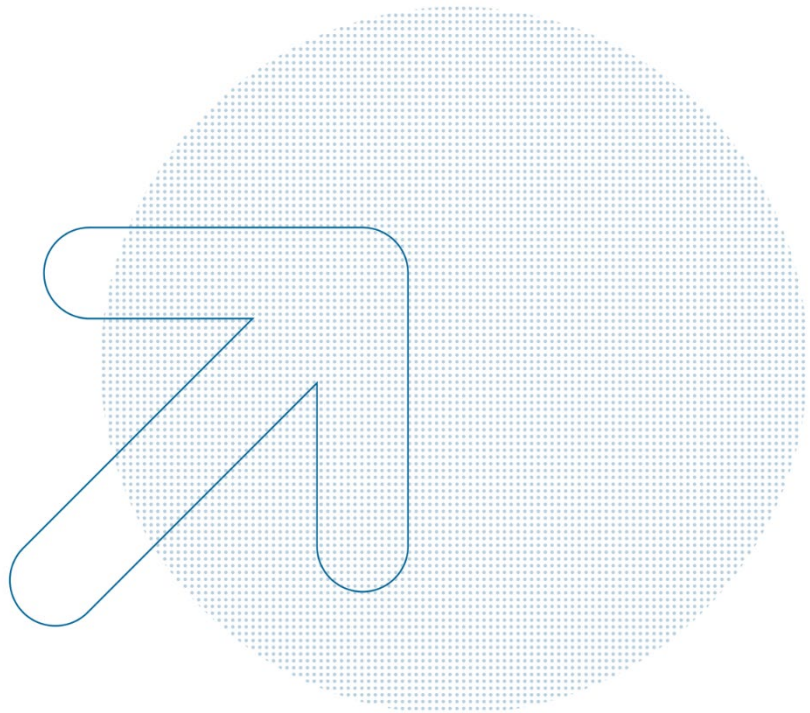


WIK-Consult & zafaco • Gutachten

für die Bundesnetzagentur



Überprüfung der Eignung verschiedener Technologien zur Erbringung der Grundversorgung

Autoren:

Dr. Gabriele Kulenkampff (wik)

Dr. Thomas Plückebaum (wik)

Oliver Portugall (zafaco)

Martin Ockenfels (wik)

Prof. Dr. Jörg Ott

Constantin Eiling (zafaco)

Bad Honnef, 02. Februar 2024



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	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



zafaco GmbH
Münchener Str. 101/39
85737 Ismaning
Deutschland
Tel.: +49 89 820308 200
Fax: +49 89 820308 299
E-Mail: info@zafaco.de
www.zafaco.de

Geschäftsführende Gesellschafter:

Gründer und Geschäftsführer	Christoph Sudhues
Geschäftsführer Technik	Bernd Oliver Schöttler
Handelsregister	Amtsgericht München, HRB 174425
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 260 524 045

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Executive Summary	i
1 Zielsetzung und Aufbau des Gutachtens	1
2 Leitungsgebundene Technologien	3
2.1 Kupferdoppeladerbasierte und hybride Anschlussstechnologien	4
2.1.1 ADSL-basierte Technologien	6
2.1.2 VDSL-basierte Technologien	12
2.1.3 Bonding und Phantoming bei rein kupferbasierten Anschlusslinien	20
2.1.4 (X)G.fast-basierte Technologien	22
2.1.5 Zusammenfassung kupferdoppeladerbasierter Anschlussnetze	27
2.2 Koaxialkabelbasierte und hybride Anschlussstechnologien	28
2.2.1 DOCSIS 2.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlussstechnologie und konkrete Ausprägungsformen der Qualitätsparameter	31
2.2.2 DOCSIS 3.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlussstechnologie und konkrete Ausprägungsformen	32
2.2.3 DOCSIS 3.1-Technologien – Charakterisierung der Anschlussstechnologie und konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter	34
2.2.4 DOCSIS 4.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlussstechnologie und konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter	35
2.2.5 Zusammenfassung koaxialkabelbasierte und hybride Anschlussnetze	37
2.3 Glasfaserbasierte Anschlussstechnologien	38
2.3.1 FTTH-x.PON-basierte Technologien	40
2.3.2 FTTH-Ethernet PtP-basierte Technologien	44
2.3.3 Zusammenfassung glasfaserbasierter Anschlussnetze	45
2.4 Zusammenfassung über alle leitungsgebundenen Technologien	47
3 Satellitengestützte Technologien	48
3.1 Allgemeine Eigenschaften satellitengestützter Technologien	49
3.2 Geostationary Earth Orbit – Realisierungen (GEO)	52
3.3 Medium Earth Orbit – Realisierungen (MEO)	54

3.4 Low Earth Orbit – Realisierungen (LEO)	55
4 Mobilfunkgestützte Technologien	73
4.1 Allgemeine Eigenschaften mobilfunkgestützter Technologie	74
4.1.1 Netzkomponenten und Aufbau mobilfunkgestützter Technologie	74
4.1.2 Technologie, Frequenz und Erstreckung als Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit von Mobilfunktechnologien	75
4.1.3 Verfügbares Spektrum als Bestimmungsfaktor der Leistungsfähigkeit	79
4.1.4 Exogene Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit	80
4.1.5 Sharing in Mobilfunknetzen	80
4.2 2G – Realisierungen	80
4.3 3G – Realisierungen	82
4.4 4G – Realisierungen	84
4.5 5G – Realisierungen	86
4.6 FWA 92	
4.7 WIMAX	94
4.8 Richtfunk	95
4.9 High Altitude Platform Systems (HAPS)	96
5 Analyse der technischen Rahmenbedingungen (AP4)	99
5.1 Leistungsfähigkeit der Technologien im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen	99
5.2 Verfügbarkeit und Maßnahmen zur Erfüllung der Mindestanforderungen	101
5.2.1 Leitungsgebundene Technologien	101
5.2.2 Satellitengestützte Technologien	108
5.2.3 Mobilfunkgestützte Technologien	111
6 Fazit	117
Literatur	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Frequenzbelegung auf Kupferdoppeladern des Telefonanschlussnetzes	5
Abbildung 2-2:	FTTEx, (Fibre to the Exchange, Glasfaser bis zum HVT, Kupferdoppelader als Anschlussleitung	7
Abbildung 2-3:	Ergebnisse der Datenübertragungsraten von ADSL-Anschlüssen mit Datenübertragungsraten von bis zu 8 Mbps im Downstream in Abhängigkeit der Länge der Kupferdoppelader (in UK 2008)	9
Abbildung 2-4:	Leistungs- / Reichweiteverhältnis bei kupferbasierten Übertragungstechnologien auf Basis von Labormessungen verschiedener xDSL-Protokolle	11
Abbildung 2-5:	Verteilung der Anschlussleitungslängen in Westdeutschland	12
Abbildung 2-6:	FTTC (Fibre to the Curb)	13
Abbildung 2-7:	Datenübertragungsrate von VDSL-Profil 17a und 35b (=Annex Q) im Vergleich	15
Abbildung 2-8:	Funktionsweise von Vectoring	16
Abbildung 2-9:	Gewinn der Datenübertragungsrate durch Vectoring auf den einzelnen Doppeladern eines Anschlusskabels bei 500 m Länge	17
Abbildung 2-10:	Degression der Datenübertragungsrate durch nicht ins Vectoring eingebundene Anschlussleitungen	18
Abbildung 2-11:	Reichweitenverlängerung durch Vectoring	19
Abbildung 2-12:	Phantomung summiert parallele physische und virtuelle Kanäle zu einer Gesamtkapazität	21
Abbildung 2-13:	Netzstruktur von (X)G.fast	23
Abbildung 2-14:	Bandbreiten-Gewinn bei G.fast	24
Abbildung 2-15:	Bandbreiten von G.fast, VDSL-Profil 35b und 17a im Vergleich über die Anschlussleitungslänge	24
Abbildung 2-16:	VDSL, G.fast und XG.fast parallel im Inhausbereich	26
Abbildung 2-17:	Struktur der TV-Kabel Netze (DOCSIS)	30
Abbildung 2-18:	Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.0	33
Abbildung 2-19:	Typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 im Vergleich	35
Abbildung 2-20:	Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.1 FD/ DOCSIS 4.0	36
Abbildung 2-21:	Struktur der Glasfaseranschlussnetze PtP und PtMP	39

Abbildung 2-22:	Frequenzplan der verschiedenen optischen Übertragungsverfahren im Anschlussnetz und im Weitverkehrsnetz	42
Abbildung 2-23:	Vom Upgrade betroffene Systeme bei x.PON (und Ethernet PtP)	43
Abbildung 3-1:	Übersicht über ein Satellitensystem	50
Abbildung 3-2:	Verfügbare Kapazität durch GEO-Satelliten	54
Abbildung 3-3:	Visualisierung der Abdeckung eines LEO-Satelliten	56
Abbildung 3-4:	Beispiel: LEO-Satelliten von drei verschiedenen Konstellationen der Tabelle 3-4	57
Abbildung 3-5:	Konnektivität innerhalb eines LEO-Systems	58
Abbildung 3-6:	Simulationsbasierte Bestimmung der Ausleuchtungszonen der Starlink-Satelliten mit 53° Inklination**	60
Abbildung 3-7:	Verfügbare Kapazität durch LEO-Satelliten	62
Abbildung 3-8:	Messungen der Umlaufzeit über Starlink von einem Satellitenterminal zu verschiedenen Messpunkten in Europa, Singapur und den USA (oben) und nur in Europa (unten)	66
Abbildung 3-9:	Umlaufzeit für Starlink-Satellitenterminals nach einem M-Lab-Datensatz: oben (aggregiert) und unten (Minima über die Zeit)	67
Abbildung 3-10:	Durchsatzmessungen für Datenraten im Up- und Downlink von einem Starlink-Terminal in Belgien zu Ookla Speedtest-Servern	68
Abbildung 3-11:	Durchsatzmessungen für Datenraten im Up- und Downlink aus Messdaten des M-Lab, kumulativ (oben) und über die Zeit (Mitte, unten)	69
Abbildung 3-12:	Schwankungen der Starlink-Leistungsmerkmale eines Satelliten-Terminals in der EU (RTT, oben) und zweier Satelliten-Terminals in DE und UK (RTT und Datenraten, unten)	70
Abbildung 4-1:	Darstellung Mobilfunk allgemein	74
Abbildung 4-2:	Zusammenhang Frequenz-Reichweite am Beispiel 5G	75
Abbildung 4-3:	Mit zunehmendem Abstand von der Zellmitte (Antenne) abnehmende Bandbreite	75
Abbildung 4-4:	Okumura-Hata-Kurve 700 MHz, 50W	77
Abbildung 4-5:	Abschätzung der Reichweite zur Erzielung der in der TKMV vorgegebenen Datenübertragungsraten (10 Mbps Downstream und 1,7 Mbps Upstream)	78
Abbildung 4-6:	Qualitativer Zusammenhang zwischen Datenrate und Reichweite	79

Abbildung 4-7: Abschätzung der Reichweite zur Erzielung der in der TKMV vorgegebenen Datenübertragungsraten (10 Mbps downstream und 1,7 Mbps upstream)	86
Abbildung 4-8: 5G Non-Stand-Alone (NSA) und Stand-Alone (SA)	87
Abbildung 4-9: Kommunikationscharakteristika von 5G-Anwendungen	88
Abbildung 4-10: Aktuelle relevante 5G-Frequenzen in Deutschland	89
Abbildung 4-11: Einsatzgebiete der verschiedenen 5G-Frequenzbereiche	90
Abbildung 4-12: Reichweiten und Datenübertragungsraten des Richtfunks	95
Abbildung 4-13: HAPS und sein Footprint	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Unterschiedliche ADSL-Übertragungsverfahren	10
Tabelle 2-2:	Übliche VDSL-Profile	14
Tabelle 2-3:	Vergleich aller kupferbasierten breitbandigen Übertragungstechniken des Anschlussnetzes	28
Tabelle 2-4:	DOCSIS 1.0 bis 3.0 in der Übersicht	33
Tabelle 2-5:	Übersicht der koaxialkabelbasierten Anschlussnetztechniken (DOCSIS)	38
Tabelle 2-6:	x.PON Systemübersicht	40
Tabelle 2-7:	Übersicht der glasfaserbasierten Anschlussnetztechniken	46
Tabelle 2-8:	Übersicht über alle leitungsgebundenen Technologien	47
Tabelle 3-1:	Versorgung mit Breitband aus dem Weltraum	52
Tabelle 3-2:	Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit GEO-Satelliten	53
Tabelle 3-3:	Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit MEO-Satelliten	55
Tabelle 3-4:	Beispiele für LEO-Satellitenkonstellationen	59
Tabelle 3-5:	Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit LEO-Satelliten	61
Tabelle 3-6:	Geschätzt für den Universaldienst verfügbare Kapazitäten aller erdnahen Satelliten über Deutschland	64
Tabelle 4-1:	Qualitätsparameter 2. Mobilfunkgeneration	82
Tabelle 4-2:	Qualitätsparameter 3. Mobilfunkgeneration	83
Tabelle 4-3:	Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration	85
Tabelle 4-4:	Anwendungsbeispiele für die Anforderungen an 5G-Netze	88
Tabelle 4-5:	Qualitätsparameter 5. Mobilfunkgeneration	92
Tabelle 4-7:	Qualitätsparameter WIMAX	95
Tabelle 4-8:	Qualitätsparameter Richtfunk	96
Tabelle 4-9:	Qualitätsparameter HAPS	98
Tabelle 5-1:	Vergleich aller kupferbasierten breitbandigen Übertragungstechniken des Anschlussnetzes	102
Tabelle 5-3:	Übersicht der glasfaserbasierten Anschlussnetztechniken	105
Tabelle 5-4:	Übersicht der koaxialkabel-basierten Anschlussnetztechniken (DOCSIS)	106

Tabelle 5-5:	Übersicht möglicher Maßnahmen zur Beeinflussung der Verfügbarkeit DOCSIS-basierender Technologien zur Erbringung des Universaldienstes	108
Tabelle 5-6:	Übersicht über LEO- und MEO-Satellitensysteme	109
Tabelle 5-7:	Qualitätsparameter 2. Mobilfunkgeneration	111
Tabelle 5-8:	Qualitätsparameter 3. Mobilfunkgeneration	112
Tabelle 5-9:	Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration	112
Tabelle 5-10:	Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration	113
Tabelle 5-11:	Qualitätsparameter 5. Mobilfunkgeneration	114
Tabelle 5-12:	Übersicht möglicher Maßnahmen zur Beeinflussung der Verfügbarkeit Mobilfunk-basierender Technologien zur Erbringung des Universaldienstes	116

Abkürzungsverzeichnis

2G	Zweite Mobilfunkgeneration
3G	Dritte Mobilfunkgeneration
4G	Vierte Mobilfunkgeneration
5G	Fünfte Mobilfunkgeneration
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
ANSI	American National Standards Institute
asym	asymmetrisch
BIPT	Belgisches Institut für Postdienste und Telekommunikation
BNG	Broadband Network Gateway
BW	Bandwidth
Bzw.	Beziehungsweise
CA	Carrier Aggregation
CMTS	Cable Modem Termination System
COAX	Koaxialkabel (auch KOAX)
CPE	Customer Premise Equipment
CSD	Circuit Switched Data
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
d. h.	das heißt
DA	Doppeladern
dB	Dezibel
dBm	Dezibel bezogen auf Milliwatt
DNS	Domain Name Server
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification

DPU	Drop Point Unit
DS	Downstream
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DTAG	Deutsche Telekom AG
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FD	Full Duplex
FTTB	Fibre to the Building
FTTC	Fibre to the Curb
FTTdp	Fibre to the distribution point (auch FTTS)
FTTE	Fibre to the Exchange (auch FTTE _x oder FTTN)
FTTH	Fibre to the Home
FTTS	Fibre to the Street (auch FTTdp)
FWA	Fixed Wireless Access
Gbps	Gigabit pro Sekunden (auch Gbit/s)
GEO	Geostationary Earth Orbit Satelliten
GHz	Gigahertz
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GS	Ground Station
GSM	Global System for Mobile Communications
HAPS	High Altitude Platform Stations

HFC	Hybrid Fibre Coax
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
http	hypertext transfer protocol
https	hypertext transfer protocol secure
HVt	Hauptverteiler
Hz	Hertz
i. d. R.	in der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated services digital network
ISL	Inter Satellite Link
ISO	Internationale Organisation für Normung (International Standards Organisation)
ITU	International Telecommunication Union
IXP	Internet Exchange Point
Kat	Kategorie
Kbps	Kilobit pro Sekunde (auch Kbit/s)
kHz	Kilohertz
Km	Kilometer
Koax	Koaxialkabel (auch COAX)
KVz	Kabelverzweiger
LEO	Low Earth Orbit Satelliten

LTE	Long Term Evolution
m	Meter
Max.	Maximal
Mbps	Megabit pro Sekunde (auch Mbit/s)
MEO	Medium Earth Orbit Satelliten
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive Machine Type Communication
MPoP	Metropolitan Point of Presence
ms	Millisekunde
MSAN	Multiservice Access Node
NGN	Next Generation Network
NGOA	Next Generation Optical Access
NG-PON	New Generation Passive Optical Network
NR	New Radio
Nr.	Nummer
NSA	Non Stand Alone
ODF	Optical Distribution Frame
OFCOM	Office of Communications
OLT	Optical Line Terminator
ONU	Optical Network Unit
PEP	Performance Enhancing Proxies
PON	Passive Optical Network
POP	Point of Presence

POTS	Plain old telephone service
PSTN	Public Switched Telephone Network
PtMP	Point to Multipoint
PtP	Point to Point
QUIC	Quick UDP Internet Connections
RAN	Radio Access Network
RFoG	Radio Frequency over Glass
SA	Stand Alone
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SFP	Small Form-factor Plugable
SMS	Short Message Service
STP	Shielded Twisted Pair Kabel
sym	symmetrisch
Sym.	Symmetrie
TAL	Telefon Anschluss Linie
TCP	Transmission Control Protocol
TKMV	Verordnung über die Mindestanforderungen für das Recht auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten
TV	Television
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
u. U.	unter Umständen
UDP	User Datagram Protocol
UK	United Kingdom
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

uRLLC	ultra Reliable Low Latence Communication
US	Upstream
UTP	Unshielded Twisted Pair Kabel
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
Vgl.	Vergleiche
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
VZK	Verzweigerkabel
W	Watt
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WIK	Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
XG.fast	10 Gigabit Fast access to subscriber terminals
XG-PON	10 Gigabit Passive Optical Network
XGS-PON	10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network
z. B.	zum Beispiel

Executive Summary

Mit Inkrafttreten des novellierten Telekommunikationsgesetzes (TKG) am 1. Dezember 2021 hat der Gesetzgeber das individuelle Recht auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten zu einem erschwinglichen Preis geschaffen. Es handelt sich dabei um die Umsetzung der auch den Universaldienst in der Telekommunikation betreffenden Richtlinie (EU) 2018/1972 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.12.2018 über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation in nationales Recht.

Das Recht auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten sieht einen individuellen Anspruch auf Erbringung eines Sprachkommunikationsdienstes und eines Internetzugangsdienstes zu einem erschwinglichen Preis für eine angemessene soziale und wirtschaftliche Teilhabe vor (§ 157 Abs. 2 TKG). Die Anforderungen an diese Dienste wurden 2022 erstmals in der Telekommunikationsmindestversorgungsverordnung (TKMV) festgelegt. Die Verfügbarkeit eines Mindestangebotes an Telekommunikationsdiensten wird von der Bundesnetzagentur in regelmäßigen Abständen überwacht (§ 157 Abs. 1 TKG).

Das Gutachten steht im Kontext der TKMV-Evaluation durch die BNetzA. Es soll untersuchen, unter welchen Voraussetzungen unterschiedliche Übertragungstechnologien die in der TKMV festgelegten Werte für die Datenübertragungsrate im Down- und Upload sowie die Latenz in welchem Maß erfüllen können. Es werden dazu die folgenden Übertragungstechnologien untersucht:

- leitungsgebundene Lösungen
- satellitengestützte Lösungen
- mobilfunkgestützte Lösungen

Die leitungsgebundenen Lösungen bauen entweder auf dem ursprünglichen Telefonnetz aus Kupferdoppeladern auf, die mit breitbandgeeigneten Übertragungssystemen (xDSL) beschaltet werden, oder auf den bestehenden Koaxialkabeln des Kabel-TV-Netzes, die für die bidirektionale breitbandige Übertragung mit entsprechenden Übertragungssystemen (DOCSIS) beschaltet werden, oder auf neu ausgebauten Glasfaseranschlusssystemen. Für letztere gibt es zwei Ausbaumformen (Topologien): Punkt-zu-Punkt (PtP) und Punkt-zu-Multipunkt (PtMP). Die PtP-Variante bietet eine ungeteilte individuelle Glasfaser je Endkunde bis zur Schaltzentrale, die PtMP-Variante vereinigt viele Fasern auf dem Weg zur Schaltzentrale über sogenannte Splitter auf eine einzige weiterführende Faser. Dies bedingt eine spezielle Übertragungstechnologie, xPON genannt.

Bei den kupferdoppeladerbasierten Lösungen werden z.T. noch alte Übertragungstechniken (z. B. ADSL und ADSL2) eingesetzt, die eine Mindestversorgung nicht sicherstellen können. Beeinträchtigt wird die Leistungsfähigkeit dieser Technologien von elektromagnetischen Störungen aus benachbarten Adern desselben Kabels. Auch spielt die Länge der Anschlussleitungen eine wesentliche Rolle. Generell kann man jedoch feststellen, dass in Deutschland eine Vielzahl von Anschlüssen, die auf Kupferdoppeladern basieren,

die derzeit festgelegten Mindestversorgungsansprüche erfüllen können. Bei Anschlüssen, die diese Anforderungen nicht erfüllen, können ggf. Nachrüstungen in der Technik und im Anschlussleitungsnetz die bestehenden Defizite hinsichtlich der Datenübertragungsraten beheben. Derartige Investitionen entsprechen jedoch nicht dem Stand der Technik. Sofern es zu einer Steigerung der Mindestanforderungen käme, wären ggf. weitere Nachinvestitionen unvermeidbar. Beispielsweise wäre bei einer Steigerung der Mindestanforderung auf über 16 Mbps im Downstream die Verwendung von Vectoring-Technologien unvermeidbar. Bei einer Steigerung bis zu 16 Mbps können bei ADSL2+ z. B. leitungsverkürzende Schaltverteiler aufgebaut werden, um so die Datenübertragungsrate zu unterstützen, oder aber es erfolgt eine Umrüstung auf eine andere Technologie.

Koaxialkabel sind grundsätzlich für die Breitbandübertragung gut geeignet. Sie wurden ursprünglich über ein gemeinsames Koaxialkabel für viele Teilnehmer zum Verteilen von Radio- und Fernsehsignalen ausgebaut. Derartige Lösungen bekommen u. U. Probleme mit der Erfüllung der Mindestversorgungsansprüche, wenn alte Technik-Stände verbaut sind (DOCSIS 2.0 oder älter) oder auch, wenn die Koaxialkabelinseln noch eine hohe Teilnehmerzahl (z. B. 1.000 Teilnehmer bei DOCSIS 3.0) aufweisen, sich also viele Teilnehmer ein Anschlusskabel teilen (sog. Shared-Medium-Problematik). Hier bieten sich ggf. Anpassungen im Netz durch Wechsel auf neuere Systeme und kleinere Kabelinseln an.

Bei Glasfaseranschlussnetzen steht das Einhalten einer Mindestversorgung nach derzeitiger Festlegung nicht in Frage. Dies gilt für beide Glasfasertopologien, Punkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Multipunkt. Mit wachsenden Ansprüchen an die Mindestversorgung könnte es jedoch zukünftig beim Einsatz älterer Systeme (z. B. GPON) auf Punkt-zu-Punkt-Topologien zu einer Unterversorgung kommen. Abhilfe böte hier ggf. ein Technik-Upgrade auf eine neuere Gerätegeneration oder ein Umbau des Glasfasernetzes (z. B. durch eine Verringerung des Splittingverhältnisses oder einen Punkt-zu-Punkt-Ausbau im Feederkabelbereich, zur Vermeidung der Shared-Medium-Problematik).

Mobilfunknetze älterer Generation (z. B. 2G) sind für die Erfüllung der Ansprüche der Mindestversorgung im Allgemeinen und großflächig nicht geeignet. Je höherwertiger die Übertragungstechnologie, je höher die verwendete Frequenz, je intelligenter die Antennentechnik und je kleiner die Funkzelle, desto besser können die Mindestversorgungsansprüche erfüllt werden (z. B. 4G und 5G). Die Beurteilung einer Mindestversorgung und deren Abhilfemaßnahmen hängt immer von der konkreten Situation vor Ort ab. Letztlich bestimmt die Zahl der gleichzeitig aktiven Nutzer eines Funkzellsegmentes und deren Kommunikationsverhalten, wieviel Datenübertragungsrate dem einzelnen Nutzer zur Verfügung steht (Shared-Medium-Problematik). Entsprechend handelt es sich hier vielmehr um ein statistisches und weniger um ein technisches Phänomen, welches die Einhaltung der Mindestanforderungen bestimmt.

Die Mindestversorgung über hoch fliegende Satelliten (GEO und MEO) scheitert an der hohen Latenz derartiger Verbindungen. Niedrig fliegende Satelliten (LEO) haben eine

geringere, aber deutlich schwankende Latenz. Sie ermöglichen dennoch in Einzelfällen eine TKMV-konforme Versorgung, nicht jedoch flächendeckend. Auch hier kommt es auf die Zahl der versorgten Nutzer an, die gleichzeitig auf die angebotene Übertragungskapazität zugreifen (Shared-Medium-Problematik).

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Technologien, die Mindestanforderungen für den Internetzugang der Grundversorgung zu erfüllen, immer bedingte Aussagen sind. Bei Kupfernetzen entscheiden insbesondere die jeweiligen technischen Ausprägungen der Leitung darüber (insb. die Länge und der Durchmesser), ob die vorgegebenen Datenübertragungsraten erreicht werden können. Dies ist von der Doppelader eines Kabels zu einer anderen Doppelader desselben Kabels, von Kabel zu Kabel und von Standort zu Standort unterschiedlich, so dass sich generelle Aussagen über Beeinträchtigungen nicht vorhersagen lassen, nicht einmal prozentual. Dies wird verstärkt durch das nichtlineare Verhalten der nutzbaren Frequenzbänder und der sich daraus ergebenden Datenübertragungsraten auf den Kupferdoppeladern. Bei den anderen Technologien – mit Ausnahme von PtP-Glasfaseranschlüssen – ist die Gleichzeitigkeit der Nutzung und die Zahl der Nutzer von entscheidender Bedeutung, ob die Mindestdatenübertragungsraten regelmäßig zur Verfügung stehen und die Dienste stets erfüllt werden können. Daher kommt es auf die konkrete Situation vor Ort an, bis hin zum Nutzungsgrad und Nutzungsverhalten weiterer Teilnehmer des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums. Dies ist im Grenzfall nicht prognostizierbar. Ein Monitoring der lokalen Netzauslastung und eine standortbezogene Dimensionierung von Kapazitäten erlaubt es den Netzbetreibern dennoch, innerhalb technischer und ökonomischer Grenzen eine Verfügbarkeit zumindest statistisch zu gewährleisten. Prozentangaben der Verfügbarkeit in Stufen lassen sich auf Basis von rein technischen Bestimmungsfaktoren nicht ableiten.

1 Zielsetzung und Aufbau des Gutachtens

Das Gutachten soll feststellen, unter welchen Voraussetzungen unterschiedliche Übertragungstechniken die in der TKMV festgelegten Werte für die Download- und Upload-Datenübertragungsrate sowie die Latenz in welchem Maß erfüllen können. In diesem Gutachten werden die folgenden Übertragungstechnologien untersucht:

- leitungsgebundene Lösungen
- satellitengestützte Lösungen
- mobilfunkgestützte Lösungen

Diese werden in unterschiedliche Ausprägungsformen unterteilt, die in den nachfolgenden Kapiteln des Gutachtens jeweils spezifisch zu den Übertragungsmedien und -technologien weiter untergliedert werden. Denn abhängig von den Übertragungsmedien und Technologien zur Realisierung des Internetzugangs ergeben sich ganz unterschiedliche Qualitätscharakteristika im Hinblick auf Datenübertragungsrate und Latenz. Da dieses Gutachten auf die Leistungsfähigkeit der Anschlusslinie (leitungs- oder funkbasiert) fokussiert, kann eine eindeutige Aussage lediglich für eine Verletzung der in der TKMV definierten Grenzwerte herausgearbeitet werden. Eine positive Antwort auf die Frage, ob der Grenzwert von 150 ms eingehalten werden kann, bedarf letztlich der Berücksichtigung der weiteren Netzsegmente bis zum Referenzmesspunkt, wie in § 1 TKMV vorgegeben – was jedoch nicht Gegenstand dieses Gutachtens ist.

In Abschnitt 2 werden zunächst die leitungsgebundenen Technologien beschrieben und deren Qualitätsparameter hinsichtlich Datenübertragungsrate und Latenz bewertet. Diese Bestandsaufnahme ist untergliedert nach kupferdoppeladerbasierten Technologien, koaxialkabelbasierten Technologien und glasfaserbasierten Technologien. Danach wird die grundsätzliche Eignung bezüglich der Mindestanforderungen der TKMV bewertet. In Abschnitt 3 werden die satellitengestützten Technologien beschrieben und deren Qualitätsparameter hinsichtlich Datenübertragungsrate und Latenz bewertet. Diese Bestandsaufnahme ist untergliedert nach Geostationary Earth Orbit (GEO), Medium Earth Orbit (MEO) und Low Earth Orbit (LEO). Danach wird die grundsätzliche Eignung bezüglich der Mindestanforderungen der TKMV bewertet. In Abschnitt 4 werden die mobilfunkgestützten Technologien beschrieben und deren Qualitätsparameter hinsichtlich Datenübertragungsraten und Latenz bewertet. Diese Bestandsaufnahme untergliedert sich nach den Mobilfunkgenerationen 2G bis 5G. Danach wird die grundsätzliche Eignung bezüglich der Mindestanforderungen der TKMV bewertet.

