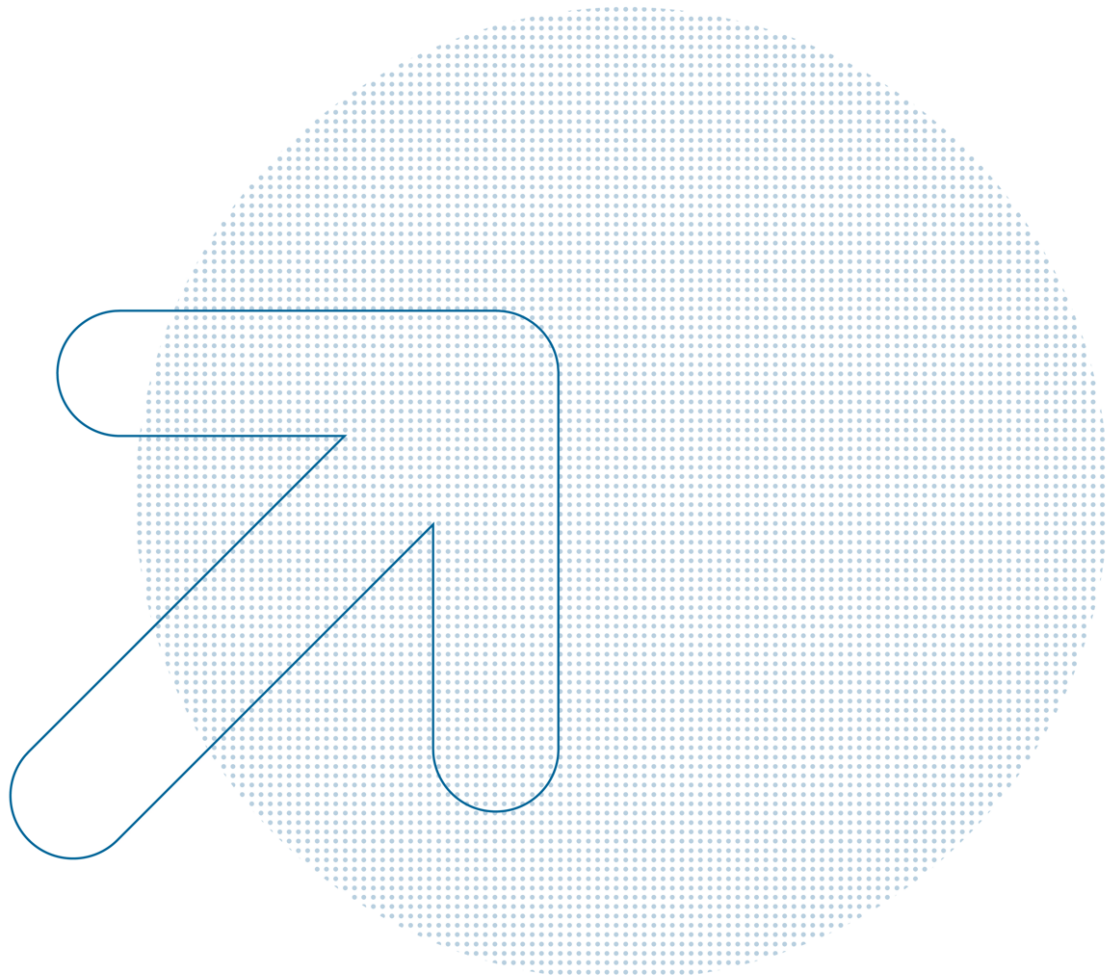


WIK-Consult • Bericht

Studie für die RTR-GmbH,
Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH
Wien, Österreich



Ökologische Effekte des Glasfaserausbaus

G. Zuloaga, T. Plückebaum, G. Kulenkampff, M. Ockenfels

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor, Verwaltungs- und Abteilungsleiter	Alex Kalevi Dieke
Direktor, Abteilungsleiter	Prof. Dr. Bernd Sörries
Abteilungsleiter	Dr. Christian Wernick
Abteilungsleiter	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7043
Steuer-Nr.	222/5751/0926
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 329 763 261

Stand: Januar 2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Zusammenfassung	1
2 Hintergrund	3
3 Gegenstand der Studie	5
3.1 Ziele der Untersuchung	5
3.2 Fokus und Eingrenzung der Studie	6
4 Methodische Vorgehensweise	8
4.1 Quantifizierungsansätze in der Literatur	8
4.2 Modellierungsansatz und Modelldesign	9
4.2.1 Netzmodellierung	10
4.2.2 Energieverbrauch	16
4.2.3 CO ₂ -Berechnung	18
5 Datenbasis	21
5.1 Gemeindedaten zur Netzmodellierung	21
5.1.1 Netzdaten der RTR	21
5.1.2 Geographische Daten	22
5.2 Standardisierte Daten zum Energieverbrauch	23
5.2.1 EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment	23
5.2.2 Hersteller-Sheets	25
5.3 Daten zu CO ₂ -Emissionen	26
5.3.1 CO ₂ -Emissionen aus dem Energieverbrauch	26
5.3.2 CO ₂ -Emissionen aus der Herstellung und Installation von Netzelementen	27
6 Modellannahmen	29
6.1 Netzdimensionierung	29
6.2 Energieverbrauchsannahmen	30
6.2.1 Grundlast von Netzelementen	30
6.2.2 Nutzungsintensität und Nutzerverhalten	30

6.2.3 POP Energieverbrauch	31
6.2.4 Energieeffizienz im Funknetz	31
6.3 Projektion bis 2050	32
6.3.1 Glasfaserausbau und Migration	32
6.3.2 Energieverbrauch und CO ₂ -Äquivalente	34
7 Analyisierte Szenarien	36
8 Modellergebnisse	38
8.1 Energieverbrauch	38
8.1.1 Suboptimaler energetischer IST-Stand (2024)	38
8.1.2 Zunahme des Energieverbrauchs bis 2050	40
8.1.3 Tempo des Ausbaus und der Migration	41
8.1.4 Dauerhafte Reduktion des energetischen Kurses	42
8.1.5 Risiko von stark ansteigendem energetischen Bedarf aufgrund von Cubes	44
8.2 CO ₂ -Emissionen	45
8.2.1 Netto-CO ₂ -Bilanz positiv für den schnelleren Ausbau	45
8.2.2 Andere steuerbare Maßnahmen erzielen höhere CO ₂ -Ersparnisse	47
8.2.3 Effekte der Datenvolumensteigerungen und Einordnung in die ICT insgesamt	48
9 Fazit und Ausblick	51
Literaturverzeichnis	53
Annex	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung modellierter aktiver Netzelemente für FTTX-Technologien	11
Abbildung 2:	Aktive und verfügbare Anschlüsse (in Mio. Anschlüssen)	22
Abbildung 3:	Straßenkilometer in bebauten Gebieten im Vergleich zu A1 Glasfasernetz nach Bundesland	23
Abbildung 4:	Energieeffizienz in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie im Jahr 2024 (W/Mbps pro Nutzer)	39
Abbildung 5:	Gesamter Energieverbrauch in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie im Jahr 2024 (Gesamt: 334.260 MWh)	39
Abbildung 6:	Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie (in MWh) – Basisszenario	40
Abbildung 7:	Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (1/2/3)	42
Abbildung 8:	Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (3/5/6)	43
Abbildung 9:	Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (3/4)	44
Abbildung 10:	Modellergebnisse (2025-2050) der kumulierten CO ₂ -Emissionen in österreichischen Anschlussnetzen	46
Abbildung 11:	CO ₂ -Ersparnisse (kumuliert) Sz. 2/3 im Vergleich zum Basisszenario	47
Abbildung 12:	CO ₂ -Ersparnisse (kumuliert) Sz. 5/6 im Vergleich zum Basisszenario	48
Abbildung 13:	Beitrag des ICT-Sektors an den weltweiten CO ₂ -Emissionen 2021	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Tabellarische Darstellung des Fokus und der Abgrenzung der Studie	6
Tabelle 2:	Szenario-Darstellung – Hauptszenarien	36
Tabelle 3:	Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi zentraler Equipment nach Technologie	56
Tabelle 4:	Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi Network Termination nach Technologie	56
Tabelle 5:	Technische Angaben verwendeter zentraler Equipment nach Technologie	57
Tabelle 6:	Technische Angaben verwendeter Network Termination nach Technologie	57

Abkürzungsverzeichnis

ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
BEREC	Body of European Regulators for Electronic Communications
CIU	Control and Interface Unit
CMTS	Cable Modem Termination System
CO ₂	Kohlendioxid
CoC	Code of Conduct
CXU	Convergence/Cross-Connection Unit
DOCSIS	Data over Cable Service Interface Specification
DPU	Distribution-Point Unit
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	DSL Access Multiplexer
EKEK	Europäischer Kodex zur Elektronischen Kommunikation
FTTB	Fibre to the Building
FTTC	Fibre to the Curb
FTTEx	Fibre to the Exchange
FTTH	Fibre to the Home
FTTS	Fibre to the Street
FTTX	Fibre to the x (= unbestimmter Punkt)
FWA	Fixed Wireless Access
GB	Gigabytes
Gf	Glasfaser
G.fast	Gigabit.fast access to subscriber terminals
GIS	Geographisches Informationssystem

GWh	Gigawattstunde
HFC	Hybrid Fibre Coax
ICT	Information and Communication Technologies
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KVz	Knotenverzweiger
KWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Analysis
MPoP	Metropolitan Point of Presence
MWh	Megawattstunden
OLT	Optical Line Terminator
PM_UPL	Power Management Unit/Power Supply
PtMP	Point to Multipoint
PtP	Point to Point
PUE	Power Usage Effectiveness
RAN	Radio Access Network
RTR	Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR-GmbH)
Sz	Szenario
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDSL	Very Highspeed Digital Subscriber Line
VHCN	Very High Capacity Networks
Wh	Wattstunden
XGS.PON	10 Gigabit Symmetrical Passive Optical Network

1 Zusammenfassung

Im Rahmen der wachsenden Digitalisierung der Gesellschaft und dem erklärten Ziel der Europäischen Kommission zum Green Deal stellt sich u.a. die Frage nach dem ökologischen Fußabdruck der Telekommunikationsanschlusnetze. Schon zur Bereitstellung ausreichender Bandbreiten sollen die Netze auf Glasfaser umgestellt werden.

Die spezifische Fragestellung für die hier vorgelegte Studie lautet, wie sich die unterschiedlichen Freiheitsgrade der Umstellung der Anschlussnetze auf Glasfaser in Österreich auf deren ökologischen Fußabdruck in den Jahren 2024 bis 2050 auswirken. Betrachtet werden Freiheitsgrade hinsichtlich des vollständigen Glasfaserausbau, seiner Ausbaugeschwindigkeit und der Migration der bestehenden alten Netze auf die neue Anslusstechik. Letztlich bestehen auch Freiheitsgrade im Grad der Migration von den bestehenden HFC-Netzen mit DOCSIS in Österreich, die zu den im EKEK definierten Zielnetz VHCN gehören, und den in Österreich derzeit in größerer Zahl nachgefragten hybriden Festnetz- und mobilen Anschlüssen (Cubes).

WIK-Consult hat dazu ein generisches Bottom-up Modell entwickelt, das ausgehend von der Besiedlung in den Gemeinden Österreichs und vom bisherigen Ausbaustand der Anschlussnetze die weitere Netzentwicklung im Rahmen der Fragestellungen des Ausbaus, des unterstellten Migrationsmodells und der Abschalt Szenarien abbildet. Das Modell bestimmt in Abhängigkeit von Netzverfügbarkeit und Netznutzung die benötigten Anlagen und Netzelemente einschließlich des Trassenbaus. Die mit der Errichtung der Trassen und des Betriebs der Netzelemente in Abhängigkeit des Energieverbrauchs entstehenden CO₂-Emissionen werden jahresbezogen berechnet. Die Bestimmung des Energieverbrauches erfolgt je Netztechnologie und Netzelement; dieser skaliert mit den Anschlusszahlen und Bandbreiten.

Die Angaben zum Energieverbrauch stützen sich dabei auf den *EU Code of Conduct (CoC) on Energy Consumption of Broadband Equipment*. Der CoC ist ein Energieverbrauchskodex der EU-Kommission für Telekommunikationsnetze, der je Netzelementtyp den Maximalwert der benötigten elektrischen Energie vorgibt und auf den sich Netzbetreiber und Hersteller freiwillig verpflichten. Er wird jährlich fortgeschrieben. Wir arbeiten auf dem Stand von 2024 und haben die zukünftige effizienzsteigernde Entwicklung parametergesteuert berücksichtigt. Für die hybriden und reinen Cube-Anschlüsse aus den Mobilnetzen haben wir für den österreichischen Fall keine separate FWA Technologie berücksichtigt, sondern den anteiligen Energieverbrauch aus den bestehenden Mobilfunknetzen für die entsprechenden Anschlüsse (Cubes und hybride Anschlüsse) dieser Anschluss-Technologie zugerechnet.

Aus dem im Prinzip sehr großen Lösungsraum an Parametrierungen haben wir mit RTR abgestimmt 6 Szenarien berechnet. Die Ergebnisse belegen:

- Von den bestehenden Technologien ist FTTH die emissionseffizienteste. Alle Technologien, die eine Übertragung über Kupferstrecke (Kupferdoppeladern oder Koaxialkabel) oder über Funk beinhalten, sind weniger emissionseffizient.
- Ein früher und schneller Glasfaserausbau ist trotz der dann früher freigesetzten Emissionen für den Ausbau an sich im kumulierten Ergebnis emissionseffizienter als ein später Ausbau.
- Dieser Effekt wird weiter verstärkt, wenn die Effizienz der Glasfaserübertragung im Anschlussnetz noch zunimmt.
- Eine hohe Steigerung der Emissionseinsparungen ergibt sich, wenn auf die in den Ausgangsszenarien noch verbleibenden und nicht migrierten Kupfer- und Funk-Anschlüsse (HFC, FTTB, Hybrid und reine Cubes) verzichtet wird, also alle Anschlüsse auf FTTH migriert werden.

ICT ist ein Sektor, der auch grundsätzlich durch viele Instrumentarien zur Emissionsreduktion in anderen Sektoren unserer Gesellschaft beiträgt. Hierzu wird auch die energiehungrige KI einen wesentlichen Beitrag leisten. Inwieweit sich die KI bzgl. einer Steigerung der Kommunikationsvolumina auswirken wird, wurde hier nicht separat untersucht. Deutlich wird jedoch, dass insbesondere bei hohen Steigerungen der Kommunikationsvolumina eine vollständige Migration auf FTTH quasi ohne Alternative ist. Und je eher das geschieht, desto besser.

2 Hintergrund

Der Ausbau der Glasfaserinfrastruktur, insbesondere des Glasfaseranschlusses bis in die Wohnung bzw. die Geschäftsräume oder zumindest bis zum Gebäude (FTTH/B), gilt als zentrale Säule der modernen Telekommunikation und ist das erklärte Ziel der Europäischen Kommission¹ und der nationalen Breitbandstrategien. Zugleich hat der Übergang zu diesen modernen Telekommunikationsinfrastrukturen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, insbesondere vor dem Hintergrund der wachsenden, ökologischen Herausforderungen und der Notwendigkeit, Energie effizienter zu nutzen und weniger Schadstoffe auszustoßen. Bisherige Studien belegen, dass Glasfasernetze wesentlich weniger Energie im Vergleich zu Kupfertechnologien verbrauchen können.² Dies ist besonders relevant im Hinblick auf die zunehmenden Datenmengen, die in modernen digitalen Gesellschaften verarbeitet und transportiert werden müssen. In diesem Zusammenhang bietet der Ausbau von glasfaserbasierten Zugangstechnologien die Möglichkeit, den Energieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Zugleich darf nicht übersehen werden, dass der Ausbau von Glasfasernetzen mit einer erheblichen Umweltbelastung während der Implementierungsphase verbunden ist. Die Verlegung von Glasfasern erfordert umfangreiche Tiefbauarbeiten, die eine erhebliche Menge an Energie und Materialressourcen beanspruchen und dabei CO₂-Emissionen verursachen. Dabei kann im Prinzip nicht jeder Glasfaserausbau als reine Neuinvestition, sondern vielfach auch als (vorgezogene) Ersatzinvestition betrachtet werden, weil die Kupferinfrastruktur veraltet ist und ersetzt werden muss.

Diese Studie, die von der österreichische Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR) in Auftrag gegeben wurde, zielt darauf ab, den aktuellen Stand der CO₂-Emissionen der Telekommunikationsinfrastruktur des Landes zu quantifizieren und die Umweltauswirkungen verschiedener Szenarien des Glasfaserausbau bis 2050 zu untersuchen. Hierbei werden nicht nur die potenziellen Energieeinsparungen durch die Umstellung des Betriebs auf Glasfaseranschlussnetze in Österreich beleuchtet, sondern auch die ökologischen Auswirkungen während der Ausbauphase analysiert. Für diesen Zweck werden die zukünftigen anfänglichen CO₂-Emissionen des Glasfaserausbau mit den langfristigen Energieeinsparungen und CO₂-Reduktionen im Betrieb bis 2050 verrechnet. Besonderes Augenmerk wird auf die CO₂-Einsparungen gelegt, die durch die Migration von traditionellen Kupfernetzen zu modernen Glasfasernetzen erreicht werden können. Ziel ist es aufzuzeigen, inwiefern und unter welchen Annahmen der Ausbau von FTTH/B zur Erreichung der Klimaziele Österreichs beitragen kann. Hierbei werden unterschiedliche Migrationsszenarien im Hinblick auf Ausbaupunkt und Migrationsumfang zugrunde gelegt, um einen möglichst zielführenden Pfad zu ermitteln.

¹ EKEK: Europäischer Kodex für die Elektronische Kommunikation, Richtlinie (EU) 2018/1972.

² BREKO (2020). BREKO-Pressemeldung: Gutachten bestätigt – Echte Glasfasernetze verbrauchen deutlich weniger Strom als herkömmliche Kupfernetze. 28.05.2020.

Die Studie umfasst nicht die ökologischen Wirkungen eines vollständigen Life Cycles, der neben dem Aus- und Aufbau der Netze und dessen Betrieb auch die Entsorgung der aktiven System und passiven Netzelemente umfasst. Auch werden Auswirkungen auf den Wasserverbrauch und andere Ressourcen nicht untersucht, gleichfalls nicht die Weiterverwendung der nicht mehr benötigten Kupferkabel nebst Aufwand zum Herausziehen, wenn dies denn erfolgt.

3 Gegenstand der Studie

3.1 Ziele der Untersuchung

Diese Studie verfolgt das übergeordnete Ziel, die ökologischen Auswirkungen des Glasfaserausbau in Österreich zu analysieren. Im Zentrum der Untersuchung steht die Quantifizierung der aktuellen Emissionen, die durch den bestehenden Technologiemix aus Kupfer, FTTC/ FTTs, Koaxialkabel (DOCSIS), FTTB/H in der Struktur (Topologie) PtP oder PtMP, und FWA (Cubes)³ verursacht werden, sowie die prognostizierten zukünftigen, ökologischen Effekte, die durch den Übergang zu glasfaserbasierten Technologien entstehen.

Die Studie hat folgende zentrale Fragestellungen:

- Wie hoch sind die aktuellen, betriebsbedingten CO₂-Emissionen der österreichischen TK-Netze im Jahr 2024?
- Wie hoch sind die zukünftigen CO₂-Emissionen, die durch den erforderlichen ergänzenden Glasfaserausbau und -betrieb in Österreich entstehen?
- Inwiefern kann ein früherer oder späterer Glasfaserausbau und eine entsprechende Migration von alten auf neue Technologien zur Erreichung der Klimaziele Österreichs beitragen?

Die erste zentrale Fragestellung dieser Studie zielt darauf ab, die CO₂-Emissionen zu ermitteln, die durch den Betrieb der bestehende Netzwerke verursacht werden. Dabei werden insbesondere Kupfer- und Mobilfunknetze, die einen wesentlichen Teil des bestehenden Netzes ausmachen, analysiert.

Die zweite Fragestellung adressiert die ökologischen Konsequenzen des Glasfaserausbau selbst. Hierbei wird untersucht, welche Umweltbelastungen durch die Herstellung und die Installation der Glasfaserinfrastruktur anfallen. Besonders im Fokus stehen die CO₂-Emissionen, die während der Ausbauphase entstehen. Diese Phase des Netzausbau ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden, der durch den Einsatz von Maschinen für Tiefbau und Wiederherstellung der Oberflächen, Baustellenlogistik und Materialproduktion verursacht wird. Das Ziel ist es, den ökologischen Fußabdruck des Glasfaserausbau zu quantifizieren und ihn mit den langfristigen Einsparungen durch energieeffizientere Glasfasernetze gegenzurechnen.

