service IP DSLAM Surpass hiX 5625 (Chassis M400) Release 2.7.
- Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien. Technische Hochschule Mittelhessen, Studie für BREKO. [https://brekoverband.de/wp-content/uploads/2025/03/gutachten\\_nachhaltigkeit\\_2\\_v09\\_final\\_2024-1-22.pdf](https://brekoverband.de/wp-content/uploads/2025/03/gutachten_nachhaltigkeit_2_v09_final_2024-1-22.pdf).
- Plückebaum, T. (2023). Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 498, Bad Honnef, Mai 2023, [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_498.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_498.pdf).
- Plückebaum, T., Eltges, F., Ockenfels, M. (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. Februar, 2019. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/potenziell-anzunehmende-vorleistungsprodukte-in-kabelnetzen-auf-der-basis-von-docsis>.
- Postbank. (22. September, 2025). Durchschnittliche Nutzungsdauer des Internets pro Woche in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2025 (in Stunden) [Graph]. In Statista. Zugriff am 11. Dezember 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/875957/umfrage/dauer-der-internetnutzung-pro-woche-in-deutschland/>.
- Rambech, E., & Vandenbussche, V. (2022). Klimafotavtrykk fra utrulling av fiber (Versjon 01). Endrava. [https://teknorge.no/wp-content/uploads/Endrava-Rapport-Klimafotavtrykk-av-utrulling-av-fiber\\_rev01.pdf](https://teknorge.no/wp-content/uploads/Endrava-Rapport-Klimafotavtrykk-av-utrulling-av-fiber_rev01.pdf).
- Repenning, J., Harthan, R., Blanck, R., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Gockeler, K., Gorz, W. K., Hacker, F., Hennenberg, K., Hörl, W., Kasten, P., Kreye, C., Lüdtker, S., Matthes, F. C., Moosmann, L., Nissen, C., & ... Zerrahn, A. (2023). Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 (Climate Change, Nr. 30/2023). Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023\\_07\\_04\\_climate\\_change\\_30\\_2023\\_klimaschutzinstrumente.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf).
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (n.d.). Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/_inhalt.html).

- Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V. W., Wahr, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpfer, M., & Nissen, N. F. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (Projekt UTAMO) (Texte 26/2023). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobilfunk>.
- Störries, B., Wissner, M., von Preysing, C., Neuhaus, J., Hoff, T., & Berg, M. (2024). Metastudie zum nachhaltigen Ausbau von Gigabitnetzen. WIK-Consult; PwC. [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Studien/2024/WIK-C\\_PwC\\_Metastudie\\_Juni2024.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Studien/2024/WIK-C_PwC_Metastudie_Juni2024.pdf).
- Stronzik, M. und Zuloaga, G. (2020). Empirische Untersuchung der FTTB/H Ausbauaktivität im euro-päischen Vergleich. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 465. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-465-empirische-untersuchung-der-fttb-h-ausbauaktivitaet-im-europaeischen-vergleich>.
- Telekom (2017). Record year for fiber-optic expansion (40,000 kilometers of optical fiber installed). <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/record-year-for-fiber-optic-expansion-511492>.
- teltarif.de. (2025). Glasfaser im Mehrfamilienhaus: FTTH-Ausbau noch immer schwierig. <https://www.teltarif.de/glasfaser-mehrfamilienhaus-ftth/news/99379.html>.
- Umweltbundesamt (2025). Entwicklung des spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2024. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13\\_2025\\_cc.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2025_cc.pdf).
- VATM (2024). Analyse der Wettbewerbssituation auf dem deutschen Festnetzmarkt. <https://www.vatm.de/wp-content/uploads/2024/09/VATM-Wettbewerbsstudie-2024.pdf>.
- Wang, K., Kihl, M., Gavler, A., Du, M., & Lagerstedt, C. (2015). Power consumption analysis of FTTH networks. In Proceedings of the 10th International Conference on Digital Telecommunications. Lund University. <https://lup.lub.lu.se/search/files/5834821/8230657.pdf>.
- Wernick, C., Knips, J., Lachmann, M. R., & Strube Martins, S. (Jahr). Ursachen für die wachsende Schere zwischen FTTH Homes Passed und FTTH Homes Connected. WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 526. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/ursachen-fuer-die-wachsende-schere-zwischen-ftth-homes-passed-und-ftth-homes-connected-nr-526>.
- Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Ockenfels, M. (2024a). Ökologische Effekte des Glasfaserausbaus. Studie für die Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH. WIK-Consult GmbH. [https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/Oeko-Effekte\\_20241206\\_Bericht.pdf](https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/Oeko-Effekte_20241206_Bericht.pdf).
- Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Wissner, M. (2024b). Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich. WIK Working Paper Nr. 10. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/wik-working-paper-nr-10-nachhaltigkeit-fest-und-mobilnetze-ueber-unterschiedliche-regionale-strukturen-im-vergleich>.