Auf Grundlage der Bestandsaufnahme und Einordnung der jeweiligen Technologien wird in Abschnitt 5, unter Betrachtung der derzeit geltenden technischen Mindestanforderungen der TKMV zusammengefasst, welche Technologien für die Erbringung einer Grundversorgung geeignet sind. Es erfolgt für jede Technologie (gruppiert nach: leitungsgebun-

den, satellitengestützt, mobilfunkgestützt) eine separate Darstellung. Es wird herausgestellt, welche Technologien die Voraussetzungen der TKMV unterschreiten. Weiterhin wird für jede Technologie erarbeitet, welche grundsätzlich zur Erfüllung der Anforderungen der TKMV geeignet ist bzw. welche Maßnahmen den Rand der Erfüllung weiter vergrößern könnten.

2 Leitungsgebundene Technologien

Grundsätzlich lassen sich leitungsgebundene Netze auf Basis der eingesetzten Übertragungsmedien klassifizieren, weil diese ganz wesentlich die Übertragungsqualitäten bestimmen und dies die Hauptbestimmungsgröße für den Universaldienst ist, nämlich über die Mindestanforderungen an Übertragungsqualität. Die unterschiedlichen Übertragungsmedien des leitungsgebundenen Netzes haben sich erst nach und nach bedarfsorientiert entwickelt. Diese Entwicklungsstufen kommen in dem jeweiligen Technologieansatz zum Ausdruck, den wir als primäres Unterscheidungskriterium heranziehen:

- Netze auf Kupferdoppeladern bis zum Endkunden
- Netze auf Koaxialkabeln bis zum Endkunden
- Netze auf Glasfasern bis zum Endkunden

Anschlussnetze auf Basis von festen Funkverbindungen (FWA, Fixed Wireless Access, oder Richtfunk) zählen wir zwar zu den Festnetzen, aber nicht zu den leitungsgebundenen Netzen. In dieser Studie betrachten wir diese Technologien wegen ihrer Verwandtschaft zu den Mobilfunknetzen mit diesen gemeinsam (Kapitel 4).

Ein ergänzend wichtiges Kriterium ist, ob sich bei der im Grundsatz ja immer beschränkten Kapazität einer Anschlusslinie mehrere Teilnehmer eine Anschlusslinie teilen und damit auch um die verfügbare Datenübertragungsrate dieser Anschlusslinie konkurrieren, d. h. im Mittel nicht über deren volle Kapazität verfügen können. Dieses Problem ist auch als Sharing bekannt. Es kommt bei den klassischen Kupferdoppeladern eher selten vor und hat dort heute keine Marktrelevanz mehr, ist jedoch in den Koaxialkabelnetzen die Regel, denn diese Netze wurden ursprünglich für das gleichzeitige Verteilen von Radio- und Fernseh-Signalen an viele Teilnehmer gleichzeitig errichtet. Eine individuelle bidirektionale Übertragung wurde erst später mit der DOCSIS-Technik ergänzt. Bei Glasfasernetzen wurde zuerst wie in der Welt der Kupferdoppeladern die Glasfaser Punkt-zu-Punkt ausgebaut. Später erst kam die Idee auf, Glasfasern im Hauptkabelsegment (Feeder) zu sparen, indem man die ja große und von den Kunden noch nicht nachgefragte Kapazität mit vielen Kunden teilt, in etwa analog zur DOCSIS-Technologie. Die zur Bewirtschaftung der einen über einen Splitter geteilten Glasfaser eingesetzte Technologie wird oft als PON oder GPON bezeichnet. Das Phänomen der geteilten Nutzung eines Übertragungskanals kommt auch bei vielen Funknetzen vor. Daher behandeln wir die Aspekte des Sharing gemeinsam in Arbeitspaket 4, d.h. im Kapitel 5.1.

Für eine detailliertere Übersicht über leitungsgebundene Anschlussnetze auf Kupferdoppeladern oder Glasfasern verweisen wir auch auf den WIK Diskussionsbeitrag Nr. 493 (2022), das WIK Workingpaper No. 5 (2022) und den WIK Diskussionsbeitrag Nr.498 (2023).¹

¹ Zuloaga, G. et al. (2022); Zuloaga, G. & Plückebaum, T. (2022); Plückebaum, T. (2023).

2.1 Kupferdoppeladerbasierte und hybride Anschlussstechnologien

Das bestehende Telekommunikationsnetz ist ursprünglich für die analoge Telefonie über mehr als ein Jahrhundert hinweg errichtet worden. Die dort übertragenen Bandbreiten reichten bis zu 3,4 KHz. Auch für die nachfolgende digitale ISDN-Übertragung von Daten und Sprache waren diese Netze mehr als ausreichend. Andere Kupferkabel als die aus ungeschirmten Telefondrähten gibt es im Anschlussnetz daher so gut wie nicht, wenn gleich es deutlich leistungsfähigere Kabel als Kupferdoppeladern gibt, die sich dann auch besser für breitbandige Übertragungen eignen und die in der gebäudeinternen Verkabelung und insbesondere bei Bürogebäuden und in der Industrie schon seit Jahrzehnten Verwendung finden. Dies sind Kabel aus geschirmten und eng verdrehten Kupferdoppeladern, heute spezifiziert bis zur Kategorie 8.² Derartige Kabel sind jedoch bedingt durch die Schirmung und den etwas größeren Kupferdurchmesser der Adern dick im Vergleich zu den Telefonkabeln, die wiederum sehr dick sind im Vergleich zu Glasfaserkabeln gleicher Faserzahl. Neue Kupferkabel zu verlegen, macht daher wenig Sinn, wenn man stattdessen die leistungsfähigeren, dünneren und preiswerteren Glasfaserkabel verwenden kann.

Im Sinne der Leistungssteigerung eines kupferdoppeladerbasierten Anschlussnetzes muss man für die Übertragung höherer Datenübertragungsraten (ISDN: ca. 180 Kbit/s) (gleichbedeutend mit der Nutzung höherer Frequenzen) die Leitungslängen im Anschlussnetz verkürzen. Dies geschieht typischerweise durch Ersetzen von Teilen der Hauptkabel durch diesbezüglich leistungsfähigere Glasfaserkabel, so dass die Strecke vom Hauptverteiler (MPoP, Metropolitan Point of Presence) zum Endkunden zunächst durch ein Glasfaserkabel ersetzt wird und die elektronischen Abschlüsse der Kupferdoppeladern in die Kabelverzweiger (KVz) verlegt werden. Dort enden sie auf Multiplexern³, die zum Netz hin den Verkehr über die Glasfasern aggregieren und zum Kunden hin die Dienste auf den Kupferanschlussleitungen bedienen.⁴ Derartige Anschlussnetze, kombiniert aus Glasfaser und Kupferkabeln, werden hybride Anschlussnetze genannt.⁵ In diesen Netzen sind die Eigenschaften des kupferbasierten Übertragungsmediums hauptbestimmend für die erzielbare Übertragungsqualität, insbesondere für die Datenübertragungsraten. Die nachfolgenden Abschnitte erläutern diese Übertragungsverfahren detaillierter und veranschaulichen durch Abbildungen deren Struktur und Aufbau.

² ISO/ IEC 11801 bzw. Kat 8.2 (supra Kat 8) draft IEC 61156-10 mit doppelter Schirmung, Kategorie 8 reicht für 40 - 100 Gbps Ethernet oder auch DOCSIS 3.1 über kurze Längen bis 100 m.

³ DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) oder MSAN (Multiservice Access Nodes).

⁴ Ursprünglich erfolgte dies in zwei Frequenzkanälen getrennt für Sprach- und DSL-Datenkommunikation. Dazu werden an beiden Leitungsenden sog. Splitter eingesetzt. Grundsätzlich wird durch die ADSL-Nutzung kein Sprachkanal belegt, so dass man gleichzeitig das Internet nutzen und mittels klassischer Festnetztelefonie telefonieren kann.

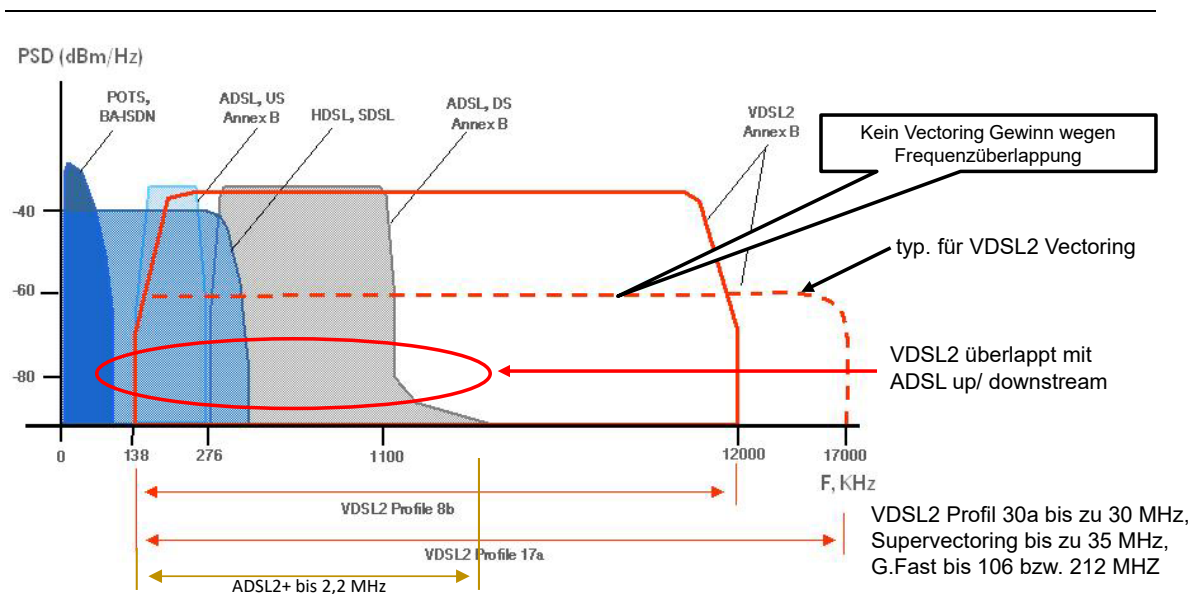
Im vergangenen Jahrhundert war das nicht möglich, da das damalige Telefonmodem nur die Bandbreite der Sprachübertragung zur Verfügung hatte. Mit dem Frequenzband von 300 Hz bis 3400 Hz konnten entweder Sprache oder Daten übertragen werden, nicht beides gleichzeitig. Die verfügbare Bandbreite betrug damals maximal 56 kbps.

⁵ Auch im Zusammenhang mit Koaxialkabeln gibt es derartige hybride Anschlussnetze (Koax-Glasfaser).

Um die begrenzte Übertragungskapazität auf den Kupferanschlussleitungen bestmöglich und bedarfsorientiert auszuschöpfen, wird in vielen Fällen eine asymmetrische Übertragung durch entsprechende Verteilung der Frequenzbänder voreingestellt, bei der die Downstream-Richtung deutlich größer ist als die Upstream-Richtung. Dies entspricht den Anforderungen einfacher Internetabfragen, bei denen über ein kurzes Kommando ganze Seiten bzw. Inhalte abgerufen werden.⁶

Abbildung 2-1 zeigt die Frequenzbelegung für verschiedene Übertragungsverfahren auf Kupferdoppeladern und weist aus, welches Spektrum für den Downstream (DS) bzw. Upstream (US) Verwendung findet. Die in der Abbildung angemerkten Übertragungsverfahren werden in den nachfolgenden Abschnitten über kupferdoppeladerbasierte Übertragungsverfahren beschrieben und können nicht bereits an dieser Stelle erläutert werden. Die im nachfolgenden besprochenen Übertragungsverfahren nutzen Frequenzen bis zu maximal 500 MHz. Dies geht aber nur über sehr kurze Distanzen (z. B. XG.fast).

Abbildung 2-1: Frequenzbelegung auf Kupferdoppeladern des Telefonanschlusnetz



VDSL2 Vectoring, in Deutschland exklusive Frequenzbelegung erst ab 2,2 MHz. Je höher die Frequenzen, desto mehr Crosstalk und desto kürzer die Leitungslänge.

Quelle: Wulf, A.H. (2007): VDSL Access Options, WIK VDSL Conference March 2007

⁶ Das Kundenverhalten ändert sich aber mittlerweile hin zu mehr symmetrischer Übertragung.

2.1.1 ADSL-basierte Technologien

2.1.1.1 ADSL – Charakterisierung der Anschlusstechnologie

Allgemeine Funktionsweise ADSL-basierter Technologien

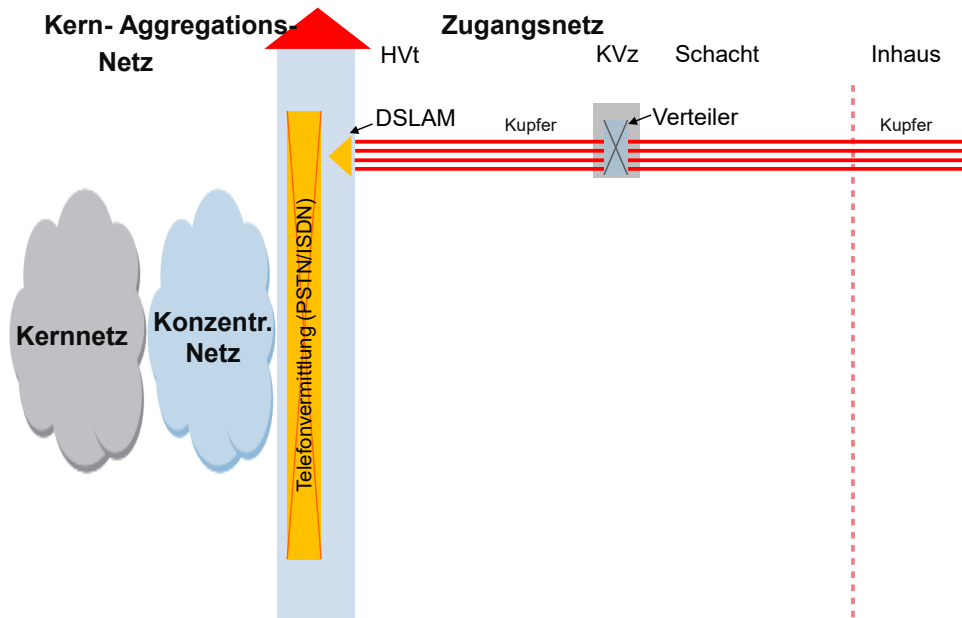
ADSL ist eine Datenübertragungstechnik, die ergänzend zur Telefonie parallel auf die Anschlussleitung geschaltet wird. Sie kann an Anschlussleitungen von analogen (POTS) und digitalen (ISDN) Telefonanschlüssen eingesetzt werden oder als entbundelter Datenanschluss (entbundeltes DSL). Sie nutzt die Telefonanschlussleitung vom Kundenanschluss über den KVz bis zum Hauptverteiler (HVt bzw. MPoP) (Abbildung 2-2) und ist somit (noch) nicht hybrid.

Bei POTS/ISDN-Anschlussleitungen gibt es Frequenzbereiche oberhalb des Basisbandes, die für die Telefonie nicht genutzt werden. Diese höheren Frequenzbereiche werden für ADSL verwendet (vgl. Abbildung 2-1). Mit der Migration der herkömmlichen Telefonie (POTS/ ISDN) auf paketorientierte Datenübertragung (VoIP), die in Deutschland weitgehend abgeschlossen ist, kann auch der untere, für Telefonie genutzte Frequenzbereich für die Datenübertragung verwendet werden (vgl. Tabelle 2-1).⁷

Grundsätzlich erhöht sich die Leitungsdämpfung mit steigender Entfernung zur Vermittlungsstelle, was die verfügbaren Datenraten und die Abdeckung mit ADSL geographisch begrenzt. Die Installation von sog. Outdoor-DSLAM, die – vom HVt kommend – das technische Equipment in Richtung Endkunde verschieben, könnte hier eine Abhilfe bieten, findet dann jedoch mit anderem, leistungsfähigerem Equipment Anwendung (VDSL, s. Abschnitt 2.1.2).

⁷ ADSL over POTS lässt den unteren Frequenzbereich für die Telefonie frei, All Digital ADSL nutzt diesen Teil für die Datenübertragung mit. ADSL over POTS kann auch ohne POTS betrieben werden.

Abbildung 2-2: FTTEx, (Fibre to the Exchange, Glasfaser bis zum HVt, Kupferdoppelader als Anschlussleitung)



Quelle: wik

Wenn, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, das untere Frequenzband nicht für die Telefonie genutzt werden muss und auch der Datenübertragung zur Verfügung steht, kann für den Internetzugang eine höhere Datenübertragungsrate erzielt werden (vgl. Tabelle 2-1).

Technische Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit

Grundsätzlich gibt es eine Menge von Einflussfaktoren, die eine real erfahrene Datenübertragungsrate der einzelnen Kunden nur schwer vorhersagbar machen. Hier spielt die Qualität des Übertragungsmediums Kupferdoppelader eine wichtige Rolle. Relevante technische Bestimmungsfaktoren sind

- die Strukturen und Kabelgrößen auf den Haupt- und Verzweigerkabelstrecken⁸
- der Aufbau der Kupferdoppeladern,
- der Leitungsquerschnitt,
- die Verbindungen der Kabelenden,
- Muffentechniken,
- Verzweigertechniken,
- Feuchtigkeit im Kabel.

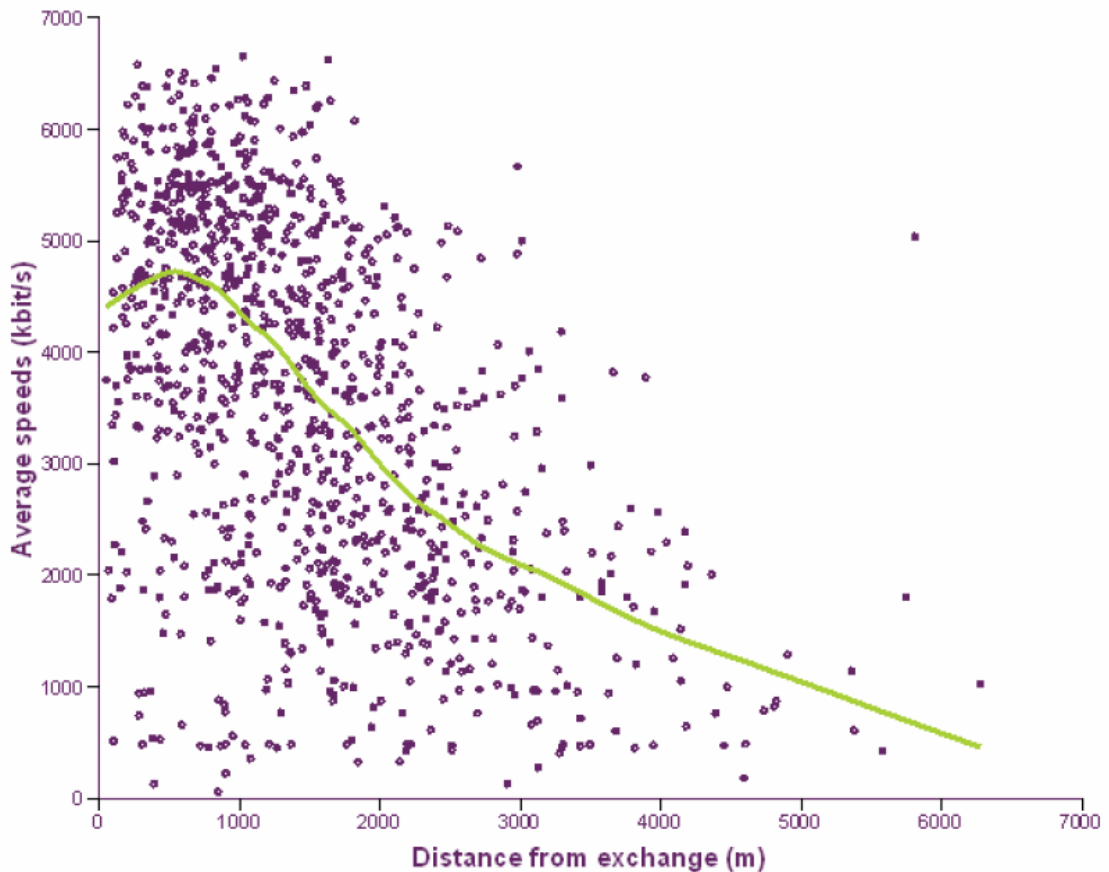
⁸ Mit der Bezeichnung „Strukturen in Haupt- und Verzweigerkabelsegment“ wird insbesondere darauf abgestellt, in welchem Umfang und über welche Längen Kupferdoppeladern gemeinsam in einem Kabel geführt werden.

Darüber hinaus ist der Beschaltungsgrad der einzelnen Kabelstrecken (Kupferdoppeladern) mit gleichen oder Übertragungsfrequenz-ähnlichen Überungsverfahren für die Leistungsfähigkeit von Bedeutung. Einschränkungen der Leistungsfähigkeit entstehen aus der parallelen (zeitgleichen) Nutzung der einzelnen Kupferdoppeladern innerhalb eines gemeinsamen Kupferkabels durch störendes Nebensprechen⁹. In den frühen Jahren des DSL-Ausbaus (2000 – 2007, d.h. vor der Einführung von Vectoring) galt als Faustformel eine Obergrenze der Beschaltung der Kupferdoppeladern von 50%. Insofern bilden technische Aspekte und das Nutzungsverhalten hier gemeinsam die Erklärung für Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit der Anschlusslinie.

Abbildung 2-3 zeigt Messwerte für ADSL-Überungsverfahren im Vereinigten Königreich (UK) im Jahr 2008. Natürlich lagen seinerzeit die erzielbaren Werte unter den heutigen Mindestanforderungen nach TKMV. Von Interesse ist hier die **Streuung** der Ergebnisse der Datenübertragungsraten in Abhängigkeit des Abstands vom HVt. Die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte über die Zeit, schwanken also auch in dieser Hinsicht in Abhängigkeit vom Nutzerverhalten. Das Thema der Streuung der Ergebnisse der Datenübertragungsraten selbst bei höherwertigen Überungsverfahren (VDSL2) adressieren wir auch noch einmal in Abschnitt 2.1.1.2, Abbildung 2-9.

⁹ Eine mit Wechselspannung beschaltete Kupferdoppelader baut um sich herum ein sich änderndes elektromagnetisches Feld auf, das in benachbarten Kupferleitungen ungewollte Spannungen und Ströme induziert, die das dort übertragene Signal verändern.

Abbildung 2-3: Ergebnisse der Datenübertragungsraten von ADSL-Anschlüssen mit Datenübertragungsraten von bis zu 8 Mbps im Downstream in Abhängigkeit der Länge der Kupferdoppelader (in UK 2008)



Quelle: OFCOM (2008), Figure 7-6: Distance from exchange and average download speeds achieved by panelists on packages of "up to" 8Mbps

2.1.1.2 ADSL – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die Datenübertragungsrate, die auf Kupferleitungen erreicht werden kann, ist im Wesentlichen abhängig vom Übertragungsprotokoll, von der Frequenz und von der Stärke der auf die Leitung einwirkenden Störfaktoren.

In den Standardisierungen der ITU-T sind für die jeweiligen Technologien die Übertragungsprotokolle und Frequenzbereiche definiert.

Mit dem Einsatz von ADSL2+ geht gegenüber ADSL eine Ausdehnung des verwendeten Frequenzbereichs nach oben bis 2.208 kHz einher, was bei kurzen Anschlussleitungen deutlich höhere Datenraten ermöglicht. Die Werte für ADSL2 und ADSL liegen noch darunter. Daher sind diese Technologien für die Mindestversorgung nach TKMV nicht relevant.

Tabelle 2-1 zeigt eine Darstellung der ITU-Normen zu den verschiedenen ADSL-Normen und den mit ihnen einhergehenden Datenübertragungsraten: ADSL2+ ist das leistungsfähigste Verfahren mit bis zu 24 Mbps (Megabit pro Sekunde) in Empfangsrichtung und bis zu 3,5 Mbps in Senderichtung, sofern das originär für die Telefonie reservierte Frequenzband ebenfalls für den Internetzugang genutzt werden kann¹⁰ und der Standort des Endkunden nahe (< 100m) am MPoP (HvT) liegt.

Die Werte für ADSL2 und ADSL liegen noch darunter. Daher sind diese Technologien für die Mindestversorgung nach TKMV nicht relevant.

Tabelle 2-1: Unterschiedliche ADSL-Übertragungsverfahren

Norm	Name	Empfangsrate (Downstream)	Senderate (Upstream)	Faktor
ANSI T1.413 Issue 2	ADSL	8 Mbit/s	0,6 Mbit/s	13,3 : 1
ITU-T G.992.1	ADSL (G.dmt)	8 Mbit/s	1 Mbit/s	8 : 1
ITU-T G.992.1 Annex A	ADSL over POTS	10 Mbit/s	1 Mbit/s	10 : 1
ITU-T G.992.1 Annex B	ADSL over ISDN	10 Mbit/s	1 Mbit/s	10 : 1
ITU-T G.992.2	ADSL Lite (G.lite)	1,5 Mbit/s	0,5 Mbit/s	3 : 1
ITU-T G.992.3	ADSL2 (G.bis)	12 Mbit/s	1,2 Mbit/s	10 : 1
ITU-T G.992.3 Annex A	ADSL2 over POTS	12 Mbit/s	1 Mbit/s	12 : 1
ITU-T G.992.3 Annex B	ADSL2 over ISDN	12 Mbit/s	1 Mbit/s	12 : 1
ITU-T G.992.3 Annex I	All-digital mode ADSL2	12 Mbit/s	3,2 Mbit/s	3,75 : 1
ITU-T G.992.3 Annex J	All-digital mode ADSL2	12 Mbit/s	3,5 Mbit/s	3,43 : 1
ITU-T G.992.3 Annex L	RE-ADSL2	6 Mbit/s	1,2 Mbit/s	5 : 1
ITU-T G.992.3 Annex M	ADSL2 extended upstream	12 Mbit/s	3,5 Mbit/s	5 : 1
ITU-T G.992.4	ADSL2 (G.bis.lite)	12 Mbit/s	1 Mbit/s	12 : 1
ITU-T G.992.5	ADSL2+	24 Mbit/s	1 Mbit/s	24 : 1
ITU-T G.992.5 Annex A	ADSL2+ over POTS	24 Mbit/s	1 Mbit/s	24 : 1
ITU-T G.992.5 Annex B	ADSL2+ over ISDN	24 Mbit/s	1 Mbit/s	24 : 1
ITU-T G.992.5 Annex I	All Digital ADSL2+	24 Mbit/s	3,2 Mbit/s	7,5 : 1
ITU-T G.992.5 Annex J	All Digital ADSL2+	24 Mbit/s	3,5 Mbit/s	6,86 : 1
ITU-T G.992.5 Annex M	ADSL2+M	24 Mbit/s	3,5 Mbit/s	6,86 : 1

Quelle: ITU-T Normen, s. Tabelle

Individuelle Eigenschaften der Kupferdoppelader

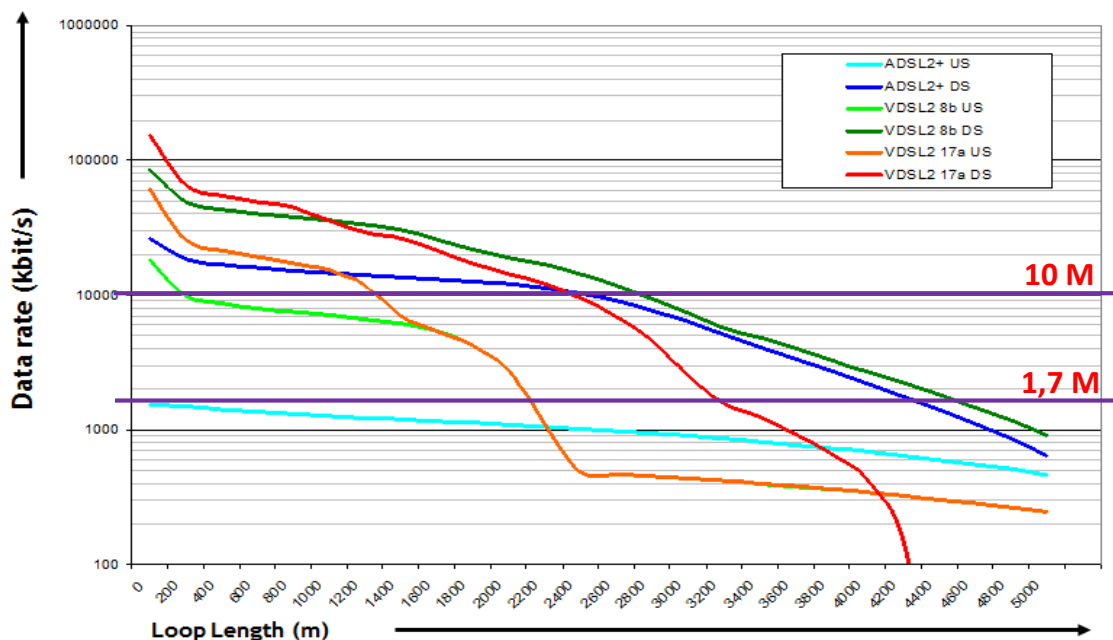
Wegen der Unsicherheit über die jeweilige Leitungsqualität – schließlich waren die Telefonleitungen nicht für die Übertragung von Signalen mit einer Bandbreite von etwa 1 MHz vorgesehen – wird die Leitung vom Endgerät zur Vermittlungsstelle „ausgemessen“. Für eine Inbetriebnahme einer einzelnen Leitung werden die Übertragungskanäle des verfügbaren Frequenzspektrums optimiert. Dazu werden ggf. einzelne Frequenzbänder ausgeblendet, falls die Dämpfung zu groß ist oder Reflexionen (Störungen vom Leitungsende

¹⁰ Zur Nutzung des POTS- bzw. ISDN-Sprachbandes vgl. Abschnitt 2.1.1.1.

her) auftreten. Dies hat dann Auswirkungen auf die erzielbare Datenübertragungsrate der Anschlüsse und ist nicht vorhersehbar, da es auch von den Störungen (dem Nebensprechen) der anderen gleichzeitig aktiven Nutzer im Kabel abhängt (vgl. Abschnitt 2.1.1.1).