Schließlich widmet sich die dritte Fragestellung der zeitlichen Dimension des Glasfaserausbau. Hierbei wird untersucht, wie sich verschiedene Ausbauzeitpunkte auf die nationale Klimastrategie und die Einhaltung der Klimaziele bis 2030 und 2050

³ Kupferdoppeladern/ Telefonzweidraht Anschlüsse, FTTC: Fibre to the Curb (Knotenverzweiger), FTTS: Fibre to the Street, DOCSIS: Data over Cable Service Interface Specification, FTTB: Fibre to the Building, FTTH: Fibre to the Home, PtP: Punkt zu Punkt oder PtMP: Punkt zu Multipunkt, FWA: Fixed Wireless Access.

auswirken. Durch die Entwicklung unterschiedlicher Szenarien soll ermittelt werden, ob ein beschleunigter Ausbau des Glasfasernetzes zu signifikant höheren CO₂-Einsparungen führen kann oder ob ein verzögerter Ausbau die Erreichung der Klimaziele gefährden könnte. Im Kern geht es um die Frage, inwiefern ein frühzeitiger technologischer Wandel größere ökologische Vorteile bringt und die Transformation der Telekommunikationsinfrastruktur zu einer energieeffizienteren Zukunft beiträgt. Ein weiterer Aspekt ist der ökologische Effekt durch das Ausmaß der Umstellung (Migration) von alten auf neue Technologien.

3.2 Fokus und Eingrenzung der Studie

Telekommunikationsinfrastrukturen und ihre ökologischen Auswirkungen sind äußerst vielschichtig und betreffen zahlreiche Technologiebereiche, Phasen des Lebenszyklus und Umweltindikatoren. Um den Fokus der Untersuchung festzulegen und die Komplexität der Thematik im Rahmen des Projektauftrags handhabbar zu machen, ist eine klare Eingrenzung des Gegenstands der Studie unerlässlich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Tabellarische Darstellung des Fokus und der Abgrenzung der Studie

	Gegenstand der Studie	Nicht Gegenstand der Studie
Zielgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Energieverbrauch (in Kwh) ✓ Treibhausemissionen (in CO₂)¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ sonstige Umweltindikatoren
Phase des Lebenszyklus-analyse (LCA)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Netznutzung ✓ Netzausbau (FTTH/B) 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ End-of-Cycle
Übertragungstechnologien und Netzarchitekturen	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Glasfasertechnologien (FTTH/B) ✓ Kupfertechnologien (FTTEx, FTTC) ✓ DOCSIS ✓ stationärer Mobilfunk (Cubes) 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Satellitennetze ✗ FWA
Netzsegmente	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Anschlussnetz (inkl. Modem) ✓ Funkzugangnetz (RAN) 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Kernnetz & Datenzentren ✗ Kundenendgeräte
Zeithorizont	<ul style="list-style-type: none"> ✓ IST-Stand 2024 ✓ 95% Ausbau bis 2030/ 2035/ 2040 ✓ 10-jährige Migration 	

Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Zielgrößen

Im Mittelpunkt der Analyse steht der Energiebedarf (gemessen in Kilowattstunden, kWh) und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen (in CO₂-Äquivalenten). Dabei wird der Betrieb der Netze zunächst über den elektrischen Energieverbrauch erfasst und in korrespondierende CO₂-Äquivalente umgerechnet, während die Belastung durch den erstmaligen Ausbau unmittelbar in CO₂-Äquivalenten erfasst wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine detaillierte Erfassung und Bewertung der

Energieeffizienz und der CO₂-Emissionen, die sowohl während des Netzausbaus als auch während der Netznutzung entstehen. Sonstige Umweltindikatoren, wie beispielsweise Wasserverbrauch, Ressourcenverbrauch oder Boden- und Wasserverschmutzung, können zwar relevant sein, würden jedoch den Rahmen dieser Studie sprengen und sind hier nicht Untersuchungsgegenstand.

Phasen der Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die Studie fokussiert sich auf zwei Hauptphasen des *Life Cycle Assessment (LCA)* der Telekommunikationsinfrastruktur: Netznutzung und Netzausbau. Die Phase des *End-of-Cycle*, also das Lebensende der Infrastruktur, wird nicht in die Analyse einbezogen. Dies bedeutet, dass potenzielle Emissionen und Umweltfolgen, die durch die Entsorgung oder das Recycling von Netzkomponenten entstehen könnten, nicht berücksichtigt werden, ebenso wenig wie nach dem Betrachtungszeitraum erforderliche Ersatzinvestitionen.

Netzsegmente

Die Analyse fokussiert sich auf das österreichischen Anschlussnetz,⁴ da für diesen Teil des Telekommunikationsnetzes – der die direkte Verbindung zu den Endnutzern herstellt – weiterhin ein signifikanter Bedarf an Glasfaserausbau besteht, während Aggregations- und Kernnetze weitestgehend mit Glasfaser ausgebaut sind.

Der Abschlusspunkt wird dabei als der Teil des integrierten Routers beim Endnutzer definiert, der die Funktion eines Modems übernimmt. Endkundengeräte, wie Router und Mobilfunkendgeräte, die über eine reine Modem-Funktionalität hinausgehen, werden bzgl. dieser zusätzlichen CPE-Funktionalitäten vom Analyseumfang dieser Studie ausgenommen.

Übertragungstechnologien und Netzarchitekturen

Die Analyse konzentriert sich auf die relevantesten Anschlusstechnologien in Österreich. Hierzu werden die DOCSIS-Technologien, die traditionellen Kupferttechnologien (xDSL), stationäre Mobilfunktechnologien wie Cubes und Hybridlösungen, sowie FTTH-Netze (*Fibre-to-the-Home*), sowohl in Punkt-zu-Punkt (PtP)- als auch in Punkt-zu-Multipunkt (PtMP)-Architekturen betrachtet.

Sonstige Anschlusstechnologien, die in Österreich weniger verbreitet sind, beispielsweise Satellitennetzwerke und reine Fixed Wireless Access (FWA) Netze⁵, werden hingegen in die Analyse nicht einbezogen.

⁴ Hiermit sind die technischen (und nicht räumlichen oder regulatorischen) Grenzen des Anschlussnetzes gemeint, d.h. die Verbindung zwischen Hauptverteiler und dem Netzabschlusspunkt beim Endnutzer. Analog liegt der Fokus bei mobilfunkbasierten Anschlusstechnologien auf das Funkzugangsnetz.

⁵ Cube- und Hybridlösungen aus den Mobilfunknetzen sind einbezogen, reine dedizierte FWA-Netze jedoch nicht.

4 Methodische Vorgehensweise

4.1 Quantifizierungsansätze in der Literatur

Die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch in Anschlussnetzen werden in der bisherigen Literatur auf Basis verschiedener Berechnungsmethoden ermittelt. Hierbei haben sich die wissenschaftlich fundierten Bottom-up- und Top-down-Methoden sowie die Lebenszyklusanalysemodelle etabliert.

Bottom-up-Ansätze zur Energie- und CO₂-Quantifizierung

Ein verbreiteter Ansatz zur Quantifizierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen in Telekommunikationsnetzen ist der Bottom-up-Ansatz. Dieser Ansatz ermittelt den Energieverbrauch der einzelnen Komponenten des Netzwerks aus der Verteilung der Anschlüsse im Feld wie Modems, aggregierendes Netzequipment oder Basisstationen, wie diese in einem effizienten, realen Netzwerk benötigt werden und summiert diese auf, um den Gesamtverbrauch des Netzes zu berechnen. Zur Bestimmung des CO₂-Ausstoßes wird der Energieverbrauch der jeweiligen Komponenten aufsummiert und anschließend mit dem CO₂-Emissionsfaktor der verwendeten Stromquelle multipliziert.

Dieser Ansatz hat einen hohen Bedarf an spezifischen technischen und energetischen Daten für jedes einzelne Netzelement, was ihn sehr datenintensiv macht. Er fußt auf einer bottom-up effizienten Netzstruktur, die in der Praxis oft weniger „optimal“ ausgeführt sein kann, was die realen Emissionen unterschätzen kann.

Beispiele von Nachhaltigkeitsstudien für TK-Netze auf Basis des Bottom-up-Ansatzes sind Stobbe et al. (2023), Obermann (2022), Ficher et al. (2021), Bieser et al. (2020), Aleksic und Lovric (2011).

Top-down-Ansatz

Neben dem Bottom-up-Ansatz wird auch der Top-down-Ansatz verwendet, der den tatsächlichen, gesamten Energieverbrauch eines Netzwerks als Ausgangspunkt nimmt und diesen dann auf verschiedene Netzsegmente wie das Anschlussnetz herunterbricht.

Hierbei besteht eine der größten Herausforderungen bei der Quantifizierung des Energieverbrauchs in Anschlussnetzen darin, dass diese Netze oft heterogen aufgebaut sind, insbesondere in Ländern mit einer gemischten Infrastruktur aus Kupfer und Glasfaser. Die Übergangsphase von Kupfer- zu Glasfasernetzen erschwert die Erhebung technologiespezifischer Verbrauchsdaten aus beispielsweise Technikräumen, was die Durchführung detaillierter Szenarioanalysen erheblich herausfordert.

Nachhaltigkeitsstudien für TK-Netze auf Basis des Top-Down-Ansatzes sind Godlovitch et al (2023), Breide et al (2021), Laidler et al. (2019), Anders und Edler (2015), Raspone et al. (2015).

Lebenszyklusanalyse (LCA)

Eine andere Methode ist die Lebenszyklusanalyse (LCA). Die LCA berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus der Netzkomponenten, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und den Betrieb bis hin zur Entsorgung.⁶ Hierbei können lokale Stromquellen und -strukturen Berücksichtigung finden.

4.2 Modellierungsansatz und Modelldesign

Die Studie verwendet einen Bottom-up-Modellierungsansatz, um den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Telekommunikationsinfrastruktur zu ermitteln. Der Fokus liegt dabei auf der detaillierten Analyse einzelner Netzsegmente und Technologietypen, um den Energieverbrauch auf Ebene der Netzelemente zu berechnen. Diese hohe Granularität ermöglicht eine Szenario-basierte Analyse, die unterschiedliche Ausbau- und Nutzungsmuster auf Gemeindeebene im Verlauf der kommenden Jahrzehnte bewertet.

Das Modell basiert auf drei Kernmodulen:

1. **Netzmodellierung:** Hier wird das gesamte Mengengerüst (oder *Inventories*) an erforderlichen passiven Netzelementen wie Trassen, Kabel und Verteilerkästen sowie die technologiespezifischen aktiven Netzkomponenten im Zeitverlauf für das österreichische Anschlussnetz ermittelt.
2. **Energieverbrauch:** Auf Basis von EU-weit standardisierten Energiegrenzwerten für TK-Equipment (*EU Code of Conduct*)⁷ und unter Berücksichtigung der Lastprofile und Nutzungsdauern werden die Energieverbräuche der unterschiedlichen Netzelemente abgeleitet.
3. **CO₂-Emissionen:** Im letzten Modul werden zum einen die CO₂-Emissionen der Netznutzung berechnet, indem der ermittelte Energieverbrauch auf Basis der zugrunde liegenden CO₂-Werte des österreichischen Strommixes umgerechnet wird. Zum anderen werden die CO₂-Emissionen, die durch den Ausbau neuer Netzelemente (einschließlich Herstellung und Installation) entstehen, berücksichtigt.

⁶ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (2023). Series of articles on methods of sustainability assessment: Life cycle assessment.

⁷ [EU Joint Research Centre \(2024\)](#). Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: Version 9.

4.2.1 Netzmodellierung

Durch die bottom-up-basierte Netzmodellierung werden die räumlichen und technischen Gegebenheiten eines Versorgungsgebiets einbezogen und die Anzahl der erforderlichen Netzwerkkomponenten nach Technologie abgeleitet (Mengengerüst oder *Inventories*). In diesem Zusammenhang wird zwischen der Modellierung von aktiven und passiven Netzelementen unterschieden.

4.2.1.1 Aktive Netzelemente

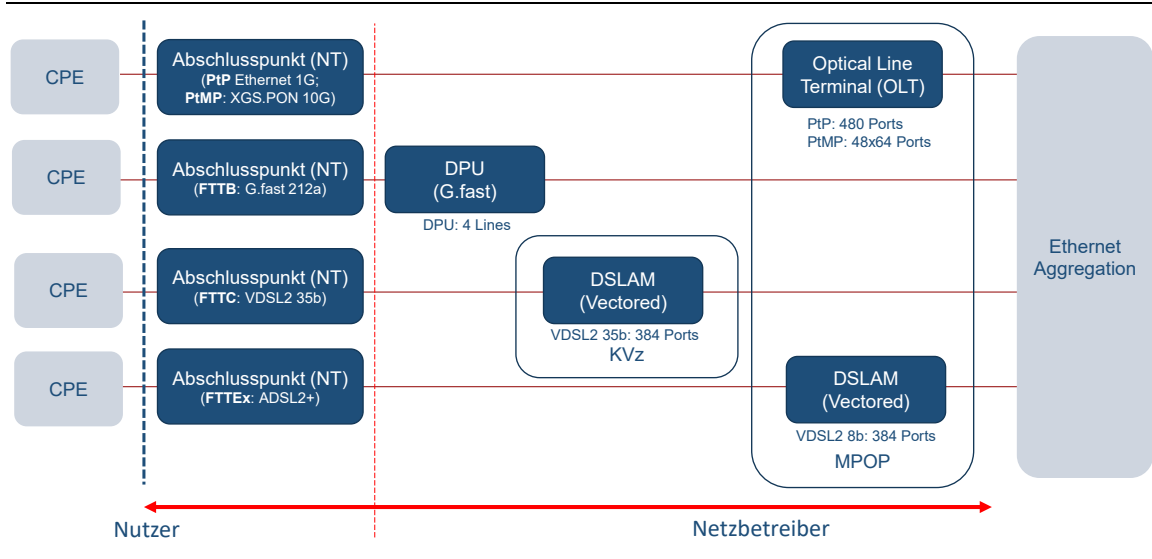
Die Berechnung des Mengengerüsts für aktive Netzelemente erfolgt zum einen durch die Zahl der aktiven Nutzer und ihrer Netzabschlussgeräte (Modems) in einem zu aggregierenden Gebiet (Gemeinde), zum anderen durch die maximale Kapazität der aktiven, aggregierenden Netzelemente. Es wird die Nachfrage des Gebietes durch die maximale Kapazität der Netzknoten dividiert. Mehr Nutzer, als die Kapazität des aggregierenden Gerätes erlaubt, erfordert entsprechend mehr Geräte. Diese Methode stellt sicher, dass die Netzinfrastruktur effizient dimensioniert wird, um alle aktiven Nutzer zu unterstützen. Aktive Anschlüsse beziehen sich auf die Anzahl von Haushalten oder Unternehmen, die derzeit tatsächlich eine Breitbandverbindung nutzen. Sie spiegeln somit den aktuellen Bedarf an aktiven Netzelementen wider. Statistische Daten zur Anzahl der aktiven Anschlüsse auf Gemeindeebene wurden von der RTR zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 5 Datenbasis).

Die Anzahl der aktiven Anschlüsse werden nach Anschlusstechnologie differenziert, da die Anschlusstechnologie bestimmt, welche spezifischen Geräte benötigt werden. Dies betrifft sowohl die zentralen, aggregierenden Netzkomponenten als auch die einzelnen Netzabschlusspunkte beim Endnutzer. Die nachstehende Abbildung stellt die modellierte Netzarchitektur für verschiedene Anschlussfestnetztechnologien dar und illustriert die unterschiedlichen Netzelemente, die je nach eingesetzter Technologie verwendet werden.

Für eine detailliertere Beschreibung der hier berücksichtigten Anschlussnetze und deren Technologien verweisen wir auf den Diskussionsbeitrag 498/ 2023 des WIK.⁸

⁸ [Plückebaum, T. \(2023\)](#). Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 498, Bad Honnef, Mai 2023.

Abbildung 1: Darstellung modellierter aktiver Netzelemente für FTTH-Technologien



Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

FTTH (Fiber-to-the-Home)

Bei der FTTH PtP Technologie handelt es sich um Punkt-zu-Punkt-Ethernet-Verbindungen. Der Netzabschlusspunkt oder *Optical Network Termination* (ONT) beim Nutzer wird durch eine Glasverbindung direkt zum *Optical Line Terminal* (OLT) am *Metropolitan Point-of-Presence* (MPOP) verbunden. Wir nehmen hier PtP OLT mit 480 kundenseitigen Ports an.⁹ Eine Portbandbreite von 1 Gbps für den Endkunden reicht für eine Gigabitversorgung aus. Somit sind sowohl die OLTs als auch die Netzabschlusspunkte mit einem Interface „PtP Ethernet 1G“ konfiguriert.

Bei der FTTH PtMP Technologie handelt es sich um eine Passive Optical Network (PON)-Architektur, bei der eine Glasfaserleitung zwischen dem Netzabschlusspunkt (*Network Termination*, NT) beim Nutzer und einem zentralen *Optical Line Terminal* (OLT) über einen Splitter geteilt wird. Der Netzabschlusspunkt beim Nutzer wird über eine Glasfaserleitung und einen Splitter, der mehrere Kundenanschlüsse zusammenfasst, mit einem OLT am MPOP verbunden, wobei die Bandbreite auf mehrere Nutzer verteilt wird. Damit jedem Nutzer mindestens 1 Gbps bereitgestellt werden kann, wird angenommen, dass die FTTH PtMP Geräte mit der PON-Übertragungstechnologie XGS.PON 10G konfiguriert sind. Um die Verbindung effizienter zu nutzen, wird typischerweise ein Splitter mit einem Verhältnis von 1:32 angeschalteten Endkunden eingesetzt. Bei einer gleichzeitigen Nutzung von 20% der angeschlossenen Kunden ergibt das rechnerisch eine Bandbreite von ca. 1,5 Gbps je Kunde. Dies wäre mit dem 1 Gbps PtP Anschluss in etwa vergleichbar.¹⁰ Laut Literatur wird für ein FTTH PtMP OLT-System eine Portdichte

⁹ Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangsnetz-Technologien.

¹⁰ Bei 100% gleichzeitig aktiven Kunden blieben jedoch nur ca. 300 Mbps je Kunde. Die Leistungsfähigkeit der Technologie hängt also von der Gleichzeitigkeit des Nutzungsverhaltens der Kunden auf einem

von 48 Ports á 10 Gbps angenommen.¹¹ Jeder Port des OLT kann bis zu 32 Nutzer bedienen. Bei einer Portdichte von 48 Ports am OLT können somit $48 \times 32 = 1.536$ Nutzer über ein einzelnes OLT bedient werden, mit einer Bandbreite je Kunde, die vom Nutzungsverhalten der Kunden an jedem Splitter abhängt.

FTTB (Fiber-to-the-Building)

Bei FTTB handelt es sich um eine Technologie, die die Glasfaser bis ins Gebäude (*Fibre-to-the-Building*, FTTB) nutzt und anschließend den Nutzer typischerweise über Kupferleitungen erreicht. Dies mögen Telefonkabel, Kabel mit geschirmten Kupferdoppeladern oder auch Koaxialkabel sein. Somit erfolgt die Verbindung zum Netzabschlusspunkt beim Endnutzer über Kupferkabel. In der für Österreich unterstellten typischen Implementierung ist das aggregierende Equipment die *Distribution Point Unit* (DPU) der G.fast Technologie, die typischerweise im Gebäudekeller angesiedelt ist und die ankommende Glasfaseranbindung in das bestehende Kupfernetz des Gebäudes einspeist. Die bei der DPU verwendete G.fast-Technologie (typischerweise G.Fast 212a) ermöglicht hohe Geschwindigkeiten (bis zu 1 Gbps) über kurze Kupferstrecken. Auf Basis der durchschnittlichen Anzahl der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern in Österreich im Jahr 2024¹² – in denen typischerweise FTTB eingesetzt wird – wird in dieser Studie eine DPU mit 4 Ports angenommen.