## Annex

Tabelle A-1: Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi zentraler Equipment nach Anschlusstechnologie

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTEx	DOCSIS	Drahtlos mobil
Full-Load Zeit (% Tag)	15%	./.	./.	15%	15%	./.	./.
Low-Power Zeit (% Tag)	60%	./.	./.	60%	60%	./.	./.
Stand-by Zeit (% Tag)	25%	./.	./.	25%	25%	./.	./.

Quelle: WIK auf Basis von Lannoo, B. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks, S. 5 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-015-0504-4> und Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht, S. 91. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_26-2023\\_umweltbezogene\\_technikfolgenabschaetzung\\_mobilfunk\\_in\\_deutschland.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf).

Tabelle A-2: Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi Endkundengeräte (CPE) nach Anschlusstechnologie

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTEx	DOCSIS	Drahtlos mobil
On-State Zeit (% Tag)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Ready-State Zeit (% Tag)	26%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Sleep-Mode Zeit (% Tag)	59%	25%	25%	25%	25%	25%	25%

Quelle: WIK auf Basis von Lannoo, B. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks, S. 5 und 11, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-015-0504-4>, Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht, S. 91, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_26-2023\\_umweltbezogene\\_technikfolgenabschaetzung\\_mobilfunk\\_in\\_deutschland.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf), Europäische Kommission, Joint Research Centre. (2024). Code of conduct on energy consumption of broadband equipment (Version 9.0). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136991>. und Postbank. (22. September, 2025). Durchschnittliche Nutzungsdauer des Internets pro Woche in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2025 (in Stunden) [Graph]. In Statista. Zugriff am 11. Dezember 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/875957/umfrage/dauer-der-internetnutzung-pro-woche-in-deutschland/>.

## Basisdatenaufbereitung

Zur Operationalisierung der Analyse wurde aus den verfügbaren Rohdaten folgenden Information pro Gemeinde generiert:

- Absolute Zahl der verfügbaren Anschlüsse
- Absolute Zahl der aktiven Anschlüsse

**Absolute Zahl der verfügbaren Anschlüsse.** Die Anzahl der *verfügbaren Anschlüsse* pro Gemeinde wurde berechnet, indem die im Breitbandatlas ausgewiesene Festnetzverfügbarkeit in Prozent der Haushalte<sup>67</sup> mit der absoluten Zahl der Haushalte aus dem Zensus 2022 multipliziert wurde.<sup>68</sup>

**Absolute Zahl der aktiven Anschlüsse.** Die absoluten Zahlen aktiver Anschlüsse sind nicht öffentlich verfügbar. Daher wurde eine gesonderte Datenanfrage an die Bundesnetzagentur gestellt. Aus Gründen der Vertraulichkeit konnten die Daten jedoch nicht auf Gemeindeebene bereitgestellt werden. Stattdessen stellte die Bundesnetzagentur auf Anfrage diese Daten hochaggregiert auf Regiotyp-Ebene zur Verfügung.<sup>69</sup> Um dennoch gemeindespezifische Werte zu approximieren, wurde daher ein mehrstufiges Vorgehen gewählt. Zunächst wurde für jeden Regiotyp das Verhältnis von aktiven zu verfügbaren Anschlüssen berechnet. Dieses Regiotyp-spezifische Verhältnis dient als Proxy und wurde anschließend auf die gemeindegenauen Verfügbarkeitszahlen übertragen. Auf diese Weise ließ sich eine Schätzung der aktiven Anschlüsse pro Gemeinde ableiten.