Je größer die Frequenz (und je länger die Strecke, auf welcher diese Störung wirken kann), desto größer ist der störende Effekt auf die Signalqualität. Daher können bei hohen Datenübertragungsraten über kupferbasierte Leitungen nur geringe Reichweiten erzielt werden.

Abbildung 2-4: Leistungs- / Reichweiteverhältnis bei kupferbasierten Übertragungstechnologien auf Basis von Labormessungen verschiedener xDSL-Protokolle



Quelle: Wulf, A.H. (2007): VDSL Access Options, WIK VDSL Conference, March 2007

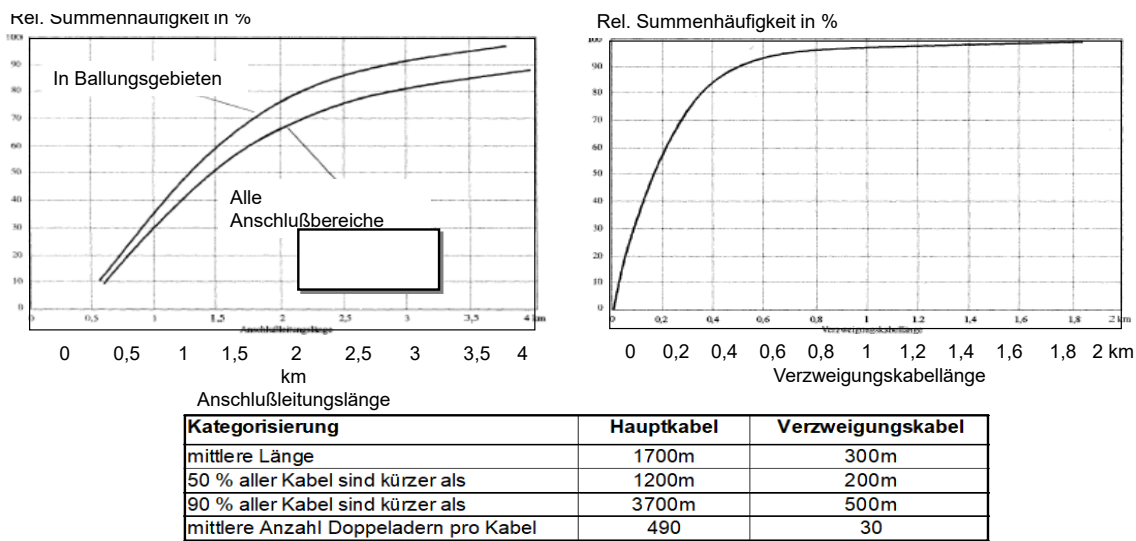
Abbildung 2-4 zeigt für ADSL2+ im Downstream für 10 Mbps eine Reichweite von ca. 2.500 m, für den Upstream bei 1,7 Mbps (Werte nach TKMV 2023) jedoch nur ca. 400 m (Einzelverbindung). Würden die Werte der Mindestversorgung nach TKMV (Stand Juni 2022) angehoben, hätte das ganz unmittelbar Auswirkungen auf die Verwendbarkeit von ADSL2+, denn schon bei einer Upstream-Datenübertragungsrate von 1.9 Mbps wäre ADSL2+ gänzlich ungeeignet, diese Anforderung zu erfüllen.

Die Anhebung der Downstream-Datenübertragungsrate hätte bei den ADSL-Übertragungsverfahren aufgrund des sehr flachen Kurvenverlaufs eine gleichfalls erheblich reichweitensenkende Auswirkung, bei VDSL-Übertragungsverfahren wäre die reichweitensenkende Auswirkung deutlich geringer.

Zu berücksichtigen ist, dass die ADSL-Techniken typischerweise im HVt eingesetzt werden. Angaben aus dem Jahr 2000 zufolge beträgt die mittlere Anschlussleitungslänge im Kupferanschlussnetz in Westdeutschland ca. 2.000 m, 90% der Anschlussleitungen liegen unter 4.000 m. Weniger als 10% der Anschlussleitungen liegen unter 400 m.¹¹ D.h. ADSL2+ ist eine nur für wenige Bereiche nah am HVt für die Mindestversorgung nach TKMV relevante Technologie (vgl. Abbildung 2-5).

Abbildung 2-5: Verteilung der Anschlussleitungslängen in Westdeutschland

90% aller Anschlußleitungen in Deutschland sind kürzer als 3.700m
 99% aller Verzweigungskabel in Deutschland sind kürzer als 1.800 m



Quelle: A. Mertz, M. Pollakowski (2000), S. 48f

Einen Gesamtüberblick über die kupferdoppeladerbasierten Technologien gibt Abschnitt 2.1.5.

Marktliche Relevanz

Die marktliche Relevanz der ADSL-Techniken ist seit Aufkommen der Vectoring-Regulierung in Deutschland stark rückläufig. Die Technik-Generationen werden nicht mehr neu eingesetzt.

2.1.2 VDSL-basierte Technologien

Bei den VDSL (Very High Bandwidth Digital Subscriber Line) Übertragungssystemen kommen gegenüber ADSL (bis 2,2 MHz) ergänzende Frequenzbereiche bis 35 MHz

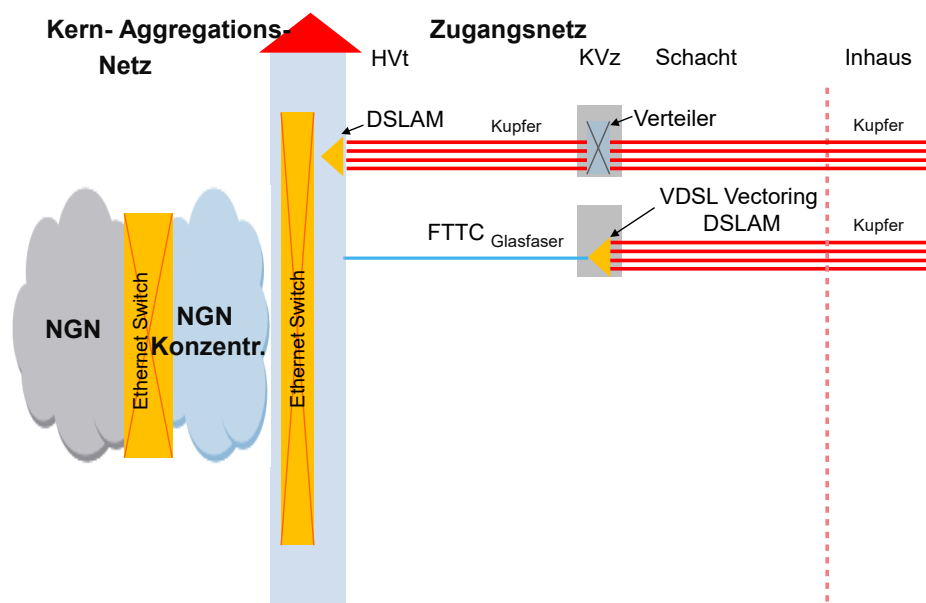
¹¹ Quelle: Mertz, A., Pollakowski, M. (2000), S. 48 ff.

dazu (Abbildung 2-1), die, jedoch nur über kürzere Entfernungen, weitere Übertragungskapazität schaffen. Der Frequenzbereich für Telefonie (POTS, ISDN)¹² kann ausgespart werden, sofern er noch genutzt wird. Mit der abgeschlossenen Migration zu VoIP-Telefonie ist dieser Aspekt für Deutschland jedoch (eigentlich) vorbei.

2.1.2.1 VDSL – Charakterisierung der Anslusstechologie

Strukturell werden VDSL DSLAM entweder im HVt oder im KVz aufgebaut. Im HVt werden eher nur die mit 8 MHz arbeitenden Systeme verwendet, denn mit den höheren Frequenzen können nur geringe Distanzen überbrückt werden. In einem vollständigen Ausbau von FTTC mit VDSL2+ DSLAM können diese gleichfalls im Nahbereich am HVt eingesetzt werden, d.h. die Kupferdoppelader-Strecke wird verkürzt und der Anschluss profitiert von einer höheren Datenübertragungsrate. Die VDSL-Übertragungstechnik macht aus dem KVz (oder Schaltverteiler) einen aktiven Netzknoten mit eigener Stromversorgung, bedarfsweise auch mit Klimatisierung.

Abbildung 2-6: FTTC (Fibre to the Curb)



Quelle: wik

Entsprechend dem antizipierten Nutzerverhalten wurde bei der Planung der Nutzung der Frequenzbereiche eine Asymmetrie zwischen Up- und Downstream unterstellt, um die begrenzte Datenübertragungsrate möglichst optimal auszunutzen.¹³ Dementsprechend wurde die Frequenzverteilung für beide Richtungen alloziert.¹⁴ Dennoch ist auch eine

¹² Analoge Telefonie, Plain Old Telephone System.

¹³ Plückebaum, T. (2023). Diese Zusammenhänge gelten für alle asymmetrischen xDSL-Technologien.

¹⁴ Faustregel: 1/3 Upstream, 2/3 Downstream.

symmetrische Nutzung auf dem Niveau der Upstream-Kapazität ohne Änderung der Systeme möglich.

2.1.2.2 VDSL – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Eine Übersicht über die marktüblichen VDSL-Systeme gibt Tabelle 2-2. Heute in Mitteleuropa weit verbreitet ist VDSL2 mit dem Profil 17a (ca. Frequenzband bis 17 MHz). Es wird ab dem HVt und bei größeren Anschlussleitungslängen ab dem KVz eingesetzt. Auf kurzen Leitungslängen, eher schon im Bereich von FTTB, findet man auch das Profil 30a (bis 30 MHz). Eine bisher letzte neue Entwicklung im VDSL-Umfeld ist das Profil 35b, das noch höhere Bandbreiten bietet und (anders als in der Tabelle dargestellt und von der ITU-T intendiert, nämlich für FTTB) auch für den Einsatz im FTTC-Bereich von verschiedenen Netzbetreibern vorgesehen wird.¹⁵

Tabelle 2-2: Übliche VDSL-Profile

Profil	8a,b,c,d	12a, b	17a	30a	35b
Frequenz	8.8 MHz	12 MHz	17.7 MHz	30 MHz	35.3 MHz
Aggregierte Übertragungsrate (Mbit/s)	50	68	100 - 150	200 - 250	300 - 400
Standardisiert in Jahr	2004	2004	2006	2006	2015
Empfohlene Netzwerk Architektur	HVt	HVt	FTTC	FTTC und/oder FTTB	FTTB

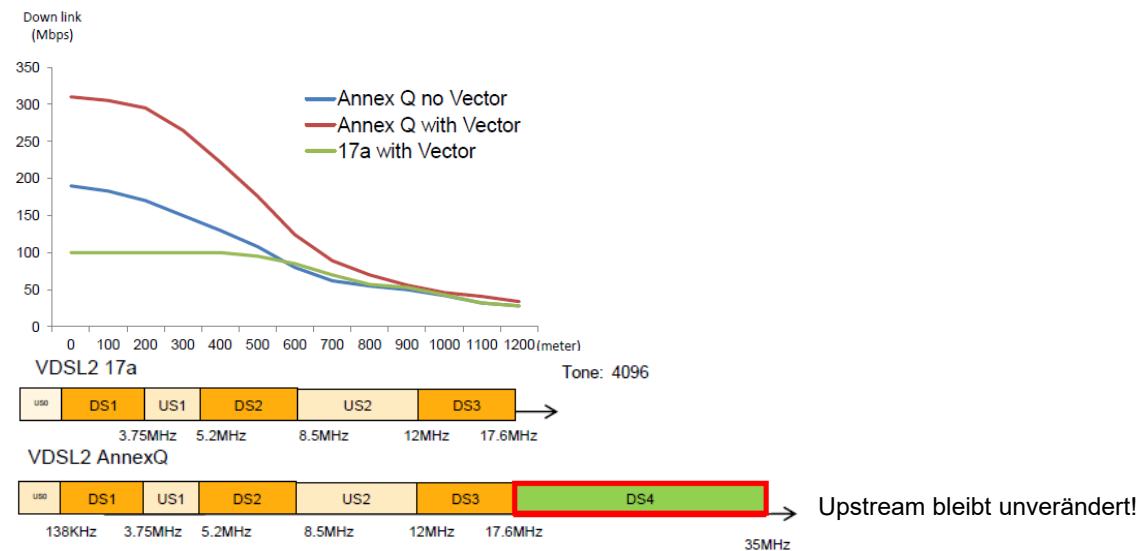
Quelle: ITU-T G.993.2

Tabelle 2-2 beschreibt die aggregierte Datenübertragungsrate beider Übertragungsrichtungen. Der Bandbreiten-Gewinn aus der höheren Frequenznutzung wird bei Profil 35b ausschließlich für eine Bandbreitenerhöhung im Downstream verwendet, die Upstream-Kapazität bleibt unverändert (Abbildung 2-7).

Abbildung 2-1 beschreibt auch für die VDSL-Profile 8 und 17 das Bandbreiten-Verhalten der Übertragungsverfahren über die Länge der Anschlussleitungen. Abbildung 2-7 beschreibt insbesondere das für Deutschland wichtige Profil 35b (in der Abbildung bezeichnet als „Annex Q“). Man erkennt den Verlauf der Datenübertragungsrate im Downstream, der sich bei Leitungslängen von über 600 m wieder annähernd den anderen VDSL2+-Profilen angleicht, weil die Reichweite der höheren Frequenzen „ausgelaufen“ ist. Die Abbildung zeigt mit der blauen Kurve den Frequenzverlauf für VDSL2-Profil 35b ohne Vectoring (Vectoring wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert).

¹⁵ So die Deutsche Telekom als Supervectoring.

Abbildung 2-7: Datenübertragungsrate von VDSL-Profil 17a und 35b (=Annex Q) im Vergleich



Quelle: Huawei (2015)

Aus Abbildung 2-4 folgt für die Mindestversorgungswerte von VDSL 8b eine maximale Länge von 2.600 m Downstream (10 Mbps) und 2.200 m Upstream (1,7 Mbps). Für Profil 17a ergeben sich Downstream ca. 2.400 m (10 Mbps), für Upstream gleichfalls 2.200 m (1,7 Mbps) und Profil 30a und 35b liegen mit den Werten des Profils 17a bei den großen Längen gleich. Für die Bewertung gleichfalls relevant zu berücksichtigen ist die Tatsache, dass über 99% aller Verzweigerkabelängen in Westdeutschland unter 1,8 km liegen.¹⁶

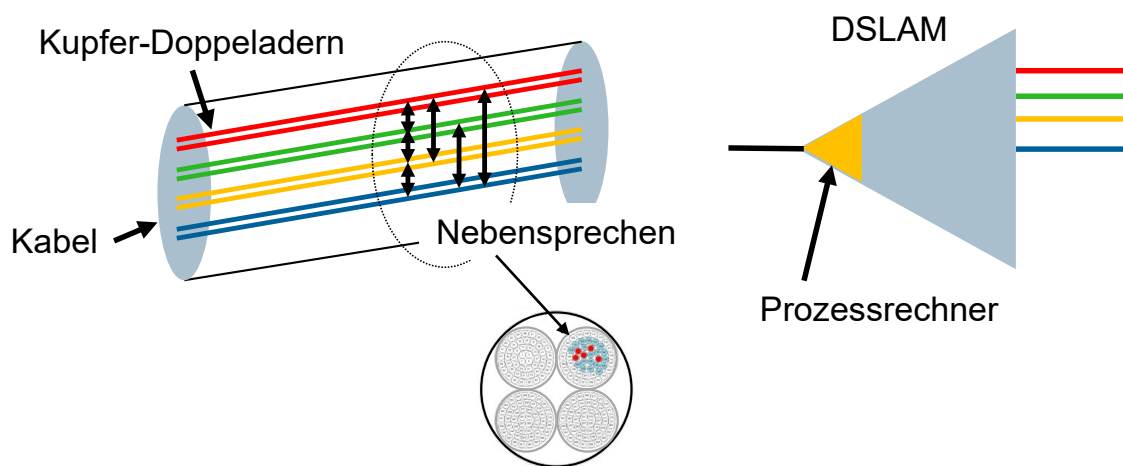
2.1.2.3 Vectoring

Ungeschirmte, eng beieinanderliegende und auf größeren Strecken parallel geführte Kupferdoppeladern, wie sie für das herkömmliche Telefonanschlussnetz typisch sind, stören sich i. d. R. untereinander. Jede Doppelader induziert in allen benachbarten Doppeladern ein sogenanntes Nebensprechen, das natürlich von dem Signal bestimmt wird, das die Doppelader gerade überträgt. Das Nebensprechen erfolgt ganz überwiegend in denselben Frequenzen, die das Ausgangssignal hat. Es wird in den höheren Frequenzbereichen immer intensiver, so dass Anschlusskabel mit VDSL2-Nutzung nicht voll mit VDSL-Anwendungen beschaltet werden können, weil das Nebensprechen zu groß wird. Nicht jeder Kunde könnte daher mit dieser Technik versorgt werden – oder die erzielbaren Datenübertragungsraten gehen wegen der Störungen für alle Kunden auf dem Kabel dramatisch herunter.

¹⁶ Vgl. Abbildung 2-5.

Schnelle Prozessrechentchnik in den einzelnen DSLAMs erlaubt es im Rahmen des technischen Fortschritts inzwischen, die Störungen, die die Kupferdoppeladern untereinander ausüben, für jedes miteinander agierende Adernpaar abzuschätzen und dann vom gestörten Nutzsignal wegzunehmen – zu subtrahieren. Der DSLAM wird dazu mit einem sogenannten Vectoring-Prozessor ausgerüstet, mit dem jeder Port intern verbunden wird (vgl. Abbildung 2-8). Die Rechenkomplexität der Korrekturrechnungen wächst dabei exponentiell mit der Zahl der Doppeladern, so dass die maximale Zahl der so korrigierbaren Doppeladern derzeit bei 384 liegt. Diese Größe entspricht typischerweise einem großen Verzweigerkabel am KVz, so dass die praktischen Anwendungsfälle damit abgedeckt werden können. Ggf. muss ein weiterer DSLAM am selben Standort eingesetzt werden, der andere dort auflaufende Verzweigerkabel korrigiert.¹⁷

Abbildung 2-8: Funktionsweise von Vectoring



Quelle: wik

Abbildung 2-9 zeigt die Wirkung von Vectoring auf die Datenübertragungsrate der Doppeladern eines Kabels aus 24 Doppeladern. Die grauen Balken zeigen die individuellen Datenübertragungsraten, die die Doppeladern eines mit VDSL2 (17a) beschalteten Kabels bedingt durch das Nebensprechen haben. Die orangenen Balken zeigen die sogenannte Single Line Performance, d.h. die Datenübertragungsrate der Doppelader, wenn keine weiteren Signale auf das Kabel aufgeschaltet sind. Die Diskrepanz zwischen den orangenen und grauen Balken ist recht groß und beschreibt eindrücklich die Degression der Datenübertragungsrate durch Nebensprechen¹⁸.

Wird nun Vectoring eingeführt, dann wird das Nebensprechen weitgehend eliminiert. Dadurch erreichen die Doppeladern nahezu die Single Line Performance. Diese ist durch

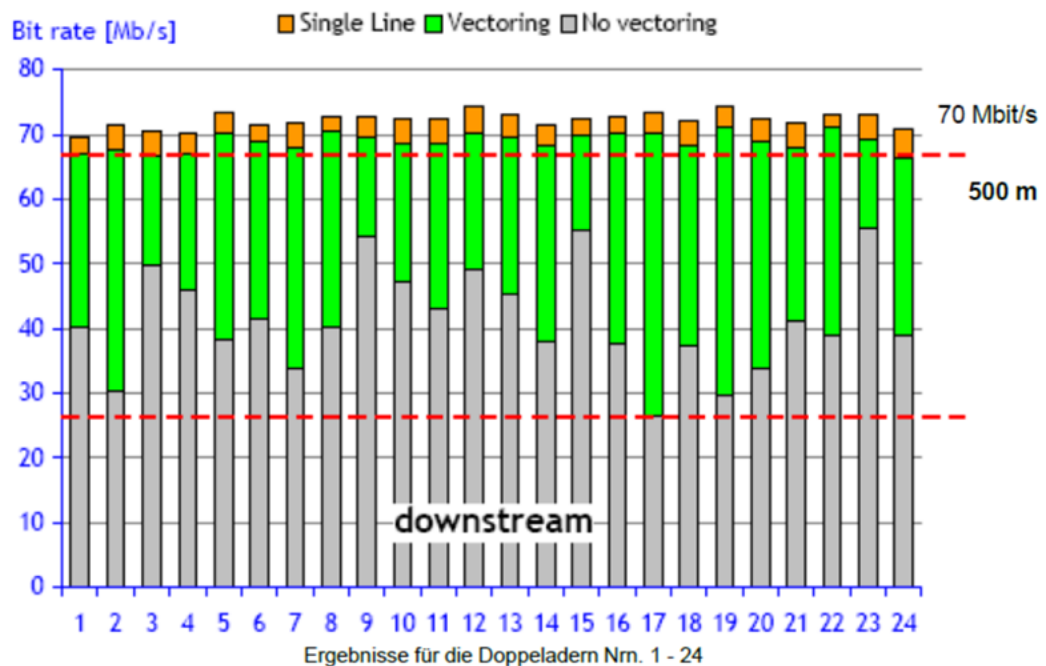
¹⁷ Sollte am KVz nur ein VZK mit z. B. 800 DA abzweigen, dann helfen Schaltverteiler an nachgelagerter tieferer Stelle im Netz (mit VZK<400DA) - oder es gibt kein Vectoring.

¹⁸ Die Ohm'sche Dämpfung drückt sich dadurch aus, dass die Single Line Performance nicht mehr 100 Mbps ist, wie sie nach vielleicht 100 m Leitungslänge noch wäre, sondern nur noch etwas über 70 Mbps, bedingt durch die 500 m Leitungslänge für alle Doppeladern.

die grünen Balken dargestellt. Während zuvor die durch Nebensprechen beeinträchtigten Datenübertragungsraten je Doppelader deutlich variierten und so der eine Nachbar nur 28 Mbps Downstream erhielt und ein anderer 55 Mbps, sind nun alle relativ gleich und über 68 Mbps und damit nahe am Optimum.

Abbildung 2-9: Gewinn der Datenübertragungsrate durch Vectoring auf den einzelnen Doppeladern eines Anschlusskabels bei 500 m Länge

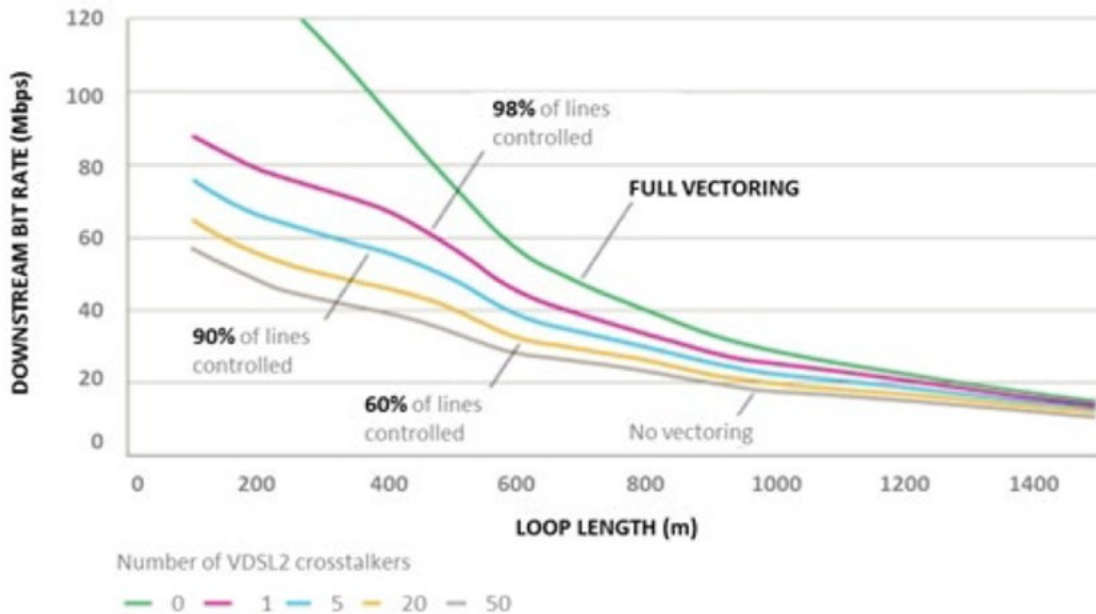
Das Kabel bedient die Kunden gleichermaßen und kann voll ausgelastet werden



Quelle: Nokia (2011) Frank van der Putten, Alcatel Lucent, Answer to BIPT 18.02.2011

Voraussetzung für das Abschätzen der Störungen ist, dass jedes Originalsignal einer Störquelle (das Nutzsignal einer anderen Doppelader) bekannt ist, weil aus ihm der Störanteil abgeleitet und abgeschätzt wird. Zudem müssen die Endgeräte (CPE) am anderen Ende mitwirken bzw. zumindest G.Vector-kompatibel sein. Ist das nicht der Fall, gibt es unbekannte Störungen, die weiterhin die Übertragungsleistung beeinträchtigen (vgl. Abbildung 2-10). Bereits 1 Störer (s. violette Linie) führt zu einem signifikanten Einbruch der Übertragungskapazität. Die in Abbildung 2-10 dargestellte Kurvenschar illustriert diesen Zusammenhang.

Abbildung 2-10: Degression der Datenübertragungsrate durch nicht ins Vectoring eingebundene Anschlussleitungen



Quelle: Nokia (2012)

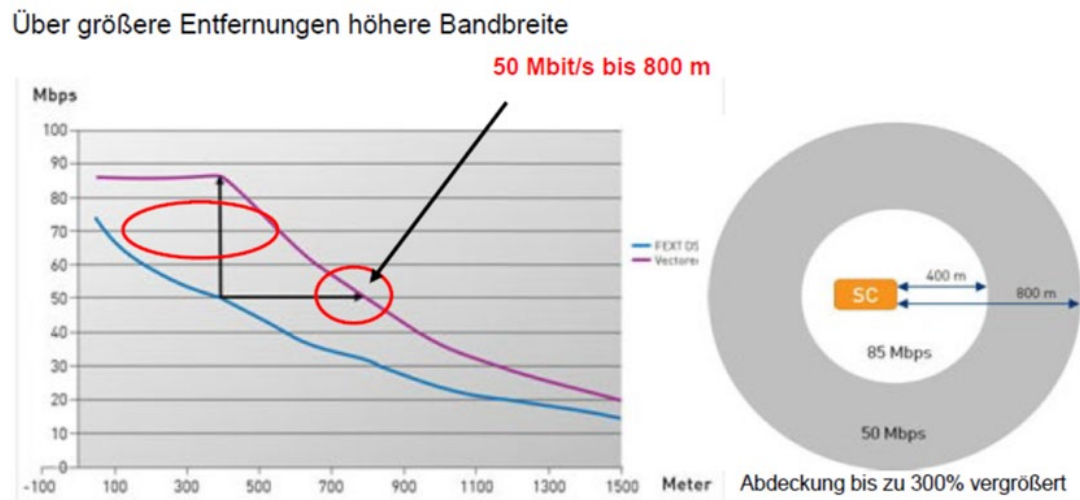
Im Grundsatz ist mit Vectoring die Single Line Performance einer ungestörten Übertragung weitgehend wiederherstellbar (vgl. auch Tabelle 2-1). D.h. dass Vectoring die unerwünschten Beeinträchtigungen eines Kupferdoppeladernkabels durch Nebensprechen bei hoher Nutzung (Beschaltung) des Kabels nahezu vollständig eliminiert.

Vectoring korrigiert jedoch nur die vorhersehbaren Störereignisse aus demselben Übertragungssystem, nicht jedoch die zusätzlich auftretenden elektromagnetischen Interferenzen aus der Umgebung, sei es durch Straßenverkehr (z. B. Straßenbahnen) oder elektrische Geräte und Anlagen innerhalb der Gebäude.

Vectoring kann den relativen Abstand der Asymmetrie zwischen Upstream und Downstream verringern helfen,¹⁹ aber nicht grundsätzlich abstellen, weil es am Design des zugrundeliegenden Übertragungsverfahrens nichts ändert.

¹⁹ Eine Auswertung auf Basis der Messwerte von Nokia (2012) legt nahe, dass Vectoring auf den niedrigen Frequenzen leistungsfähiger ist als auf den hohen Frequenzen.

Abbildung 2-11: Reichweitenverlängerung durch Vectoring



Quelle: wik/ ECI Telecom (2012)

Vectoring wirkt insbesondere auch Reichweiten-verlängernd für die hohen Datenübertragungsraten, wie dies Abbildung 2-11 zeigt. Dort ergibt sich eine Verdoppelung der Reichweite für eine Datenübertragungsrate von mehr als 50 Mbps, aber eine Vergrößerung der abgedeckten Fläche und typischerweise auch eine Vergrößerung der erreichbaren Haushalte von ca. 300%.

Der Zugriff auf alle Kupferdoppeladern in einem Kabel, den Vectoring verlangt, bedeutet, dass es eine physische Entbündelung an den Standorten, an denen Vectoring eingesetzt werden soll, nicht mehr geben kann. Theoretisch könnten zwar Wettbewerber ihre Vectoring-DSLAM kollozieren und die notwendigen Korrekturinformationen aus den eigenen Doppeladern mit den/dem anderen Betreiber(n) austauschen,²⁰ aber einen entsprechenden Standard der Systemhersteller dazu gibt es trotz langjähriger Bekundungen der Hersteller und der Regulierer immer noch nicht und ist auch nicht mehr zu erwarten. Zudem gibt es harte technische Hürden für die Kollokation. Die Verbindungen zwischen den Ports und den Vectoring-Prozessoren verlangen Echtzeitbedingungen, die sich schon auf das Verbindungskabel auswirken bzgl. des Übertragungsmediums und des maximalen Abstands der DSLAM zueinander.²¹

²⁰ Node Level Vectoring, d.h. Austausch von Vectoring-Korrekturinformationen zwischen DSLAM verschiedener Netzbetreiber untereinander, die auf dieselben Anschlusskabel zugreifen, z. B. im Kontext von KVz-TAL.