FTTC (Fiber-to-the-Curb)

FTTC setzt auf Glasfaser bis zum Straßenverteiler (*Fibre-to-the-Curb*, FTTC) und verwendet dann bestehende Kupferleitungen der Telefonverkabelung (ungeschirmt) bis zum Endnutzer. Das aggregierende Equipment ist der *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* (DSLAM), der sich am Kabelverzweiger (KVz) befindet. In dieser Studie wird von einem generischen DSLAM mit einer Portdichte von 384 Ports ausgegangen, wobei jeder Port genau einen Nutzer bedient. Der FTTC DSLAM in dieser Studie verwendet VDSL2-Vectoring (Profil 35b – Supervectoring) mit einer Bandbreite von bis zu ca. 250 Mbps (entfernungs- bzw. anschlussleitungslängenabhängig).

FTTEx (Fiber-to-the-Exchange)

Bei FTTEEx handelt es sich um eine Anschlusstechnologie, bei der Glasfaser bis zum *Main Point of Presence* (MPOP) verlegt wird und von dort Kupferleitungen bis zum Endnutzer genutzt werden. Diese Struktur kommt aus dem klassischen, noch bestehenden Telefonnetz. Das aggregierende Equipment ist ein DSLAM der ADSL 2+ Technologie, ähnlich dem bei VDSL2, jedoch ohne die Vectoring-Funktion, der ebenfalls über 384 Ports verfügt und somit ebenfalls 384 Nutzer bedienen kann. Im Gegensatz zu FTTC

Splitter ab. Bei den Energieverbrauchsvergleichen der PTP und der PTMP Technologie fußt die Vergleichbarkeit auf den o.a. Annahmen des Nutzungsverhaltens.

¹¹ Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangsnetz-Technologien.

¹² Auf Basis von Datenlieferung der RTR (2024) zu Wohngebäude nach Wohntypen.

sind die Kupferleitungen vom DSLAM am MPOP bis zum Abschlusspunkt beim Kunde deutlich länger und die übertragbaren Bandbreiten deutlich geringer (< 16 Mbps)

DOCSIS

Ein DOCSIS Anschlussnetz besteht aus einem CMTS (*Cable Modem Termination System*) im MPoP, das über eine Glasfaserverbindung zu einem intermediären Fibre-Node den Zugriff auf das am Fibre-Node (analog zum DSLAM am Straßenverzweiger) angeschaltete, koaxiale Anschlusskabel das Cable Modem beim Endkunden für die bidirektionale Datenkommunikation steuert. In dieser Studie wird angenommen, dass ein einzelner CMTS bis zu 64 *Service Groups* bedienen kann, die durch einen Fibre-Node angeschlossen werden. Jeder Fibre-Node bedient typischerweise etwa 250 Nutzer.¹³ 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.¹⁴ Die Kunden greifen auf diese Struktur über ihre Cable-Modems als Netzabschluss in ihren Wohnungen zu, im Wettbewerb um die nur gemeinsam nutzbare Bandbreite auf dem Koaxialkabel zum Fibre Node. Die für unsere energetischen Untersuchung derartiger Netze relevanten Komponenten sind das CMTS, der Fibre Node, die Verstärker und die Cable Modems.

Mobilfunk

In Österreich sind hybride Mobil-/ Festnetzlösungen recht weit verbreitet. Ein sogenannter Cube erweitert einen bestehenden xDSL-Anschluss um die Möglichkeit, bei Bedarf zusätzliche Übertragungskapazität über einen quasistationären Zugang zuzuschalten (hybrid) oder den Internetzugang ausschließlich über eine solche quasistationäre Lösung zu nutzen (z.B. Router mit SIM-Karte, „stand-alone“), wie das bei weniger genutzten Feriendomizilen oder bei Domizilen in entlegenen Lagen sinnvoll sein kann. Für diesen Anwendungsfall modellieren wir nur den Anschluss separat und berücksichtigen den Verbrauch von Energie je Nutzer bezogen auf das kommunizierte Datenvolumen im Mobilfunknetz Österreichs. Wir sehen das Mobilfunknetz im Übrigen als in jedem Fall bestehendes Netz an, für das das Hauptgeschäft die Mobilfunkkommunikation ist und der Festnetzaspekt einen Zusatznutzen darstellt. Das Mobilfunknetz Österreichs modellieren wir im Kontext dieser Studie nicht explizit bottom-up, sondern greifen auf die veröffentlichten Energieverbrauchswerte zurück und bestimmen den Anteil für die über Cubes angeschlossenen Kunden. Eine genauere Darstellung des Modellierungsansatzes erfolgt in Abschnitt 4.2.2.2. In der Ergebnisdarstellung trennen wir die kombinierten Fest- und Mobilfunklösungen (hybrid)

¹³ Breide et al. (2021). Energy Consumption of Telecommunication Networks.

¹⁴ Plückerbaum, et al. (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS.

von den rein quasistationären Mobilfunklösungen mit Cubes (ohne Festnetzanschluss, stand-alone).

4.2.1.2 Passive Netzelemente

Die Ermittlung der Anzahl der passiven Elemente in Glasfaseranschlussnetzen erfordert die Berücksichtigung sowohl von technischen als auch geographischen Faktoren. Hierbei werden detaillierte Anschlusszahlen und geographische Daten auf Gemeindeebene verwendet.

Passive Elemente in Glasfaseranschlussnetzen sind physische Komponenten, die die Übertragung von Daten ermöglichen, aber selbst keine elektrischen Signale verstärken oder steuern. Diese Elemente sind wesentliche Bestandteile von Anschlussnetzen und beeinflussen dessen Infrastrukturplanung. Zu den wichtigsten passiven Elementen zählen:¹⁵

- **Faserverzweiger** (Verteilerkästen, auch bekannt als *Optical Distribution Points*, ODP): Diese dienen dazu, die Glasfaserkabel zu verzweigen und die Signale zu den einzelnen Endnutzern zu leiten. Faserverzweiger sind in der Regel rechteckige Kästen oder Schränke und können unterschiedlich groß sein, abhängig von der Anzahl der Anschlüsse, die sie bedienen. Sie befinden sich in der Regel am Straßenrand, in Gehwegen, an Häuserwänden oder in Schaltkästen am Boden, sodass Techniker leicht Zugang haben. Sie sind an strategischen Punkten positioniert, um die Glasfaserverbindungen effizient zu verteilen.
- **Trassen**: Diese umfassen die physische Infrastruktur, die die Netzwerke zwischen verschiedenen Knotenpunkten und Endnutzern verbindet. Sie können grundsätzlich entweder oberirdisch oder unterirdisch verlegt sein. In dieser Studie wird die Verlegung der Glasfaserkabel einseitig oder beidseitig entlang von Straßen angenommen.

Faserverzweiger. Bei der Bestimmung der Anzahl passiver Elemente wird auf zwei zentrale Größen zurückgegriffen: die Anzahl der verfügbaren Anschlüsse und die Länge der Straßen in bebauten Gebieten. Zunächst wird die Anzahl der Anschlüsse in einer Gemeinde ermittelt, die über Glasfasertechnologie (FTTH/B) verfügbar sind. Diese Daten stammen in der Regel von lokalen Betreibern oder der nationalen Regulierungsbehörde. Die RTR stellt für unseren Zweck die Informationen über verfügbare Anschlüsse nach Technologie bereit.

Aus der Anzahl der verfügbaren Anschlüsse eines Gebietes wird die Anzahl der benötigten Faserverzweiger entsprechend deren Kapazität bestimmt, abhängig von der

¹⁵ In Abstimmung.

Dichte der Bebauung und der Netztopologie. In dieser Studie wird angenommen, dass die Faserverzweiger die folgende maximale Anzahl von Anschlüssen bedienen kann:¹⁶

- FTTH PtP (und FTTB): 336 (groß) und 80 (klein)
- FTTH PtMP: 320 (groß) und 80 (klein)

Trassen. Die Länge der Straßen in bebauten Gebieten österreichischer Gemeinden wird als Grundlage für die Schätzung der Trassenlängen verwendet. Diese wurden von der RTR Verfügung gestellt. Sie basieren auf GIS-Daten, die die Straßeninformationen mit den bebauten Flächen in Österreich verschneiden. Um von den identifizierten Straßenlängen einer Gemeinde auf die tatsächlichen Trassenlängen zu schließen, werden die identifizierten Straßenlängen durch die Anwendung von Umwandlungsfaktoren skaliert. Dies zum einen, um die Länge der Stichleitungen von der Straße zum Gebäude zu reflektieren (Lot von der Straße zum Gebäude als kürzeste Verbindung), zum anderen, um beidseitige Verlegungen bei dichter Bebauung abzubilden. Wir nehmen dazu Anleihen aus Modellierungen in Deutschland. Die verwendeten Faktoren drücken das durchschnittliche Verhältnis von bottom-up modellierten Lot- oder Trassenlängen zu den tatsächlichen Straßenlängen in den bebauten Gebieten in Deutschland aus. Wir gehen hierbei von einem vergleichbaren Verhältnis für Österreich aus. Konkret werden folgende Umwandlungsfaktoren in dieser Studie verwendet:¹⁷

- Umwandlungsfaktor für das Lotsegment: 0,39
- Umwandlungsfaktor für das Distributionssegments:¹⁸ 1,30

Der niedrigere Umwandlungsfaktor für das Lotsegment von 0,39 deutet darauf hin, dass die Summe der Lotlängen einer Gemeinde nur einen Bruchteil der Summe der Straßenlängen in bebauten Gebieten derselben Gemeinde ausmacht.

Der höhere Umwandlungsfaktor im Distributionssegment mit einem Wert von 1,30 reflektiert, dass es zumindest in dicht besiedelten Gebieten ökonomisch sinnvoller sein kann, auf beiden Seiten der Straße zu trassieren als für jedes zweite Gebäude für den Hausstich (Lot) die Straße zu queren, denn in der Regel sind Straßenquerungen teurer als die Trassierung im Gehweg.

Auf dieser Grundlage wird die Gesamtlänge der Glasfasertrassen pro Gemeinde berechnet, wobei im Ausbauziel von einem vollständigen Glasfaserausbauzustand ausgegangen wird. Um die tatsächlichen Trassenlängen je Ausbaujahr zu bestimmen, werden die neuen geplanten Anschlüsse und damit verbundenen Trassen ausgehend

¹⁶ WIK Experteneinschätzung.

¹⁷ WIK auf Basis des mittleren Verhältnisses (Median) von GIS-modellierten Trassenlängen zu den tatsächlichen Straßenlängen in bebauten Gebieten in Deutschland. Verwendeter Datensatz von Zoz et al (2021). Costs of Very High Capacity Networks and Geographic Heterogeneity – a statistical assessment for Germany. WIK Working Paper Nr. 4.

¹⁸ Da die Datenbasis lediglich auf Straßen in bebauten Gebieten abstellt, wird keine Unterscheidung zwischen dem Distributions- und Feeder Segment unterstellt.

vom aktuellen Glasfaserausbauzustand bestimmt, basierend auf dem Anteil der im jeweiligen Jahr als Ausbauziel angestrebten Glasfaseranschlüsse.

4.2.2 Energieverbrauch

4.2.2.1 Festnetz

Der Energieverbrauch der im Abschnitt 4.2.1.1 identifizierten, aktiven Netzkomponenten wird in diesem Modul erfasst. Drei zentrale Parameter bestimmen den Energiebedarf:

Grundlast pro Netzelement (in Wattstunden). Dies ist die Mindestlast, die für ein Netzelement unabhängig von der Anzahl der angeschlossenen Nutzer und Nutzlast konstant für die Betriebsbereitschaft benötigt wird. Es repräsentiert die Baseline-Energieanforderung des Netzbetriebes.

Energieverbrauch pro Port (Wattstunden/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.

Nutzungsintensität (% von max.). 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. Diese hängt wiederum von den Energiemodi und deren Nutzungsdauer ab:

- **Energiemodus.** 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. Dieser Modus reduziert den Energieverbrauch erheblich, wenn aktive Netzkomponenten in Zeiten geringer Netzbelastung oder Inaktivität in einen stromsparenden Modus wechseln können.
- **Nutzungsdauer.** Die Dauer, in der Netzkomponenten und Modems in einem Low Power Mode verbleiben, hängt von mehreren Faktoren ab. Der wichtigste Faktor für den Wechsel in einen Low Power Mode ist die Auslastung des Netzwerks. Bei geringer Auslastung (z. B. nachts oder während Zeiten niedrigen Datenverkehrs) können Netzkomponenten in den energiesparenden Modus wechseln. Auch die Netzarchitektur und Topologie spielt dabei eine Rolle, denn in dicht besiedelten Gebieten mit gemeinsam genutzten Netzressourcen (wie beispielsweise FTTH PtMP oder DOCSIS) ist die Wahrscheinlichkeit von Leerlaufzeiten einzelner Netzelemente geringer, wodurch sich die Möglichkeit zur Aktivierung von Low Power Modes reduziert.

Stromumwandlungsverluste. Ein wichtiger zusätzlicher Parameter, von dem alle aktiven Netzelemente betroffen sind, ist der Stromumwandlungsverlust (AD/DC-Verluste). Diese Verluste entstehen, wenn elektrische Energie vom Wechselstrom (AC) des Energieversorgers auf Gleichstrom (DC) für die Versorgung der Netzelemente umgewandelt wird. Hinzu kommen für batteriegepufferte Systeme (z.B. der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)) entsprechende Speicher- und Ladeverluste. Der Verlustfaktor beschreibt, wie viel Energie bei dieser Umwandlung verloren geht. Solche Verluste werden bei der Berechnung des gesamten Energieverbrauchs berücksichtigt.

Zeitraum. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist der zugrunde gelegte Berechnungszeitraum für den Energieverbrauch. In dieser Studie wird der Energieverbrauch zunächst für einen typischen Tag ermittelt und anschließend auf das gesamte Jahr hochskaliert. Die Realität zeigt im Grundsatz für jeden Tag einen individuellen Verbrauch, der von vielen Faktoren abhängt (z.B. Homeoffice, Wochenenden, Ferienzeiten, Ereignisse mit Pressewirksamkeit/Großevents, Notlagen und Ausfälle, etc.).

Die Ausprägung der oben genannten Parameter ist primär vom verwendeten Equipment abhängig. In dieser Studie wird angenommen, dass generische Geräte eingesetzt werden, wobei lediglich eine Differenzierung nach der jeweiligen Anschlusstechnologie erfolgt. Darüber hinaus wird ein technologieübergreifendes, durchschnittliches Nutzerverhalten als Grundlage angenommen, um eine vereinfachte und standardisierte Analyse zu ermöglichen. Die spezifischen Parameterwerte, die für die Berechnungen herangezogen wurden, sind im Anhang dieser Studie detailliert aufgeführt.

4.2.2.2 Mobilfunk

Im Gegensatz zum Festnetz wird in dieser Studie auf eine detaillierte Netzmodellierung des Funknetzes (RAN, Radio Access Network) verzichtet. Stattdessen wird ein stark vereinfachtes Modell verwendet, das nicht die komplexe Topologie und Dynamik eines Mobilfunknetzes abbildet, sondern auf aggregierten Durchschnittswerten und allgemeinen Annahmen basiert. Dies ermöglicht zwar eine vereinfachte Berechnung, jedoch ohne eine parametergesteuerte Berücksichtigung individueller Einflussfaktoren wie die räumliche Verteilung der Sendetechnologie und Frequenzbereiche oder die Netzauslastung. Ebenso bleiben Aspekte wie Low-Power-Modi und Größe und Dichte der Funkzellen, die in einer vollständigen Netzmodellierung des Funknetzes berücksichtigt werden könnten, hier unberücksichtigt.

Vereinfacht hängt der Energieverbrauch im Funknetz von der Datenmenge pro Nutzer, der Energieeffizienz der Netzelemente (Wh/GB) und der Anzahl aktiver Nutzer ab.

Datenvolumen. Der Haupttreiber für den Energieverbrauch im Mobilfunknetz ist die Menge der übertragenen Daten. Je mehr Daten über eine Funkzelle laufen, desto höher ist der Energieverbrauch, insbesondere da zusätzliche Ressourcen aktiviert werden müssen, um die gestiegene Nachfrage zu bewältigen. Diese Daten werden aus dem Jahresbericht der RTR (2023) herangezogen.

Energieeffizienz. Die Energieeffizienz im Funknetz beschreibt das Verhältnis zwischen dem übertragenen Datenvolumen und dem dafür benötigten Energieaufwand. Sie wird üblicherweise in Wattstunden pro übertragenem Gigabyte (Wh/GB) gemessen und ist ein zentraler Indikator für die Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz von Mobilfunknetzen. Angesichts der stetig steigenden Nachfrage nach mobiler Datenübertragung wird die Verbesserung der Energieeffizienz immer wichtiger, um die steigenden Datenvolumina zu bewältigen, ohne dass der Energieverbrauch proportional dazu ansteigt. Statistiken zeigen, dass der Energieverbrauch pro übertragenem GB im Funknetz kontinuierlich sinkt. Beispielsweise hat der Übergang zu 5G-Netzen die Energieeffizienz gegenüber früheren Mobilfunkgenerationen signifikant verbessert. In dieser Studie wird die Energieeffizienz auf Grundlage des gesamten Energieverbrauchs des österreichischen Mobilfunknetzes und des gesamten übertragenen mobilen Datenvolumens berechnet.

Anzahl aktiver Nutzer. Die berechnete Energie im Funknetz wird im nächsten Schritt proportional zum Anteil der mobilfunkbasierten Anschlüsse (sogenannten „Cubes“ bzw. hybride Anschlüsse) am gesamten Bestand mobilfunkbasierter Endgeräte zugeordnet. Cubes sind stationäre Mobilfunkanschlüsse, die aufgrund ihrer ständigen Netzverbindung einen bedeutenden Anteil des mobilen Datenverkehrs und somit auch des Energieverbrauchs im Funknetz verursachen. Zusätzlich wird der Energieaufwand, der direkt durch die Cubes bzw. hybride Anschlüsse selbst als Endkundegerät bzw. Netzabschlusspunkt verursacht wird, separat ausgewiesen.¹⁹

Die für die Berechnungen verwendeten spezifischen Energieverbrauchswerte für mobilfunkbasierte Geräte sind im Anhang dieser Studie dargestellt.

4.2.3 CO₂-Berechnung

Die Berechnung von CO₂-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 CO₂-Emissionen aus diesen beiden Phasen des Lebenszyklus dargestellt.

¹⁹ Bei den hybriden Anschlüssen wurde am Netzabschlusspunkt (Modem) neben einem mobilfunkbasierten Interface zusätzlich Energieverbrauch aus einem VDSL 35b Interface zugerechnet.

4.2.3.1 CO₂-Emissionen im Netzbetrieb (alle Technologien)

Der Energieverbrauch, der durch den Betrieb der verschiedenen Netztechnologien entsteht, umfasst alle aktiven, energierelevanten Netzkomponenten im laufenden Betrieb. Die CO₂-Emissionen des Netzbetriebs werden durch folgende Formel berechnet:

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

- **Energieverbrauch:** Dies ist die Energiemenge, die für den Betrieb der Netzkomponenten einer Anschluss-technologie in einem bestimmten Zeitraum benötigt wird, gemessen in Kilowattstunden (kWh). Diese Werte werden, wie im Modul „Energieverbrauch“ (Abschnitt 4.2.2) beschrieben, pro Anschluss-technologie berechnet.
- **CO₂-Äquivalente pro kWh:** Dieser Faktor gibt an, wie viel CO₂-Emissionen in Gramm durch die Erzeugung einer Kilowattstunde elektrischer Energie freigesetzt werden (CO₂-eq/ kWh). Er ist abhängig von der Stromquelle (Kohle, Erdgas, erneuerbare Energien, etc.), die zur Stromerzeugung verwendet wird und kann je nach Energiemix des Landes variieren. Ein höherer Anteil an erneuerbaren Energien würde den CO₂-Äquivalent-Wert reduzieren. Für Österreich wird der Emissionsfaktor für die Stromaufbringung in Österreich aus dem Bericht des Umweltbundesamtes (2023) herangezogen.²⁰ Dieser lag im Jahr 2023 bei 226g CO₂-eq/ kWh.

Der Energieverbrauch wird also mit dem CO₂-Äquivalent pro kWh multipliziert, um den durch den Netzbetrieb verursachten CO₂-Ausstoß zu berechnen. Dadurch wird sowohl die Effizienz der Netzkomponenten als auch der nationale Energiemix berücksichtigt.

4.2.3.2 CO₂-Emissionen im Netzausbau (FTTH/B)

Hier wird der CO₂-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.