Eine methodische Herausforderung bestand darin, dass die von der Bundesnetzagentur bereitgestellten Daten zu aktiven Anschlüssen ursprünglich auf Postleitzahl-Ebene erhoben und anschließend auf Regiotyp-Ebene aggregiert wurden. Damit eine konsistente Vergleichsbasis entsteht, mussten auch die Verfügbarkeitszahlen zunächst nach denselben Aggregationskriterien (PLZ) aufbereitet werden.

---

<sup>67</sup> Gemäß des Breitbandatlas wurden die erhobenen Verfügbarkeitsinformationen auf Adressebene (Festnetz) unter Nutzung von Geobasisdaten aufbereitet. Als Geobasisdaten dienen amtliche Geodaten des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) und Haushalts- und Adressdaten der Nexiga GmbH (Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und Bundesnetzagentur (2024b). Breitbandatlas. Methodenbericht. [https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/Dokumente/Methodenbericht\\_BBA.pdf?blob=publicationFile&v=8](https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/Dokumente/Methodenbericht_BBA.pdf?blob=publicationFile&v=8)). Die Haushalts- und Adressdaten von Nexiga GmbH sind nicht öffentlich verfügbar.

<sup>68</sup> Nach dem Breitbandatlas gibt es derzeit keine Unterscheidung in der Datenerhebung nach *Homes Passed* und *Homes Connected* und somit sind dürfen sich die Unternehmen bei ihrer Datenlieferung auf unterschiedliche Sachverhalte beziehen (Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und Bundesnetzagentur, 2024b)

<sup>69</sup> Die Bundesnetzagentur erfasst die Anschlusszahlen auf Postleitzahlenebene (PLZ). Für die Aggregation dieser Daten auf die Ebene der Regiotypen griff die Bundesnetzagentur auf eine vom WIK bereitgestellte PLZ-Regiotyp-Zuordnung zurück. Diese folgt demselben Prinzip wie die Gemeinde-Regiotyp-Zuordnung, nämlich der Klassifikation auf Basis der Bevölkerungsdichte und der in Stobbe et al. (2023) definierten Grenzwerte. Die verwendeten PLZ-Daten wurden für diesen Zweck aus [ArcGIS Hub](#) unter Verwendung von OpenStreetMap und Einwohnerzahl von DESTATIS herangezogen.



Dies erfolgte in zwei Schritten:

1. Herstellung der Vergleichsbasis:

Zunächst wurden die Gemeinden den jeweiligen Postleitzahlen zugeordnet.<sup>70</sup> Die verfügbaren Anschlüsse wurden auf PLZ-Ebene zusammengeführt und anschließend – analog zur Vorgehensweise der Bundesnetzagentur – auf Regiotyp-Ebene aggregiert. Damit standen Verfügbarkeitsdaten in derselben Aggregationslogik zur Verfügung wie die aktiven Anschlüsse.

2. Berechnung und Übertragung der Aktivierungsquoten:

Auf dieser konsistenten Basis wurde pro Regiotyp das Verhältnis von aktiven zu verfügbaren Anschlüssen („Aktivierungsquote“) berechnet. Diese Quoten wurden anschließend zurückgerechnet: zunächst auf PLZ-Ebene angewandt, um dort die Zahl aktiver Anschlüsse zu schätzen, und in einem weiteren Schritt wieder auf Gemeindeebene aggregiert. Schließlich konnten Aktivierungsquoten für jeden Regiotyp auf Grundlage der Gemeindegrenzen bestimmt und auf die jeweilige Zahl verfügbarer Anschlüsse jeder Gemeinde übertragen werden.