²¹ Es wird von maximalen Abständen von weniger als 2 m (Kupferkabel) gesprochen. Das ist für eine Outdoor-Kollokation zu gering. Glasfaser kommt wegen des Delays bei e-o-e Wandlung nicht in Betracht.

2.1.3 Bonding und Phantoming bei rein kupferbasierten Anschlusslinien

Bonding und Phantoming sind Technologien, die bei Kupferdoppeladern Anwendung finden. Ihnen ist gemeinsam, dass sie mehrere parallele Übertragungskanäle zu einer Gesamtkapazität zusammenfassen, um die für den Nutzer erzielbare Datenübertragungsraten zu erhöhen.

2.1.3.1 Bonding und Phantoming – Charakterisierung der Anschlusstechnologie²²

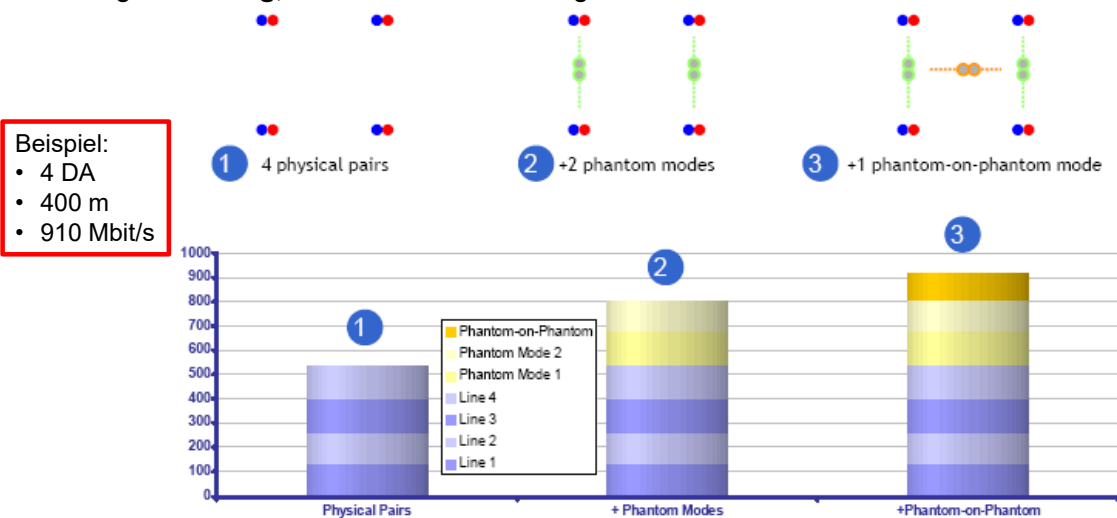
Zwei Ergänzungen zur Vergrößerung der Datenübertragungsraten sollen hier und insbesondere im Kontext des Vectorings aufgezeigt werden, die allerdings bisher im deutschen Markt keine besondere (ergänzende) Verbreitung gefunden haben. Es ist dies zum ersten Bonding, bei dem zwei oder mehr Doppeladern zum selben Endkunden parallel genutzt werden und so die Datenübertragungsraten nahezu verdoppelt – oder allgemeiner – vervielfacht wird. Hier hilft Vectoring, das Nebensprechen der parallelen Übertragungswege untereinander und mit den anderen, nicht zusammengehörenden parallelen Übertragungswegen zu eliminieren. Das Phantoming setzt auf dem Bonding auf und nutzt zunächst einmal zwei oder mehr parallele Doppeladern. Zwischen jeweils zwei von diesen werden nun zusätzlich Differenzsignale für einen weiteren virtuellen Übertragungskanal aufgeschaltet. Wegen dieser zusätzlichen virtuellen Kanäle wird das Verfahren auch Phantoming genannt. Auch zwischen zwei dieser virtuellen Kanäle kann jeweils auch wieder ein virtueller Kanal etabliert werden usw. Die Datenübertragungsraten im Beispiel aus Abbildung 2-12 betragen im Ergebnis 900 Mbps über 400 m bei 4 Doppeladern.

²² Plückebaum, T. (2023).

Abbildung 2-12: Phantoming summiert parallele physische und virtuelle Kanäle zu einer Gesamtkapazität

Phantoming:

- baut auf Bonding auf
- zusätzliche Kommunikationskanäle zwischen allen Kombinationen von durch Bonding zusammengefassten Doppeladern
- benötigt **Vectoring**, um vollen Bandbreitengewinn zu erzielen



Quelle: Nokia, Cebit 2011

Voraussetzung für Bonding und Phantoming ist, dass ausreichend Doppeladern zwischen dem HVt bzw. KVz bzw. Drop-Punkt am Straßenrand und dem Endkundenstandort zur Verfügung stehen. Zudem werden in den DSLAMs geeignete Ports benötigt, die das Zusammenführen aller Kanäle, der parallelen physischen (Doppeladern) wie auch der darauf aufsetzenden virtuellen Kanäle umsetzen. Grundsätzlich eignet sich dieser Ansatz daher nicht für den Massenmarkt, aber sicher in ausgewählten Gebieten mit ausreichend Doppeladern und einer beschränkten Zahl dies nachfragender Kunden, z. B. Geschäftskunden. Derartige Systeme und Portkarten sind marktverfügbar.²³

²³ Portkarten für Phantoming sind aufgrund Ihrer zusätzlichen Fähigkeit, virtuelle Kanäle zu bilden, komplexer und teurer als normale Portkarten. Sie flächendeckend für den Massenmarkt vorzuhalten, wenn denn nur wenige Kunden dies nachfragen, ist teuer und sie würden in vielen Fällen für diese Funktion ungenutzt bleiben. Anstelle von ADSL-Bonding empfiehlt sich i. d. R. ein technisches Upgrade auf VDSL oder VDSL-Vectoring, schon auch deshalb, weil erst mit Vectoring das beim Bonding und Phantoming auftretende Nebensprechen vermieden werden kann. Inwieweit Phantoming-fähige Portkarten bei den Betreibern eingesetzt sind, entzieht sich unserer Kenntnis. Vgl. auch: Plückebaum, T. (2013), Kapitel 5.

2.1.3.2 Bonding und Phantoming – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Im Grundsatz verhält sich die Datenübertragung bei Bonding und Phantoming hinsichtlich ihrer Reichweite wie die zugrundeliegenden Übertragungskanäle. Es vervielfältigt sich nur deren Datenübertragungsrate. Im Kontext der Erfüllung der Mindestanforderungen nach TKMV wäre Bonding und/oder Phantoming dort interessant, wo mit seiner Hilfe die Mindestanforderungen erfüllt werden könnten und die Doppeladerbedarfe zur Verfügung stehen. Die hier dann relevanten ADSL-Techniken unterstützen jedoch Bonding eher nicht. Es müssten Bonding-fähige Ports auf den Schnittstellenkarten der DSLAMs vorgehalten bzw. installiert werden, die das Zusammenschalten der Ports zu Bonding- oder gar Phantom-Gruppen ermöglichen.

Marktliche Relevanz

Aufgrund der Verfügbarkeit leistungsfähiger VDSL-Vectoring-Technologien in Deutschland ist Bonding für den Massenmarkt – auch nach Angaben der Deutschen Telekom²⁴ – nicht von Relevanz. Bonding kommt lediglich dort ins Spiel, wo die Datenübertragungsrate mehrerer Teilnehmeranschlussleitungen zur Bereitstellung einer Ethernet-Anschlussleitung genutzt werden soll (z. B. im Bereich der Geschäftskundenanwendungen).

Bonding ist in der Lage, die aktuellen Mindestanforderungen zu erfüllen. Da diese Technologie jedoch an die Verfügbarkeit mehrerer Kupferdoppeladern gebunden ist, lässt sich zu der Relevanz von Bonding zur Erfüllung der Mindestversorgung nach TKMV keine verlässliche Aussage treffen. Auch müssen Ports und DSLAM für die Umsetzung dieser Technologie geeignet sein.

2.1.4 (X)G.fast-basierte Technologien

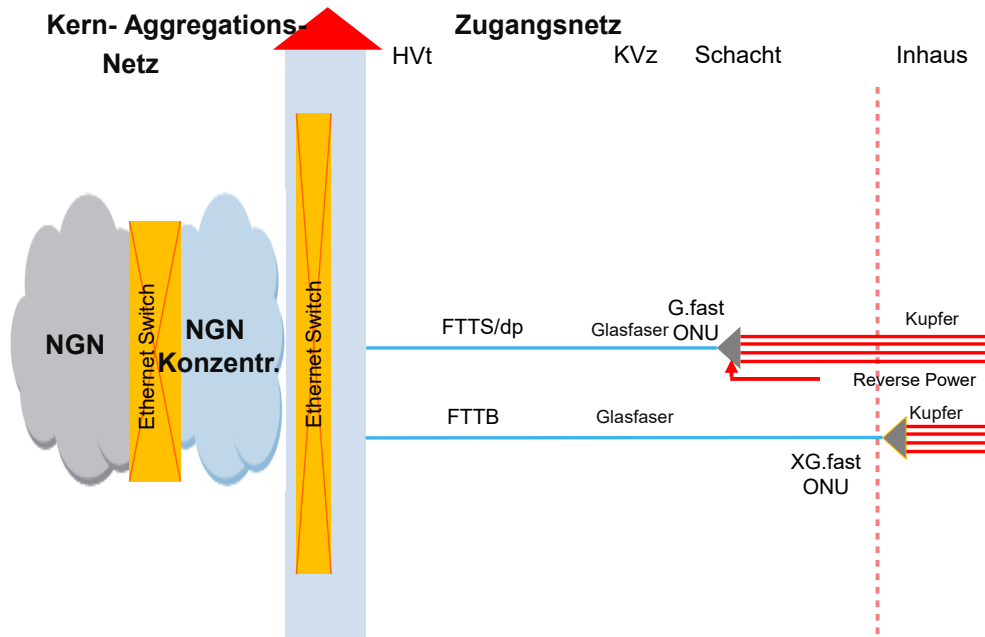
2.1.4.1 (X)G.fast – Charakterisierung der Anschlusstechnologie

Bei G.fast und XG.fast handelt es sich ebenfalls um kupferbasierte Anschlusstechnologien. Bei ihnen steigen die genutzten Übertragungsfrequenzen auf den Kupferdoppeladern auf 106 oder 212 MHz (G.fast) bzw. 500 MHz (XG.fast). Die Reichweiten für derartig hohe Frequenzen sind entlang von Kupferdoppeladern sehr beschränkt. Der DLSAM, in diesem Kontext auch DPU genannt²⁵, muss daher unmittelbar in der Nachbarschaft am Straßenrand oder unmittelbar im Keller des anzuschließenden Objektes stehen.

²⁴ Die Deutsche Telekom schließt den Einsatz von Bonding zur Erfüllung der Mindestversorgung auch vor dem Hintergrund aus, dass für die Bereitstellung dieser Anschlusstechnologien keine automatisierten Prozesse zur Verfügung stünden (Interviews mit der DTAG im Zusammenhang mit Los 1 Datenerfassung der TKMV-Marktüberprüfungsprojekte 2023, nicht öffentlich verfügbar).

²⁵ Distribution Point Unit, unterstützt maximal 48 Teilnehmer (ITU-T G.7900, 2014).

Abbildung 2-13: Netzstruktur von (X)G.fast



Quelle: wik²⁶

2.1.4.2 (X)G.fast – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

G.fast

G.fast²⁷ arbeitet nach ähnlichen Prinzipien wie VDSL2-Vectoring. Es arbeitet in einer ersten Version im Frequenzbereich bis 106 MHz, in einem weiteren Schritt bis 212 MHz. Für beide Bandbreitenbereiche sind individuelle Vectoring-Prozessoren im Einsatz, weil das Nebensprechverhalten in beiden Frequenzbändern sehr unterschiedlich intensiv geschieht.

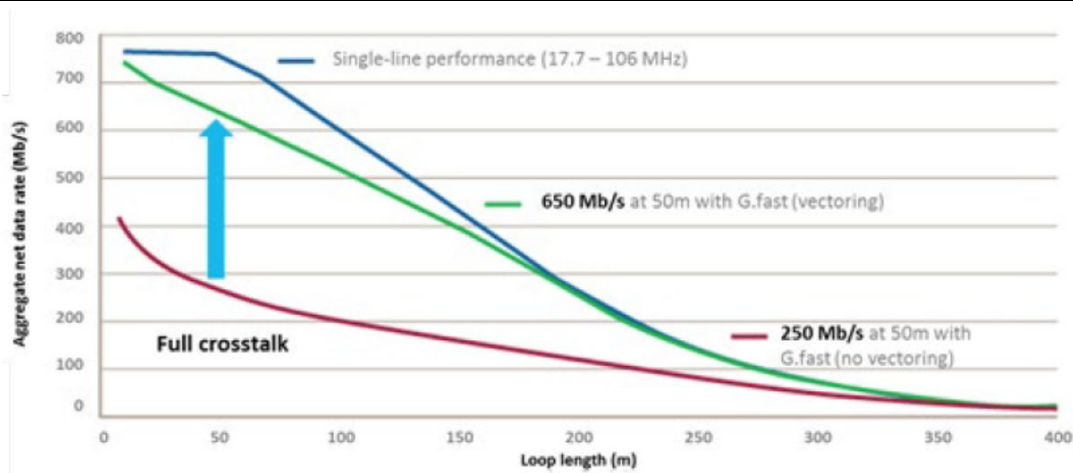
Seine Übertragungsbandbreite kommt in der Summe von Up- und Downstream auf ca. 750 Mbps (106 MHz) bzw. 1,2 Gbps (212 MHz), jeweils übertragungslängenabhängig (Abbildung 2-14). Die Aufteilung der Übertragungsrichtungen ist je DPU frei einstellbar, im Gegensatz zu ADSL und VDSL. So kann ein Betreiber sukzessive die zunehmend symmetrische Bandbreitennachfrage²⁸ bedienen, jeweils je DPU.

²⁶ Plückebaum, T. (2023).

²⁷ ITU-T G.7900, 2014.

²⁸ Strube Martins, S. et al. (2017).

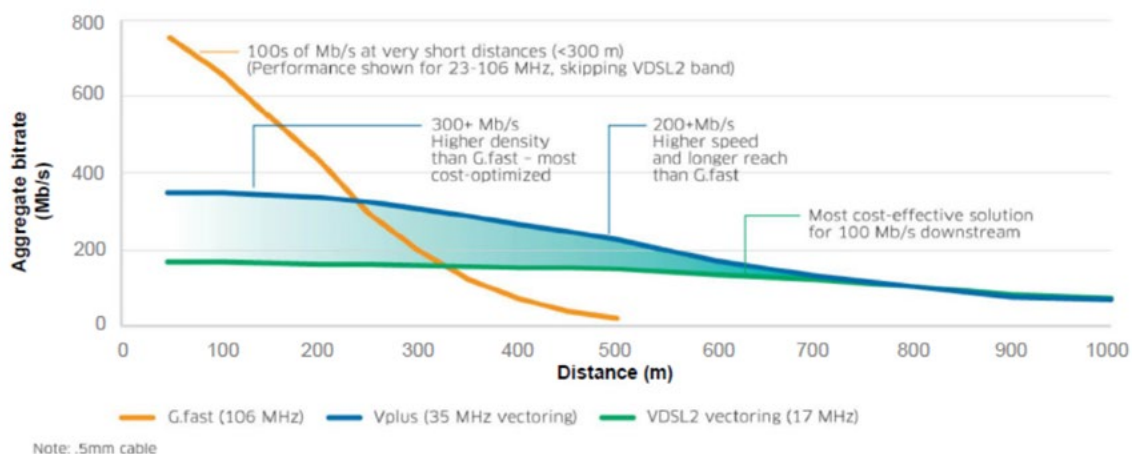
Abbildung 2-14: Bandbreiten-Gewinn bei G.fast



Quelle: Nokia (2013)

Abbildung 2-14 zeigt, dass einerseits zur Erzielung hoher Bandbreiten Vectoring erforderlich ist, andererseits der Vectoring-Gewinn nur über kurze Reichweiten hält und schon bei 350 m auf das Niveau von VDSL-Vectoring absinkt. Es handelt sich daher um eine typische FTTS- / FTTB-Technologie, die kurz vor oder in den Kundengebäuden einsetzbar ist. Dies bedeutet, dass das FTTS-Glasfasernetz vom Hvt ggf. über die KVz hinaus bis kurz vor die Gebäude ausgebaut werden muss. Genauer beschreibt dies noch der Vergleich der Bandbreiten von G.fast mit VDSL-Vectoring-Profil 35b und 17a in Abbildung 2-15: G.fast performt bereits bei Anschlussleitungslängen ab 250 – 350 m schlechter als VDSL-Profil 35b bzw. 17a.

Abbildung 2-15: Bandbreiten von G.fast, VDSL-Profil 35b und 17a im Vergleich über die Anschlussleitungslänge



Quelle: Alcatel-Lucent, Spruyt/Vanhastel (2014), <https://www.nokia.com/networks/technologies/vdsl2-vectoring/>

In realen FTTB-Installationen kann G.fast bei einer gebäudeinternen Verkabelung aus sternförmig geführten, geschirmten Kat 6- oder höherwertigen Doppeladern ohne Vectoring auskommen, weil es bei dieser Topologie und Kabeltechnik so gut wie kein Nebensprechen gibt. Eine solche Verkabelung findet man in modernen Büro- und Privatwohnhäusern vor. Sie entspricht seit Mitte der 90er Jahre dem Stand der Technik. Im Allgemeinen und bei den überwiegend noch nicht geschirmten Gebäudeverkabelungen wird zur Vermeidung von Nebensprechen Vectoring benötigt. Je höher die Frequenzen, desto intensiver wird das Nebensprechen und desto aufwändiger werden die Schätz- und Rechenverfahren. Für das volle Frequenzspektrum bis 212 MHz werden mehrere Schätzverfahren für das Nebensprechen in den unterschiedlichen Frequenzbereichen benötigt. Dies erhöht den Rechenaufwand deutlich und verringert bei gegebener Prozessorkapazität die Zahl korrigierbarer Ports. Diese Restriktion hinsichtlich der Portanzahl hat jedoch praktisch keine Auswirkung, weil die Größe der DPU gleichfalls auf maximal 48 Ports beschränkt ist.

Der DSLAM- bzw. die G.fast-DPU hat eine maximale Baugröße von 48 Teilnehmeranschlüssen. Es gibt jedoch auch kleinere Größen. Seine Energieversorgung erfolgt typischerweise über die Kundengebäude (reverse powering). Somit entfallen teure separate Stromanschlüsse an die DPU-Standorte durch die Energieversorger, wie sie bei FTTC-VDSL erforderlich sind. Die Elektronik ist entweder in kleinen Schränken am Straßenrand, an Telefonmasten oder in bereits existierenden Schächten vor den Kundengebäuden untergebracht.²⁹

XG.fast

Für den nächsten Erweiterungsschritt XG.fast wurde der Frequenzbereich bis 500 MHz erweitert. Dem folgend soll die Übertragungsbandbreite 10 Gbps (Summe) erreichen. Diese kann nur bei Übertragungslängen von maximal 50 bis 100 m erreicht werden. XG.fast ist daher eine typische FTTB-Technologie.

Die Marktreife von XG.fast ist seit 2020 gegeben. Auch XG.fast basiert auf Vectoring zur Eliminierung des Nebensprechens, wenn die Art und Struktur des gebäudeinternen Netzes dieses erfordern (s. G.fast).

Reichweitenbeschränkungen bei den Anforderungen der Mindestversorgung nach TKMV

Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 kann man entnehmen, dass G.fast für die Bereitstellung der Mindestversorgung nach TKMV (10/ 1,7 Mbps) bei dem Einsatz in den Topologien FTTS und FTTB geeignet ist. Eine Längenbeschränkung lässt sich bei ca. 400 m

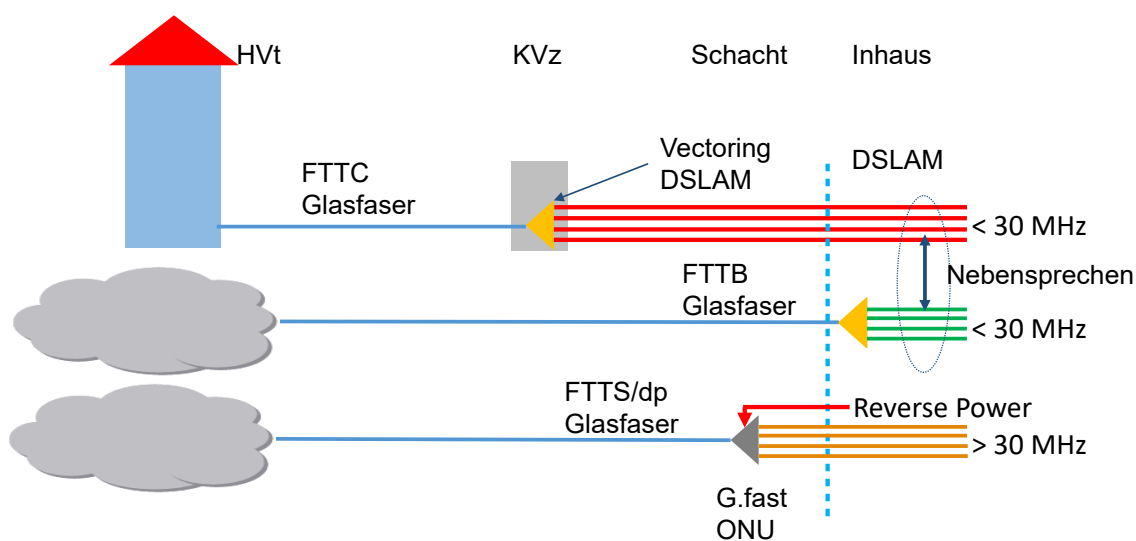
²⁹ Nach Pilotversuchen in Bibern (Schweiz) hat beispielsweise die Swisscom ab Oktober 2016 den ersten kommerziellen FTTS-Ausbau mit G.fast umgesetzt. Siehe: Swisscom (2016). Allerdings wird G.fast mittlerweile nicht weiter ausgebaut, sondern im Neuausbau durch FTTH ersetzt. In Deutschland hat ein FTTS-Ausbau nicht stattgefunden, gleichfalls nicht in Österreich. Im U.K. gab es in größerem Umfang Pilotinstallationen an kleineren KVZ-Standorten.

abschätzen. Ähnlich kann man für XG.fast abschätzen, dass es als FTTB im Inhausbereich eingesetzt werden kann und im kurzen Anschlusslängenbereich einen hohen Bandbreitenpeak (< 100 m) ausweist, sich dann aber in seinem Bandbreitenverlauf über die Länge gleich zu G.fast verhält.

Koexistenz verschiedener Übertragungsverfahren im Inhausbereich

Kommen im Inhausbereich unterschiedliche Übertragungsverfahren auf Kupferdoppeladern zum Tragen, die alle im unteren Frequenzbereich überlappen, so kommt es hier zu Störungen.³⁰ Sofern die Inhausinfrastruktur aus normalen ungeschirmten Telefondoppeladern in vieladrigen Steigekabeln ausgebaut ist, ist ein Nebensprechen und sich gegenseitiges Stören unvermeidbar, es sein denn, die Übertragungsverfahren mit den insgesamt höheren Frequenzen verzichten auf die Nutzung der unteren Frequenzspektrien. Dies nimmt ihnen jedoch die Frequenzen mit einer höheren Reichweitenerwartung und beschränkt insofern die Einsetzbarkeit der Technologie. Eine Abhilfe bringt hier nur eine geschirmte Doppeladerverkabelung.³¹ Diese Zusammenhänge verdeutlichen, dass man sich hier im Bereich nicht am Schreibtisch planbarer Unabwägbarkeiten gebäudeinterner Versorgung bewegt.

Abbildung 2-16: VDSL, G.fast und XG.fast parallel im Inhausbereich



Quelle: wik.

Während die FTTC-Technologien oft noch im HVt (das Haus in der Grafik) an die nächste Netzebene angeschlossen werden, erfolgt dies für FTTS und FTTB i. d. R. bereits auf einer höheren Netzebene (z. B. BNG-Standort), hier dargestellt durch eine Wolke.

³⁰ Solche Konstellationen sind insbesondere dann zu erwarten, wenn im Zuge von Infrastrukturwettbewerb (X)G.fast-Lösungen und VDSL-Vectoring-Technologien in einem Wohngebäude von verschiedenen Betreibern realisiert werden.

³¹ STP: Shielded Twisted Pair, ab Kategorie 6, vgl. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 493/ 2022.

Marktrelevanz

G.fast und XG.fast haben in Deutschland nach unserer Kenntnis auf der Anschlusslinie keine oder nur eine geringe Relevanz im Markt. Eine Ausnahme bildet die Verwendung als Abschluss von FTTB im Inhausbereich, weil mit diesen Techniken auf die bestehende (Telefon-) Infrastruktur aufgesetzt werden kann und keine Neuverkabelung erforderlich ist. Grundsätzlich kann nahezu jedes andere kupferdoppeladerbasierte Übertragungsverfahren auf den hier relevanten Längen innerhalb von Gebäuden die Mindestanforderungen nach TKMV auch erfüllen. G.fast oder gar XG.fast braucht es dafür nicht. Aber wo es installiert ist, erfüllt es die Anforderungen in jedem Fall.

2.1.5 Zusammenfassung kupferdoppeladerbasierter Anschlussnetze

Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die auf dem Markt befindlichen kupferdoppeladerbasierten Teilnehmeranschlussstechniken für die breitbandige Übertragung. Bei den kupferdoppeladerbasierten Übertragungsmedien ist die Leitungslänge eine wesentliche bestimmende Größe für die bei den Endkunden ankommende Übertragungsrate. Ergänzend zu den üblichen Darstellungen haben wir für dieses Übertragungsmedium daher eine maximale Länge der Anschlussleitung aus den Messwerten der verschiedenen Übertragungstechnologien für die Kupferdoppelader (z. B. aus Abbildung 2-4) abgelesen. Diese Messwerte sind Einzelmesswerte, d.h. sie berücksichtigen eine optimale Situation ohne Effekte des Nebensprechens aus der Beschaltung der anderen Doppeladern des Anschlusskabels. Die Wirkungen des Nebensprechens und seiner weitgehenden Beseitigung durch Vectoring-Verfahren beschreiben Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10.

Für die Verfahren ohne Vectoring (ADSL bis VDSL (8a)), die i. d. R. auf die TAL ab HVt geschaltet sind und die wegen des Operierens in niedrigen Frequenzbereichen die größten Reichweiten, aber die niedrigsten Bandbreiten erzielen, ist das Erreichen der Mindestanforderungen nach TKMV entweder generell (technologiebedingt) nicht möglich (ADSL und ADSL2) oder nur in einem geringen Umkreis (ADSL2+) unter 400 m, weil der Upstream bei größeren Entfernungen unterhalb der geforderten 1,7 Mbps liegen wird. Auch für VDSL (8b) ist der Upstream die begrenzende Größe für die Leitungslänge (ca. 2.200 m). Beeinträchtigt werden die Werte noch durch die Nebensprecheffekte, d.h. den Beschaltungsgrad der Kabel. Damit kann eine signifikante Zahl der Kunden (> 30%)³² mit den vorgenannten Techniken ab HVt nicht mit dem heutigen Mindestniveau versorgt werden. Die Vectoring-Technologien, die mit höheren Frequenzen und höheren Bandbreiten arbeiten und die näher am Endkunden aufgebaut werden müssen (KVz, Straßenrand, Keller), sind von der Beschaltung der Kabel weitgehend unbeeinträchtigt und erreichen in der Regel alle Kunden innerhalb der aufgeführten Längenbeschränkungen.

32 Abbildung 2-5.

Tabelle 2-3: Vergleich aller kupferbasierten breitbandigen Übertragungstechniken des Anschlussnetzes

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Kupfer Doppelader		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
ADSL	FTTN/FTTEx	10	1	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2	FTTN/FTTEx	12	1,5	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2+	FTTEx/FTTC	16	2,4	400	2.600	< 7	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 (8b)	FTTC	50	15	2.200	4.000	< 5	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 Vectoring (17a)	FTTC	90	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Vectoring (30a)	FTTB	200	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Supervect. (35b)	FTTC	300	40	2.200	300	< 5	ja, längenabhängig
Bonding	FTTN - FTTC	nb * BW(DA)	nb * BW(DA)		s.o.	< 7	nein, nicht verfügbar
Phantoming	FTTN - FTTC	(nb + np) * BW	(nb + np) * BW		s.o.	< 9	nein, nicht verfügbar
G.fast (106)	FTTS/dp	350	350	400	250	< 5	ja
G.fast (212)	FTTS/dp	600	600	400	250	< 5	ja
XG.fast	FTTB	5.000	5.000	400	50	< 5	ja

Legende: nb: Anzahl der im Bonding betriebenen parallelen DA,
 np: Anzahl der davon zusätzlich im Phantoming betriebenen Kanäle
 BW: Bandwidth (Bandbreite)
 DA: Doppelader

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik

Die Latenzen sind im Rahmen der Mindestversorgung nach TKMV als unkritisch einzuschätzen.³³

2.2 Koaxialkabelbasierte und hybride Anslusstechologien

Koaxialkabel sind Kupferkabel mit einer Ader in der Mitte, umgeben von einem Schirm als Rückleiter in der Außenhaut. Sie strahlen so gut wie keine elektromagnetischen Felder um sich herum ab und sind gut geeignet für eine hochfrequente Übertragung. Heute üblich sind Frequenzen bis zu 2,7 GHz auf den bereits installierten Kabeln. Diese Kabel sind erheblich dicker bezogen auf die eine Kupferader, die sie umhüllen.³⁴

³³ Vgl. <https://www.vdsl-tarifvergleich.de/speed-optimierung/ping-zeiten.html>, die angegebenen PING-Zeiten sind das Doppelte der hier wiedergegebenen one-way-Werte.

³⁴ Zuloaga, G. et al. (2022).