CO₂-Emissionen aus Produktion von Netzelementen. Dies 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

²⁰ [Umweltbundesamt \(2023\)](#). Österreichische Treibhausgas-Emissionsfaktoren.

(Mengengerüst) betrachtet, um den Materialaufwand und den damit verbundenen CO₂-Ausstoß zu bestimmen.

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

Sollten für Netzelemente nur spezifische Daten zu den CO₂-Emissionen pro Kilogramm vorliegen, wird das Gewicht des jeweiligen Netzelements in die Berechnungen einbezogen und entsprechend in die Formeln integriert.

CO₂-Emissionen aus der Verlegung von Trassen. Dies bezieht sich auf die gesamten Glasfasertrassen, die im Rahmen des FTTH/B Netzausbau verlegt werden und die damit einhergehende CO₂-Emissionen pro Trassenkilometer.

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

Der CO₂-Äquivalenzwert pro Kilometer gibt dabei an, wie viel CO₂ im Durchschnitt bei der Verlegung eines Kilometers Glasfasertrasse freigesetzt wird. Dieser Wert berücksichtigt sowohl die Emissionen, die bei der Herstellung der benötigten Materialien, wie Kabel und Schutzrohre, entstehen, als auch die CO₂-Emissionen, die durch die Bauprozesse, wie das Graben von Kanälen, die Installation der Kabel und die Wiederherstellung der Oberflächen verursacht werden.

5 Datenbasis

5.1 Gemeindedaten zur Netzmodellierung

Die Datengrundlage für die Netzdimensionierung österreichischer Anschlussnetze basiert auf einer Vielzahl von Informationen differenziert nach Anschlusstechnologie, die auf Gemeindeebene erhoben und in Datenlieferungen zwischen Juni und September 2024 bereitgestellt wurden. Die relevanten Daten stammen von der RTR und umfassen sowohl Netz- als auch geografische Daten, die für die Modellierung und Planung der Netzinfrastruktur typischerweise Berücksichtigung finden.

5.1.1 Netzdaten der RTR

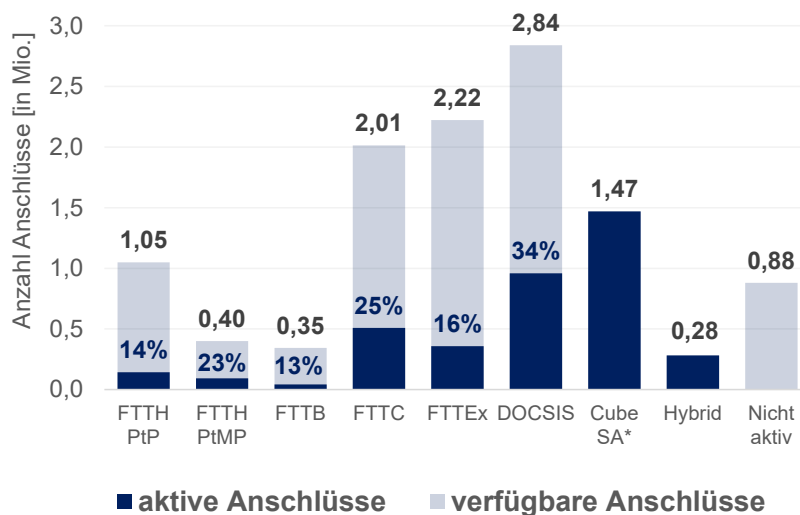
Aktive Anschlüsse. Die Anzahl der aktiven Anschlüsse pro Technologie gibt Auskunft darüber, wie viele Anschlüsse tatsächlich in Betrieb sind. Sie ist ein wichtiger Indikator für die aktuelle Netzlast.

Verfügbare Anschlüsse. Die Anzahl der verfügbaren Anschlüsse pro Technologie beschreibt die theoretische Nutzerkapazität und Abdeckung des Netzes.

Die nachstehende Abbildung stellt die Anzahl der aktiven Anschlüsse im Verhältnis zur gesamten Anzahl der verfügbaren Anschlüsse nach Anschlusstechnologie in Österreich dar. Diese wurde als Datengrundlage für die Netzdimensionierung verwendet.²¹

²¹ Die Rohdaten der RTR zu aktiven und verfügbaren Anschlüssen wurden einer Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dabei wurden insbesondere die Anteile aktiver zu verfügbarer Anschlüsse sowie die Gesamtsummen auf Gemeindeebene analysiert. Auffälligkeiten traten hauptsächlich im Verhältnis zwischen aktiven und verfügbaren Glasfaseranschlüssen auf, was vermutlich auf unterschiedliche Zeitpunkte der Datenerhebung für aktive und passive Anschlüsse zurückzuführen ist, da die Anzahl der Glasfaseranschlüsse eine dynamische Größe darstellt. Diese geringfügigen Unstimmigkeiten wurden bereinigt, indem die Anzahl der aktiven Anschlüsse so korrigiert wurde, dass sie die Anzahl der verfügbaren Anschlüsse derselben Technologie pro Gemeinde nicht übersteigt.

Abbildung 2: Aktive und verfügbare Anschlüsse (in Mio. Anschlüssen)



Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von Anschlussdaten der RTR (2024).

Anmerkung: „SA“: Stand-Alone

Knoten. Dies bezieht sich auf die Anzahl der Hauptverteiler, Kabelverzweiger (in Österreich ARU genannt) und Faserverzweiger. Die Kabelverzweiger basieren auf einer Liste des österreichische Netzbetreibers A1.

5.1.2 Geographische Daten

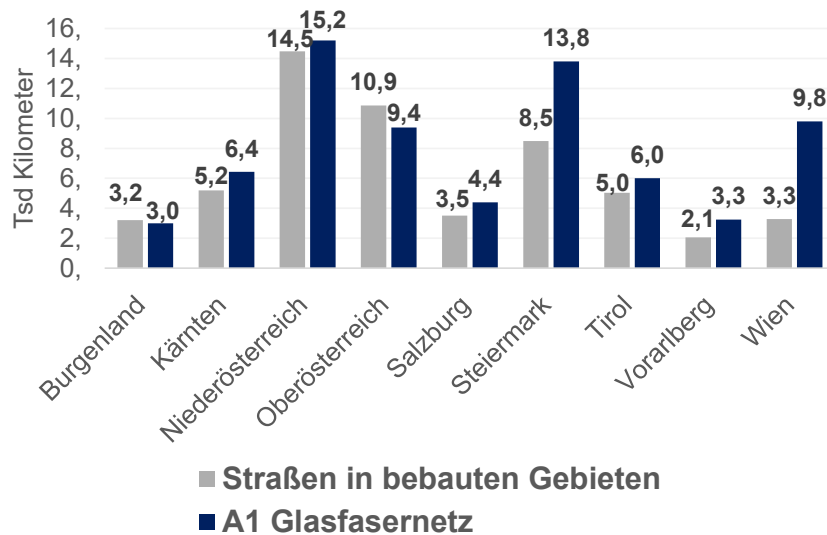
Regiotyp. Eine Regiotyp-Statistik auf Basis der *Degree of Urbanisation* (DEGURBA) wird in dieser Studie genutzt, um Gemeinden in Österreich nach ihrem Urbanisierungsgrad zu klassifizieren. Diese von EUROSTAT entwickelte Klassifizierung ermöglicht eine standardisierte Unterscheidung zwischen städtischen, vorstädtischen und ländlichen Gebieten. Dies wird für die Modellierung einiger Netzkomponenten verwendet, da die Anforderungen an die Telekommunikationsinfrastruktur in Abhängigkeit vom Regiotyp stark variieren könnte.

Gebäudetyp. Diese Daten wurden von der RTR zur Verfügung gestellt und erlauben eine Differenzierung zwischen Einzelwohnungen, Mehrfamilienhäusern und Nicht-Wohngebäuden auf Gemeindeebene. Diese Daten beschreiben die Verbreitung und Struktur der Gebäudetypen in einer Gemeinde, die wiederum einen Einfluss auf die Netzarchitektur haben könnte.

Straßenlängen. Die Straßenlängen in bebauten Gebieten bilden die zentrale Datengrundlage zur Ableitung der Trassenlängen und wurden im August 2024 von der RTR bereitgestellt. Die nachfolgende Abbildung stellt diese Straßenlängen dar, die für die Schätzung der erforderlichen Trassenlängen im Rahmen des Netzausbaus in

Österreich herangezogen wurden und vergleicht sie mit der Länge des A1 Glasfasernetzes in den einzelnen Bundesländern.

Abbildung 3: Straßenkilometer in bebauten Gebieten im Vergleich zu A1 Glasfasernetz nach Bundesland



Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von Straßendaten der RTR (2024) und A1 Glasfasernetzdaten aus [Leadersnet \(2023\)](#). [So viele Glasfaserkilometer gibt es in Ihrem Bundesland.](#)

Die Gesamtlänge der Straßen in bebauten Gebieten in Österreich beträgt 56.097 Kilometer. Der Vergleich mit der Länge des bestehenden A1 Glasfasernetzes im Jahr 2024 von 70.000 Kilometern zeigt Unterschiede, die sich durch die in der Modellierung nicht enthaltenen Backbone und Mobilfunk-Trassen sowie die in der Straßenlänge noch nicht berücksichtigten Zuschläge erklären lassen.

5.2 Standardisierte Daten zum Energieverbrauch

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs verschiedener Netzelemente werden die standardisierten Angaben im EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment, Version 9 (2024) herangezogen.

5.2.1 EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment

Der *EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Communication Equipment*²² ist ein freiwilliger Selbstverpflichtungsrahmen für Hersteller und Betreiber von Telekommunikationsnetzen, der von der Europäischen Kommission entwickelt

²² [EU Joint Research Centre \(2024\)](#). Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: Version 9.0.

wurde, um den Energieverbrauch von Telekommunikationsnetzen zu reduzieren und nachhaltigere Praktiken in der Branche zu fördern. Der Code of Conduct legt Richtlinien und maximale Grenzwerte fest, mit denen Netzbetreiber und Hersteller den Energieverbrauch ihrer Netzkomponenten optimieren können, ohne die Leistung oder Servicequalität zu beeinträchtigen. Er zielt darauf ab, den Energieverbrauch in den verschiedenen Teilen der Netzinfrastruktur, insbesondere im Zugangsnetz, effizient zu gestalten. Die Unterzeichner des EU Code of Conduct (CoC) verpflichten sich freiwillig dazu, die festgelegten Grenzwerte für den Energieverbrauch bei mindestens 90% der eingesetzten Netzausrüstung einzuhalten.

Der EU Code of Conduct (2024) deckt eine breite Palette von Netzelementen (*Broadband Equipment*) ab, die in Telekommunikationsnetzwerken eingesetzt werden. Beinahe alle Netzkomponenten der unterschiedlichen Anschlusstechnologien sind im Code of Conduct in Bezug auf ihren Energieverbrauch vertreten. Hierbei lassen sich die Elemente in zwei Kategorien zuordnen:

- Endkundengeräte bzw. *Customer Premises Equipment* (CPE) sowie
- Netzwerk Equipment

Endkundengeräte (CPE). Im EU Code of Conduct wird der Energieverbrauch von CPE nach verschiedenen Funktionalitäten differenziert, und es werden für den maximalen Energieverbrauch dieser Funktionalitäten separate Grenzwerte festgelegt:

- CPE-Funktionalität, wie etwa Netzwerkverarbeitung und Speicher,
- WAN/Uplink-Interface, das die Funktion hat, Verbindungen über Technologien wie Ethernet, PON, xDSL, G.Fast, DOCSIS oder 4/5G herzustellen, sowie
- zusätzliche CPE-Funktionalitäten, beispielsweise WLAN, Powerline, USB oder Bluetooth.

Da sich die Studie auf die Modemfunktionalität des CPE beschränkt, werden der Energieverbrauch der zentralen CPE-Funktionen und auch der Energieverbrauch des WAN/Uplink-Interfaces berücksichtigt. Der Energieverbrauch zusätzlicher CPE-Funktionalitäten wird in dieser Studie nicht einbezogen, da dieser von individuellen Nutzerbedürfnissen bestimmt und nicht von den Netzbetreibern verantwortet wird.

Netzwerk Equipment. Im EU Code of Conduct bezieht sich der Begriff Netzwerk-Equipment auf eine Vielzahl von Geräten, die im Netz des Betreibers zur Bereitstellung und Verwaltung von Breitbanddiensten eingesetzt werden. Diese Geräte verfügen über eine bestimmte Anzahl an Ports, über die sie eine festgelegte Anzahl von Kunden in einem Versorgungsgebiet anbinden können. Zu den zentralen Netzkomponenten zählen unter anderem *Optical Line Terminals* (OLT), *Distribution Point Units* (DPU), *Digital Subscriber Line Access Multiplexers* (DSLAM) und *Cable Modem Termination Systems* (CMTS).

Die Energieverbrauchswerte werden in Watt pro Netzkomponente und in Watt pro Port angegeben und basieren auf standardisierten Messbedingungen nach ETSI EN 303 215.^{23, 24} Die Messungen erfolgen bei vollständig ausgestatteten Geräten, das heißt, alle Ports sind aktiviert und die Geräte laufen in ihrer maximalen Konfiguration. Der EU Code of Conduct (2024) unterscheidet den Energieverbrauch nach:

- **Übertragungstechnologie** (PtP Ethernet, XGS.PON, G.PON, DOCSIS 3.1, etc.), wobei unterschiedliche Technologien unterschiedliche Energiebedarfe pro Port aufweisen.
- **Portdichte** (Anzahl der Ports pro Netzkomponente): Netzkomponenten mit einer höheren Portdichte neigen dazu, pro Port effizienter zu sein, da sie die zentralen Ressourcen besser teilen können.
- **Maximale Bandbreitenkapazität** pro Port: (beispielsweise 1 Gbps oder 10 Gbps)
- **Betriebsmodi** bzw. **Power-Modi**: Die Betriebsmodi von Netzwerk-Equipment sind von der Netzlast abhängig und reichen von maximaler Auslastung (*Full-Load*) über reduzierte Aktivität (*Low-Load*) bis hin zur Inaktivität (*Stand-by*). Bei Endkundengeräten (CPE) sind die Betriebsmodi in den normalen Betriebsmodus (*on-State*) von den Bereitschaftsmodus (*ready-State*) zu unterscheiden. Im on-State erfolgt die aktive Übertragung von Nutzerdaten, während im ready-State keine Datenübertragung stattfindet, das Gerät jedoch ohne Neukonfiguration oder manuelle Eingriffe bereit ist, die Daten zu übertragen.

5.2.2 Hersteller-Sheets

Zusätzlich zu der *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,²⁵ Huawei²⁶ und Nokia²⁷ herangezogen. Einige Hersteller-Sheets bieten detaillierte Angaben zum Stromverbrauch und zur Leistungsaufnahme der Geräte, teilweise maximale und typische Strombedarfe von einzelnen Modulen. Die herstellereigenen 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

²³ [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).

²⁴ 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.

²⁵ [Cisco ME 4600 Series Optical Line Terminal Datasheet](#); [Cisco cBR-8 Converged Broadband Router Data Sheet](#).

²⁶ [Huawei SmartAX MA5801-FL16 Datasheet](#); [Huawei OptiXstar P613E-E ONU Datasheet](#).

²⁷ Nokia Siemens Networks Multi-Service IP DSLAM Surpass hiX 5625 (Chassis M400) Release 2.7.

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

Die in dieser Studie angesetzten Werte für die Grundlast der analysierten Netzelemente sind im Abschnitt 6.2.1 aufgeführt.

5.3 Daten zu CO₂-Emissionen

In der vorliegenden Studie wurde eine Analyse der CO₂-Emissionen vorgenommen, die sowohl den Energieverbrauch als auch die Herstellung und Installation von Netzelementen umfasst. Hierfür wurden spezifische Datenquellen herangezogen, um eine Umrechnung des Ressourcenverbrauchs in CO₂-Äquivalente zu ermöglichen.

5.3.1 CO₂-Emissionen aus dem Energieverbrauch

Zur Berechnung der CO₂-Emissionen durch den Energieverbrauch wurde der Emissionsfaktor des österreichischen Umweltbundesamts (2023) verwendet, der für die Stromaufbringung in Österreich einen Wert von 226 g CO₂-eq/kWh ausweist. Dieser Emissionsfaktor beruht auf der durchschnittlichen CO₂-Intensität des Strommixes in Österreich und wird häufig in Umweltschutzstudien herangezogen, um den Kohlenstoffausstoß im Zusammenhang mit der Energienutzung zu quantifizieren. Österreich hat einen relativ sauberen Strommix, der durch einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien (u.a. Wasserkraft) gekennzeichnet ist, dennoch verbleiben Emissionen, insbesondere durch fossile Energiequellen im Mix, die über den Tag variieren. Der Wert von 226 g CO₂-eq/kWh ist daher als mittlerer Emissionswert für den Betrieb der Netzelemente anzusetzen und berücksichtigt kein zeitlich unterschiedliches Erzeugungs- oder Verbrauchsverhalten.

5.3.2 CO₂-Emissionen aus der Herstellung und Installation von Netzelementen

Für die Ermittlung der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung und Installation von Netzelementen wurden mehrere Quellen genutzt, die spezifische Emissionswerte für unterschiedliche Aspekte der Netzinfrastruktur liefern.

Trassenlängen (5.358 kg CO₂-eq/km). Für die Berechnung der Emissionen pro Trassenkilometer wurde auf die Studie von Godlovitch et al. (2021) zurückgegriffen, die für die Europäische Kommission erstellt wurde. Diese Studie analysiert die CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Ausbau der Breitbandinfrastruktur in Europa und verwendet Daten von ICF und EcoAct.²⁸ Die CO₂-Emissionen pro Trassenkilometer berücksichtigen dabei sowohl den Materialverbrauch (wie Kabel und Schutzrohre) als auch die baulichen Maßnahmen, die für die Verlegung der Glasfaserkabel notwendig sind. Die Trassierung ist ein wesentlicher Bestandteil des Netzausbaus und verursacht einen signifikanten Anteil der Gesamtemissionen, da die Installationen der Infrastruktur mit Tiefbau, Kabelverlegung und Wiederherstellung der Oberflächen energieintensiv sind.

Faserverteiler (166 kg CO₂-eq). Für Faserverteiler, die als Knotenpunkte für die Verteilung von Glasfaserkabeln dienen, wurden die Emissionswerte aus der FiberBroadband (2024) Studie übernommen.²⁹ Diese Datenquelle liefert spezifische CO₂-Berechnungen für Komponenten, die im Rahmen des Glasfaserausbau genutzt werden. Die Angabe von 166 kg CO₂-eq bezieht sich auf die Produktion und Installation eines typischen Faserverteilers für FTTH und FTTB.³⁰ In diesen Berechnungen sind Materialverbrauch, Produktionsprozesse sowie die Installation vor Ort enthalten.

Aktive Netzelemente (OLT, DPU, Modems). Für die Berechnung der CO₂-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.³¹ In diesem Modell werden verschiedene Annahmen zu Produktions- und Lieferprozessen auf Basis der Bilanzierungs- und Reporting-Standards Greenhouse

²⁸ [European Commission: Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Godlovitch, I., et al. \(2023\). Support study associated with the review of the Broadband Cost Reduction Directive: Annexes 1-4 – Final report. EC, Eco-Act, ICF and WIK-Consult.](#)

²⁹ [Fiber Broadband \(2024\). Fiber Broadband Deployment is Paramount To Achieving Zero Carbon Footprint.](#)

³⁰ Auf Basis von WIK-Experteneinschätzungen sind die Unterschiede zwischen Faserverzweiger für FTTH PtP, PtMP und FTTB für den Zweck dieser Studie vernachlässigbar.

³¹ 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 CO₂-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 CO₂-Bilanz seiner Produkte, insbesondere im Bereich der Elektronik.