### Aufschlüsselung aggregierter Festnetztechnologien

**FTTH/B.** Zur Differenzierung von FTTB- und FTTH-Anschlüssen wurde eine Zuordnungsregel auf Basis der gemeindeschaffen Gebäude- und Wohnungszählung des Zensus 2022 angewandt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass FTTB überwiegend in Wohnungen von Mehrfamilienhäusern realisiert wird – insbesondere in größeren Wohnanlagen mit verteilter Eigentümerstruktur, bei denen eine gebäudeinterne Glasfaserverlegung (FTTH) nicht durchgängig gewährleistet ist.

Auf dieser Grundlage wurde die Zahl der FTTB-Anschlüsse in einer Gemeinde berechnet, indem die Gesamtzahl der FTTH/B-Haushalte mit dem Anteil der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern mit sieben oder mehr Wohneinheiten multipliziert wurde. Um die spezifische Verbreitung von FTTB innerhalb von Mehrfamilienhäusern abzubilden, wurde zudem ein Korrekturfaktor berücksichtigt. Dieser Faktor entspricht dem Verhältnis der bundesweiten Gesamtzahl an FTTB-Anschlüssen – laut Jahresbericht 2024 der Bundesnetzagentur – zur hypothetischen Anzahl an FTTB-Anschlüssen, die entstehen würde, wenn sämtliche Mehrfamilienhäuser mit sieben oder mehr Wohneinheiten in Deutschland mit FTTB erschlossen wären. Damit entspricht die auf Gemeindeebene verteilte Gesamtzahl der FTTB-Anschlüsse der aus dem Jahresbericht 2024 der Bundesnetzagentur ausgewiesenen bundesweiten Gesamtzahl der FTTB-Anschlüsse.<sup>71</sup>

<sup>70</sup> Da die PLZ-Bereiche in vielen Fällen feingranularer abgegrenzt sind als Gemeinden, ergeben sich zwangsläufig Unterschiede zwischen der PLZ-basierten und der gemeindebasierten Regiotyp-Zuordnung. Bei mehrfacher Zuordnung mehrerer PLZ zu einer Gemeinde erfolgte die Aufteilung der Anschlüsse bevölkerungsgewichtet.

<sup>71</sup> Gemäß dem Jahresbericht 2024 der Bundesnetzagentur (Datenstand zum 12/2024) belaufen sich Anzahl der aktiven FTTB-Anschlüsse auf 1,2 Mio. von insgesamt 5,3 Mio. aktiven FTTH/B-Anschlüssen, was einem Anteil von rund 23 % entspricht. Dieses Verhältnis wurde auf die Gesamtzahl der

Die gemeindescharfe Zahl der FTTH-Anschlüsse ergibt sich als Restgröße aus der Differenz zwischen der Gesamtzahl der FTTH/B-Anschlüsse und den zuvor ermittelten FTTB-Anschlüssen. Mit anderen Worten: Von den auf Gemeindeebene ausgewiesenen FTTH/B-Anschlüssen werden die nach der beschriebenen Zuordnungsregel berechneten FTTB-Anschlüsse abgezogen. Die verbleibende Zahl entspricht der Anzahl der FTTH-Anschlüsse.

**FTTH PtP und PtMP.** Für die Unterscheidung zwischen den Bauweisen Point-to-Point (PtP) und Point-to-Multipoint (PtMP) liegen keine gemeindescharfen Informationen vor. Die konkrete Ausprägung hängt primär von den jeweiligen nationalen bzw. regionalen Glasfaserunternehmen ab. Aufgrund der großen Zahl aktiver Glasfaserunternehmen, fehlender Angaben zur Marktrelevanz sowie nicht öffentlich verfügbarer Informationen zur eingesetzten FTTH-Bauweise ist es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, eine georeferenzierte oder regional differenzierte Abgrenzung zwischen PtP und PtMP vorzunehmen.