An ein Kabel wurden ursprünglich mehrere Tausend Endteilnehmer angeschaltet. Das war so lange unproblematisch, wie das Kabel nur dazu genutzt wurde, in eine Richtung (Down) an viele Teilnehmer viele Informationen – ein volles TV-Programm-Angebot – zu übertragen. Das Kabel kann als ein Shared Medium charakterisiert werden: Es ist ein zwischen allen angeschlossenen Kunden in seiner Nutzung geteiltes Übertragungsmedium.

Der hohe Frequenzbereich, den das Kabel durch seine Bauart unterstützt, erlaubt es aber prinzipiell auch, das Kabel ergänzend für viele Teilnehmer in bidirektionaler Kommunikation zu nutzen. In der Kommunikation vom Netz zum Kunden (Down) gibt es dafür – wie bei den TV-Signalen – einen von allen empfangenen digitalen Kommunikationskanal, aus dem die jeweils adressierte Empfängerstation die an sie gerichteten Nachrichten entnimmt. In der anderen Richtung gibt es gleichfalls einen gemeinsam genutzten Kanal (Up). Dieser wird bei den Koaxialnetzen typischerweise von einem zentralen Gerät administriert, welches auf einer Ebene vergleichbar mit den Metropolitan Points of Presence (MPoP) angesiedelt ist. Dieses Gerät vergibt für bestimmte Zeitintervalle Senderechte an die verschiedenen angeschlossenen sendewilligen Teilnehmer. Sofern nur ein Teilnehmer senden und empfangen will, steht ihm die gesamte Kapazität dieser beiden gerichteten Kanäle (Down und Up) zur Verfügung. Andernfalls muss er sich die Kapazität mit den anderen kommunikationswilligen Teilnehmern teilen. Diese bidirektionale Datenkommunikationsform ist im DOCSIS-Standard³⁵ seit vielen Jahren und über mehrere Generationen standardisiert.

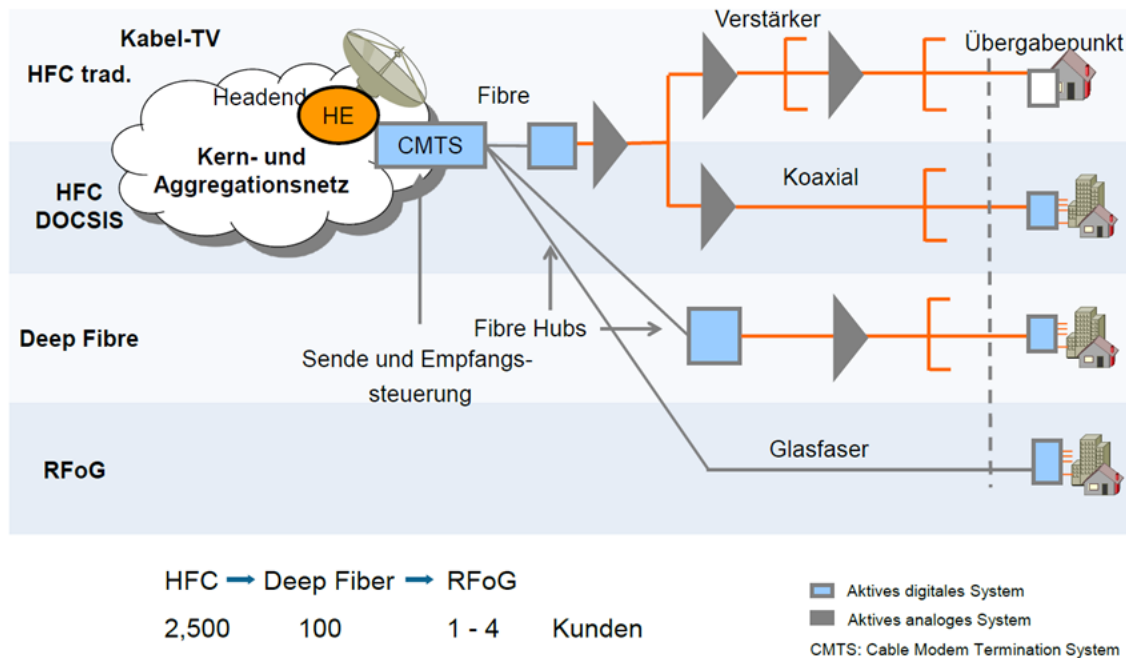
Das zentrale Gerät, das die Zugriffe auf das Koaxialkabel als gemeinsames Medium koordiniert, ist ein CMTS (Cable Modem Termination System); jeder Teilnehmer betreibt bei sich als Gegenstelle ein Cable Modem, an das neben dem Fernseher das Inhausnetz über eine Ethernet-Schnittstelle und einen Router angeschlossen wird.

Wesentlicher Unterschied zu den Kabeln aus Kupferdoppeladern ist daher die Eigenschaft des Shared Medium. Das entspricht der ursprünglichen Intention, Radio- und TV-Signale gleichermaßen in einem Massenkanaal an viele Teilnehmer zu verteilen. Auf das eine Leiterpaar (innen und außen) greifen alle dort angeschlossenen Teilnehmer zu. Auch für die bidirektionalen Kommunikationskanäle (Up- und Downstream) gilt, dass alle in einem Koaxialkabelsegment angeschlossenen Teilnehmer gemeinsam auf das Übertragungsmedium zugreifen und sich die Bandbreite teilen müssen. Hierfür kommuniziert das CMTS mit den bei den Teilnehmern das Koaxialnetz abschließenden Kabel-Modems,

35 Data over Cable Service Interface Specification fing bei Release 1.0 an; heute in Deutschland implementiert sind noch geringe Reste von Release 2.1; Release 3.0 wurde bereits in großem Umfang auf Release 3.1 aufgerüstet, Release 4.0 soll in naher Zukunft in Pilotinstallationen implementiert werden.

die wiederum die TV-Signale auf Koaxialports und den Telekommunikationsverkehr (Internet und Telefonie) auf entsprechenden Schnittstellen³⁶ zugänglich machen.³⁷

Abbildung 2-17: Struktur der TV-Kabel Netze (DOCSIS)



Quelle: wik, HFC: Hybrid Fibre COAX, RFOG: Radio Frequency over Glas

Die Koaxialkabelnetze bestehen in der Regel aus Radio Head-End Systemen an zentraler Stelle, an denen die Radio- und TV-Signale in das Kabel-TV-Festnetz eingespeist werden, zum anderen aus den dort gleichfalls angesiedelten CMTS. Ein Frequenzmixer bringt die Signale zusammen und überträgt sie heute typischerweise zunächst über Glasfaser bis zu sogenannten Fibre Nodes (Fibre Hubs), in denen die optischen in elektrische Signale zur Übertragung über die Koaxialkabelnetze gewandelt werden. Für die Upstream Kommunikation müssen dort auch die elektrischen Signale auf den Koaxialkabeln in optische gewandelt und zum CMTS übertragen werden. Erst nach dem Fibre Node beginnt damit das Shared Medium, ein Koaxialkabelsegment.

Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit

Auch für die Koaxialkabel gilt das Ohm'sche Gesetz und die damit verbundene **Dämpfung**, die in den TV-Kabelnetzen mit Hilfe von elektrischen Verstärkern überwunden wird. Für die Kommunikation mit DOCSIS müssen die Verstärker in beiden Übertragungsrichtungen

³⁶ Heute typischerweise Ethernet und VoIP, ältere Modems unterstützen auch direkt analoge PSTN- und ISDN-Schnittstellen für die Telefonie. Oft wird heute auch ein WLAN-Zugang und ggf. DECT Schnurlos-Telefonie angeboten.

³⁷ In dieser Hinsicht sind CMTS und Kabel-Modems vergleichbar mit den OLT und ONU der x.PON Glasfasertechnologie (vgl. Abschnitt 2.3.1).

tungen die entsprechenden Frequenzbereiche auffrischen. Über längere Distanzen werden wiederholt Verstärker benötigt. Jeder Verstärker braucht eine elektrische Energieversorgung, um seine Arbeit verrichten zu können. Die Verstärker sind typischerweise in kleinen Schränken am Straßenrand oder in Schächten untergebracht. Typischerweise gibt es zwei getrennte Verstärkerrichtungen, individuell für das (schmale) Upstream-Frequenzband am unteren Rand des Spektrums und ein (breites) Downstream-Frequenzband für die TV- und Datenkommunikation in der Downstream-Richtung.

Grundsätzlich kann man die Kapazität des Systems durch eine Erweiterung des **Frequenzbandes** und ggf. eine andere Aufteilung der Richtungsanteile erweitern. Dies hat u. U. zur Folge, dass in den betroffenen Segmenten die Verstärker und Kabelmodems ausgetauscht werden müssen.

Eine weitere und bevorzugte Option zur Kapazitätserweiterung von Koaxialkabelnetzen besteht darin, die Zahl der Teilnehmer pro Koaxialkabelsegment zu verringern. Während es in den Anfangszeiten der DOCSIS-Architektur oft mehrere tausend Teilnehmer in einem solchen Segment geben konnte, wurden durch sogenanntes **Fibre-Node-Splitting** die Koaxialkabelsegmente in kleinere Einheiten untergliedert. Von einer Deep-Fibre-Architektur spricht man bei ca. 50 bis 100 Teilnehmern je Fibre Node. Dazu muss die Glasfaser in viele Fällen auch weiter in das Netz in Richtung Teilnehmer ausgebaut werden. Die Menge der benötigten Verstärker verringert sich entsprechend. Wenn die Glasfaser auch in kleineren Wohneinheiten oder gar in jeder Wohnung angekommen ist, wo sie dann von kleinen Fibre Nodes abgeschlossen wird, spricht man auch von einer RFoG-Topologie (vgl. Abbildung 2-17). Dann muss sich der Teilnehmer die Bandbreite mit nur noch wenigen Teilnehmern (1-4) teilen, allerdings muss das Netz als FTTB- oder FTTH-Netz ausgelegt werden und benötigt dazu erhebliche Investitionen.

Der Vorteil beim Nachrüsten eines bestehenden Kabel-TV-Netzes besteht bei dieser Methode darin, dass punktuell (gebietsweise/koaxialkabelsegmentweise) nachfragebezogen die Kapazität erweitert werden kann und jedenfalls keine Umbaumaßnahmen für das gesamte Netz innerhalb kurzer Zeit erforderlich werden.³⁸

2.2.1 DOCSIS 2.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlusstechnologie und konkrete Ausprägungsformen der Qualitätsparameter

DOCSIS 2.0 erschien im Jahr 2002 und steigerte die maximal mögliche Datenrate im Upstream auf 30 Mbps, im Downstream auf 40 Mbps.³⁹ Der unterstützte Frequenzbereich liegt zwischen 88 MHz bis 860 MHz im Downstream und 30 MHz bis 42 MHz im Upstream. Es gibt 2 - 3 Upstream-Kanäle von bis zu 5 MHz. Welcher Kanal zwischen der Kopfstelle und dem Kabelmodem genutzt wird, wird während der Synchronisation des

³⁸ Vgl. auch Jay et al. (2013), Plückebaum et al. (2019).

³⁹ Luber, S. (2021).

Modems festgelegt und nicht dynamisch nach Bedarf über die gesamte Upstream-Kapazität alloziert. Bei der Vielzahl von Teilnehmern an einem Koaxialkabelsegment (oft > 2.500) müsste in diese Technik massiv investiert werden, so dass dies einem Upgrade auf höhere DOCSIS-Releases gleichkäme.⁴⁰

Nur wenn DOCSIS 2.0 nahezu unbeschaltet ist, kann diese Technologie den Mindestanforderungen der TKMV entsprechen. Ob diese Rahmenbedingung im Einzelfall erfüllt ist, ist unklar; in der realen betrieblichen Umgebung erachten wir es als nicht realistisch. Wir halten DOCSIS 2.0 ohne die erforderlichen Upgrades⁴¹ für nicht geeignet, eine Mindestanforderung nach TKMV zu erfüllen.

Marktliche Relevanz

Während die beiden größeren Betreiber (Vodafone und Pyur) in Interviews im Jahr 2023 angegeben haben, kein DOCSIS 2.0 zu betreiben, ist die WIK-Consult im Rahmen Ihrer Projektarbeit noch DOCSIS 2.0-Installationen begegnet. Aber auch für diese waren Upgrades auf höhere Releases vorbereitet.

2.2.2 DOCSIS 3.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlusstechnologie und konkrete Ausprägungsformen⁴²

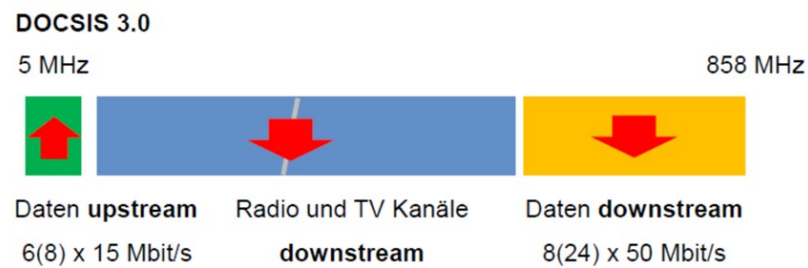
DOCSIS 3.0 nutzt den Frequenzbereich von 5 bis ca. 858 MHz für die Übertragung von Daten (inkl. Telefonie) sowie Radio- und TV-Signalen. Im unteren Upstream-Bereich sind bis zu 8 Frequenzblöcke für 15 Mbps, insgesamt also 120 Mbps vorgesehen. In der anderen Richtung kommen wir für die Datenkommunikation Downstream auf maximal 24 Frequenzblöcke für je 50 Mbps, d. h. auf insgesamt 1,2 Gbps (vgl. Abbildung 2-18). Das Verhältnis Upstream:Downstream beträgt also 1:10. Ein solch asymmetrischer Bedarf wird heute in der Regel nicht nachgefragt, so dass ein Teil der Downstream-Kapazität entweder nicht genutzt wird, d. h. brachliegt oder für andere, zusätzliche TV-Kanäle genutzt werden kann.

⁴⁰ Ein Kanal kann bei DOCSIS 2.0 nicht nutzungsabhängig gewechselt werden. Wenn die Kanalallokation gleichmäßig vorgenommen wird, kommen bei 3 Kanälen jeweils ca. 800 Kunden in Betracht, die sich den Kanal teilen. Wenn davon 80 gleichzeitig aktiv sind, ist kein Upstream mit 1,7 Mbps möglich. Unter der Annahme von 10% gleichzeitig aktiven Kunden dürften für den Upstream maximal 176 Kunden einem Upstream-Kanal zugeordnet werden. Bei 40 Mbps downstream und 10 Mbps upstream Bandbreite kämen nur 40 Kunden in Betracht.

⁴¹ Es wäre Node-Splitting bis auf entsprechend wenige Teilnehmer erforderlich. Der einfachere und effizientere Weg ist ein Upgrade auf eine höhere DOCSIS-Version.

⁴² Plückerbaum, T. (2023).

Abbildung 2-18: Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.0



Quelle: wik

Die Kapazität des Radio- und TV-Kanal-Bereiches steht immer im Wettstreit mit der Bandbreite für die Datenkanäle. Analoge TV-Kanäle brauchen mehr Bandbreite als digitale Kanäle. Das gilt für Radio und TV gleichermaßen. Natürlich spielt auch die Zahl der Kanäle, die insgesamt übertragen werden sollen, eine Rolle. Selten gesehene Spartenkanäle werden ggf. besser als IP-Streaming on Demand übertragen, als dass sie allen Kunden im TV-Kanalbündel zur Verfügung stehen. Somit ist die Marktstrategie im Auftritt der Kabel-TV-Welt auch für die in den Datenkanälen zur Verfügung stehende Kapazität bzw. Datenübertragungsrate von Bedeutung.

Tabelle 2-4: DOCSIS 1.0 bis 3.0 in der Übersicht

	DOCSIS 1.0	DOCSIS 1.1	DOCSIS 2.0	DOCSIS 3.0
Highlights	Initial cable broadband technology	Added voice over IP service	Higher upstream speed	Greatly enhances capacity
DS Kapazität	40 Mbit/s	40 Mbit/s	40 Mbit/s	1 Gbit/s
US Kapazität	10 Mbit/s	10 Mbit/s	30 Mbit/s	100 Mbit/s
Produktiv-Datum	1997	2001	2002	2008

Quelle: CableLabs (<https://www.cablelabs.com/full-duplex-docsis/>)

DOCSIS 3.0 ist der Datenübertragungsstandard für bidirektionale Kommunikation neben dem TV-Signal Broadcast für ein koaxialkabelbasiertes Kabel-TV-Netz, das vom CMTS bis zu seinen Fiber Nodes Glasfaserverbindungen einsetzt. Dies begründet die Bezeichnung HFC, Hybrid Fibre Coax (Abbildung 2-17).

Die Bandbreite für den einzelnen Endkunden hängt in diesem mit den anderen Kunden auf dem Koaxialkabelsegment geteilten Übertragungskanal von der Zahl der gleichzeitig aktiven Nutzer und deren Nutzungsverhalten ab. Die Latenz liegt in den DOCSIS-Netzen bei < 5 ms (ping one-way).⁴³

⁴³ White, G. et al. (2019). Die Angaben zur Verzögerung stellen auf die Umlaufzeit (Roundtrip) ab. In diesem Kontext wurden die Angaben der Umlaufzeit durch zwei geteilt, um eine Approximation der Latenz zu erhalten.

Marktliche Relevanz

DOCSIS 3.0 war die weitverbreitete TV-Kabelnetz-Plattform für bidirektionale Individualkommunikation in Deutschland bei allen Betreibern. In großen Teilen wurde ein Upgrade auf DOCSIS 3.1 vorgenommen oder ist vorbereitet. Derzeit ist die Relevanz von DOCSIS 3.0 in Deutschland noch als hoch, aber deutlich abnehmend einzuschätzen.

2.2.3 DOCSIS 3.1-Technologien – Charakterisierung der Anschlusstechnologie und konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter⁴⁴

DOCSIS 3.1 wurde 2013 standardisiert. Bei DOCSIS 3.1 wurde der Frequenzbereich insgesamt auf aktuell 1,2 GHz und optional für spätere Nutzung auf 1,7 GHz erweitert. Upstream werden dadurch bis zu 1 Gbps im mit anderen Nutzern geteilten Kanal möglich und downstream 10 Gbps.

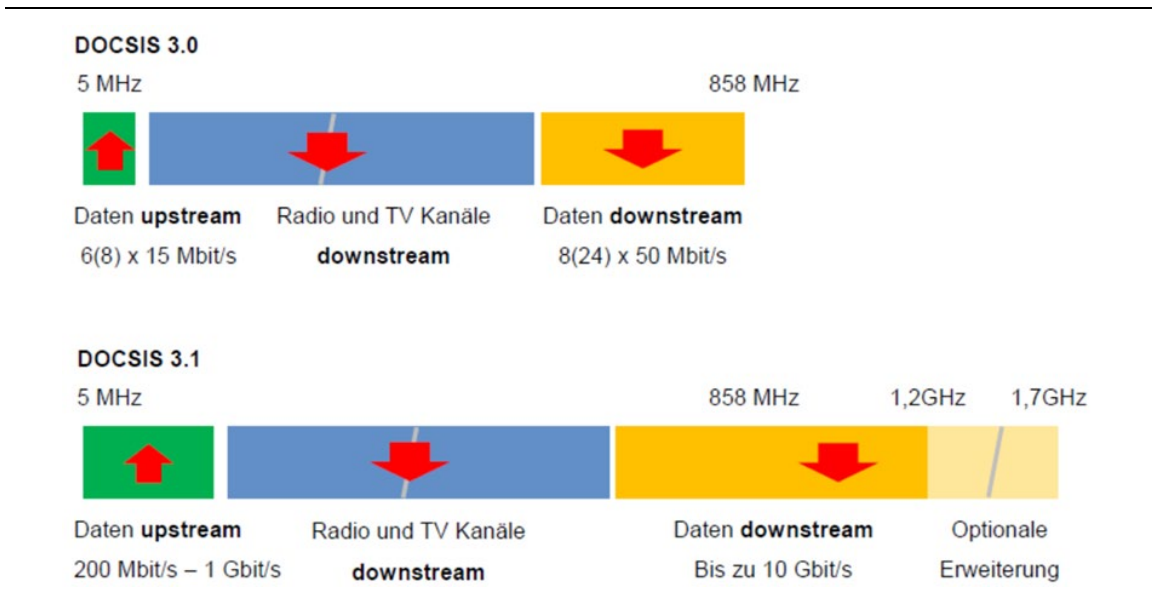
Die Frequenzbereiche und deren Belegung müssen durch die Verstärker im Feld unterstützt werden (Frequenzbereich, Übertragungsrichtung). Sofern dies noch nicht der Fall ist, müssen sie in den Netzteilen, in denen hochgerüstet werden soll, ausgetauscht werden. DOCSIS 3.1-fähige Kabelmodems sind bereits seit 2016 auf dem Markt verfügbar. Sie wurden seitdem bereits bei Neuanschlüssen oder Systemupgrades/Reparaturaustausch eingesetzt, weil sie abwärts kompatibel sind und der spätere Austausch und Wechsel keine ganz so große Hürde mehr darstellt. So konnte die Aufrüstung längerfristig und kostensparend vorbereitet werden. Ein Strukturbild für den Aufbau der DOCSIS-Anschlussnetze zeigt Abbildung 2-17.

Eine typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 zeigt Abbildung 2-19 im Vergleich.

DOCSIS 3.1 unterstützt 10 Gbps down- und 1 Gbps upstream, wegen der verwendeten Verstärker unabhängig von der Länge der Koaxialkabel im Anschlussnetz.

⁴⁴ Plückebaum, T. (2023).

Abbildung 2-19: Typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 im Vergleich



Quelle: wik

Die Latenz liegt in den DOCSIS-Netzen bei < 5 ms (ping one-way).⁴⁵

Marktliche Relevanz in Deutschland

DOCSIS 3.1 ist derzeit die Zielarchitektur, in die alle Koaxialkabelnetze in Deutschland derzeit migriert werden bzw. mit der die überwiegende Zahl der Koaxialkabel-Anschlüsse realisiert wird.

2.2.4 DOCSIS 4.0-Technologien – Charakterisierung der Anschlusstechnologie und konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter ⁴⁶

Für den nächsten Entwicklungsschritt wurde von den Cable Labs und nahezu parallel von Nokias Bell Labs im Jahr 2017 angekündigt, DOCSIS 3.1 um die Möglichkeit zu erweitern, über den vollen Frequenzbereich auch upstream kommunizieren zu können.⁴⁷

Wenn im selben Frequenzbereich upstream und downstream kommuniziert wird, tritt das Problem von Echos auf, denn die Kabelmodems empfangen im selben Frequenzbereich, in dem sie auch senden. Zudem gibt es den Effekt des Nebensprechens benachbarter Kabelmodems. Diese Effekte gilt es zu unterdrücken. Dazu müssen die Fibre Nodes nahe zu den Teilnehmern hin (deep fibre oder mehr) ausgebaut und die Kabelmodems erweitert oder gar erneuert werden, denn sie senden nun upstream über die volle Frequenzbandbreite. Zudem benötigen sie Echo-Unterdrücker oder vergleichbares Equipment,

⁴⁵ Siehe FN 43, White, G. et al. (2019).

⁴⁶ Plückebaum, T. (2023).

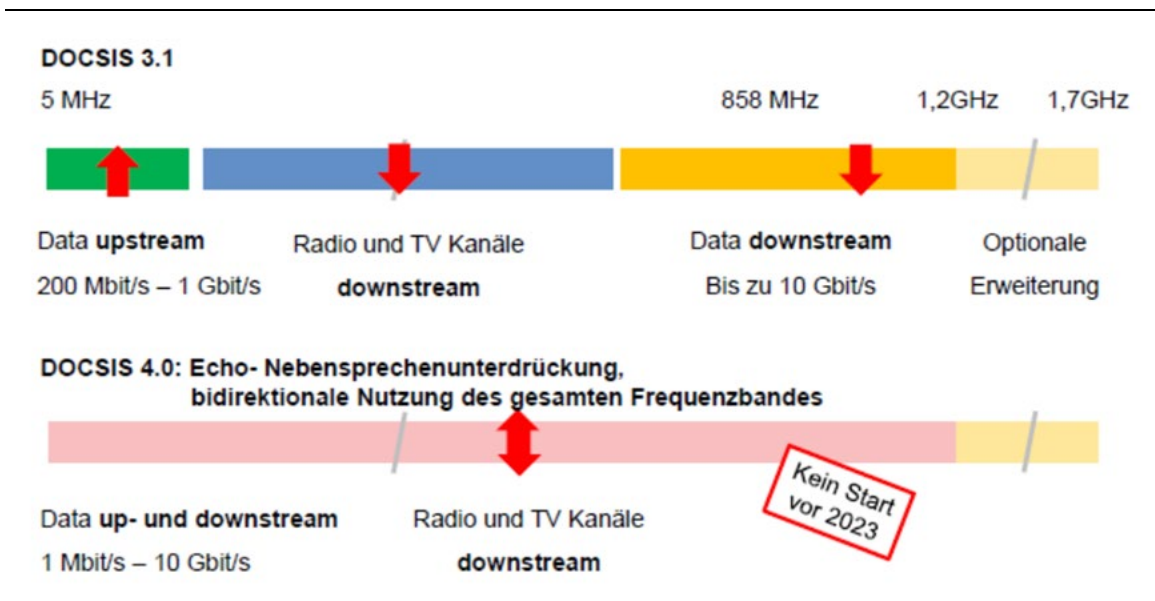
⁴⁷ CableLabs (2017).

ähnlich den Vectoring-Erweiterungen an den DPU und CPE bei G.fast und XG.fast⁴⁸. Dies begrenzt die Fibre Node-Größe auf ca. 50 Teilnehmer. Das Glasfasernetz muss auf eine Deep Fibre oder RFoG-Topologie hin erweitert werden.⁴⁹ Sofern Verstärker noch auf der Strecke zum Endkunden benötigt werden, muss auch bei diesen der Upstream-Kanal auf die volle Bandbreite ausgebaut werden. Ebenso müssen die CMTS ausgetauscht werden.

DOCSIS 4.0 bietet auf dem gemeinsam genutzten Kanal eine Bandbreite von 10.000 Mbps (10 Gbps) symmetrisch, d.h. in beide (up- und downstream-) Richtungen. Diese Kapazität teilen sich alle an einem Fibre Node angeschlossenen und gleichzeitig aktiven Kunden.

Die Größe der Fiber Nodes sollte ca. 50 Teilnehmer nicht überschreiten, um die Komplexität des Vectoring für die Echounterdrückung nicht exponentiell in die Höhe zu treiben und die für XG.fast entwickelten Vectoring-Chipsets vom Ansatz her weiter zu verwenden. Das bedeutet, dass das der Technologie immanente Sharing keine Einschränkungen für eine Mindestversorgung nach TKMV hat (10.000 Mbps / 50 Teilnehmer = 200 Mbps je Teilnehmer).

Abbildung 2-20: Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.1 FD/ DOCSIS 4.0



Quelle: wik

Die Latenz liegt in den DOCSIS-Netzen bei < 5 ms (ping one-way).⁵⁰

⁴⁸ XG.fast von Nokia.

⁴⁹ Wieviel zusätzliche Investitionen hierfür erforderlich sind, richtet sich im Wesentlichen danach, wieviel davon schon zuvor für Fibre-Node-Splitting investiert worden ist. Vgl. Plückebaum et al. (2019).

⁵⁰ Siehe FN 43, White, G. et al. (2019).

Marktliche Relevanz in Deutschland

Die Systemhersteller und Standardisierungsgremien haben inzwischen die technischen Spezifikationen abgestimmt und publiziert.⁵¹ Nokia mit XG-Cable und die Cable Labs mit ihrem weniger konturierten Ansatz für FD (Full Duplex) haben sich auf einen gemeinsamen, erfolgversprechenden Lösungsweg geeinigt, der unter DOCSIS 4.0 vermarktet wird. Erste Pilotinstallationen sind für 2023 angekündigt.⁵²

DOCSIS 4.0 hat für Deutschland (bisher) keine erkennbare Relevanz. Vodafone als größter TV-Kabelnetzbetreiber in Deutschland hat zwar einen FTTH-Ausbau angekündigt, aber nicht genauer erläutert, auf welcher Glasfaserstruktur und mit welcher Anschlussnetz-Technologie dieser erfolgen soll. Vorstellbar ist auch, dass der von Vodafone Deutschland angekündigte Ausbau mit FTTH über einen Einsatz von x.PON mit Video-Wellenlänge für das Radio- und TV-Broadcast auf dedizierter Wellenlänge (Abbildung 2-22) erfolgt, so dass die Kapazitäten von x.PON für die breitbandige Internet-Kommunikation unbeschränkt von linearem TV genutzt werden können und DOCSIS als Mittel zur bidirektionalen Kommunikation auf Koaxialkabelnetzen überflüssig wird.

2.2.5 Zusammenfassung koaxialkabelbasierte und hybride Anschlussnetze

Tabelle 2-5 fasst die für die Bereitstellung der Mindestversorgung nach TKMV relevanten Eigenschaften der zum Betrieb von Koaxialkabelnetzen marktverfügbaren DOCSIS-Technologien zusammen. Alle Technologien sind im Prinzip für die Bereitstellung der TKMV-Mindestversorgung geeignet, sofern die Koaxialkabelsegmente nicht zu groß werden, dass die Menge der gleichzeitig im Netz aktiven Internet-Nutzer die für jeden verfügbare Übertragungsrate nicht unter die Mindestversorgung drückt.

Die Latenz liegt in allen DOCSIS-Netzen bei < 5 ms (ping one-way).⁵³

⁵¹ <https://www.cablelabs.com/blog/on-the-path-to-10g-cablelabs-publishes-docsis-4-0-specification> (2020), aktuell: <https://www.cablelabs.com/specifications/search?category=DOCSIS&subcat=DOCSIS%204.0&doctype=Specifications&query=&content=false&archives=false> (2022).