Gas Protocol und ISO 14040 Life Cycle Assessment für elektronische Geräte getroffen, um die jeweiligen CO₂-Emissionen zu quantifizieren:³²

- Für *Optical Line Terminals* (OLT) wurde ein Emissionsfaktor von 114,8 kg CO₂-eq pro Kilogramm OLT angesetzt. Unter Berücksichtigung der typischen Größe und des Gewichts von OLTs, die in Fiber-to-the-Home (FTTH) Point-to-Multipoint (PtMP) und Point-to-Point (PtP) Architekturen eingesetzt werden, ergibt sich ein Wert zwischen 574 kg CO₂-eq (5kg PtMP OLT) und 2.984 kg CO₂-eq (26 kg PtP OLT). Diese Berechnung berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften der Geräte und die damit verbundenen Material- und Produktionsprozesse.
- Für *Distribution Point Units* (DPU) wurde ebenfalls ein Emissionsfaktor von 114,8 kg CO₂-eq pro Kilogramm DPU angenommen. Bei einer 19 Kilogramm DPU wurden 2.181 kg CO₂-eq angesetzt. Dieser Wert spiegelt die Emissionen wider, die bei der Herstellung dieser Geräte anfallen.
- Die Modems, die bei den Endnutzern installiert werden, sind relativ klein und leicht und verursachen somit – pro Einheit – geringere CO₂-Emissionen. Hier wurde ein Emissionsfaktor von 115,4 kg CO₂-eq pro Kilogramm eingesetzt. Das Gewicht der Modems variiert in Abhängigkeit von der eingesetzten Technologie, dem Hersteller sowie der Funktionalität. In dieser Analyse wurden ausschließlich reine Modems (ohne integrierte Router) betrachtet. Je Modemgewicht (PtP: 0,176 kg; PtMP: 0,220 kg oder FTTB: 0,350)³³ ergibt sich dann ein Emissionswert für die Herstellung zwischen 20 und 40 kg CO₂-eq. Insbesondere FTTB-Modems weisen durch zusätzliche Komponenten wie leistungsstärkere Signalverstärker ein höheres Gewicht auf.

Durch die Integration dieser Datenquellen in die vorliegende Studie ist es möglich, eine disaggregierte und transparente CO₂-Bilanzierung sowohl für den Betrieb als auch für die Herstellung und Installation der relevanten Netzinfrastrukturelemente vorzunehmen.

³² [Galaxus \(2020\)](#). Unser Klima-Beitragsmodell.

³³ PtP: Genexis FiberTwist-P2110 ([Obermann, 2022](#)); PtMP: Ubiquiti UISP Fiber XGS ([Galaxus, 2024](#)); FTTB: Ruby Tech G.fast Modem VC-600LR-M ([Ruby Tech, 2024](#))

6 Modellannahmen

6.1 Netzdimensionierung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden zur bottom-up Netzdimensionierung des österreichischen Anschlussnetzes Annahmen getroffen, die die Modellierung des bestehenden und zukünftigen Netzausbaus und -betriebs vereinfachen. Diese Annahmen betreffen sowohl die Struktur des Netzwerks als auch die geografische Verteilung der Netzkomponenten. Die zentralen Annahmen sind:

Einheitliches Equipment und generisches Netz: Es wurde angenommen, dass in allen Netzsegmenten einheitliches und standardisiertes Equipment zum Einsatz kommt. Dies bedeutet, dass an allen relevanten Netzwerkübergangspunkten (z. B. *Optical Line Terminals*, OLT oder *Distribution Point Units*, DPU) und Netzabschlusspunkten (*Network Termination*) dieselbe Art von Geräten pro Anschlusstechnologie verwendet wird. Grund für diese Annahme ist zum einen die Vereinfachung von Komplexitäten im Einsatz von heterogenen Mengengerüst sowie die Erwartung, dass im Netz die Standardisierung von Netzelementen zur betrieblichen und technischen Effizienzgewinnen führt, die sich aus der Skalierung des Netzwerks und deren Wartung ergeben. Diese Annahme ist zudem entscheidend für die Nachvollziehbarkeit der Kalkulation des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen, da einheitliches Equipment konsistente und transparente Ermittlung von Verbrauchswerten erlaubt.³⁴

Kein Überbau von Trassen- oder aktiven Netzkomponenten. Für den Zweck dieser Studie wurde angenommen, dass es keinen Überbau bestehender Trassen- oder aktiver Netzkomponenten geben wird. Der Überbau, bei dem parallele Netzstrukturen zur bestehenden Infrastruktur errichtet werden, führt typischerweise zu Ineffizienzen und höheren Kosten, da redundante Infrastrukturkomponenten zu erhöhtem Materialaufwand und gesteigertem Energieverbrauch führen. Diese Studie basiert allerdings auf dem Grundsatz, dass bestehende Trassen und Netzkomponenten genutzt werden und neue Baumaßnahmen nur dort stattfinden, wo keine bestehende Infrastruktur zur Verfügung steht.

Mindestens ein POP pro Gemeinde bereits vorhanden. Für die Dimensionierung der Netzinfrastruktur wurde die Annahme getroffen, dass in jeder Gemeinde mindestens ein Point of Presence (POP) errichtet wurde, der als zentraler Netzwerkknotenpunkt fungiert. Es wurde weiterhin angenommen, dass nach der Errichtung dieses initialen POPs kein weiterer Ausbau zusätzlicher POPs im Zeitverlauf erforderlich ist. Diese Annahme

³⁴ Wir nehmen an, dass das zugrundeliegende Equipment die Grenzwerte des CoC einhält. Der tatsächliche Energieverbrauch darf auch darunterliegen. In der Realität wird es auch Abweichungen nach oben geben. Vom Prinzip her ist die Nutzung der CoC Werte für die Modellierung eines State of the Art effizienten Netzes eher eine Abschätzung des Energieverbrauches nach oben.

spiegelt ein konservatives Szenario wider, in dem die Netzstruktur langfristig stabil bleibt und sich der Ausbau auf die initialen Knotenpunkte beschränkt.

6.2 Energieverbrauchsannahmen

In der vorliegenden Studie wurden zur Bewertung des Energieverbrauchs von Netzelementen unterschiedlicher Anschlusstechnologien in Österreich spezifische Annahmen getroffen, die auf Statistiken zum Energieverbrauch und Nutzerverhalten aus dem bestehenden Netz basieren. Die angesetzten Werte sind im Annex dargestellt.

6.2.1 Grundlast von Netzelementen

Der Grundlast am Energieverbrauch wurde für unterschiedliche Netzarchitekturen auf Basis von Energieangaben zu unterschiedlichen Netzmodulen in den Hersteller-Sheets spezifiziert (siehe Abschnitt 5.2.2). Für Punkt-zu-Punkt Verbindungen (FTTH PtP und FTTE_x Technologien) beträgt die Grundlast 10% des gesamten Energieverbrauchs. Für FTTH PtMP und FTTC ist der Anteil höher (13%), während für FTTB und DOCSIS der Energieverbrauch vollständig (100%) der Grundlast entspricht. Diese Unterschiede reflektieren die spezifischen Netzarchitekturen und die Art und Weise, wie die Geräte in verschiedenen Nutzungsszenarien betrieben werden. Besonders bei DOCSIS- und FTTB-Systemen spielt die Grundlast eine größere Rolle, da die Systeme kontinuierlich aktiv sind, unabhängig vom tatsächlichen Datenverkehr.³⁵

6.2.2 Nutzungsintensität und Nutzerverhalten

Network Termination (Modem). Die Annahmen bezüglich der Nutzungsintensität von Kundenmodems bzw. Netzabschlusspunkten beziehen sich auf die Nutzungsdauer dieser Geräte in unterschiedlichen Betriebsmodi. Diese wird im Wesentlichen vom individuellen Nutzerverhalten bestimmt. Auf Basis der Literatur sind im Durchschnitt die Modems 15% der Zeit (ca. 3,6 Stunden pro Tag) aktiv, was den Zeitraum beschreibt, in dem Daten übertragen werden.³⁶ Für 25% der Zeit (ca. 6 Stunden, vorwiegend nachts) befinden sie sich im *Sleep-Mode*,³⁷ einem Zustand reduzierten Energieverbrauchs. Während der restlichen 60% der Zeit befinden sich die Modems im sogenannten *Ready-*

³⁵ Bei den DOCSIS Systemen ist das Downstreaming der TV-Signale eine zeitunabhängige Aufgabe. Die Datenkanäle bedienen eine relativ große Zahl an Nutzern, für die permanent die Sende- und Empfangsrechte administriert werden müssen. Die Verstärker im Feld laufen dementsprechend dauerhaft und nutzungsunabhängig. Bei den G.fast Systemen gehört der Betrieb des Upstream Interfaces zur Grundlast, die Vectoring-Funktionen der DPU auf den Kupferports erfordern eine permanente Fehlerkorrektur, die Synchronisation der Ports bedeutet einen dauerhaften Betrieb der Anschlusslinien.

³⁶ Lannoo et al. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks.

³⁷ Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht.

State, in dem sie auf Datenanforderungen warten, jedoch nicht aktiv Daten übertragen werden. Für das PtP Kundenmodem, das nur dann aktiv sein muss, wenn entweder für den einzelnen Kunden gesendet oder empfangen werden muss, wird im Gegensatz zu anderen Anschlusstechnologien von einer längeren Zeit im Schlafmodus ausgegangen, da hier Statistiken für Österreich belegen, dass Endnutzer durchschnittlich 77% der Zeit offline sind.³⁸ Für den Energieverbrauch in den unterschiedlichen Betriebsmodi werden die Grenzwerte in der EU Code of Conduct (2024) herangezogen.

Aggregierendes Equipment. In Bezug auf das zentrale Equipment in den Netzwerken wurde angenommen, dass nur in FTTH PtP, FTTC und FTTX Netzarchitekturen der *Low-Power Mode* genutzt werden kann. In geteilten Medien (sogenanntes *Shared Medium*) wie beispielsweise FTTH PtMP oder DOCSIS sind diese Energiesparmaßnahmen weniger effektiv bis gar nicht anwendbar. Diese Annahme basiert auf Wang et al. (2015) und EU Code of Conduct (2024), die zeigen, wie der Energieverbrauch und Energiesparmaßnahmen nach Anschlusstechnologie und Netzwerktopologie variieren.

6.2.3 POP Energieverbrauch

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs von *Points of Presence* (PoP) wurde der *Power Usage Effectiveness* (PUE) als zentraler Faktor herangezogen. Der PUE ist ein Maß für die Effizienz des Energieeinsatzes in Netzwerken, das das Verhältnis zwischen der Gesamtenergieaufnahme einer Anlage und der tatsächlich für Netzgeräte genutzten Energie beschreibt. Für die in dieser Studie betrachteten Netzkomponenten wurde ein PUE-Faktor von 1,3 angesetzt.³⁹ Dies bedeutet, dass für jede Einheit Energie, die von den Netzelementen genutzt wird, zusätzliche 30% Energie für unterstützende Systeme wie Kühlung und Stromversorgung verbraucht werden. Ein PUE von 1,3 gilt als relativ effizient im Vergleich zu weniger optimierten Infrastrukturen, bei denen der PUE-Faktor deutlich höher ausfallen kann.

6.2.4 Energieeffizienz im Funknetz

Die Energieeffizienz von Funknetzen in Österreich wird auf Basis des aktuellen IST-Stands (2024) ermittelt. Die Berechnung der Energieeffizienz erfolgt durch die Relation zwischen dem Energieverbrauch der Funknetze und dem übertragenen Datenvolumen. Hierfür wurden mehrere zentrale Parameter herangezogen, die im Folgenden erläutert werden.

Energieverbrauch österreichischer Mobilfunknetze. Der gesamte Energieverbrauch der Mobilfunknetze in Österreich wurde für das Jahr 2024 auf 600 GWh geschätzt. Diese

³⁸ Statista (2023). Anteil der Internetnutzer in Österreich von 1996 bis zum 1. Halbjahr 2023. Stand: 05.09.2024, 10:56.

³⁹ Moayeri (2024). Die immer noch unterschätzten IT-Energiekosten. Der Netzwerk Insider.

Angabe stammt aus der Studie von Wagner (2023), die den Energieverbrauch verschiedener Telekommunikationsinfrastrukturen in Österreich untersucht. Der angegebene Wert umfasst den Energiebedarf aller Mobilfunknetze in Österreich und spiegelt somit den Gesamtenergieverbrauch wider, der für den Betrieb dieser Netze erforderlich ist.

Anteil der Funknetze am Gesamtverbrauch. Es wird angenommen, dass das Funknetz einen Anteil von 80% am Gesamtenergieverbrauch der Mobilfunkinfrastruktur ausmacht. Dieser Wert basiert auf den Untersuchungen von Volker (2022), die den Energieverbrauch in Mobilfunknetzen nach verschiedenen Netzkomponenten aufschlüsseln. Die Funknetze umfassen in diesem Zusammenhang die Basisstationen, Antennen und die zugehörigen Funktechnologien, während die restlichen 20% des Energieverbrauchs auf andere Infrastrukturelemente wie das Core-Netzwerk oder administrative Systeme entfallen. Diese Aufteilung reflektiert die hohe Energiedichte der Funknetzinfrastruktur, die insbesondere durch den Betrieb der Basisstationen geprägt ist.

Datenvolumen Mobilfunk in Österreich. Für das Jahr 2024 wird das in österreichischen Mobilfunknetzen übertragene Datenvolumen auf 4.341 Petabyte geschätzt, basierend auf Angaben der RTR (2023). Dieser Wert umfasst sowohl mobile Datenübertragungen durch Endnutzer als auch maschinelle Kommunikation (M2M) und stellt die Gesamtmenge an Daten dar, die über das österreichische Mobilfunknetz verarbeitet wird.

Auf Grundlage dieser Parameter wurde die Energieeffizienz des Mobilfunknetzes als Verhältnis zwischen dem Energieverbrauch und dem Datenvolumen berechnet. Die Energieeffizienz, ausgedrückt in Wh/GB, ergibt sich wie folgt:

$$\text{Energieeffizienz}_t = \frac{\text{Energieverbrauch}_t}{\text{Datenvolumen}_t}$$

Bei einem Energieverbrauch von 600 GWh (entspricht 600.000.000 kWh) und einem übertragenen Datenvolumen von 4.341 Petabyte (entspricht 4.341.000.000 GB) ergibt sich eine Energieeffizienz von 0,013 Wh/GB, was bedeutet, dass für die Übertragung eines Gigabyte an Daten im österreichischen Funknetz 0,013 Wattstunden Energie benötigt werden. Diese Berechnungsmethodik folgt dem Standardansatz zur Energieeffizienzbestimmung in Telekommunikationsnetzen.

6.3 Projektion bis 2050

6.3.1 Glasfaserausbau und Migration

Die Projektion der CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs bis 2050 basiert zum Teil auf verschiedenen Annahmen zum Glasfaserausbau und zur Migration von den bestehenden Kupfer- oder mobilfunkbasierten Anschlusstechnologien hin zu

Glasfasertechnologien (FTTH/B). Die zugrunde liegenden Modellannahmen für das Basisszenario, das als Benchmark für die spätere Szenarioanalyse dient, umfassen wesentliche Annahmen zur Glasfaserausbastrategie, zum Migrationsumfang sowie zur Ausbau- und Migrationsgeschwindigkeit. Diese Annahmen bilden die Grundlage für die Bewertung des künftigen Energiebedarfs und der Emissionsbilanzen.

Glasfaserausbastrategie. Das Basisszenario geht von einer kontinuierlichen Fortsetzung der bisherigen Verteilung der Glasfaserinfrastruktur aus, sodass die bestehenden Verhältnisse zwischen FTTH (*Fiber-to-the-Home*), PtP (*Point-to-Point*), PtMP (*Point-to-Multipoint*) und FTTB (*Fiber-to-the-Building*) auf Gemeindeebene beibehalten und fortgeschrieben werden. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die Glasfaseranschlusnetze sukzessive ausgebaut werden, was bedeutet, dass einzelne Gemeinden vorzugsweise innerhalb eines Jahres vollständig nach einer festgelegten Priorisierungsfolge mit Glasfaser erschlossen werden. Für diese Priorisierung können unterschiedlichen Kriterien miteinander abgewogen werden. In dieser Studie wird für die Projektion unterstellt, dass die Bevölkerungsdichte ein relevantes Kriterium für den Netzausbau ist, d.h. dass Regionen mit höherer Einwohnerdichte bevorzugt ausgebaut werden.⁴⁰

Glasfaserausbaugeschwindigkeit. Die Ausbaugeschwindigkeit hängt direkt von der jährlich zu verlegenden Trassenkilometerzahl ab, die für den Glasfaserausbau als Zielgröße angenommen wird. Im Basisszenario wird von einem „Budget“ von 5.000 Trassenkilometern pro Jahr ausgegangen. Der jährliche Fortschritt oder Stand des Glasfaserausbau wird dann auf Basis der aktuellen Anzahl der verfügbaren FTTH/B-Anschlüsse in Relation zur gesamten Anzahl der Anschlüsse ermittelt, die bis zum Ausbauende mit Glasfaser versorgt werden sollen. Hierbei geht das Basisszenario davon aus, dass 95% des Anschlussnetzes bis 2035 mit Glasfaser ausgebaut und 95% der bestehenden Anschlüsse bis 2045 in FTTH/B migriert werden.

Migrationsgeschwindigkeit. Im Ausgangs- bzw. Basisszenario wird angenommen, dass der Migrationsprozess hin zu Glasfasertechnologien ausschließlich dann erfolgt, wenn in der jeweiligen Gemeinde bereits eine Glasfaserinfrastruktur verfügbar ist. Die allgemeine Migrationsgeschwindigkeit ist demnach direkt abhängig von der angenommenen Geschwindigkeit des Glasfaserausbau. Zudem wird angenommen, dass der Migrationsverlauf in jeder Gemeinde einer nicht-linearen, konkaven Funktion folgt, wobei die Migrationsgeschwindigkeit mit zunehmender Penetrationsrate abnimmt.⁴¹ Bei der Umstellung der bestehenden Anschlüsse auf FTTH/B verringert sich die Anzahl der bisherigen Technologien proportional zu deren vorherrschendem Anteil im jeweiligen Gebiet.

⁴⁰ Die ökonomische Begründung dazu ist der bessere Cash-Flow bei diesem Vorgehen.

⁴¹ $Take\ up\ rate\ (\%)_t = Take\ up\ rate\ (\%)_{t-1}^x$ wobei die *Take-up rate (%)* im Wertbereich 0 bis 1 liegt und x ein Exponent kleiner 1 ist.

Mit dem Anstieg der migrierten aktiven Anschlüsse steigt gleichzeitig die Anzahl der aktiven Netzkomponenten, die für den Betrieb von FTTH/B-Netzen erforderlich sind. Zugleich werden die erforderlichen, zentralen Netzkomponenten von Kupfernetzen mit der schrittweisen Umstellung auf Glasfaser ebenfalls schrittweise reduziert.

Migrationsumfang. Des Weiteren wird angenommen, dass von dem angestrebten Migrationsziel von 95% alle Anschlüsse der Technologien FTTC (*Fiber-to-the-Cabinet*), FTTEEx (*Fiber-to-the-Exchange*) sowie hybrider Anschlüsse vollständig auf Glasfaser migriert werden. Für DOCSIS-basierte und Cube-Anschlüsse wird hingegen im Basisszenario ein maximaler Migrationsgrad von 50% bis zum Abschluss des Migrationszeitraums unterstellt.

Ersatzinvestitionen. Wir beziehen den noch fehlenden Glasfaserausbau vollständig in die CO₂-Bilanz ein, als wäre der gesamte Netzausbau eine freiwillige Handlungsoption aus der Sicht der Netzbetreiber (und Regulierer), und variieren dessen Startpunkt und Dauer. Dies ist jedoch streng genommen nicht so: Auch die bestehenden Netze brauchen Ersatzinvestitionen zur Erneuerung der Netzkomponenten (Leerrohre, Kabel, Verzweiger) und -elemente. Diese haben wir bei den zeitlichen Alternativen nicht in Ansatz gebracht. Man kann den Ausbau mit FTTH als eine – ggf. manchmal etwas vorgezogene – Ersatzinvestition in die nun zu verwendende moderne und zukunftssichere Technologie, das Modern Äquivalent Asset (MEA), auffassen. In diesem Sinne könnte man für die Betrachtung der Handlungsoptionen auf die Emissionen des Netzaubaus in der Gesamtbilanz verzichten, würde dann aber die Auswirkungen des früheren oder späteren Ausbaus verlieren. Wir haben daher auf Ersatzinvestitionen im Modellansatz verzichtet und uns auf den Neuausbau konzentriert.

6.3.2 Energieverbrauch und CO₂-Äquivalente

Im Basisszenario zur Energieverbrauchsprojektion bis 2050 wird eine Ceteris-paribus-Betrachtung angewendet. Das bedeutet, dass bestimmte Variablen über den Betrachtungszeitraum konstant gehalten werden, um eine klare Ausgangsbasis für die Szenarioanalyse zu schaffen. Konkret beinhaltet dieses Szenario die folgenden Annahmen.