Da frühere vergleichbare Studien nur geringe energetische Unterschiede zwischen den beiden Bauweisen festgestellt haben, wird stattdessen eine grobe Schätzung auf Basis bundesweiter Marktdaten vorgenommen. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Deutsche Telekom (DTAG) und die Deutsche Glasfaser – beide mit PtMP-Bauweise – zusammen rund 59 % der *homes passed* Anschlüsse stellen.<sup>72</sup> Für die verbleibenden 41 % wird angenommen, dass jeweils die Hälfte in PtP- und die andere Hälfte in PtMP-Bauweise realisiert ist. Daraus ergibt sich eine Gesamtaufteilung der FTTH-Anschlüsse von 20,5 % PtP und 79,5 % PtMP. Dieses bundesweite Verhältnis wird anschließend einheitlich auf jede Gemeinde angewendet.

**FTTEx.** Im Breitbandatlas erfolgt keine gesonderte Ausweisung von FTTEx bzw. ADSL-Anschlüssen. Die dort verwendete Systematik unterscheidet lediglich zwischen den Kategorien FTTB/H, FTTC, HFC sowie sonstige Breitbandtechnologien, wobei Letztere alle nicht explizit genannten Technologien (z. B. Richtfunk oder ADSL) umfassen.<sup>73</sup> Zusätzlich werden sämtliche Technologiegruppen nach Bandbreitenklassen ( $\geq 16$  Mbit/s,  $\geq 30$  Mbit/s,  $\geq 50$  Mbit/s usw.) differenziert.

Da ADSL-Anschlüsse (FTTEx) typischerweise Bandbreiten von weniger als 16 Mbit/s ermöglichen, wird deren Anzahl approximiert, indem von der Gesamtzahl der Haushalte die Kategorie sonstige Breitbandtechnologien  $\geq 16$  Mbit/s abgezogen wird. Der resultierende Restwert entspricht jenen Haushalten, die entweder nicht mit Breitband versorgt sind oder über einen Anschluss mit weniger als 16 Mbit/s verfügen. Diese Größenordnung wird als Näherung für die Zahl der ADSL-Anschlüsse auf Gemeindeebene

---

verfügbaren FTTH/B-Anschlüsse laut Breitbandatlas (14,4 Mio.) übertragen. Daraus ergibt sich eine geschätzte Zahl von 3,3 Mio. verfügbaren FTTB-Anschlüssen.

<sup>72</sup> VATM (2024). Analyse der Wettbewerbssituation auf dem deutschen Festnetzmarkt.

<https://www.vatm.de/wp-content/uploads/2024/09/VATM-Wettbewerbsstudie-2024.pdf>.

<sup>73</sup> Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und Bundesnetzagentur (2024a). Breitbandatlas. Häufige Fragen und Antworten. <https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/start.html>.



herangezogen. Auf diese Weise ergibt sich deutschlandweit eine Gesamtzahl von rund 1,6 Mio. verfügbaren Anschlüssen, was etwa 4 % aller Haushalte entspricht.

Die Kategorie FTTC wird im Breitbandatlas explizit ausgewiesen und umfasst etwa 35,2 Mio. Haushalte. Zusammen mit den approximierten ADSL-Anschlüssen ergibt sich somit eine Gesamtzahl von ca. 36,9 Mio. Haushalten mit einem xDSL-Anschluss.

Das daraus abgeleitete Verhältnis zwischen ADSL und FTTC innerhalb der Gesamtmenge von xDSL-Anschlüssen bildet die Grundlage für die weitere Differenzierung der von der Bundesnetzagentur berichteten Daten zu aktiven Anschlüssen, da dort beide Technologien unter der Sammelkategorie xDSL zusammengefasst werden.

**ISSN 1865-8997**