⁵² z. B. Comcast, USA: <https://www.golem.de/sonstiges/zustimmung/auswahl.html?from=https%3A%2F%2Fwww.golem.de%2Fnews%2Fdocsis-4-0-kabelnetzbetreiber-fuehrt-in-2023-symmetrisches-10g-ein-2209-168227.html&referer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

⁵³ S. Fußnote 33, Abschnitt 2.1.5 oder auch White, G. et al. (2019).

Tabelle 2-5: Übersicht der koaxialkabelbasierten Anschlussnetztechniken (DOCSIS)

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Koaxialkabel		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
Docsis 2.0	CMTS	40	30		160.000	< 5	nein, nicht wirtschaftlich
Docsis 3.0	fibre node	1.200	200		160.000	< 5	ja
Docsis 3.1	fibre node	10.000	1.000		160.000	< 5	ja
Docsis 4.0 (FD)	deep fibre	10.000	10.000		160.000	< 5	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik

Aufgrund der festen Zuordnung der Endkunden bei DOCSIS 2.0 zu einem Up- bzw. Downstream-Frequenzblock ist kein belastungsabhängiger Wechsel der Nutzer zwischen den einzelnen Frequenzblöcken möglich. Um die Mindestversorgung für die mit DOCSIS 2.0 angeschlossenen Kunden sicherstellen zu können, dürfen nur wenige Kunden je Frequenzblock zugeordnet werden. In Anbetracht der Auslegung von DOCSIS 2.0 für 5.000 Nutzer am CMTS/Fiber Node wäre ein entsprechendes Downscaling (Node Splitting) unwirtschaftlich. Dafür stehen zur Ertüchtigung eines DOCSIS 2.0-Netzes die Migrationswege auf die neueren Technologien zur Verfügung.

Grundsätzlich gilt für alle DOCSIS-Netze: Durch die Zwischenverstärker gibt es keine relevante Längenabhängigkeit, so dass die Bandbreite im gesamten Koaxialkabelnetz zur Verfügung steht.

Im Ergebnis kann man festhalten, dass die Entwicklung der Kapazitätserweiterungen bei DOCSIS stärker nachfrageorientiert erfolgen kann als bei den FTTx-Netzstrukturen, aber insgesamt sind schon einige Systemwechsel sowie ein zumindest FTTS-orientierter Glasfaserausbau über die Zeit erforderlich.

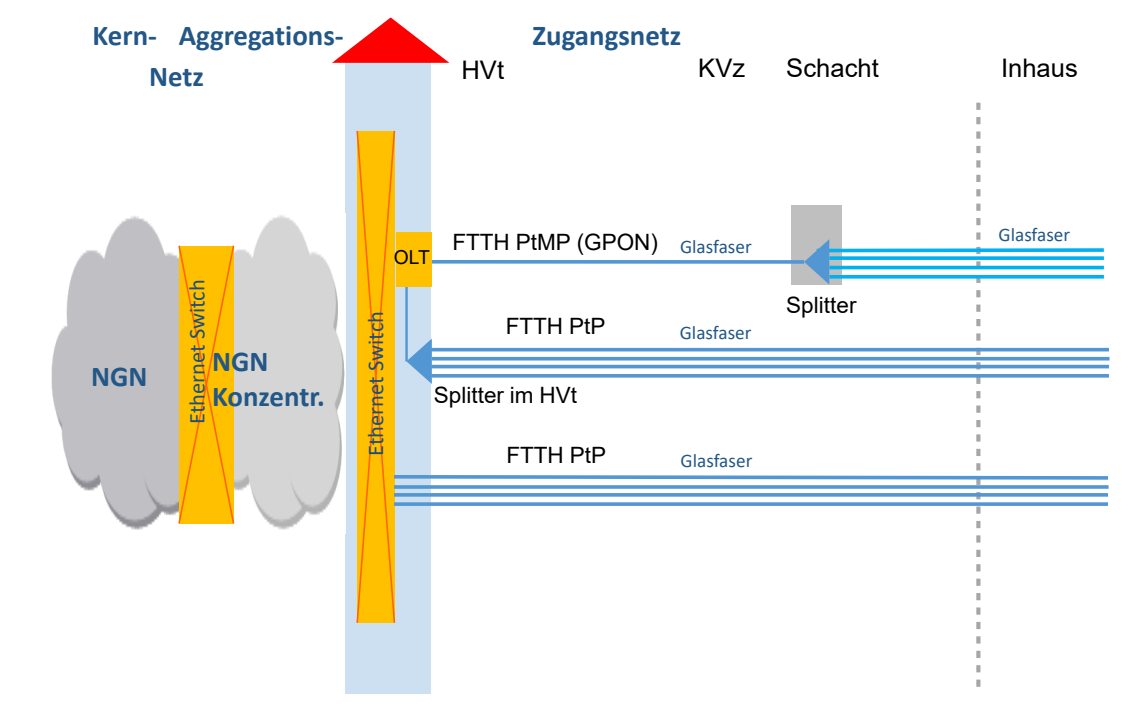
2.3 Glasfaserbasierte Anschlussstechnologien

Die glasfaserbasierten Anschlussstechnologien unterscheiden sich im Grundsatz zunächst nach der Topologie der Glasfasern: Entweder werden die Fasern Punkt-zu-Punkt (PtP) als individuelle Einzelfasern vom Endkunden bis in den Metropolitan Point of Presence (MPoP) geführt und dort auf einem optischen Verteiler (ODF) aufgelegt⁵⁴ oder es findet bereits im Endkundengebäude oder auf dem Weg zum MPoP (im Feld) eine Aggregation der Anschlussfasern der Haushalte auf eine einzige weiterleitende Faser statt. Dieser Fall wird als Punkt-zu-MultiPunkt-Topologie bezeichnet. Hier bedarf es eines passiven optischen Splitters, der das Licht der Fasern auf eine weiterführende Faser

⁵⁴ Am MPoP werden die PtP-Glasfasern dann an aggregierendes Equipment weitergeleitet.

(Feeder) zusammenführt und umgekehrt das Licht von der Faser zu den Haushalten gleichermaßen auf alle angeschlossenen Fasern zu den Haushalten verteilt. Die optischen Signale werden im Splitter nicht verändert, allenfalls durch das Splitting in seiner Leistung entsprechend dem Splittingverhältnis gemindert. In umgekehrter Richtung braucht es einen Koordinator an zentraler Stelle (OLT: Optical Line Terminator), der den einzelnen angeschlossenen Endstellen koordiniert Senderechte gibt, so dass sich die Upstream-Signale nicht überlagern und unkenntlich werden. An den Endstellen braucht es dazu eine Gegenstelle zur Koordination (ONU: Optical Network Unit), die auch die an die Endstelle gerichteten Nachrichten empfängt (in Abbildung 2-21 nicht eingetragen).⁵⁵

Abbildung 2-21: Struktur der Glasfaseranschlussnetze PtP und PtMP



Quelle: wik

Das Funktionspaar OLT und ONU kann verschiedenen Technikgenerationen angehören. Daher subsumieren wir diese Technikfamilie auch als x.PON. PON steht dabei für Passives Optisches Netz, wobei alle oben abgebildeten Glasfaserarchitekturen PON sind.⁵⁶ Die Beschränkung des Begriffs PON auf die Technologiefamilie, die man zum Betrieb gesplitteter Netze zwingend braucht, ist daher irreführend.

⁵⁵ Für vertiefende Literatur s. Fußnote 1.

⁵⁶ Grundsätzlich sind alle optischen Anschlussnetze, die keine aktiven Komponenten benötigen, passive optische Netze, abgekürzt PON (Passive Optical Networks). Dies umfasst die beiden Glasfasertopologien PtP und PtMP. Dennoch hat sich für die für PtMP erforderliche ergänzende Systemwelt aus OLT und ONUs die Bezeichnung GPON eingepreßt (Gigabit PON). Da sich mittlerweile eine umfangreichere Technologiefamilie dazu entwickelt hat, sprechen wir von der x.PON-Familie.

2.3.1 FTTH-x.PON-basierte Technologien

2.3.1.1 X.PON-Technologien – Charakterisierung der Anschlusstechnologie

Auf der gemeinsam genutzten Faser (Feeder-Faser) wird das Licht von der Zentrale auf alle angeschlossenen Fasern gleichermaßen aufgeteilt bzw. von den Endteilnehmern kommend auf die einzelne, konzentrierende und weiterführende Faser geführt und diese beleuchtet (vgl. Abbildung 2-21). Es ist offensichtlich, dass gleichzeitiges Licht von mehreren Endteilnehmern die im Licht enthaltene Information der einzelnen Endteilnehmer gegenseitig überlagert. Es braucht also ein ordnendes System, das immer nur einem der Endteilnehmer das Senderecht auf der Feederfaser gewährt. Diese Aufgabe übernimmt der zentrale OLT am MPoP in Zusammenspiel mit den bei jedem Endkunden eingesetzten ONUs. OLT und ONU stimmen untereinander jeweils ein Zeitfenster ab, in dem der einzelne Endteilnehmer senden kann. In der anderen Richtung adressiert der OLT die ONU des Empfängers einer Nachricht. Nur diese empfangende ONU nimmt die Nachricht vom Netz. Dieses System eignet sich grundsätzlich auch für die Übermittlung von Nachrichten an alle (Broadcast), so. z. B. für TV-Signale.

Das älteste der x.PON-Systeme (GPON) leistet 2,5 Gbps downstream und 1,25 Gbps upstream. Teilt man diese durch maximal 64 Endteilnehmer (gesplitterte Nutzung), steht pro Teilnehmer also mehr Datenübertragungsrate zur Verfügung als zur Erfüllung der Mindestversorgungsansprüche nach TKMV erforderlich. Es bleiben je Endkunde mindestens $2,5 \text{ Gbps}/64 = 39 \text{ Mbps}$.

2.3.1.2 x.PON-Technologien – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Derzeit sind die folgenden Technologien marktverfügbar (Tabelle 2-6):

Tabelle 2-6: x.PON Systemübersicht

System	Standard	Jahr	Up [Gbps]	Down [Gbps]	Sym.	Splitter maximal
GPON	ITU-T G.984	2003	1,25	2,5	asym	1:64
XG-PON	ITU-T G.987	2010	2,5	10	asym	1:128
XGS-PON	ITU-T G.9807.1	2016	10	10	sym	1:128
TWDM-PON/ NG-PON2	ITU-T G.989	2015	4-8 x 10	4-8 x 10	sym	1:256

Quelle: wik, ITU-T

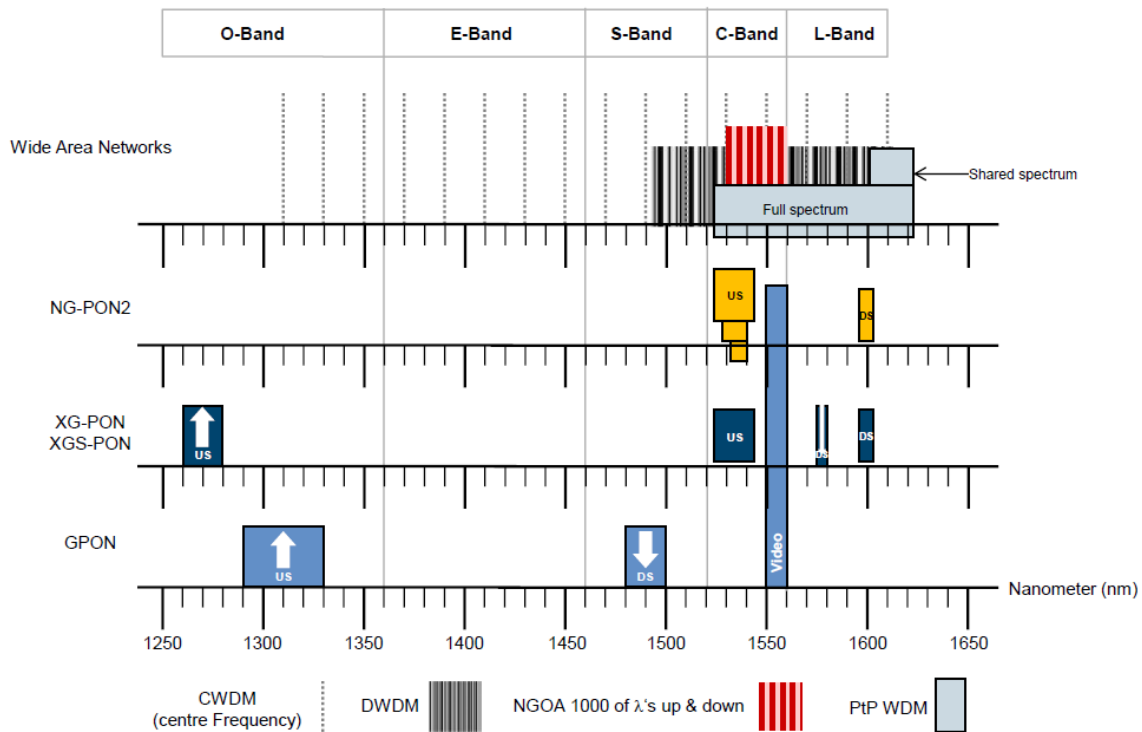
Die Technologien unterscheiden sich hinsichtlich der Datenübertragungsraten, mit denen die Daten übertragen werden, und hinsichtlich des maximal zulässigen Splitting-Faktors. Dieser gibt an, wie viele Endteilnehmer über Splitter maximal auf eine Feederfaser aufgeschaltet werden dürfen. Bestimmend dafür ist die Leistungsfähigkeit der Optischen Elemente, insbesondere in der Downstream-Richtung vom OLT zur ONU, denn die Stärke des Lichtes vom OLT verteilt sich auf alle angeschlossenen Endfasern zu gleichen Teilen, d. h. es kommt ggf. nur 1/64 (oder weniger bei höheren Splittingverhältnissen) der Lichtleistung beim Empfänger an. Dies bestimmt den Dämpfungsplan⁵⁷ und damit die Ausdehnung des Glasfaseranschlussnetzes wesentlich mit. Es müssen nicht alle Fasern an einer Stelle zusammengeführt werden, sondern dies kann auch verteilt geschehen, z. B. im Keller, in einem Faserverzweiger und am ODF, oder gar noch häufiger. Die Obergrenze der Summe der zusammengeführten Fasern darf jedoch das Splittingverhältnis nicht überschreiten.⁵⁸ Auch fügt jeder zusätzliche Splitter eine weitere Minderung der Lichtleistung hinzu (Einfügedämpfung), wie auch jeder Faser-Splice und jeder Stecker die empfangene Lichtleistung beim Empfänger reduziert.

Das derzeit bei vielen Betreibern im Neuausbau eingesetzte x.PON-System ist XGS.PON. Es bietet eine Datenübertragungsrate von 10 Gbps in beide Übertragungsrichtungen und unterscheidet sich dadurch von den Vorgängersystemen GPON und XG.PON. Die Nachfolgeneration NG-PON2 vervielfacht die XGS.PON-Technik in der Übertragung desselben Prinzips auf mehrere separate Wellenlängen (farbiges Licht, „Farben“). Derzeit sind bis zu 8 Wellenlängen einsetzbar, die alle jeweils 10 Gbps symmetrisch übertragen können. In der Entwicklung befinden sich 25 Gbps und 50 Gbps Übertragungssysteme.

⁵⁷ Man könnte auch laienhaft von einem Lichtstärkeplan sprechen.

⁵⁸ Zuloaga, G. et al. (2022).

Abbildung 2-22: Frequenzplan der verschiedenen optischen Übertragungsverfahren im Anschlussnetz und im Weitverkehrsnetz



Quelle: wik

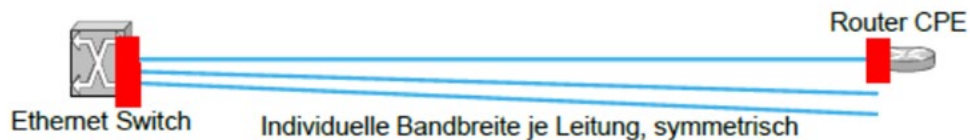
Abbildung 2-22 zeigt in der horizontalen Achse die typischen für die optische Übertragung auf Glasfasern verwendeten Wellenlängenbereiche. Vertikal sind die verschiedenen Anwendungsgruppen der optischen Signalübertragung auf der Wellenlängenskala aufgeführt, farblich markiert in den Bereichen, die sie nutzen, durch Pfeile oder US/DS auch noch in ihrer Übertragungsrichtung (up- bzw. downstream) gekennzeichnet. Wesentliche Essenz aus Abbildung 2-22 ist die Tatsache, dass durch Nutzung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche GPON und XG.PON nebeneinander auf derselben Glasfaser existieren können, ebenso NG-PON2. Nicht gleichzeitig auf derselben Faser existieren könnten hingegen XG.PON und XGS.PON. Dies gibt einige Upgrade-Pfade vor, wenn keine parallelen, unbeschalteten Glasfasern für eine Umrüstung auf leistungsfähigere Systeme zur Verfügung stehen, was in Deutschland die Regel ist⁵⁹. Für das Upgrade von GPON über XG.PON oder XGS.PON auf NG-PON2 müssen immer die OLT und ONU der Kunden erneuert werden, die von den höheren Datenübertragungsraten profitieren wollen, weil sich die Bandbreiten/Kapazitäten und dafür genutzten Wellenlängen ändern (Abbildung 2-23).

⁵⁹ Mögliche Ausnahme davon: In nach dem Materialkonzept des Bundes ausgebauten Glasfaserfördergebieten sind im letzten Netzsegment bis ins Haus ggf. Mehrfasersysteme verlegt.

Abbildung 2-23: Vom Upgrade betroffene Systeme bei x.PON (und Ethernet PtP)

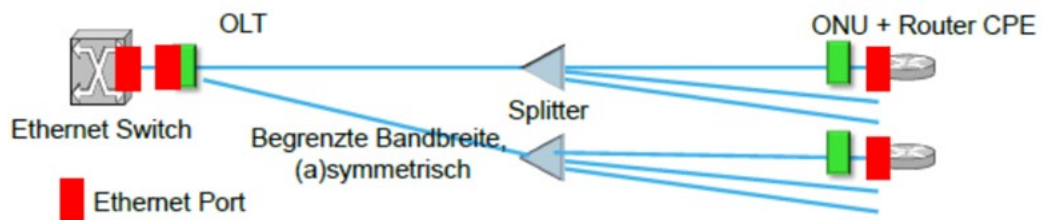
PtP:

- Zentraler Ethernet Switch: Austausch von Ports, falls erforderlich (1G, 10G, 100G), CPE: Port Upgrade, falls erforderlich, oder gar Austausch der Router



PtMP:

- Austausch von OLT und allen Kunden ONT, und CPE: Port Upgrade, falls erforderlich, oder gar Austausch des Router



Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik. Es muss typischerweise bei den x.PON-Upgrades mehr Elektronik ausgetauscht werden als beim Upgrade der PtP-Ethernet-Architektur.

Die optische Reichweite bei den x.PON-Systemen ist zum einen von der Leistungsfähigkeit der optischen Komponenten bestimmt (es gibt z. B. bei GPON 3 Klassen), zum anderen aber auch von der Größe der Splitter und deren Anzahl. Jeder Splitter hat zunächst eine Einfügedämpfung, verursacht durch die Splices, mit denen er in die Faserstränge eingebunden wird. Zudem verteilt sich die Downstream-Leistung im Splitter auf die Zahl der angeschlossenen Fasern, unabhängig davon, ob sie am Ende beschaltet sind oder nicht. Werden mehrere Splitter im Rahmen des maximal zulässigen Splittingverhältnisses hintereinandergeschaltet (kaskadiert), erhöht sich diesbezüglich die Einfügedämpfung.⁶⁰ Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass die angegebene Datenübertragungsrate über eine Anschlussleitungslänge von maximal 20 km gut übertragen werden kann. Eine Bandbreitendegression würde bei Überschreiten der Dämpfung nicht stattfinden, aber eine zu stark bedämpfte Verbindung könnte nicht zuverlässig aufgebaut werden und immer wieder oder dauerhaft ausfallen, ggf. auch verbunden mit einer Störung für alle Teilnehmer im betroffenen OLT-Strang.

⁶⁰ Für manche x.PON-Systeme sind (aktive) Zwischenverstärker (Reach Extender) vorgesehen – ein Bruch mit dem Prinzip des Passiven Optischen Netzes (PON).

Marktliche Relevanz in Deutschland

Die x.PON-Netze finden in der öffentlichen Wahrnehmung eine große Anwendung in Deutschland, sei es auf einer PtMP-Topologie oder auf einer PtP-Topologie. Bei letzterer sind die Splitter im MPoP hinter dem ODF angesiedelt. Vorteil der x.PON-über-PtP-Architektur ist die Verfügbarkeit transparenter PtP-Glasfaser am MPoP mit der Option, diese kundenbezogen und bedarfsorientiert mit einer anderen Technologie als x.PON zu beschalten und damit ein deutlich größeres Maß an Produktgestaltungsspielraum zu behalten.⁶¹

Die bisher in Deutschland und in Europa überwiegend eingesetzte Technologie ist GPON. Neue Installationen erfolgen i. d. R. mit dem moderneren und symmetrischen XGS.PON.

2.3.2 FTTH-Ethernet PtP-basierte Technologien

2.3.2.1 FTTH-Ethernet PtP – Charakterisierung der Anschlusstechnologie

Glasfaser-Punkt-zu-Punkt (PtP, auch PtoP oder P2P) ist die einfachste und am meisten zukunftsorientierte Anschlusstechnik auf dem Markt. Sie ist bereits seit mehreren Jahrzehnten etabliert und ausgereift und beliebig Upgrade-fähig. Zwischen jedem Endkunden und dem zentralen optischen Verteiler (ODF: Optical Distribution Frame) gibt es ein individuelles Faserpaar (im Fall der gerichteten Übertragung: für jede Richtung eine Faser; dies erlaubt preiswertere Sender und Empfänger) oder eine einzelne individuelle Faser (im Fall der bidirektionalen Übertragung: Sender und Empfänger für beide Richtungen in einem Bauelement integriert; aufwändiger, aber inzwischen auch im Massenmarkt verwendet).

Auf der Seite beim Endkunden steht typischerweise ein Router mit Glasfaseranschluss an einem Ethernet-Port, auf der zentralen Seite beim ODF steht ein Ethernet-Switch mit Multi-Port-Schnittstellenkarten. Die Geschwindigkeit einer solchen Anschlusskonfiguration beträgt wahlweise und nach Ausrüstung der Portkarten zwischen 1 und 100 Gbps, wobei der Verkehr in beiden Richtungen symmetrisch, d. h. gleich groß sein kann. Technologische Grenzen für die Bandbreite einer Glasfaser-Anschlussleitung gibt es in der Praxis nicht. Bei Bedarf könnte sie über Wellenlängen-Multiplex in ihrer Kapazität vervielfacht werden (bei DWDM: bis zu Faktor 160, bei 160 Wellenlängen à 400 Gbps). Der Einsatz separater Wellenlängen-Multiplexer ist jedoch eine nur theoretische Option für

⁶¹ Eine jüngst durchgeführte Marktbefragung des WIK bei 41 Glasfaser-ausbauenden Unternehmen zeigt gegenüber der öffentlichen Wahrnehmung ein etwas anderes Bild. Die bevorzugte Glasfasertopologie ist PtP (42% plus 24% Gemischtausbau, 34% nur PtMP). Von den PtP-Unternehmen setzen ca. 72% auf Ethernet-Technologie, 24% nutzen G.PON (über PtP). Die 34% PtMP-Unternehmen müssen eine G.PON-Technologie nutzen, so dass mehr als $34\% + 0,24 \cdot 72\% = 51,3\%$ G.PON-Technologien nutzen, denn die gemischt (PtP und PtMP) ausgebauten Gebiete kommen teilweise noch mit G.PON hinzu. Davon wird ein nennenswerter Anteil mit G.PON über PtP betrieben.
Quelle: Braun, M. et al. (2023).

die Zukunft, denn derzeit sind die Kapazitäten mit einer Datenübertragungsrate von 100 Gbps symmetrisch je Teilnehmeranschluss noch längerfristig mehr als ausreichend.

Marktliche Relevanz in Deutschland

Der große Vorteil einer Ethernet-Anschlussnetz-Infrastruktur ist ihre Flexibilität im Bedienen aller Endkunden jeweils individuell mit der Datenübertragungsrate ihres Bedarfs, ohne dass eine Technologie gewechselt oder aufgerüstet werden müsste. Das Netz wächst einfach individuell mit dem Bedarf der Endkunden und hat ein hohes Maß an Flexibilität, sowohl in der Skalierung nach unten als auch nach oben. Insofern besteht kein Risiko, dass die eingesetzten Systeme vorzeitig vor Ablauf ihrer betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer ausgetauscht werden müssten, weil sie technologisch veraltet sind oder kapazitativ nicht mehr mit dem Bedarf Schritt halten können. Eine solche Infrastruktur behindert auch keine Kunden in ihrer Bedarfsentwicklung, weil die erforderliche Basis-Infrastruktur der Glasfaser bereits vor Ort existiert, während sie in anderen Fällen erst errichtet werden müsste und dies nicht kundenindividuell und punktgenau erfolgen kann, sondern anderen, großflächigeren Ausbauregeln und Prioritäten folgen muss.

Ethernet-PtP wird weniger häufig und eher im Kontext von Wholesale-only-Geschäftsgängen eingesetzt. Anstelle des durch die x.PON-Systeme vorherbestimmten Bitstroms kann bei Glasfaser-PtP auch die transparente Glasfaser entbündelt angeboten werden.⁶²

2.3.2.2 FTTH-Ethernet PtP – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Bei Ethernet PtP gibt es technisch praktisch keine Restriktionen. Jeder Kunde wird individuell mit einem Port bedient, der die Kundenwünsche bedienen kann, derzeit mit bis zu 100 Gbps symmetrisch. Kleinere Kunden werden über die marktübliche 1 Gbps-Massemarkt-Schnittstelle angeschlossen. Dieser Wert liegt weit über der Mindestversorgung nach TKMV. Die Länge, die Ethernet-Portkarten überbrücken können, hängt von der Leistungsfähigkeit der optischen Übertragungselemente auf den Karten oder in den SFP ab.⁶³

2.3.3 Zusammenfassung glasfaserbasierter Anschlussnetze

Tabelle 2-7 gibt eine Übersicht über die glasfaserbasierten Anschlussnetztechniken. Alle Techniken erlauben die Bereitstellung von Anschlussnetzen, die die Mindestversorgungsansprüche aus der TKMV erfüllen, bei allen Beschaltungsgraden und über alle relevanten Anschlussleitungslängen hinweg.

⁶² Braun, M. et al. (2023), vgl. Fußnote 61.

⁶³ Sie kann wegen der individuellen Fasern zum Kunden auch individuell eingestellt werden, wenngleich heterogene Ports betrieblich etwas aufwändiger zu servitieren sind. Vgl. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 493, 2022.

Tabelle 2-7: Übersicht der glasfaserbasierten Anschlussnetztechniken

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Glasfaser		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
GPON (PtMP)	FTTH	2.500	1.250		20.000	< 2	ja
XG.PON	FTTH	10.000	2.500		40.000	< 2	ja
XGS.PON	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
TWDM GPON/ NG-PON2	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
DWDM GPON	FTTH	1.000	1.000		100.000	< 2	ja
Ethernet PtP	FTTH	10.000	10.000		80.000	< 2	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik

Selbst für das leistungsschwächste GPON ergeben sich bei maximaler Beschaltung eines Splitters mit 64 (gleichzeitig) aktiven Teilnehmern (Worst Case) ca. 40 Mbps je Teilnehmer downstream und für den Upstream die Hälfte, also eine über der Mindestversorgung nach TKMV-Dienstqualität über die volle Länge des Anschlussnetzes (bei GPON 20 km).⁶⁴

Die Latenzen bei den Glasfaseranschlusstechniken (ping one way) liegen unter 2 ms und sind keine Beschränkung für die Mindestversorgung nach TKMV.⁶⁵

⁶⁴ 2.500 Mbps/64 = 39 Mbps, der Upstream bietet nur die halbe Bandbreite im gemeinsam genutzten Kanal.

⁶⁵ Vgl. <https://www.vdsl-tarifvergleich.de/speed-optimierung/ping-zeiten.html>, die angegebenen PING-Zeiten sind das Doppelte der hier wiedergegebenen one-way-Werte.

2.4 Zusammenfassung über alle leitungsgebundenen Technologien

Tabelle 2-8: Übersicht über alle leitungsgebundenen Technologien

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Kupfer Doppelader		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
ADSL	FTTN/FTTEx	10	1	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2	FTTN/FTTEx	12	1,5	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2+	FTTEx/FTTC	16	2,4	400	2.600	< 7	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 (8b)	FTTC	50	15	2.200	4.000	< 5	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 Vectoring (17a)	FTTC	90	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Vectoring (30a)	FTTB	200	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Supervect. (35b)	FTTC	300	40	2.200	300	< 5	ja, längenabhängig
Bonding	FTTN - FTTC	nb * BW(DA)	nb * BW(DA)		s.o.	< 7	nein, nicht verfügbar
Phantoming	FTTN - FTTC	(nb + np) * BW	(nb + np) * BW		s.o.	< 9	nein, nicht verfügbar
G.fast (106)	FTTS/dp	350	350	400	250	< 5	ja
G.fast (212)	FTTS/dp	600	600	400	250	< 5	ja
XG.fast	FTTB	5.000	5.000	400	50	< 5	ja
Koaxialkabel		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
Docsis 2.0	CMTS	40	30		160.000	< 5	nein, nicht wirtschaftlich
Docsis 3.0	fibre node	1.200	200		160.000	< 5	ja
Docsis 3.1	fibre node	10.000	1.000		160.000	< 5	ja
Docsis 4.0 (FD)	deep fibre	10.000	10.000		160.000	< 5	ja
Glasfaser		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
GPON (PtMP)	FTTH	2.500	1.250		20.000	< 2	ja
XG.PON	FTTH	10.000	2.500		40.000	< 2	ja
XGS.PON	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
TWDM GPON/ NG-PON2	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
DWDM GPON	FTTH	1.000	1.000		100.000	< 2	ja
Ethernet PtP	FTTH	10.000	10.000		80.000	< 2	ja

Legende: nb: Anzahl der im Bonding betriebenen parallelen DA,
 np: Anzahl der davon zusätzlich im Phantoming betriebenen Kanäle
 BW: Bandwidth (Bandbreite)
 DA: Doppelader

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik

3 Satellitengestützte Technologien

Dieser Abschnitt betrachtet Kommunikationssatelliten als Mittel zur Bereitstellung eines Internet-Zugangs. Zu diesen Satelliten zählen wir ausschließlich Objekte, die sich in Erdumlaufbahnen befinden. In Abgrenzung dazu betrachten wir deshalb in der Stratosphäre angesiedelte fliegende Objekte, die mit klassischen Mobilfunktechniken ausgestattet sind, eher als eine besondere Antennenform und dem Mobilfunknetz zugehörig, selbst wenn sie aufgrund ihrer besonderen Form der Gebietsausleuchtung auch Verwandtschaft mit den Satellitennetzen aufweisen können.