Keine Effizienzsteigerung der Festnetzinfrastrukturen. Es wird angenommen, dass die Energieeffizienz der Festnetzelemente (z. B. DSLAM, OLT) im Festnetz über den gesamten Zeitraum bis 2050 unverändert bleibt (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Das impliziert, dass trotz technischer Fortschritte oder möglicher Innovationen im Bereich der Energieeffizienz diese Entwicklungen im Basisszenario nicht berücksichtigt werden. Folglich bleibt der Energieverbrauch der bestehenden Netzelemente konstant, unabhängig von der möglichen Einführung effizienterer Geräte.

Fortschreibung der Entwicklung des Datenvolumens und Energieverbrauch im Funknetz. Es wird davon ausgegangen, dass das Datenvolumen im Mobilfunkbereich wie im letzten Jahr (2023) weiterhin jährlich um 18% ansteigt,⁴² und dass bei einem Anstieg des mobilen Datenvolumens um 200% der Energieverbrauch der Funknetze lediglich um 25% zunimmt. Diese Annahme basiert auf den Zielen eines Umweltprogramms 2022-2025 von einem österreichischen Netzbetreiber⁴³ und geht von einer gewissen Verbesserung der Energieeffizienz von Netzelementen im Funknetz im Zeitverlauf aus – und ist somit konsistent mit der Entwicklung der Energieeffizienz im Mobilfunkbereich.

Unveränderte durchschnittliche Nutzungsintensität und Nutzungsverhalten: Die zunehmende Verbreitung von IoT-Geräten könnte in Abhängigkeit von deren Kommunikationsverhalten auf den Anschlusslinien zukünftig dazu führen, dass Modems kontinuierlich online bleiben müssen, selbst wenn geringe Datenmengen in kurzen Abständen übertragen werden müssen. In einem solchen Szenario würde die Möglichkeit der Modems, in einen energiesparenden Schlafmodus zu wechseln, stark eingeschränkt oder vollständig verhindert. Dies könnte die Effizienz potenzieller Energiesparmaßnahmen wie wir sie heute kennen deutlich reduzieren. Für das Basisszenario wird allerdings angenommen, dass die durchschnittliche Nutzungsintensität über die Zeit konstant bleiben (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4). Veränderungen im Nutzungsverhalten, wie eine intensivere Nutzung datenintensiver Anwendungen oder ein stärkerer Rückgang der Internetnutzung, werden in diesem Ausgangsszenario nicht berücksichtigt.

Konstante CO₂-Umwandlungsfaktoren: Sowohl der CO₂-Umwandlungsfaktor, der zur Berechnung der Emissionen aus dem Energieverbrauch herangezogen wird, als auch die CO₂-Emissionen aus der Herstellung und Installation von Netzequipment werden als konstant angenommen. Das bedeutet, es wird keine Annahme über die Änderung in der Stromerzeugung (beispielsweise durch einen höheren Anteil erneuerbarer Energien) oder zu Effizienzgewinnen in der Energieversorgung über den Projektionszeitraum getroffen. Dies führt zu einer stabilen Relation zwischen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen.

⁴² [RTR \(2023\)](#). Internet Monitor Jahresbericht.

⁴³ [A1 \(2022\)](#). Umwelterklärung.

7 Analysierte Szenarien

Das Modell bietet über seine Parametrierbarkeit eine Vielzahl von Möglichkeiten, Szenarien zu definieren und deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Die für diese Studie limitiert zur Verfügung stehende Zeit zur Projektbearbeitung hat die Zahl der untersuchten Szenarien in Abstimmung mit dem Auftraggeber RTR auf relevante und aussagekräftige 6 Szenarien begrenzt.

Die Prognose des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von österreichischen Anschlussnetzen bis 2050 stellt auf unterschiedliche Szenarien ab, die zum einen unterschiedliche Ausbaustrategien und Migrationsgeschwindigkeiten unterstellen und zum anderen die Sensitivität gegenüber Änderungen dieser Annahmen untersucht. Diese Szenarien bieten Einblicke in die Auswirkungen verschiedener Strategien auf die Netzstruktur und die Umweltbelastung.

Diese Szenarien umfassen:

Tabelle 2: Szenario-Darstellung – Hauptszenarien

	Mäßig steigende Nutzung (+18% Datenvolumen p.a.)	Stark steigende Nutzung (+30% Datenvolumen p.a.)	Höhere Energieeffizienz von Glasfaserelementen	Vollständige Migration DOCSIS und Cubes
Langsam Ausbau bis 2040; Migration bis 2050	Szenario 2			
Benchmark Ausbau bis 2035; Migration bis 2045	Basisszenario Szenario 1	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
Schneller Ausbau bis 2030; Migration bis 2040	Szenario 3			

Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Szenario 1 (Ausgangsszenario). Das Basis-Szenario („Benchmark“) setzt auf ein moderates Tempo für den Ausbau des Glasfasernetzes, der bis 2035 abgeschlossen sein soll, und für die Migration, die bis 2045 erfolgt. Hier wird von einem moderaten Datenvolumenwachstum von 18% pro Jahr ausgegangen. Dieses Szenario dient als Vergleichsgrundlage und zeigt einen Mittelweg auf, bei dem das Netz kontinuierlich modernisiert wird, jedoch ohne extrem schnelle oder langsame Maßnahmen.

Szenario 2. Das zweite betrachtete Szenario „langsam“ geht von einem langsamen Ausbau der Glasfaserinfrastruktur bis 2040 und einer vollständigen Migration bis 2050 aus. Dabei wird wie zuvor ein moderates jährliches Datenvolumenwachstum von 18%

angenommen. Dieses Szenario untersucht, wie sich ein langsamer Ausbau und eine lange Übergangszeit auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen auswirken.

Szenario 3. Das Szenario „schneller“ sieht einen beschleunigten Ausbau und eine frühzeitige Migration vor, wobei der Ausbau bereits bis 2030 abgeschlossen sein soll und die Migration bis 2040 vollzogen wird. Hier wird ebenfalls ein moderates jährliches Datenwachstum von 18% angenommen. Ziel dieses Szenarios ist es, die Auswirkungen eines schnellen Umstiegs auf Glasfasertechnologie zu untersuchen, was den Energieverbrauch früher reduzieren und eine positive CO₂-Bilanz im Vergleich zu langsameren Szenarien ermöglichen könnte.

Szenario 4. Ein weiteres Szenario, „stark steigendes Datenvolumen“, arbeitet mit einem moderaten Ausbau- und Migrationszeitraum (bis 2035 bzw. 2045) wie im Basisszenario, geht jedoch von einem stark wachsenden Datenvolumen von 30% pro Jahr aus. Dieses Szenario untersucht das Risiko, dass ein stark steigendes Datenvolumen den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen erheblich in die Höhe treiben könnte, selbst bei moderatem Ausbau- und Migrationstempo.

Zusätzlich zu diesen 4 Hauptszenarien werden spezifische Maßnahmen untersucht, die den Energieverbrauch durch Effizienzsteigerungen oder durch eine vollständige Migration zu Glasfaser senken könnten.

Szenario 5. Im Szenario „höhere Energieeffizienz“ wird, ausgehend vom Ausbau entsprechend des Basisszenarios, angenommen, dass der Energieverbrauch des Glasfaserequipments um 20% reduziert wird, ergänzt durch eine jährliche Effizienzsteigerung von 1,9% bei *Optical Line Terminals* (OLT) und *Distributed Point Units* (DPU) sowie von 0,5% bei *Network Termination*.⁴⁴ Dieses Szenario zielt darauf ab, die Reduktionspotenziale durch technologische Fortschritte in der Glasfaserinfrastruktur zu erfassen.

Szenario 6. Das Szenario „vollständige Migration von DOCSIS und Cubes“ betrachtet den Ausbau des Basisszenarios mit einer vollständigen Umstellung auf Glasfaser, bei der alle bisherigen Technologien, einschließlich DOCSIS und mobilfunkbasierter Cubes, durch Glasfaser ersetzt werden. Dies umfasst die Umstellung auf Point-to-Point (PtP) oder Point-to-Multipoint (PtMP)-Netze, wobei der Ausbau von FTTP nicht weiter verfolgt wird. Dieses Szenario untersucht das Potenzial, durch den Verzicht auf energieintensive Alttechnologien maximale Effizienz und eine nachhaltige Netzstruktur zu erreichen.

⁴⁴ Die Annahmen zur zukünftigen Effizienzsteigerung einzelner Komponenten (OLT, DPU und NT) basieren auf deren energetischen Grenzwerten, wie sie im Zeitverlauf im EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment festgelegt wurden.

8 Modellergebnisse

8.1 Energieverbrauch

8.1.1 Suboptimaler energetischer IST-Stand (2024)

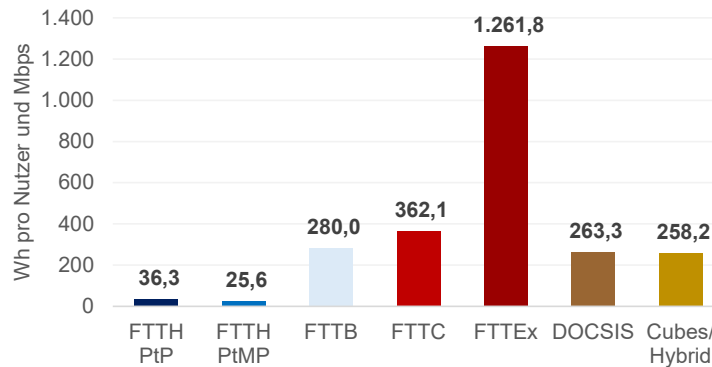
Die Modellberechnungen zum energetischen IST-Stand der verschiedenen Anslusstechologien im österreichischen Anslusstnetz im Jahr 2024 verdeutlichen, dass die aktuelle Zusammensetzung der Netztechnologien im Betrieb energetisch suboptimal ist. Dies liegt insbesondere an der weiterhin dominanten Nutzung energieintensiver Technologien wie DOCSIS, Cubes und kupferbasierten Technologien (FTTx und FTTC).

Die Analyse des Energieverbrauchs pro Mbps und Nutzer in Abbildung 4 unterstreicht die Ineffizienz der Kupfer- und DOCSIS-Netze im Vergleich zu FTTH. Der Energieverbrauch bei FTTH liegt zwischen 26 und 36 Wh/Mbps pro Nutzer, während DOCSIS, FTTx und Cubes zwischen 258 Wh/Mbps pro Nutzer und 1.261,8 Wh/Mbps pro Nutzer verbrauchen.⁴⁵ ⁴⁶ Diese erhebliche Diskrepanz zwischen den Anslussttechnologien macht deutlich, dass kupferbasierte, mobilfunkbasierte und DOCSIS-Technologien mehr als das Zehnfache an Energie pro Mbps verbrauchen im Vergleich zu den glasfaserbasierten Optionen. Fiber-to-the-Home (FTTH) stellt die energieeffizienteste Option dar und weist somit den niedrigsten Energieverbrauch pro Mbps unter den betrachteten Technologien auf.

⁴⁵ Um Vergleichbarkeit zwischen Technologien mit unterschiedlichen Leistungen (Geschwindigkeiten) herstellen zu können, wurden Energieverbräuche der jeweiligen Technologie auf 1 Mbps linear skaliert und mit einander verglichen. Bei dieser Umrechnung wird für PtP (1G Ethernet) eine Geschwindigkeit pro Nutzer in Höhe von 1.000 Mbps angenommen, für PtMP (XGS.PON) 1.562 Mbps, DOCSIS (3.1) 500 Mbps; FTTB (G.Fast) 500 Mbps, FTTC (VDSL2 35b) 250 Mbps, FTTEEx (VDSL2 8a/ ADSL2+) 25 Mbps, Cubes/ Hybride (4G) 300 Mbps (Plückebaum, 2012: VDSL, Vectoring, Bonding und Phantomring: Technisches Konzept, marktliche und regulatorische Implikationen, WIK Diskussionsbeitrag Nr 374; [Plückebaum, et al. 2019](#). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS, Plückebaum und Ockenfels 2020. Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 457).

⁴⁶ Bei dieser Darstellung werden für PtP 1 Gbps je Kunde als Anschlusswert unterstellt, bei PtMP 1,562 Gbps je Kunde. Würde man berücksichtigen, dass sich bei PtMP mehr als 20% gleichzeitig aktive Nutzer diese Bandbreite über den Splitter teilen, kehrt sich die Rangfolge der beiden Technologien um.

Abbildung 4: Energieeffizienz in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie im Jahr 2024 (W/Mbps pro Nutzer)

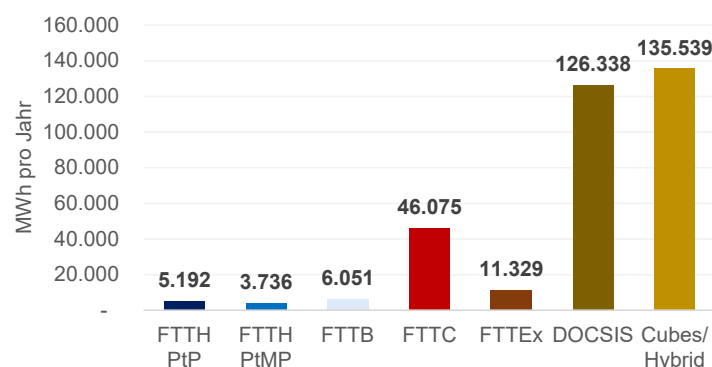


Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Trotz dieser Effizienz zeigt die Berechnung, dass FTTH im Jahr 2024 nur einen geringen Anteil des energetischen Gesamtverbrauchs im österreichischen Anschlussnetz ausmacht, während energieintensivere Technologien wie DOCSIS und Cubes derzeit einen großen Teil der Anschlüsse stellen (Abbildung 2) und ca. 80% des gesamten Energieverbrauchs im Netz ausmachen (Abbildung 5) und somit den Energieverbrauch deutlich dominieren.

Der Gesamteinsatz von DOCSIS und mobilfunkbasierten Technologien (Cubes) führt zu einem hohen Energiebedarf im österreichischen Netz, wobei der Verbrauch für DOCSIS-Anschlüsse auf rund 126.338 MWh und für mobilfunk-basierte Anschlussstechnologien auf 135.539 MWh pro Jahr geschätzt wird. Im Vergleich dazu ist der Energieverbrauch für FTTH-Anschlüsse mit nur 5.192 MWh (Point-to-Point) und 3.736 MWh (Point-to-Multipoint) deutlich geringer.

Abbildung 5: Gesamter Energieverbrauch in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie im Jahr 2024 (Gesamt: 334.260 MWh)



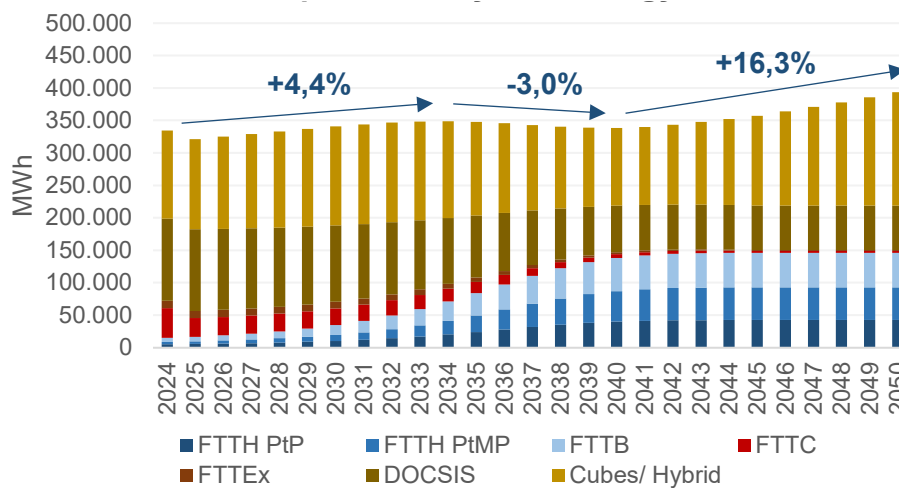
Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass das österreichische Anschlussnetz im Jahr 2024 durch die weiterhin dominante Nutzung energetisch ineffizienter Technologien gekennzeichnet ist. Der hohe Anteil von DOCSIS, mobilfunk- und kupferbasierten Technologien führt zu einem suboptimalen energetischen IST-Stand.

8.1.2 Zunahme des Energieverbrauchs bis 2050

Die Modellberechnungen zum Energieverbrauch der österreichischen Anschlussnetze bis zum Jahr 2050 zeigen, dass der jährliche Energieverbrauch trotz einer weitreichenden Migration zu Glasfasertechnologien (FTTH/B) ansteigen wird. Unter den Annahmen des Basisszenarios ist ein Anstieg des Energieverbrauchs bis 2050 um insgesamt 18% zu erwarten. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Migration nur zu etwa 50% für mobilfunkbasierte Technologien (Cubes) und DOCSIS erfolgt, während ein beträchtlicher Anteil dieser energieintensiven Technologien weiter im Einsatz bleibt.

Abbildung 6: Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen nach Technologie (in MWh) – Basisszenario



Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

In der Übergangsphase bis zur vollständigen Migration wird die doppelte Nutzung von Alt- und Neuinfrastrukturen zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führen. Die Modellrechnung zeigt einen initialen Anstieg des Gesamtenergieverbrauchs um 4,4% von 334.000 MWh im Jahr 2024 auf 349.000 MWh im Jahr 2034. Dieser Anstieg ist hauptsächlich auf die temporäre Doppelversorgung zurückzuführen, bei der bestehende Netzinfrastrukturen noch betrieben werden, während parallel Glasfaseranschlüsse aufgebaut werden.

Nach dieser Phase der Doppelversorgung zeigt das Modell eine moderate Reduktion des jährlichen Energieverbrauchs um 3% bis zum Jahr 2040, mit einem Tiefpunkt bei 339.000 MWh. Zu diesem Zeitpunkt ist der Migrationsprozess nahezu abgeschlossen, und die Glasfaserinfrastruktur erreicht eine Abdeckung von 93,8%. Dennoch bleibt ein Teil der DOCSIS-Technologie (50%), die nicht migriert wurde, weiterhin in Betrieb. Dieser verbliebene Anteil trägt weiterhin signifikant zum Gesamtenergieverbrauch bei und limitiert die möglichen Energieeinsparungen durch die Umstellung auf Glasfaser.

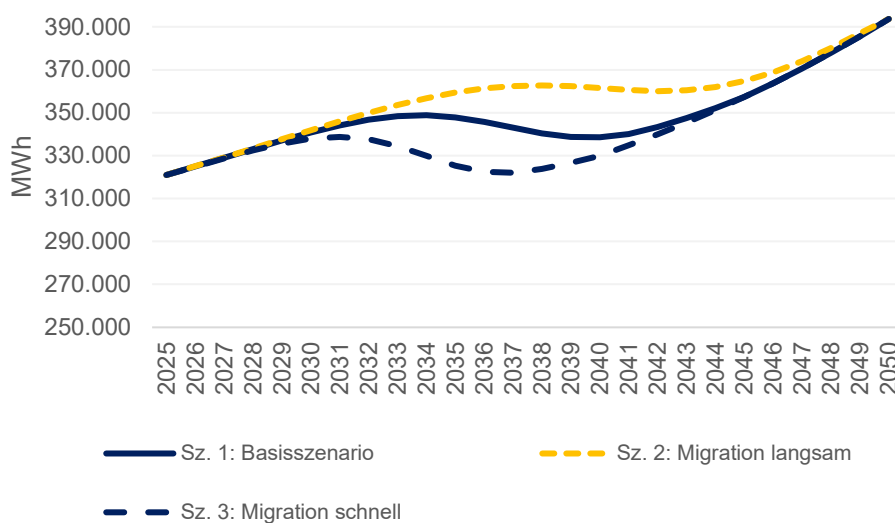
Die Nutzung von mobilen Datenverbindungen wird laut den Modellannahmen weiterhin zunehmen. Die Cubes-Technologie, die häufig für den Zugang zu mobilen Datendiensten verwendet wird, bleibt gleichfalls teilweise bestehen (50% nicht migriert) und weist ebenso einen hohen Energieverbrauch auf. Da das Datenvolumen bis 2050 weiterhin ansteigt, wird dieser Teil der Infrastruktur einen zunehmend größeren Anteil am Gesamtenergieverbrauch beanspruchen. Dies führt in Kombination mit der weiterhin aktiven DOCSIS-Infrastruktur zu einem erneuten Anstieg des jährlichen Energieverbrauchs, der bis 2050 auf etwa 394.000 MWh ansteigen wird – ein Plus von 16,3% gegenüber dem Tiefpunkt im Jahr 2040.