Satellitengestützte Netze lassen sich in verschiedene Ausprägungsformen klassifizieren, bei denen die Höhen der Umlaufbahnen um die Erde das primäre Unterscheidungsmerkmal im Sinne der erzielbaren Kommunikationseigenschaften liefern. Die Höhen der Umlaufbahnen bestimmen im Wesentlichen die Qualität der Kommunikationseigenschaften im Hinblick darauf, auf welcher Fläche die Kommunikationskapazität mit anderen Nutzern geteilt wird (Footprint) und im Hinblick auf die Signallaufzeiten (Latenz), die im Wesentlichen durch die Entfernung zwischen Satellit und Endstellen auf dem Boden bestimmt werden. Der allgemein verwendeten Klassifizierung in

- niedrige Umlaufbahnen (Low Earth Orbit, LEO),
- mittlere Umlaufbahnen (Medium Earth Orbit, MEO) und
- geostationäre Umlaufbahnen (Geostationary Earth Orbit, GEO)

wird daher auch diese Studie folgen. Auch wenn sich die Angaben in der Literatur zu den Höhen der Umlaufbahnen der drei Ausprägungsformen subtil unterscheiden, so lässt sich doch die grobe Übereinstimmung finden, dass sich LEO-Satelliten auf Umlaufbahnen unterhalb von 2.000 km, GEO-Satelliten auf rund 36.000 km Höhe und ggf. darüber und MEO-Satelliten dazwischen befinden (vergleiche hierzu auch die Fraunhofer-Studie).⁶⁶

Diese Studie betrachtet ausschließlich bidirektionale Satellitensysteme, d. h. Systeme, die sowohl den Vorwärtskanal (Downlink) als auch den Rückkanal (Uplink) über Satelliten realisieren. Im Vergleich dazu fanden sich in den späten 1990er und (frühen) 2000er Jahren hybride Lösungen, die eine unidirektionale Satellitenübertragung zum Nutzer (Downlink) mit einem terrestrischen Rückkanal (Uplink) z. B. über Modem oder ISDN verbanden, um verglichen mit dem terrestrischen Netz eine höhere Übertragungsrate zu erzielen. Entsprechende an Endkunden gerichtete Angebote waren von mehreren Anbietern verfügbar. Heute finden sich – vermutlich aufgrund der verfügbaren Technik für bidirektionale Satellitendienste – Angebote für hybride Systeme in Deutschland anscheinend

⁶⁶ Fraunhofer IIS (2021).

nicht (mehr), zumindest nicht von Anbietern wie Astra, Eutelsat, Avanti und anderen Anbietern geostationärer Satellitendienste. Auch die Fraunhofer-Studie⁶⁷ dokumentiert keine solchen Angebote.

Allen Satellitenfunktechnologien ist gemein, dass die maximal technisch möglichen Bandbreiten zwischen Sendeanlage und Empfangsgerät zwar durch äußere Einflüsse wie Topologie und Entfernung sowie Oberflächen- und Wetterbedingungen determiniert werden. Es handelt sich jedoch immer um ein Shared Medium, bei dem sich alle nutzenden Endgeräte (präzise: die aktiven Endgeräte in einem Sektor eines Footprints) die vorhandene Bandbreite untereinander teilen müssen.

3.1 Allgemeine Eigenschaften satellitengestützter Technologien

Satellitengestützte Technologien zeichnen sich dadurch aus, dass die notwendige terrestrische Kommunikationsinfrastruktur räumlich entfernt von den Nutzern des entsprechenden Dienstes angesiedelt sein kann. Auf diese Weise lassen sich auch Nutzer in Gegenden erreichen, die weit von sonstiger Infrastruktur entfernt sind; nicht zuletzt deshalb werden Satellitendienste auch für maritime Anwender vermarktet.

Als Infrastruktur betreiben beispielsweise viele Diensteanbieter die Bodenstationen ihrer Satellitendienste an wenigen Stellen in der Bundesrepublik Deutschland oder in Europa, z. B. in Usingen bei Frankfurt. Aufgrund dieser Eigenschaft muss keine regionale oder nutzerspezifische Infrastruktur aufgebaut und gewartet werden, sondern die verwendeten – wenn auch ungleich teureren – Satelliten können im Rahmen ihrer Ausleuchtungszone beliebige Nutzer erreichen, sofern diese eine (ausreichend) freie Sicht zum Himmel haben und eine Satellitenantenne geeignet aufstellen können. Die Bodenstation muss über eine Verbindung zum Internet verfügen, einen *Point of Presence (POP)*, für den ein bi- oder multilaterales Peering mit einem oder mehreren anderen Internet-Diensteanbietern stattfindet. Dies wird oft gebündelt in *Internet Exchange Points (IXPs)* realisiert. Die Entfernung der Bodenstation von dem verwendeten POP beeinflusst die Latenz, allerdings nur dann signifikant, wenn große Entfernungen zu überbrücken sind. Innerhalb Deutschlands oder im benachbarten Luxemburg sind die Entfernungen vernachlässigbar; so findet sich beispielsweise DE-CIX in Frankfurt mit den angeschlossenen Satellitennetzbetreibern Astra (ASN 12684) und Starlink (ASN 14593).⁶⁸

Aus der Möglichkeit, beliebige Nutzer im Ausleuchtungsbereich eines Satelliten zu erreichen, ergibt sich allerdings die Einschränkung, dass die potenzielle Zahl der Nutzer eines Satellitendienstes mit der Fläche der Ausleuchtungszone eines Satelliten steigt und verglichen mit terrestrischen Netzen nur begrenzt skaliert werden kann. In Gegenden mit hoher Bevölkerungsdichte können Satellitenkapazitäten daher unzureichend sein. Ande-

⁶⁷ Fraunhofer-IIS (2021).

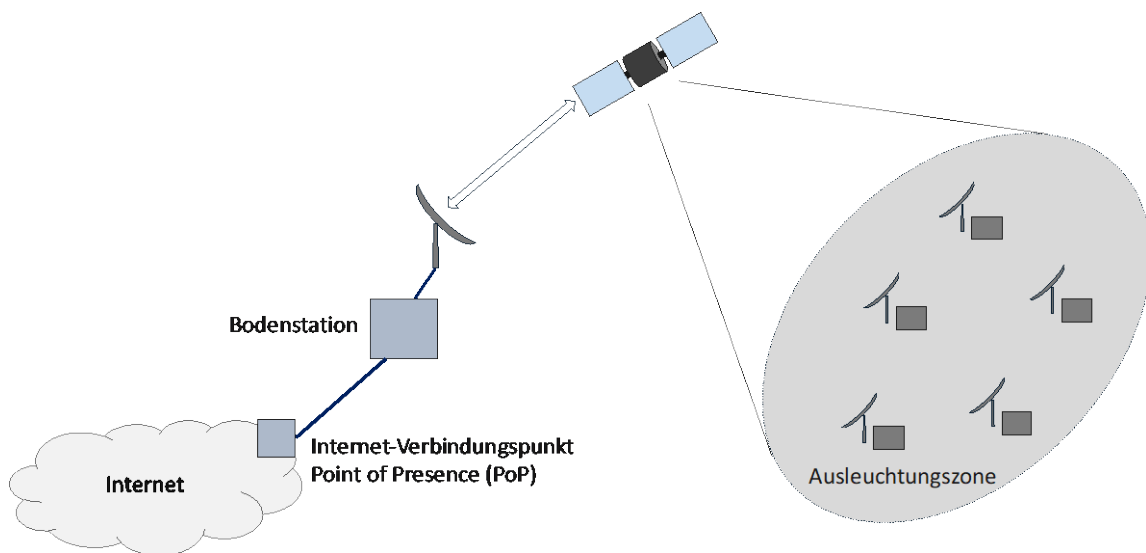
⁶⁸ Siehe DE-CIX Management (o.J.).

rerseits schafft eine hohe Bevölkerungsdichte ökonomische Anreize zum Auf- und Ausbau der terrestrischen Infrastruktur, so dass in ebensolchen Gegenden eher nicht mit der Notwendigkeit der Nutzung eines Satellitendienstes zu rechnen ist. Die heute verfügbaren Satellitendienste sind jedenfalls zusammen nicht in der Lage, allein auch nur die angemessene Versorgung der knapp 2 Millionen Haushalte der Hauptstadt Berlin zu gewährleisten.⁶⁹ Daher können sie eher als punktuelle Ergänzung in dünn besiedelten und für Infrastruktur weniger leicht zugänglichen Gebieten angesehen werden. Vor diesem Hintergrund führt diese Studie keine Betrachtung von Bevölkerungsdichten und Nutzungsdichten und den daraus resultierenden Implikationen für Satellitendienste durch, sondern beschränkt sich auf die technischen Parameter der Dienste und diskutiert, welche Arten von Satellitendiensten überhaupt für die Grundversorgung geeignet sind.

Wie oben angedeutet, benötigen Nutzer von Satellitendiensten ein freies Sichtfeld zum Satelliten, wobei sich die Anforderungen je nach Satellitentechnik unterscheiden. Dies kann die Verfügbarkeit bestimmter Satellitendienste einschränken, etwa an Berghängen, in Tälern oder in Häuserschluchten. Satellitendienste können daher nicht in allen Fällen als Ersatz für terrestrisches Internet Anwendung finden.

Satellitenbasiertes Internet kann durch Wetterphänomene beeinflusst werden, was zu Leistungsschwankungen und (kurzzeitigen) Ausfällen führen kann.⁷⁰

Abbildung 3-1: Übersicht über ein Satellitensystem



Quelle: wik

⁶⁹ Die in der Fraunhofer-Studie (Fraunhofer IIS (2021)) errechneten Kapazitäten ergeben bei großzügigen Annahmen in Summe maximal 150 Gbps für den Vorwärts- und 60 Gbps für den Rückkanal. Bei 2 Millionen Haushalten (grob die Anzahl der Haushalte in Berlin), von denen 10% gleichzeitig aktiv sind, entfielen auf jeden Haushalt nur rund 750 kbps für den Vorwärts- und 300 kbps für den Rückkanal.

⁷⁰ Vgl. z. B.: Ma, S. et al. (2022).

Abbildung 3-1 zeigt eine Übersichtsdarstellung eines Satellitensystems mit einem Satelliten und dessen Ausleuchtungszone, einigen Nutzer-Terminals, einer Bodenstation und einem PoP zum Internet-Zugang. Diese prinzipielle Struktur ist allen Satellitendiensten gemein. Allerdings unterscheidet sich die Anzahl der Bodenstationen und der PoPs je nach Satellitentyp und Anbieter. Der Betreiber eines geostationären Satelliten über Europa kommt aufgrund der festen Position des Satelliten relativ zur Erdoberfläche mit einer Bodenstation aus. LEO- und MEO-Satelliten hingegen bewegen sich auf ihren Umlaufbahnen um die Erde und nutzen mehrere Bodenstationen auf ihrem Weg. Dabei erfordern LEO-Satelliten aufgrund der niedrigen Flughöhe und damit geringen Sichtweite bis zum Horizont mehr Bodenstationen als MEO-Satelliten.⁷¹ Für die Abdeckung der Fläche der Bundesrepublik durch Satelliten reicht im Allgemeinen jedoch eine Bodenstation für alle drei Klassen von Satelliten aus.

Für die Betrachtung der Eignung der jeweiligen Satellitensysteme ist zunächst die Leistungsfähigkeit der Satellitenverbindung von der Bodenstation zum Nutzerterminal zu betrachten, insbesondere die Signallaufzeit bzw. Umlaufzeit sowie die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität. Weiterhin ist prinzipiell die Verbindung von der Bodenstation zum PoP zu berücksichtigen, dort ebenfalls die Übertragungskapazität wie auch die zusätzlich entstehende Latenz. Wie oben bereits erwähnt, ist durch die Lage Deutschlands, der relevanten Bodenstationen und deren räumlicher Nähe zu Internet-PoPs der Anteil der in diesem Segment entstehenden Latenz als gering einzustufen (< 10 ms), so dass sich diese Studie auf den objektiv messbaren Teil der Satellitenstrecke konzentriert.⁷²

Bevor in den folgenden drei Abschnitten auf die verschiedenen Satellitenklassen eingegangen wird, fasst Tabelle 3-1 einige ihrer wesentlichen Eigenschaften zusammen, auf die dann nachfolgend weiter eingegangen wird.

Bei allen Satellitenklassen kann es mehrere Anbieter geben, die jeweils eine Vielzahl von Satelliten betreiben können. Bei LEO-Satelliten ist der Einsatz vieler Satelliten erforderlich, um ein Satellitenterminal kontinuierlich zu bedienen. Bei GEO-Satelliten hingegen richtet der Nutzer seine Satellitenantenne auf einen Satelliten aus, über den er dann kommuniziert. Der Betreiber des Satellitendienstes kann natürlich viele GEO-Satelliten zur Auswahl anbieten, die Auswahl eines Satelliten erfolgt jedoch statisch. Für MEO-Konstellationen sind auch mehrere Satelliten erforderlich, jedoch deutlich weniger als es

71 Knapp 2.000 km durchmisst beispielsweise die Ausleuchtungszone eines Satelliten in rund 500 km Höhe. Dieser Wert ergibt sich aus dem minimalen (für Starlink angegebenen) Winkel zum Horizont von 25°, dem mittleren Erdradius und der Flughöhe und lässt sich trigonometrisch leicht errechnen. Vgl. auch Handley, M. (2019).

72 „Objektiv messbar“ bedeutet, dass die Veröffentlichungen, auf die sich die vorliegende Studie beruft, nur Messungen von einem Nutzerterminal zum ersten IP-fähigen System (Router) durchführen konnten, sie aber nicht genau feststellen können, wie nahe an einer Bodenstation sich dieses IP-fähige System befindet; auch sind die internen Strukturen und Detailabläufe der Satellitendiensteanbieter proprietär und bleiben verborgen.

bei LEO-Konstellationen der Fall ist. SES Astra beschreibt für ihre O3b mPower-Satelliten beispielsweise, dass sechs Satelliten für eine globale Abdeckung ausreichen.⁷³

Tabelle 3-1: Versorgung mit Breitband aus dem Weltraum

Satellitentyp	Höhe der Umlaufbahn [km]	Latenz [ms] (Boden-Sat-Boden)	Anzahl Satelliten*	Ausleuchtung pro Satellit
GEO	35.786	500–700	1	Kontinent
MEO	2.000–35.000	125–250	Einige bis einige 10	Teilkontinent
LEO	180–2.000	20–50+ (variabel)	Einige 10 bis viele 1.000	Ellipsoid-Streifen (Länder)

* Die Anzahl der Satelliten hängt von der vom Betreiber gewählten Konstellation ab.

Quelle: wik, angelehnt an Plückebaum (2021)

3.2 Geostationary Earth Orbit – Realisierungen (GEO)

Geostationäre Satelliten bewegen sich in einer äquatorialen Umlaufbahn von rund 36.000 km Höhe über dem Äquator und umkreisen die Erde synchron mit deren Umdrehung. Aus dieser großen Entfernung ergibt sich unmittelbar für einen Weg die hohe Latenz von rund 250 ms, durch die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von rund 300.000 km/s bedingt. Um 2 x 36.000 km zurückzulegen braucht Licht (und benötigen damit Funkwellen) also 2 x 120 ms = 240 ms (up und wieder down, ein Weg); diese kürzeste Entfernung gilt allerdings nur am Äquator; bei 50° nördlicher Breite ergeben sich mindestens 38.000 km Distanz und somit mehr als 250 ms Latenz bzw. mehr als 500 ms Umlaufzeit.

Die daraus resultierende Problematik wird auf den ersten Blick deutlich: Die Flughöhe bestimmt maßgeblich die Laufzeit des Signals. Danach sind geostationäre Satelliten für eine Grundversorgung mit einer maximalen Latenz von 150 ms (eine Richtung up und down) ungeeignet. Zwar wurden die Auswirkungen hoher Umlaufzeiten in der Vergangenheit durch geeignete Protokollmanipulationen in Performance Enhancing Proxies (PEPs) [RFC 3135] reduziert⁷⁴, derartige Mechanismen – etwa HTTP-Prefetching⁷⁵ oder andere Techniken der Weitverkehrsnetzoptimierung (WAN Optimizer)⁷⁶ – sind aber aufgrund des heute quasi universellen Einsatzes von Ende-zu-Ende-Verschlüsselung^{77,78} kaum noch praktisch einsetzbar und allenfalls noch eingeschränkt leistungsfähig; auch die Nutzung von VPNs etwa für Teleworking hat den effektiven Einsatz von PEPs stark eingeschränkt bis unterbunden. Außerdem lassen sich Latenzen für Anwendungen, die

⁷³ SES Astra (2024): <https://www.ses.com/o3b-mpower/power-meo>.

⁷⁴ PEPs können natürlich die Latenz nicht tatsächlich reduzieren. Internet-Protokolle wie etwa TCP und HTTP führen jedoch viele Interaktionen zwischen den Endpunkten durch, wobei die Leistungsfähigkeit mit steigender Dauer jeder einzelnen Interaktion sinkt, die wiederum mit der Umlaufzeit wächst. PEPs reduzieren durch Protokollanpassungen, Vorhersagen, Caching und andere Techniken den Einfluss einer einzelnen Interaktion und/oder die Anzahl der erforderlichen Ende-zu-Ende-Interaktionen.

⁷⁵ Seifert, N. (2000).

⁷⁶ Grevers, T., Jr. (2008).

⁷⁷ Google (o.J.), Abrufdatum: 2023.

⁷⁸ Let's Encrypt Statistics (o.J.), Abrufdatum 2023.

interaktive Multimediakommunikation nutzen, nicht reduzieren: Hier ist einzig die Einweg-Laufzeit vom Sender zum Empfänger als untere Schranke von Bedeutung, zuzüglich Warteschlangen, Jitter-Puffer usw. Primär-Anwendungen, die nicht zeitkritisch und nur wenig interaktiv sind, können einen solchen satellitenbasierten Internet-Zugang problemlos nutzen. Für den Universaldienst in Deutschland (Mindest-Grundversorgung der Bevölkerung) können sich GEO-basierte Lösungen daher jedoch nicht qualifizieren.

Dennoch findet sich ein vielschichtiges Angebot von Internet-Zugangsdiensten, die auf geostationären Satelliten beruhen, das basierend auf der Fraunhofer-Studie (2021) zusammengestellt wurde. Dieses Angebot ist in der folgenden Tabelle 3-2 kurz zusammengefasst. Die angegebenen Kapazitäten entsprechen der durch die Fraunhofer-Studie (2021) ermittelten Kapazität des jeweiligen Satellitensystems, die Bandbreiten hingegen sind den Produktangeboten durch die Satellitendienstanbieter entnommen, da durch die europaweite Ausleuchtung eine Berechnung von anteiligen Kapazitäten pro potenziellem Nutzer keine Aussagekraft besitzt, wie oben bereits beschrieben wurde. Wie der Tabelle 3-2 zu entnehmen ist, wären die einzelnen Dienstanbieter zumindest teilweise in der Lage, für eine begrenzte Nutzerzahl die geforderten Datenübertragungsraten der Grundversorgung zu liefern. Die hohen Umlaufzeiten verhindern jedoch (latenzbedingt) in der Praxis eine Internet-Nutzung gemäß TKMV.

Tabelle 3-2: Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit GEO-Satelliten

Anbieter (Produkt)	Kapazität (Downlink) [Gbps]	Kapazität (Uplink) [Gbps]	Bandbreite (Downlink) [Mbps]	Bandbreite (Uplink) [Mbps]	Latenz [ms]
Eutelsat Konnect	1,24	0,73	30–100	5	> 250
Eutelsat Konnect VHTS	9,53	4,76	k.A.	k.A.	> 250
Astra Connect	0,2–0,25	0,12–0,17	20	2	> 250
Avanti	0,21–0,63	0,09–0,32	30–50	2–4	> 250
Viasat	1,71	1,03	25–50	1–6	> 250
Viasat skyDSL 2+	1,71	1,03	5,4–15	0,3–1,8	> 250

Quelle: wik, basierend auf der Fraunhofer-Studie (2021)

Der Vollständigkeit halber gibt die folgende Abbildung 3-2 die theoretisch über Deutschland verfügbaren Kapazitäten durch GEO-Satellitenkonstellationen wieder.

Abbildung 3-2: Verfügbare Kapazität durch GEO-Satelliten

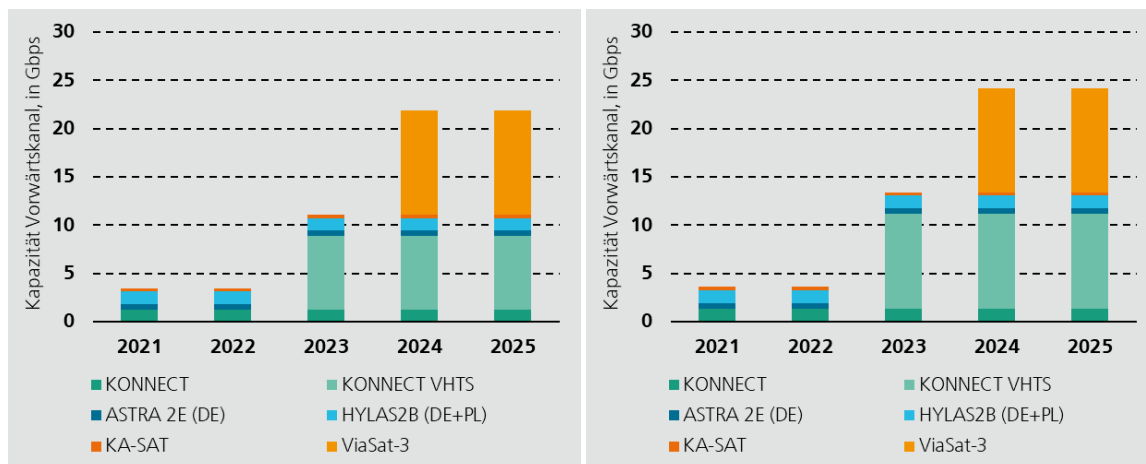


Diagramm 1: Über Deutschland geschätzt verfügbare Kapazität geostationärer Satelliten im Vorwärtskanal. Das linke Diagramm unterstellt konkurrierende Nutzung durch andere Dienste über Wasser. Das rechte Diagramm unterstellt die teilweise Verfügbarkeit der über Wasser vorhandenen Kapazität für Nutzer in Deutschland.

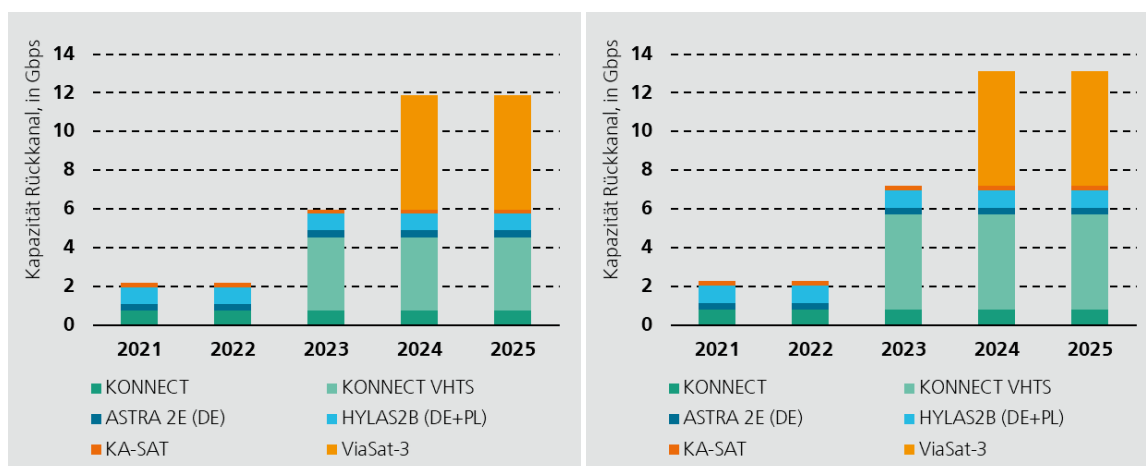


Diagramm 2: Über Deutschland geschätzt verfügbare Kapazität geostationärer Satelliten im Rückwärtskanal. Das linke Diagramm unterstellt konkurrierende Nutzung durch andere Dienste über Wasser. Das rechte Diagramm unterstellt die teilweise Verfügbarkeit der über Wasser vorhandenen Kapazität für Nutzer in Deutschland.

Quelle: Fraunhofer-Studie (2021)

Zusammenfassend sind geostationäre Satelliten aufgrund der hohen Latenz nicht für die Erbringung des Universaldienstes geeignet.

3.3 Medium Earth Orbit – Realisierungen (MEO)

MEO-Satelliten bewegen sich auf Umlaufbahnen in Höhen zwischen 2.000 km und 36.000 km. Hierzu zählen Satelliten von Navigationssystemen wie GPS und Galileo, deren Umlaufbahnen in Höhen zwischen 20.000 km und 25.000 km liegen. Kommunikationssatelliten wie O3b von SES Astra befinden sich in niedrigeren Umlaufbahnen (O3b in rund 8.000 km Höhe), was auch zu deutlich geringeren Latenzen führt (vergleiche auch

Tabelle 3-1). Im Vergleich zu geostationären und LEO-Satelliten (vgl. nächster Abschnitt) scheinen für MEO-Satelliten allerdings keine umfangreichen Erfahrungen vorzuliegen, die in wissenschaftlichen Studien dokumentiert sind.

Die Fraunhofer-Studie (2021) identifiziert nur einen Anbieter für MEO-Kommunikationssatelliten: SES Astra betreibt mit den Systemen O3b und der Ausbaustufe O3b mPower⁷⁹ einen Satellitendienst, der sich primär an kommerzielle Nutzer richtet: etwa für staatliche oder maritime Anwendungen, aber auch als Backhaul-Dienst für Telekommunikationsanbieter. O3b nutzt Satelliten auf einer äquatorialen Umlaufbahn und deckt damit für den „Standarddienst“ nur einen Teil der Bundesrepublik, bis 50° nördliche Breite, ab; bis 62° nördliche Breite ist nur ein „limitierter Dienst“ verfügbar. Die europäischen Bodenstationen für O3b befinden sich in Portugal und Griechenland, die PoPs in London, Frankfurt und Athen. Die aus den öffentlich zugänglichen Angebotsdaten zu ermittelnden Leistungsmerkmale sind eher allgemein gefasst, es lassen sich aber die in Tabelle 3-3 zusammengefassten Informationen ermitteln.⁸⁰

Tabelle 3-3: Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit MEO-Satelliten

Anbieter (Produkt)	Kapazität (Downlink) [Gbps]	Kapazität (Uplink) [Gbps]	Bandbreite (Downlink) [Mbps]	Bandbreite (Uplink) [Mbps]	Latenz*) [ms]
Astra O3b (mPOWER)	0.040–10 pro Service		durch den B2B-Kunden zu definieren		75 ^{*)} 75–200 ^{**)}

*) Die Angaben zur Verzögerung stellen auf die Umlaufzeit (Roundtrip) ab. Sie basieren auf Messungen des Anbieters Astra. In der Tabelle wurde die angegebene bzw. gemessene Umlaufzeit durch zwei geteilt, um eine Approximation der Latenz zu erhalten.

***) Eine Studie hat einen Datensatz ausgewertet, der auch Daten zu Astra O3b enthält, wobei die gemessene Latenz vermutlich allerdings nicht nur das Segment des Satellitendiensteanbieters vom Terminal bis zum PoP enthält. Vgl. Raman, A. et al (2023); Tiwari, S. et al. (2023).

Quelle: wik

Das SES Astra-Satellitensystem deckt lediglich einen Teil der Fläche Deutschlands ab. Darüber liegen keine weiteren öffentlichen Informationen über die Verfügbarkeit von Anschlussprodukten vor. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass durch dieses Satellitensystem eine Grundversorgung erbracht werden kann.

3.4 Low Earth Orbit – Realisierungen (LEO)

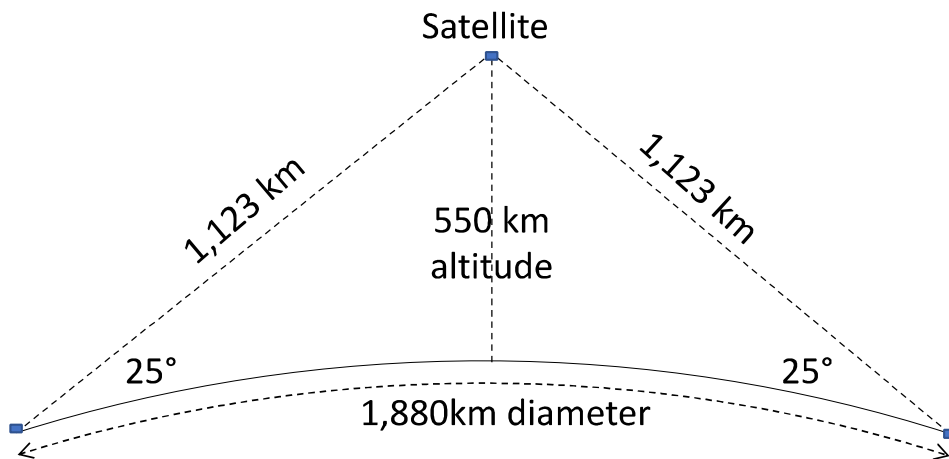
LEO-Satelliten umkreisen die Erde auf Umlaufbahnen zwischen rund 200 km und 2.000 km Höhe und bewegen sich schnell über den Erdboden: Sie benötigen für eine Erdumrundung in 500 - 600 km Höhe nur etwa 100 Minuten. Die Abdeckung eines einzelnen Satelliten ist aufgrund der niedrigen Flughöhe begrenzt, zumal ein minimaler Win-

⁷⁹ SES S.A. (o.J.).