Die Modellannahmen verdeutlichen, dass die angestrebte Reduktion des Energieverbrauchs im österreichischen Anschlussnetz trotz der Migration zu Glasfaser durch die weiterhin aktive Nutzung energieintensiver Technologien begrenzt wird. Die Kombination aus nicht vollständig migrierten DOCSIS- und Cubes-Technologien und dem zunehmenden Datenvolumen führt langfristig zu einem höheren Energiebedarf.

8.1.3 Tempo des Ausbaus und der Migration

Die Modellergebnisse zur Auswirkung des Tempos von Ausbau und Migration auf den jährlichen Energieverbrauch im österreichischen Anschlussnetz verdeutlichen, dass eine schnellere Migration zu Glasfasertechnologien (FTTH/B) energetische Effizienzgewinne bewirken kann. Ein zügiger Ausbau und eine beschleunigte Migration führen zu zeitlich begrenzten Einsparungen im Energieverbrauch, da ineffiziente Netztechnologien früher aus dem Netz eliminiert werden und der Anteil an energieeffizienten Glasfaseranschlüssen schneller steigt (Szenario 3 in Abbildung 7).

Abbildung 7: Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (1/2/3)



Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Im Szenario 2 („Migration langsam“) steigt der Energieverbrauch zwischen 2035 und 2045 im Vergleich zu den anderen Szenarien an (Szenario 2 in Abbildung 7). Dieser Effekt ist vor allem auf die fortgesetzte parallele Nutzung älterer, energieintensiver Technologien (z. B. DOCSIS und kupferbasierten Technologien) zurückzuführen, die durch den langsamen Migrationsprozess länger im Netz verbleiben. Obwohl der Energieverbrauch nach 2045 leicht abnimmt, bleibt er bis 2050 im Vergleich zu einer schnelleren Migration tendenziell höher. Der höhere Energieverbrauch in diesem Szenario resultiert aus der geringeren Effizienz der veralteten Technologien, die länger betrieben werden müssen, bis sie vollständig durch Glasfaser ersetzt sind.

Die im Szenario 3 erzielten Effizienzgewinne sind jedoch zeitlich begrenzt. Ab 2050 verschwinden die Vorteile des schnellen Ausbaus, da die Migration in beiden Szenarien zu diesem Zeitpunkt weitgehend abgeschlossen ist. Dennoch zeigt das schnellere Migrationsszenario in den Jahren des Übergangs eine signifikante Reduktion des Energieverbrauchs und trägt kurzfristig zu einem energieeffizienteren Betrieb des österreichischen Anschlussnetzes bei. Insgesamt ist dieser Migrationsweg im Gesamtverbrauch energetisch effizienter.

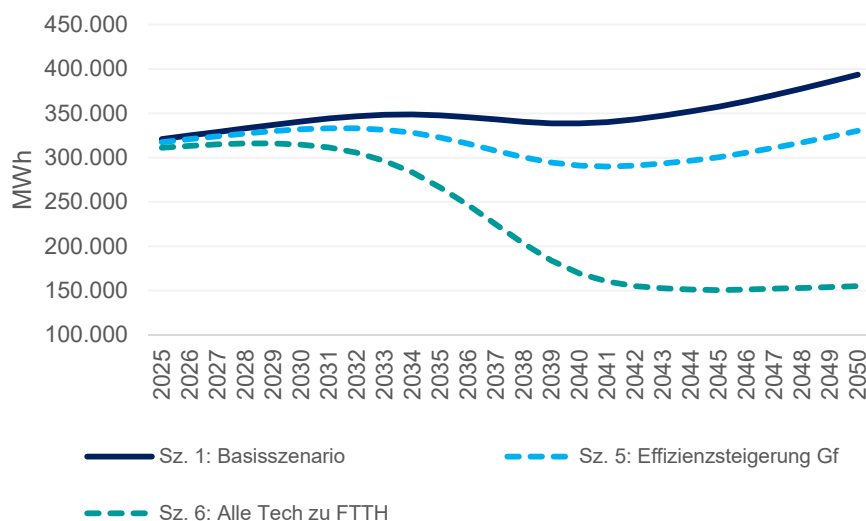
8.1.4 Dauerhafte Reduktion des energetischen Kurses

In den Modellrechnungen werden zwei alternative Szenarien zur dauerhaften Reduktion des Energieverbrauchs analysiert:

Szenario 5 („Effizienzsteigerung Gf“): In diesem Szenario wird eine moderate Effizienzsteigerung in der Glasfasertechnologie angenommen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass verbesserte Glasfasernetzkomponenten den Energieverbrauch weiter optimieren können. Die erzielten Einsparungen hängen jedoch stark vom Migrationsstand ab. Sobald die Migration größtenteils abgeschlossen ist, erreicht dieses Szenario das Maximum der möglichen Energieeinsparung und zeigt langfristig eine Parallelentwicklung zum Basisszenario (siehe Szenario 5 in Abbildung 8). Das Szenario verdeutlicht, dass zwar durch technologischen Fortschritt in der Glasfaserinfrastruktur eine Reduktion des Energieverbrauchs möglich ist, diese jedoch beschränkt bleibt, solange nicht eine vollständige Migration hin zu Glasfaser erfolgt.

Szenario 6 („Alle Tech zu FTTH“) - Vollständige Migration zu FTTH: Dieses Szenario nimmt eine vollständige Migration an, bei der bis 2050 nicht nur 50%, sondern 100% der bestehenden DOCSIS- und Cube-Anschlüsse auf FTTH umgestellt werden. Dieses Szenario führt zu einer deutlich stärkeren und langfristigen Reduktion des Energieverbrauchs, da die energieintensiven Technologien vollständig ersetzt werden (siehe Szenario 6 in Abbildung 8). Bis 2050 wird dadurch eine signifikante Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs erreicht, die die der anderen Szenarien erheblich übertrifft. Diese Umstellung eliminiert nicht nur den Energiebedarf für ineffiziente Technologien wie FTTB, sondern entkoppelt auch den Energieverbrauch vom steigenden Datenvolumen im Mobilfunknetz, das häufig über energieintensive Cubes abgewickelt wird.

Abbildung 8: Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (3/5/6)



Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Das Szenario einer vollständigen FTTH-Umstellung zeigt, dass der Energieverbrauch durch eine konsequente und vollständige Umstellung auf Glasfasertechnologie langfristig

mehr als halbiert werden kann. Diese Reduktion ist besonders relevant im Hinblick auf steigende Anforderungen an das Netz und das zunehmende Datenvolumen.

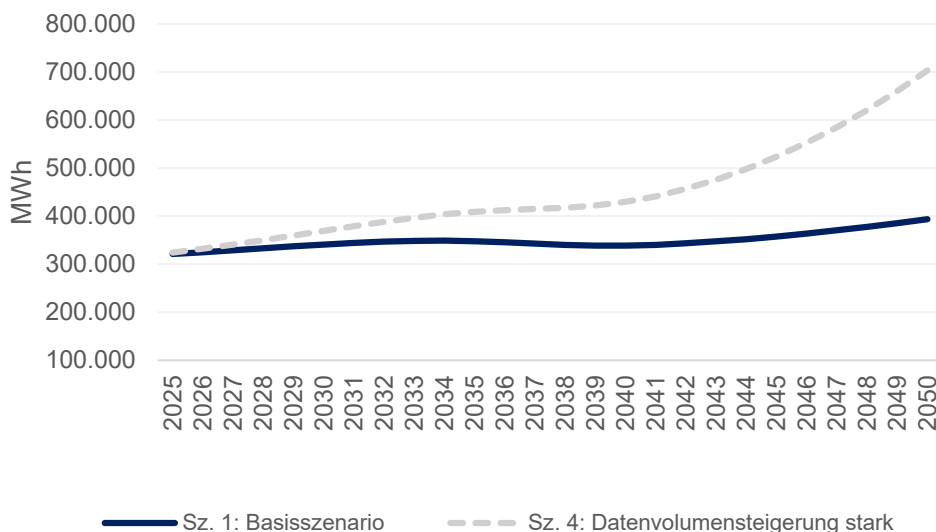
Die Ergebnisse der Modellberechnungen machen deutlich, dass, während technologische Effizienzsteigerungen im Glasfaserbereich einen positiven Beitrag leisten, es vor allem die vollständige Migration zu FTTH ist, die die größte und nachhaltigste Reduktion des Energieverbrauchs ermöglicht.

8.1.5 Risiko von stark ansteigendem energetischen Bedarf aufgrund von Cubes

In Szenario 4 wird davon ausgegangen, dass das mobile Datenvolumen bis 2050 jährlich um 30% steigt, was erheblich über den Annahmen des Basisszenarios (18% jährlicher Zuwachs) liegt. Diese hohe Wachstumsrate im Datenverkehr erzeugt eine signifikante zusätzliche Belastung für die Netzwerke, da insbesondere mobilfunkbasierte Technologien wie Cubes weiterhin eine zentrale Rolle in der Versorgung spielen.

Unter diesen Bedingungen kann das ursprüngliche Ziel, den Energieverbrauch nur um 25% bei einem 200%-igen Anstieg des Datenvolumens zu steigern, nicht mehr eingehalten werden. Stattdessen wird angenommen, dass die hohe Wachstumsrate des Datenverkehrs zu einer höheren Energieverbrauchssteigerung führt (von rund 35% bei einem 200%-igen Anstieg des Datenvolumens). Unter dieser Annahme sinkt die Energieeffizienz im Mobilfunkbereich im Zeitverlauf gegenüber dem Basisszenario.

Abbildung 9: Modellergebnisse bis 2050 des gesamten jährlichen Energieverbrauchs in österreichischen Anschlussnetzen (in MWh) – Szenarienvergleich (3/4)



Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse des Modells zeigen, dass der energetische Bedarf erheblich steigt, vor allem in den Jahren nach 2040, wenn die gegenwirkenden positiven Effekte der Migration auf Glasfaser durch den massiven Datenzuwachs ausgeschöpft sind. Die Energieeinsparungen durch die Migration können den Einfluss des stetig wachsenden Datenvolumens nur zeitlich begrenzt kompensieren, und der Energieverbrauch steigt im Vergleich zu anderen Szenarien bis 2050 überproportional an.

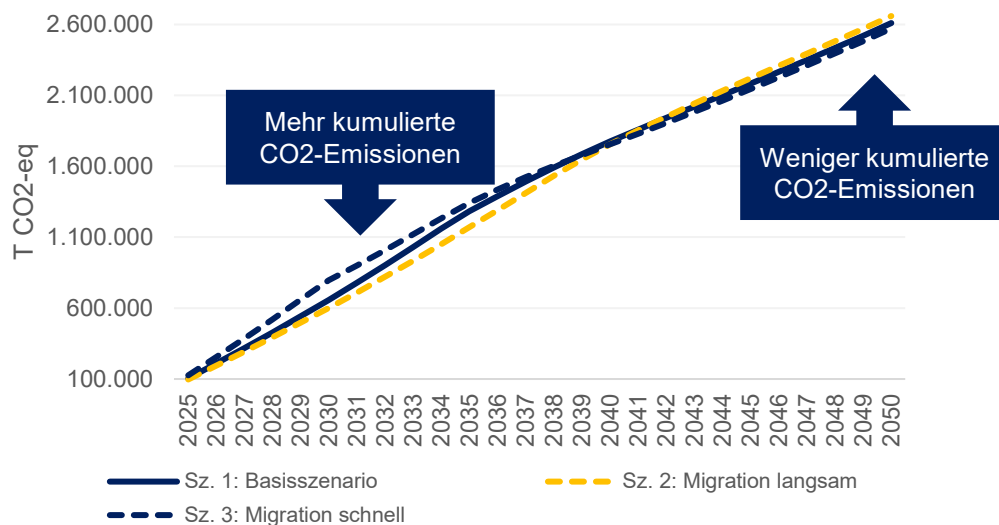
Die Modellrechnungen zeigen, dass das starke Wachstum des mobilen Datenvolumens, in Kombination mit der fortgesetzten Nutzung von Cubes, zu einer sehr hohen Energiebelastung des österreichischen Anschlussnetzes führen kann. Sollte sich die Annahme eines zum Energieverbrauch überproportionalen jährlichen Datenvolumenzuwachses bewahrheiten und die Cubes weiterhin eine relevante Rolle im Netz spielen, könnte, ceteris paribus, der jährliche Energieverbrauch bis 2050 nahezu doppelt so hoch sein wie im Basisszenario.

8.2 CO₂-Emissionen

8.2.1 Netto-CO₂-Bilanz positiv für den schnelleren Ausbau

Die zeitlich begrenzten Energieeinsparungen, die durch die Nutzung energieeffizienter Glasfasernetze entstehen, wirken ab der Betriebsphase dem CO₂-Ausstoß aus der Bauphase entgegen. Diese zusätzliche Umweltbelastung ist primär auf die energieintensive Bauphase und den damit verbundenen Ressourcenverbrauch zurückzuführen. Ein beschleunigter Ausbau, bei dem 95% der Glasfaserinfrastruktur bis 2030 realisiert werden (Szenario 3, Abbildung 10), führt kurzfristig zu einem höheren CO₂-Ausstoß im Vergleich zum Basisszenario (95% bis 2035). Durch die höhere Energieeffizienz von Glasfasernetzen im Vergleich zu älteren Netztechnologien können die CO₂-Emissionen während des Betriebs signifikant gesenkt werden. Die Modellrechnung zeigt, dass diese Einsparungen ausreichen, um die anfängliche CO₂-Belastung zu überkompensieren. Somit führt ein schneller Ausbau langfristig zu einer Netto-CO₂-Reduktion, die im Vergleich zum Basisszenario eine Emissionseinsparung von 1,5% zwischen 2025 und 2050 ermöglicht.

Abbildung 10: Modellergebnisse (2025-2050) der kumulierten CO₂-Emissionen in österreichischen Anschlussnetzen

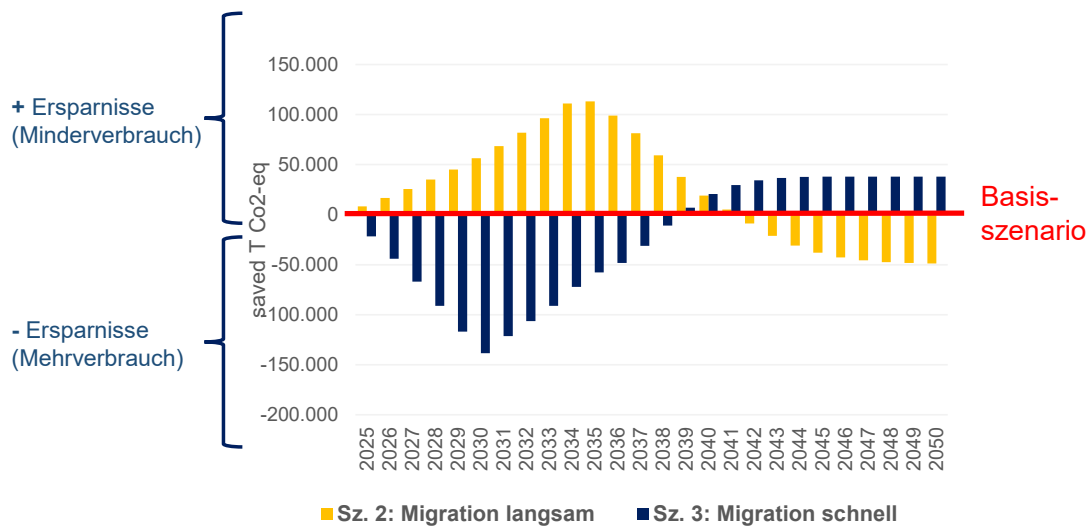


Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Während der schnellere Ausbau kurzfristig eine höhere Umweltbelastung durch verstärkten Ressourcenverbrauch verursacht, ermöglichen die frühzeitigen, energetischen Einsparungen im Betrieb eine schnellere Amortisation der initialen Emissionskosten. Im Szenario des beschleunigten Ausbaus (95% bis 2030) führen die CO₂-Einsparungen während der Betriebsphase zu einer langfristigen Abflachung der Emissionskurve, sodass ab etwa 2040 ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Szenarien sichtbar wird. Genau anders herum verhält es sich beim verlangsamen Ausbau (Szenario 2, Abbildung 10). Langfristig ist der Gesamtausstoß an CO₂ höher als im Basisszenario oder gar im beschleunigten Ausbau.

Abbildung 11 verdeutlicht die Einsparungen zwischen den Szenarien noch. Ein beschleunigter Ausbau von Glasfasernetzen, der bis 2030 eine Abdeckung von 95% anstrebt, führt zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen im Bereich von 1,5% im Vergleich zum Basisszenario. Verglichen mit dem Szenario eines langsamen Ausbaus (95% bis 2035) können die Emissionen sogar um bis zu 3,3% gesenkt werden.

Abbildung 11: CO₂-Ersparnisse (kumuliert) Sz. 2/3 im Vergleich zum Basisszenario



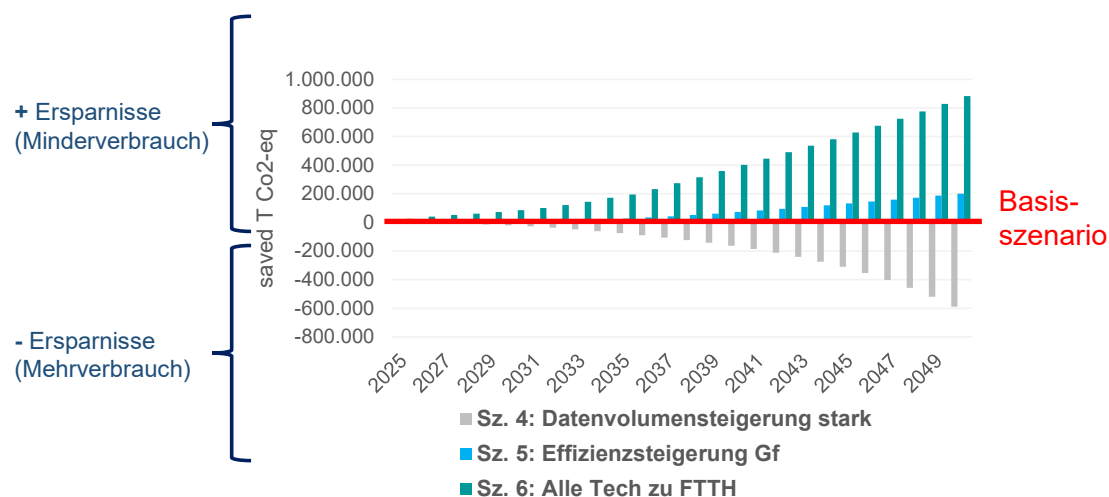
Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Allerdings bleiben einige Unsicherheiten bestehen, insbesondere bezüglich der langfristigen Auswirkungen des CO₂-Ausstoßes. Die Modellannahmen berücksichtigen keine „Memory“-Effekte, d.h. mögliche irreversible ökologische Schäden durch den frühen Ausstoß von CO₂.

8.2.2 Andere steuerbare Maßnahmen erzielen höhere CO₂-Ersparnisse

Zusätzlich zum beschleunigten oder verlangsamten Ausbau wurden mehrere Szenarien untersucht, in denen weitere Maßnahmen zur Emissionsminderung betrachtet werden:

- Effizienzsteigerung in der Glasfasertechnologie (Szenario 5): Durch den Einsatz fortschrittlicher, energieeffizienterer Glasfaserkomponenten kann der CO₂-Ausstoß bis 2050 um etwa 7,7% im Vergleich zum Basisszenario gesenkt werden. Diese Effizienzsteigerung trägt dazu bei, den Energieverbrauch und damit die Emissionen im laufenden Betrieb des Anschlussnetzes nachhaltig zu reduzieren.
- Vollständige Migration zu FTTH/B (Szenario 6): Dieses Szenario nimmt an, dass bis 2050 eine vollständige Umstellung auf FTTH/B erfolgt, wobei alle bisherigen Kupfer- und DOCSIS-Anschlüsse durch Glasfaser ersetzt werden. Die CO₂-Einsparungen in diesem Szenario sind besonders signifikant und belaufen sich kumuliert auf 33,8% im Vergleich zum Basisszenario. Die vollständige Migration zu Glasfaser beseitigt die energieintensiven Alttechnologien und maximiert somit die Energieeffizienz des Anschlussnetzes.

Abbildung 12: CO₂-Ersparnisse (kumuliert) Sz. 5/6 im Vergleich zum Basisszenario

Quelle: WIK. Eigene Darstellung.

Die kumulierte Betrachtung der CO₂-Einsparungen (Abbildung 12) zeigt, dass die Szenarien mit dauerhaften Effizienzmaßnahmen (Szenario 5) und vollständiger Migration zu FTTH/B (Szenario 6) die langfristig höchsten Einsparungen erzielen. Während Szenario 5 eine Reduktion der kumulierten Emissionen um 7,7 % bewirkt, führt Szenario 6 mit einer Einsparung von 33,8 % zu den größten Reduktionen und zeigt das größte Potenzial für eine nachhaltige CO₂-Bilanz im österreichischen Anschlussnetz. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung umfassender und dauerhafter Strukturveränderungen, um den Energieverbrauch und damit die Emissionen des Netzes langfristig zu minimieren.

8.2.3 Effekte der Datenvolumensteigerungen und Einordnung in die ICT insgesamt

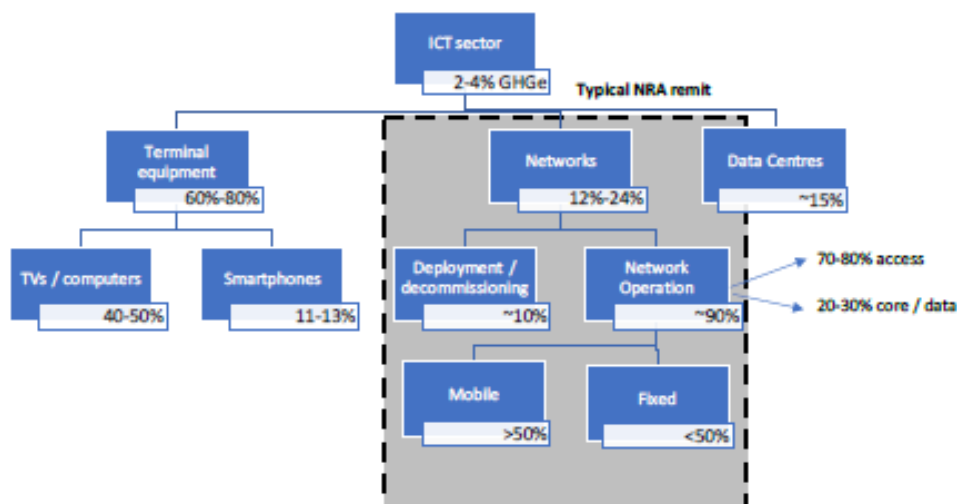
Es ist offensichtlich, dass eine gegenüber dem Basisszenario deutlich höhere Datenvolumensteigerung sich auch negativ auf den kumulierten CO₂ Ausstoß auswirken wird (vgl. Abschnitt 8.1.5 und Abbildung 12, Szenario 4). Selbst wenn sich dieser Effekt bei einer Kombination mit den Szenarien 5 (Effizienzsteigerungen in der Übertragung über Glasfasern) und insbesondere Szenario 6 (vollständige Abschaltung von DOCSIS, Cubes und FTTB) gegenkompensiert, ist ein unbegrenztes Datenvolumenwachstum aus ökologischen Gründen bedenklich. Letztlich geht es darum, den CO₂-Ausstoß gegenüber der heutigen Situation zu reduzieren.

Unsere Untersuchungen beschränken sich auf den Umbau der bestehenden Telekommunikationsanschlussnetze auf Glasfasertechnik, soweit noch nicht geschehen, und den Weg dorthin, d.h. auf die Wirkungen der Migration und der Migrationswege von den bisher etablierten Anschlusstechnologien auf FTTH Lösungen. Wir konzentrieren uns in dieser Untersuchung also nur auf das Anschlussnetz. Nicht eingeschlossen sind

die ökologischen Effekte in den Serverfarmen, die den Content bereitstellen und die Netze steuern, und die Aggregations- und Kernnetze, die ja gleichfalls die Datenmengen transportieren. Auch hier wirken sich Datenvolumensteigerungen aus bzw. finden dort ihre Quellen und Senken.

In einer Untersuchung für BEREC (12/2021)⁴⁷ haben wir festgestellt, dass auf den ICT (*Information and Communications Technologies*)-Sektor ca. 2 – 4% der weltweiten CO₂-Emissionen entfallen (Abbildung 13). Auf Endgeräte entfallen davon 60 – 80%, auf die zentralen Rechenzentren ca. 15% und auf die Telekommunikationsnetze 12 – 24%. Davon entfallen ca. 20 – 30% auf Aggregations- und Kernnetz und ca. 70 – 80% auf die Zugangsnetze (50/50 für Fest- und Mobilnetze) mit Betrieb (90%) und Ausbau (10%). Diesen letzten Teil, die Zugangsnetze, haben wir in der vorliegenden Studie genauer analysiert. Dennoch, von den Netzkosten ist dies der deutlich größere Teil.

Abbildung 13: Beitrag des ICT-Sektors an den weltweiten CO₂-Emissionen 2021



Quelle: WIK/ Rambol für BEREC 2021, basierend auf Literaturrecherchen

Die Kernnetze und Aggregationsnetze arbeiten jedoch bereits heute vollständig über Glasfaser. Hier bestehen allenfalls Handlungsoptionen hinsichtlich der Optimierung der optischen Übertragung (optisches Routing, Gigabit-Wellenlängen und Terabit-Netze). Auch hat der Trend zur Verteilung der Rechenleistungen in zentralen und auf verschiedenen Ebenen angesiedelten Edge-Clouds Auswirkungen auf die Kommunikationsvolumina in den Kern- und Aggregationsnetzen einerseits und auf die CO₂-Emissionen der Rechenzentren andererseits. Untersuchungen in diese Richtungen haben wir hier ausgeklammert, weil sie den Rahmen dieser Studie sprengen würden.

Ein anderer zu beobachtender Trend ist Entwicklung von KI. Sie hat zuvorderst einen hohen zentralen Rechenbedarf in sogenannten Hyperscale Serverfarmen, die wiederum

⁴⁷ Godlovitch, I., Louguet, A., Baischew, D., Wissner, M., Pirlot, A.: Environmental impact of electronic communications, WIK/Ramboll Study for BEREC, Bad Honnef, 21. December 2021, BOR (22) 34

einen enormen Energiebedarf entwickeln, sowohl für die erforderlichen Rechenleistungen als auch für Kühlung dieser Anlagen. Eine der Herausforderungen besteht darin, diesen Energiebedarf möglichst umweltneutral zu befriedigen.⁴⁸ Inwieweit sich aus KI auch ein deutlich intensiverer Kommunikationsbedarf zu den Endkunden entwickeln wird, wird von den Anwendungen und deren Verteilung sowie den Nutzungsformen abhängen.⁴⁹ Diese Aspekte sind ökologisch relevant, liegen jedoch gleichfalls jenseits des Untersuchungsraumes dieser Studie.

⁴⁸ Stichworte dazu: Regenerative Energie, Speicher, grüner Wasserstoff, Abwärmenutzung, ...

⁴⁹ Wir vermuten: Fragen und „intelligente“ Antworten stehen in keiner Relation zu der hohen Rechenleistung, mit der die Antworten generiert werden.

9 Fazit und Ausblick

Wir konnten zeigen, dass FTTH das mit großem Abstand energieeffizienteste und damit CO₂-sparsamste Anschlussnetz ist, auch im Hinblick auf die Kommunikation großer Datenvolumina. Je schneller man diese Technologie implementiert, desto besser ist es in der Gesamtbilanz der kommenden Jahrzehnte. Es ist auch in dieser Hinsicht die derzeit zukunftsicherste bekannte Technologie. Wenn die Migration auf Glasfaser im geplanten Umfang abgeschlossen ist, egal auf welchem Weg sie erreicht wurde, sind die zukünftigen Emissionen pro Jahr wieder gleich, denn die im Netz eingesetzten Technologien unterscheiden sich dann nicht mehr.

Hierbei ist es auch von besonderer Bedeutung, die Kupfer- Koaxial- und Funktechnologien für die Breitbandkommunikation im Festnetz möglichst schnell durch Glasfaser abzulösen. Auch der Wechsel von FTTB zu FTTH hat noch einmal eine nicht unerhebliche Energie- und CO₂-sparende Wirkung. Anstrengungen in der Inhausverkabelung in Richtung FTTH sind daher auch aus Überlegungen der Nachhaltigkeit zu begrüßen. Die erzielbaren Einsparungen sind dauerhaft, im Gegensatz zu den Alternativen der Migrationswege. Hier kann man mit einer Modell- bzw. Parameteranpassung sicher auch noch ergänzende Szenarien rechnen und sowie weitere und differenziertere Erkenntnisse gewinnen.

Wir haben den noch fehlenden Glasfaserausbau vollständig in die CO₂-Bilanz einbezogen, als wäre der gesamte Netzausbau eine freiwillige Handlungsoption aus der Sicht der Netzbetreiber (und Regulierer). Dies ist jedoch streng genommen nicht so: Auch die bestehenden Netze brauchen Ersatzinvestitionen zur Erneuerung der Netzkomponenten (Leerrohre, Kabel, Verzweiger) und -elemente. Diese haben wir bei den zeitlichen Alternativen nicht in Ansatz gebracht. Man kann den Ausbau mit FTTH als eine – ggf. manchmal etwas vorgezogene – Ersatzinvestition in die nun zu verwendende moderne und zukunftsichere Technologie, das Modern Äquivalent Asset (MEA) auffassen. In diesem Sinne kann man für die Betrachtung der Handlungsoptionen auf die Emissionen des Netzausbaus in der Gesamtbilanz verzichten, verliert dann aber die Auswirkungen des früheren oder späteren Ausbaus. Dennoch, auch diese Variante ist mit dem vorgelegten Modell ein mögliches modellierbares Szenario.

Für eine „multicriteria lifecycle analysis“ haben wir zwar die Aspekte des Aufbaus und Betriebes eines neuen Glasfaseranschlussnetzes einschließlich des vorübergehenden Parallelbetriebs von alter und neuer Infrastruktur und Netzelementen berücksichtigt. Die Aspekte einer Entsorgung der nicht mehr benötigten Netzkomponenten konnten wir im Rahmen dieser Studie jedoch nicht untersuchen. Nicht berücksichtigt haben wir zudem den Verbrauch anderer Ressourcen wie den von Wasser. Diese hätten den Rahmen der Studie gesprengt, sind zudem noch wenig erforscht und können Gegenstand weiterführender Arbeiten sein.

Für die Untersuchungen zur CO₂-Reduktion insgesamt zählt die ICT als wichtiges, hebelndes Werkzeug. Mehraufwände hier ermöglichen höhere Einsparungen in nahezu allen anderen Sektoren. Dennoch sollten diese Mehraufwände in der ICT gering gehalten werden. Mit der Konzentration auf das Zugangsnetz haben wir uns mit dem in dieser Hinsicht wichtigsten Teil der Netze befasst, wohl wissend, dass in der ICT die Endgeräte den Löwenanteil der Energie- und CO₂-Verbräuche bedingen. Die Rechenzentren liegen mit den Netzen auf vergleichbarem Rang, mit dem Eindruck, dass die Anschlussnetze auf einem guten Weg zu Emissionseinsparungen sind und die Kernnetze schon ein gutes Niveau erreicht haben, während Skepsis angesagt ist, ob die steigenden Anforderungen an die Rechenzentren hinsichtlich Content und KI diesen Weg der Emissionseinsparungen mitgehen werden. Offen bleibt in dieser Untersuchung die Frage, welche Handlungsoptionen sich diesbezüglich ergeben und welche Auswirkungen diese auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen haben.

Literaturverzeichnis

- A1 Group (2024). KPI-Factsheet. A1 Group [ESG KPI-Factsheet](#).
- Aleksic, S., & Lovric, A. (2011). Energy Consumption and Environmental Implications of Wired Access Networks. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 4(4):531-539.
- Anders, S., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges* 6(1):117-157. DOI: [10.3390/challe6010117](https://doi.org/10.3390/challe6010117).
- Bieser, J., Salieri, B., Hischier, R. (2020). 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://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Prysmian-study-on-Energy-Consumption.pdf>.
- BREKO (2020). BREKO-Pressemeldung: Gutachten bestätigt – Echte Glasfasernetze verbrauchen deutlich weniger Strom als herkömmliche Kupfernetze. 28.05.2020. <https://www.brekoverband.de/aktuelles/news/pressemitteilungen/breko-pressemeldung-gutachten-bestaetigt-echte-glasfasernetze-verbrauchen-deutlich-weniger-strom-als-herkoemmlische-kupfernetz/>. Zuletzt besucht: 11.11.2024.
- Cisco (2024). Cisco cBR-8 Converged Broadband Router Data Sheet. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/video/cbr-8-converged-broadband-router/datasheet-c78-733099.html>. Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Cisco (2024). Cisco ME 4600 Series Optical Line Terminal Datasheet. [datasheet-c78-730445.pdf](#). Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- 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).
- European Commission (2023): Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Godlovitch, I., Kroon, P., Strube Martins, S., Steffen, N. et al., Support study accompanying the review of the Broadband Cost Reduction Directive – Impact assessment – Final report, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2759/34519>.
- European Commission (2024), Joint Research Centre, Lejeune, A. and Bertoldi, P., Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/985625> JRC136991.
- FiberBroadband Association (2024). Fiber Broadband Deployment is Paramount To Achieving Zero Carbon Footprint. A carbon footprint analysis: FTTH vs. HFC/ DOCSIS. Fiber Broadband Association Sustainability Working Group. Abrufbar unter: 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. [ffhal-03196527](#).

- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (2023). Series of articles on methods of sustainability assessment: Life cycle assessment. 15.06.0223.
<https://www.ffe.de/en/publications/series-of-articles-on-methods-of-sustainability-assessment-life-cycle-assessment/>. Zuletzt besucht: 11.11.2024.
- Godlovitch, I., Louguet, A., Baischew, D., Wissner, M., Pirlot, A.: Environmental impact of electronic communications, WIK/Ramboll Study for BEREC, Bad Honnef, 21. December 2021, BOR (22) 34.
- Hämmerli, A. (2020). Unser Klima-Beitragsmodell. Galaxus. Abrufbar unter:
<https://www.galaxus.de/de/page/unser-klima-beitragsmodell-16329>. Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Held, V. (2022). [Energieverbrauch von Mobilfunknetzen senken – Interview mit Volker Held, Nokia - Informationszentrum-Mobilfunk](#).
- Huawei (2024). Huawei OptiXstar P613E-E ONU Datasheet.
<https://e.huawei.com/en/products/optical-terminal/optixstar-p613e-e>. Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Huawei (2024). Huawei SmartAX MA5801-FL16 Datasheet.
<https://e.huawei.com/en/products/optical-access/ma5801-fl16?section=specification>.
Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Lannoo, B., Dixit, A., Lambert, S., Colle, D. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks. *Photonic Network Communications* 30(1). DOI:[10.1007/s11107-015-0504-4](https://doi.org/10.1007/s11107-015-0504-4).
- Leadersnet (2023). So viele Glasfaserkilometer gibt es in Ihrem Bundesland.
<https://www.leadersnet.at/news/71185,so-viele-glasfaserkilometer-gibt-es-in-ihrem-bundesland.html>. Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Moayeri, B. (2024). Die immer noch unterschätzten IT-Energiekosten. Der Netzwerk Insider. Abrufbar unter: <https://www.comconsult.com/wp-content/uploads/2024/05/in2406.pdf>.
Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Nokia (2024). Nokia Siemens Networks Multi-Service IP DSLAM Surpass hiX 5625 (Chasis M400) Release 2.7.
- Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangsnetz-Technologien.
- Plückebaum, T. (2023):. Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, wik [WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 498](#), Bad Honnef, Mai 2023.
- Raspone, D., Sabella, D., Fodrini, M. (2015). Energy Efficiency Solutions for the Mobile Network Evolution Towards 5G: an Operator Perspective. DOI: [10.1109/SustainIT.2015.7101367](https://doi.org/10.1109/SustainIT.2015.7101367).
- RTR (2024). Internet Monitor Jahresbericht 2023. [RTR Internet Monitor](#).
- Statista (2023). Anteil der Internetnutzer in Österreich von 1996 bis zum 1. Halbjahr 2023. Stand: 05.09.2024, 10:56.
- Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobilfunk>.

- Umweltbundesamt (2023). Österreichische Treibhausgas-Emissionsfaktoren. Harmonisierte österreichische direkte und indirekte THG-Emissionsfaktoren für relevante Energieträger & Technologien, Datenstand: 2023, [REP-0888](#), Wien.
- Wagner, G. (2023). 5G-Mobilfunksysteme mit hohem Energiesparpotenzial. Abrufbar unter: <https://fmk.at/5g-mobilfunksysteme-mit-hohem-energiesparpotenzial/>. Zuletzt besucht: 08.11.2024.
- Wang, K., Kihl, M., Gavler, A., Du, M., & Lagerstedt, C. (2015). Power Consumption Analysis of FTTH Networks. In 10th International Conference on Digital Telecommunications IARIA.
- Zoz et. al (2021). Costs of Very High Capacity Networks and Geographic Heterogeneity – a statistical assessment for Germany. [WIK Working Paper Nr. 4](#).

Annex

Tabelle 3: Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi zentraler Equipment nach Technologie

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTEx	HCF	Cube	Hybrid
Full-Load Zeit (% Tag)	15%	./.	./.	15%	15%	./.	./.	./.
Low-Power Zeit (% Tag)	60%	./.	./.	60%	60%	./.	./.	./.
Stand-by Zeit (% Tag)	25%	./.	./.	25%	25%	./.	./.	./.

Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von Lannoo, B. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks, S. 5 und Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht, S. 91.

Tabelle 4: Nutzungsintensität: Annahmen über die Nutzungszeit unterschiedlicher Betriebsmodi Network Termination nach Technologie

	FTTH PtP	FTTH PtMP	FTTB	FTTC	FTTEx	HCF	Cube	Hybrid
On-State Zeit (% Tag)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Ready-State Zeit (% Tag)	8%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Sleep-Mode Zeit (% Tag)	77%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%

Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von Lannoo, B. (2015). How Sleep Modes and Traffic Demands Affect the Energy Efficiency in Optical Access Networks, S. 5 und 11, Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland – Abschlussbericht, S. 91, EU Joint Research Centre (2024). Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: Version 9.0 und Statista (2023). Anteil der Internetnutzer in Österreich von 1996 bis zum 1. Halbjahr 2023. Stand: 05.09.2024, 10:56.

Tabelle 5: Technische Angaben verwendeter zentraler Equipment nach Technologie

	Anzahl Ports [#]	Bandbreite [Gbps/ Port]	Full-Load [W/ Port]	Low-Power [W/ Port]	Stand-by [W/Port]
FTTH PtP OLT Ethernet 1G	480	1	1,7	1,13*	1,13*
FTTH PtMP OLT XGS.PON	48	10	6,5	./.	./.
FTTB DPU G.Fast 212a	4	<2	7,0	./.	./.
FTTC DSLAM VDSL2 35b	384	<1	1,9	1,0	0,5
FTTEx DSLAM VDSL2 8b	384	<1	1,0	0,6	0,5
DOCSIS CMTS CCAP	64		32	./.	./.
DOCSIS Fiber Node	1		72	./.	./.
DOCSIS Amplifier	1		56,3	./.	./.

Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von EU Joint Research Centre (2024). Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: Version 9.0 und Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangsnetz-Technologien.

Tabelle 6: Technische Angaben verwendeter Network Termination nach Technologie

	On-State [W/ Port]	Ready-State [W/ Port]	Sleep-Mode [W/Port]
FTTH PtP Ethernet 1G	4,0	3,4	0,16*
FTTH PtMP XGS.PON	4,5	3,4	0,09
FTTB G.Fast 212a	4,7	4,4	4,4.
FTTC VDSL2 32b	4,0	3,8	3,8
FTTEx ADSL2+	2,2	2,0	2,0
DOCSIS 3.1	11,9	8,5	8,5
Cube 4G	3,6	3,0	3,0
Hybrid (4G + VDSL 35b)	6,2	5,6	5,6

Quelle: WIK. Eigene Darstellung auf Basis von EU Joint Research Centre (2024). Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: Version 9.0 und Obermann, K. (2022). Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangsnetz-Technologien.