⁸⁰ SES Astra Insight Paper (2023).

kel (z. B. 25° bei Starlink von SpaceX) zu einer Tangente an der Erdoberfläche erforderlich ist. Für die beispielhaft genannten 500 - 600 km Flughöhe ergibt sich damit eine Ausleuchtung mit einem Durchmesser von rund 1.880 km, wie in der folgenden Grafik veranschaulicht.⁸¹

Abbildung 3-3: Visualisierung der Abdeckung eines LEO-Satelliten



Quelle: Fußnote 81.

Ein Terminal in dieser maximalen Ausleuchtungszone eines Satelliten ist durch diesen maximal für gut vier Minuten zu erreichen. Das bedeutet einerseits, dass eine Vielzahl von Satelliten auf einer Umlaufbahn erforderlich sind, die sich in der Versorgung der Terminals abwechseln: Das Satellitenterminal führt ein Handover zwischen den Satelliten durch, vergleichbar der Übergabe eines Mobiltelefons von einer Basisstation zur nächsten. Die geringe Ausleuchtung bedeutet andererseits, dass benachbarte Satellitenbahnen erforderlich sind, um sowohl eine kontinuierliche Ausleuchtung desselben Punktes auf der Erdoberfläche zu erzielen, denn die Erde dreht sich unter dem Satelliten hinweg, als auch um größere Flächen abzudecken, etwa einen Kontinent.

Deshalb setzen Anbieter von LEO-Satellitendiensten auf eine große Zahl von Satelliten in Satellitenkonstellationen, die aufgrund der großen Anzahl der Satelliten auch als Megakonstellationen bezeichnet werden. Die Satelliten eines Betreibers können dabei auf verschiedenen Umlaufbahnen in verschiedenen Flughöhen angeordnet sein, und mehrere Satelliten nutzen gleichzeitig dieselbe Umlaufbahn, angeordnet in regelmäßigen Abständen. Für die verschiedenen Konstellationen werden dabei in den entsprechenden Anmeldungen die Anzahl der Schalen, die Anzahl der Umlaufbahnen pro Schale und die

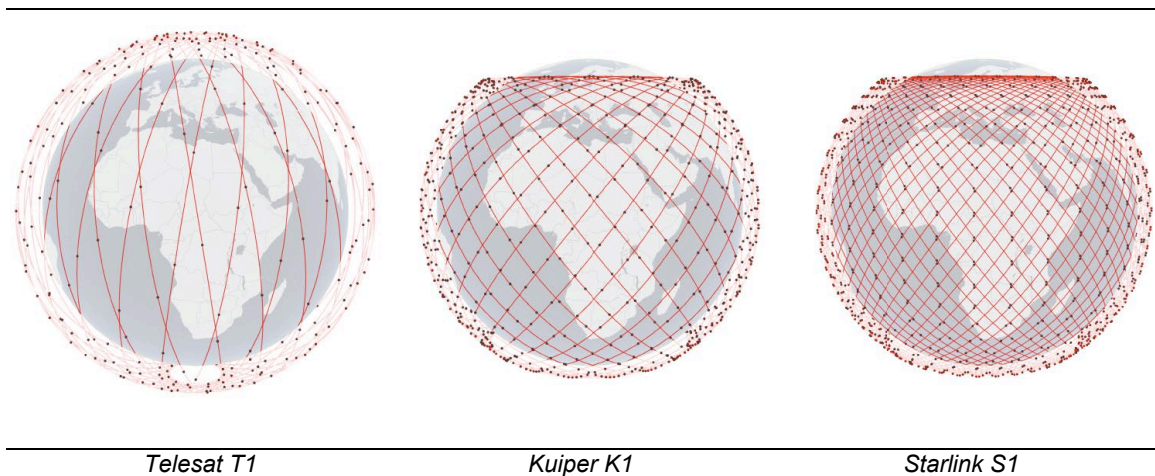
⁸¹ Handley, M. (2019).

Anzahl der Satelliten pro Umlaufbahn angegeben – Werte, die natürlich später aktualisiert werden können. Für Starlink, Kuiper und Telesat ergaben sich im Jahr 2020 daraus jeweils 4.409, 3.236 und 1.320 Satelliten.⁸²

Eine Umlaufbahn von LEO-Satelliten ist dabei zunächst definiert durch ihre Flughöhe und ihren Neigungswinkel gegenüber dem Äquator (Inklination) und wird als „Orbital Plane“ bezeichnet, eine Ebene, in der sich die Satelliten hintereinander um die Erde bewegen. Konstellationen nutzen mehrere dieser Ebenen, etwa verschiedene am Äquator „parallele“ oder sich geeignet kreuzende Umlaufbahnen desselben Neigungswinkels. Die Inklination impliziert auch, wie nahe die Satellitenumlaufbahnen den Polen der Erde kommen und damit, wie weit nach Norden bzw. Süden sie ihren Internet-Dienst erbringen können.

Die Gesamtheit aller Umlaufbahnen einer Flughöhe werden auch als „Schale“ (engl. Shell) bezeichnet. Abbildung 3-4 zeigt drei Beispiele für LEO-Satelliten-Konstellationen. Eine Visualisierung verschiedener LEO-Satellitensysteme findet sich hier: <https://satellitemap.space>.

Abbildung 3-4: Beispiel: LEO-Satelliten von drei verschiedenen Konstellationen der Tabelle 3-4



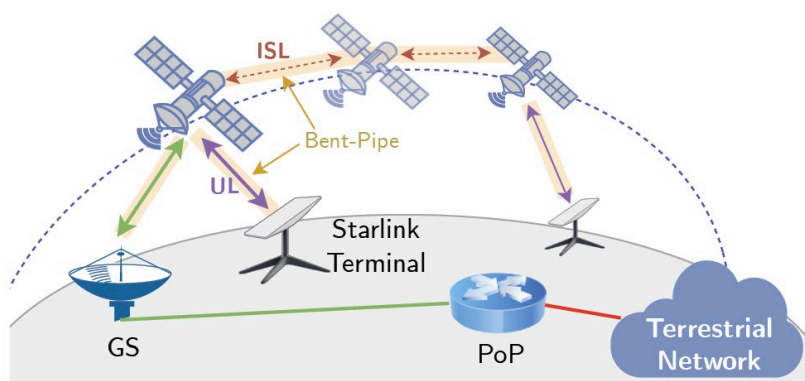
Quelle: Kassing, S. et al. (2020).

Wie oben beschrieben, umfasst die Zeitspanne, in der ein Endnutzer über sein Satellitenterminal mit einem LEO-Satelliten in Verbindung steht, nur wenige Minuten, so dass ein Handover zu nachfolgenden Satelliten derselben Ebene, zu Satelliten benachbarter Ebenen oder auch zu Satelliten einer anderen Inklination oder Schale erforderlich ist. Je nach Lage des Satellitenterminals relativ zu der/den durch die Satelliten genutzten Bodenstation(en) kann es möglich sein, dass das Satellitenterminal über den Satelliten direkt mit der Bodenstation kommuniziert. Dies scheint konkret bei den in Deutschland betriebenen Starlink-Satellitenterminals der Fall zu sein, beispielhaft dargestellt für das linke Satellitenterminal in Abbildung 3-5. Falls sich Satellitenterminal und Bodenstation nicht

82 Kassing, S. et al. (2020).

gleichzeitig in der Ausleuchtungszone eines Satelliten befinden – oder es andere (technische) Gründe gibt –, kann die Kommunikation über mehrere Satelliten hinweg erfolgen, etwa mittels (laserbasierter) Kommunikation zwischen den Satelliten, den Inter-Satelliten-Verbindungen (Inter-Satellite-Links, ISLs). Dieser Fall ist beispielhaft dargestellt für das rechte Satellitenterminal in Abbildung 3-5. Die Weiterleitung von Daten kann auch über mehrere Satelliten und so im Laufe der Zeit über unterschiedlich viele Zwischenstationen und über unterschiedlich lange Wege führen, so dass sich auch die Latenzen des Internet-Zugangs ändern können, ebenso natürlich andere Leistungsparameter wie etwa Verzögerungen durch unterschiedlich hohes Datenaufkommen auf den einzelnen Verbindungen, wie bei allgemeinem Routing in einem Warteschlangensystem wie dem Internet auch.^{83 84}

Abbildung 3-5: Konnektivität innerhalb eines LEO-Systems



GS: Groundstation = Bodenstation

Quelle: Mohan, N. et al. (2023).

Die folgende Tabelle 3-4 fasst die Kenndaten verschiedener Betreiber von Satellitenkonstellationen zusammen,⁸⁵ wobei anzumerken ist, dass sich diese Daten ändern können, wie im konkreten Fall von SpaceX Starlink geschehen, denn auch andere Konfigurationen sind hier dokumentiert worden,^{81.86} und die Umlaufbahnen (Höhe, Inklination, Anzahl der Satelliten) für Starlink weichen heute ab.⁸⁷ Die exakten Konfigurationen sind für die hier vorgenommene prinzipielle Betrachtung der Konstellation aber nachrangig.

⁸³ Handley, M. (2018).

⁸⁴ Kassing, S. et al. (2020).

⁸⁵ Handley, M. (2018).

⁸⁶ Kassing, S. et al. (2020).

⁸⁷ Li, Y. et al. (2023).

Tabelle 3-4: Beispiele für LEO-Satellitenkonstellationen

Anbieter (Produkt)	Schale	Höhe [km]	Umlaufbahnen	Satelliten pro Umlaufbahn	Inklination
Starlink	S1	550	72	22	53°
	S2	1.110	32	50	53,8°
	S3	1.130	8	50	74°
	S4	1.275	5	75	81°
	S5	1.325	6	75	70°
Kuiper	K1	630	34	34	51,9°
	K2	610	36	36	42°
	K3	590	28	28	33°
Telesat	T1	1.015	27	13	98,98°
	T2	1.325	40	33	50,88°

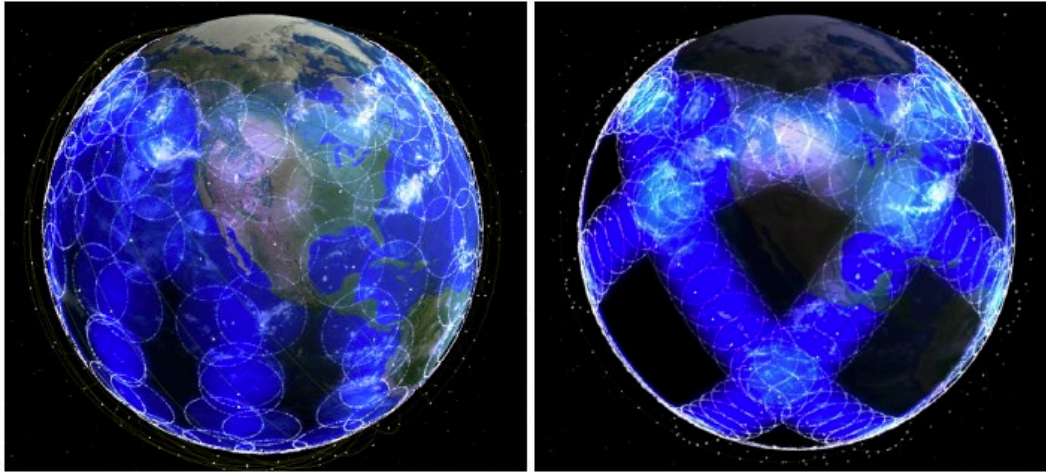
Quelle: Kassing, S. et al. (2020).

Die Definition der Schalen und Ebenen von LEO-Satellitenkonstellationen ist auf eine möglichst gute Abdeckung ihres jeweiligen Zielgebiets für die Internetversorgung ausgerichtet. Die nachfolgende Darstellung veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel von Starlink. Bedingt durch die Bahnneigung der Satellitenorbits der aktuell im Umlauf befindlichen Starlink-Satelliten (Stand 2023) ist die Versorgungsdichte um 50° nördlicher Breite besonders hoch, wie in Abbildung 3-6 am Beispiel von Simulationen verschiedener Konstellationen gezeigt. Durch ergänzende Inklinationen bei 70° und 97,6° werden aber Gebiete Nordeuropas erreicht, wenn dies im Norden auch zu intermittierender Konnektivität führen kann, weil diese Ebenen weniger Satelliten aufweisen.^{88,89}

⁸⁸ Mohan, N. et al. (2024). Eine Vorab-Veröffentlichung der Ergebnisse ist verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2310.09242.pdf>

⁸⁹ McDowell, J. C. (2023). Abrufdatum: 2023-10.

Abbildung 3-6: Simulationsbasierte Bestimmung der Ausleuchtungszonen der Starlink-Satelliten mit 53° Inklination**



24 Ebenen mit je 11 Satelliten

6 Ebenen mit je 66 Satelliten

** Heute nutzt Starlink in einer Schale 72 Ebenen mit je 22 Satelliten (S1).

Quelle: Handley, M. (2018).

Latenz

Durch die geringe Flughöhe der LEO-Satelliten ergibt sich zunächst eine geringe Latenz für die Überwindung der Distanz vom Satellitenterminal zum Satelliten und herunter zur Bodenstation. Bei LEO-Satelliten in 550 km Höhe sind dies bei 25° Winkel zum Horizont für das Terminal maximal 1.123 km, ebensoviel maximal zur Bodenstation, so dass sich ohne ISLs eine maximale Latenz von 7,5 ms und damit eine Umlaufzeit von 15 ms ergibt, wenn sich sowohl Bodenstation als auch Satellitenterminal jeweils an den Grenzen der Ausleuchtungszone befinden. Größere Flughöhen steigern diese Entfernung zwar, allerdings beträgt bei 2.000 km Flughöhe die maximale Distanz zum Satelliten bei 25° Winkel zum Horizont rund 3.369 km, so dass sich durch die reine Signallaufzeit eine Latenz (Umlaufzeit) von rund 22 ms (44 ms) ergibt. Somit kommen LEO-Satellitensysteme aufgrund ihrer Latenzeigenschaften durchaus für den Universaldienst in Betracht.⁹⁰ Die tatsächlich gemessenen Umlaufzeiten der bereits verfügbaren Systeme liegen oberhalb der zuvor in diesem Absatz genannten Werte, jedoch (lastabhängig) innerhalb Deutschlands meist unter 100 ms.⁹¹

⁹⁰ Auch wenn ISLs zum Einsatz kommen sollten, ist zu erwarten, dass die Latenz bis zur nächsten Bodenstation nicht über Gebühr steigt, da 1.000 km zurückgelegter Strecke im Weltraum nur 3,3 ms zusätzliche Latenz mit sich bringen und ein Satellitendienstanbieter daran interessiert sein dürfte, aus Qualitätsgründen möglichst kurze Umlaufzeiten anzubieten. Hier können ISLs einen Latenzvorteil bringen, denn die Lichtgeschwindigkeit ist im Vakuum um rund 50% höher als in einer Glasfaser.

⁹¹ Michel, F. et al. (2022), Mohan, N. et al. (2023).

Tabelle 3-5: Dienst- und Leistungsangebot für Internetdienste mit LEO-Satelliten

Anbieter (Produkt)	Kapazität Downlink [Gbps]	Kapazität Uplink [Gbps]	Bandbreite Downlink [Mbps]	Bandbreite Uplink [Mbps]	Umlaufzeit [1] [ms]
SpaceX Starlink (2024)	43	11,3	30–300*	5–50*	20–100*
OneWeb (2024)	5,9	1,2	?	?	> 70 (150–200*)
Amazon Kuiper (2024)	6,9	2,1	?	?	?
Telesat Lightspeed (2025)	0,8	0,3	?	?	?

[1] Die hier angegebenen Werte beruhen auf Angaben des Betreibers bzw. wurden durch Messungen ermittelt. Da gerade bei Satellitensystemen die Medienzugriffszeiten wie auch das Routing asymmetrisch sein können, kann man die Umlaufzeit nicht einfach durch zwei dividieren, um eine Einweg-Latenz zu ermitteln. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf das Jahr der Ausbaustufe wie in Fraunhofer IIS (2021) angegeben.

* Messungen: für Starlink u.a. Michel, F. et al. (2022), Mohan, N. et al. (2023), Raman, A. et al. (2023), Tiwari, S. et al. (2023); die gemessenen Werte für die Uplink- und Downlink-Bandbreite schwanken sehr stark je nach Experiment; die Daten in der Tabelle stammen aus Michel, F. et al. (2022), Starlink Ookla in Abbildung 5. Für OneWeb Raman, A. et al. (2023). Allerdings wurde bei OneWeb die Latenz durch M-Lab Speedtests ermittelt, was vermutlich mehr als nur die Strecke bis zum PoP umfasst. Diese Studie enthält keine Informationen zur Datenrate für OneWeb.

Quelle: wik

Um die einem Nutzer zur Verfügung stehenden Datenübertragungsraten einordnen zu können, stellen wir auf die am Markt angebotenen Datenraten für Kunden ab. Diese sind in Tabelle 3-5 entsprechend der Fraunhofer-Studie (2021) zusammengestellt. Die Werte für einige der Anbieter lassen sich jedoch nicht ermitteln, weil es entweder noch kein Angebot für Endkunden gibt oder der Anbieter ohnehin nur auf kommerzielle Nutzer abzielt, wie etwa OneWeb.⁹² So sind die angebotenen Datenübertragungsraten lediglich von Starlink konkretisiert. Um aus der vom Anbieter realisierten (Gesamt-)Kapazität Nutzer-individuell zur Verfügung stehende Bandbreiten abzuleiten, fehlt es an belastbaren Informationen.

⁹² Einen Datenpunkt für die Latenz von OneWeb liefert Raman, A. et al (2023). In jener Studie wird Latenz allerdings der RTT gleichgesetzt, so dass die Werte für die vorliegende Studie halbiert wurden.

Abbildung 3-7: Verfügbare Kapazität durch LEO-Satelliten

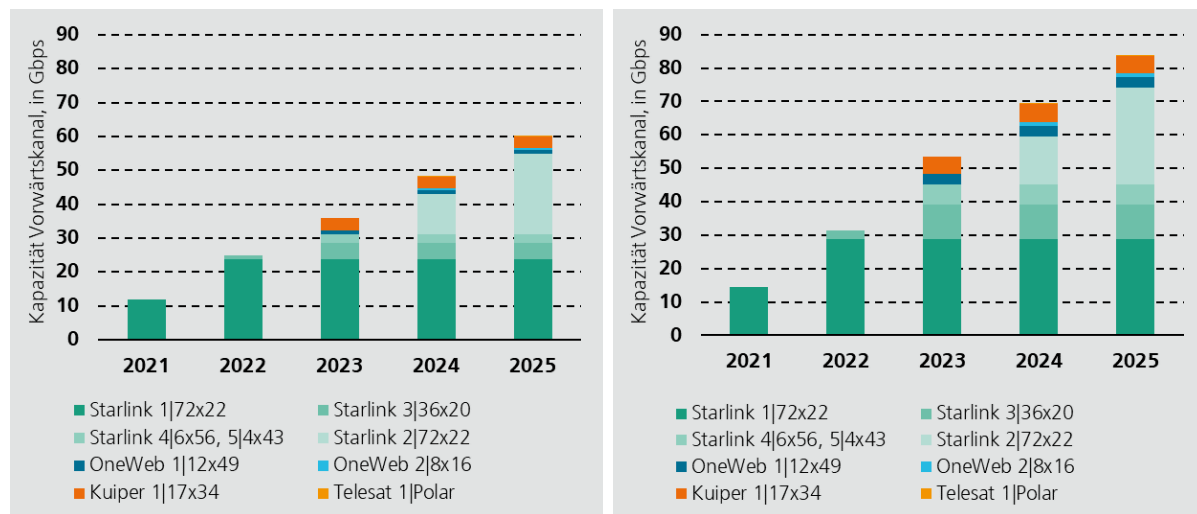


Diagramm 3: Über Deutschland geschätzt verfügbare Kapazität erdnahe Satelliten im Vorwärtskanal. Das linke Diagramm unterstellt die teilweise konkurrierende Nutzung durch andere Dienste über Wasser. Das rechte Diagramm unterstellt die vollständige Verfügbarkeit der über Wasser vorhandenen Kapazität für Nutzer in Deutschland.

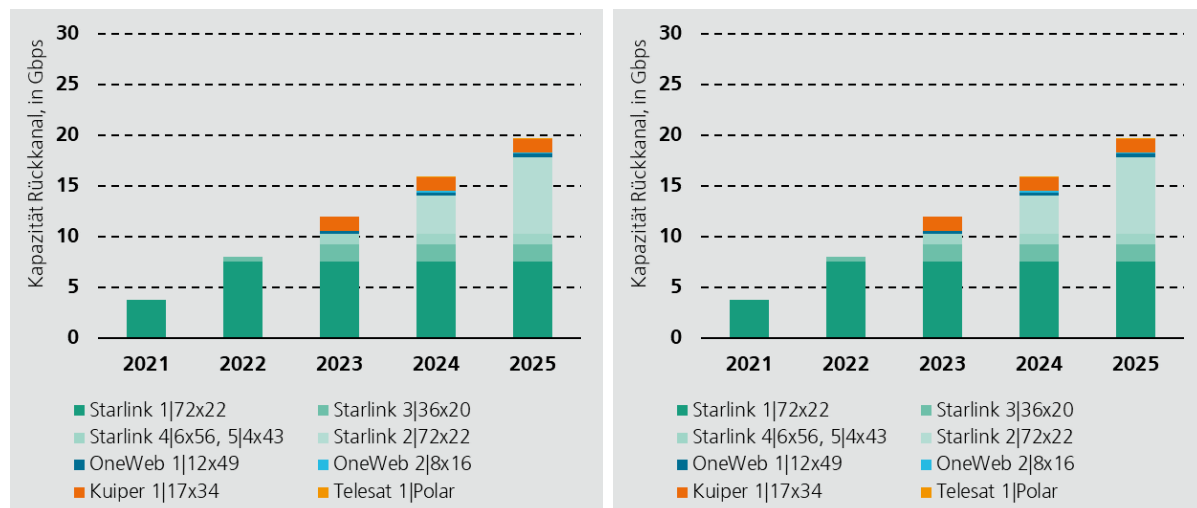


Diagramm 4: Über Deutschland geschätzt verfügbare Kapazität erdnahe Satelliten im Rückkanal. Das linke Diagramm unterstellt die teilweise konkurrierende Nutzung durch andere Dienste über Wasser. Das rechte Diagramm unterstellt die vollständige Verfügbarkeit der über Wasser vorhandenen Kapazität für Nutzer in Deutschland.

Quelle: Fraunhofer-Studie (2021)

Aktuell scheint Starlink der einzige LEO-Satellitendienstanbieter für Endkunden zu sein, der in Deutschland verfügbar ist. Iridium, das erste LEO-basierte Kommunikationssystem, setzt eher auf domänenspezifische (kommerzielle) Nutzer (wenn auch mit breitem Dienstangebot), als dass es auf den Massenmarkt abzielt. Auch OneWeb adressiert kommerzielle Nutzer und kann darüber hinaus den Norden Deutschlands nicht abdecken. Für Amazon Kuiper und Telesat Lightspeed finden sich noch keine konkreten Angebote am Markt, die sich bewerten ließen. Starlink wird weitverbreitet genutzt (2 Millionen Nutzer

weltweit⁹³) und intensiv in vielen Studien erforscht (siehe Mohan, N. et al. (2023) für einen aktuellen Überblick) und kann eine Grundversorgung erbringen,⁹⁴ auch wenn gelegentlich kurze Dienstunterbrechungen zu beobachten sind.

Tabelle 3-6 listet die potentiell relevanten LEO-Konstellationen auf, und Abbildung 3-7 fasst die theoretisch über Deutschland verfügbaren Kapazitäten durch LEO-Satellitenkonstellationen zusammen.

93 Jewett, R. (2023).

94 Die Angebote an kommerzielle Nutzer sind zwar auch für die Grundversorgung von Relevanz, jedoch können in Ermangelung öffentlicher Informationen über die Leistungsmerkmale keine Aussagen über ihre Eignung getroffen werden.

Tabelle 3-6: Geschätzt für den Universaldienst verfügbare Kapazitäten aller erdnahen Satelliten über Deutschland

Betreiber System	Konstellation	Vorwärtskanal ¹ , nominal, in Gbps	Rückkanal ² , nominal, in Gbps	Verfügbarkeit, Risiken
SpaceX Starlink	1 72x22	23,69 (28,91)	7,56 (9,34)	Verfügbar (öffentliche Testphase seit März 2021); alle Satelliten der Teilkonstellation gestartet; Ausbau voraussichtlich bis Ende 2021 abgeschlossen
	3 36x20	4,95 (10,17)	1,73 (3,56)	Erste Satellitenstarts für August 2021 geplant; geschätzt 25% Verfügbarkeit Anfang 2022 und 100% bis Ende 2022
	4 6x56, 5 4x43	2,51 (6,02)	1,02 (2,46)	Erste Satelliten gestartet. Ausbau geschätzt bis Anfang 2023 abgeschlossen.
	2 72x22	23,69 (28,91)	7,56 (9,34)	Geschätzt 50% verfügbar 2024, vollständig 2025
OneWeb	1 12x49	4,09 (10,76)	1,04 (2,65)	Erste Satelliten gestartet; Ausbau voraussichtlich bis Ende 2022 abgeschlossen; lückenhafte Abdeckung über Teilen Deutschlands; Angebot richtet sich an Firmenkunden; Verfügbarkeit für Universaldienst bewertet mit 20%
	2 8x16	1,82 (3,91)	0,50 (1,11)	Ausbau voraussichtlich bis Mitte 2023 abgeschlossen; Verfügbarkeit für Universaldienst bewertet mit 20%
Amazon Kuiper	1 17x34	6,88 (10,53)	2,65 (4,25)	Erste Satellitenstarts für Ende 2021 und 2022 erwartet; geschätzt ab 2023 verfügbar, jedoch unsicher, ob Dienst in Deutschland angeboten wird; Verfügbarkeit bewertet mit 50%
	3 17x34	8,26 (10,20)	3,08 (3,91)	Möglicher Aufbau und Verfügbarkeit bis 2024; wegen Unsicherheiten im Zeitplan und fehlenden Informationen zu Prioritäten nicht berücksichtigt
Telesat	1 Polar	0,83 (3,64)	0,43 (1,90)	Möglicher Aufbau und Verfügbarkeit bis 2024; unsicherer Zeitplan und Finanzierung, unsicher ob Dienst in Deutschland angeboten wird; Verfügbarkeit bewertet mit 10%
Summe (gesamt)		76,72 (113,05)	25,58 (38,52)	Gesamte Kapazität einschließlich wahrscheinlich nicht verfügbarer Teilkonstellationen
Summe (verfügbar)		60,13 (84,04)	19,70 (28,14)	Geschätzt verfügbare Kapazität

Tabelle 47: Geschätzt für den Universaldienst verfügbare Kapazität aller erdnahen Satelliten über Deutschland.

Quelle: Fraunhofer-Studie (2021)

Praktische Erkenntnisse aus Mess-Studien zu LEO-Satelliten

Mit der Ankündigung von LEO-Satellitendiensten begannen Wissenschaftler, sich für deren – zu erwartende – Eigenschaften zu interessieren^{81 82}. Die Markteinführung von Starlink ermöglichte es dann, die theoretischen Überlegungen um praktisch gewonnene Erkenntnisse durch Messungen zu ergänzen, so dass inzwischen eine Vielzahl von Studien zur Leistungsbewertung von Starlink als Stellvertreter von LEO-basierten Satellitensystemen verfügbar sind. Diese sind natürlich mit gebotener Vorsicht zu betrachten: Zum einen bildet jede Studie nur einen begrenzten Zeitraum der Beobachtung mit begrenzten

Messpunkten ab, so dass sich die getroffenen Aussagen weder geographisch noch über die Zeit verallgemeinern lassen. Zum anderen stellt Starlink ein sich im Aufbau befindliches und sich ständig weiterentwickelndes System dar. Ersteres bedeutet, dass Starlink neue Satelliten im All platziert und somit Kapazität und Reichweite ausbaut, gleichzeitig aber auch die Anzahl der Nutzer steigt, im September 2023 auf die oben genannten 2 Millionen⁹⁵, die ihrerseits um diese Kapazität konkurrieren. Letzteres impliziert, dass sich Starlink als geschlossenes Software-gesteuertes System darstellt, das beispielsweise durch die Satellitenzuordnung und die Wegewahl den Internet-Verkehr jedes Nutzers bestimmt^{96.97.88} und diesen jederzeit durch Einsatz anderer Algorithmen verändern kann. Alle diese Faktoren können zu geänderten Leistungsmerkmalen führen. Dennoch gibt diese Studie im Folgenden einen kurzen Einblick in ausgewählte Messergebnisse zu Starlink, möglichst aus der jüngsten Vergangenheit. Diese sind auch für die bereits vorliegenden Untersuchungen nur als beispielhaft und nicht als repräsentativ zu verstehen. Die Studie geht dabei kurz auf drei Kenngrößen ein: 1) die gemessene Latenz, 2) die gemessene Bandbreite und 3) anhaltende Paketverluste als ungefähre Messgröße für die Verfügbarkeit des Dienstes.

1) Latenz

Verschiedene Studien haben unabhängig voneinander Latenzmessungen über Starlink durchgeführt und/oder öffentlich verfügbare Daten von Messplattformen wie M-Lab ausgewertet. Wie oben in der Tabelle bereits angedeutet, ergibt sich für Starlink für Messungen in Deutschland bzw. in Europa für das Gros der Datenpunkte eine Umlaufzeit von 20 - 100 ms, also – vereinfacht berechnet halbiert – eine Latenz von 10 - 50 ms. Wie in jedem Warteschlangen-basierten Best-Effort-Netz⁹⁸ sind hier Einflüsse durch Belastungen des Netzes durch andere Nutzer möglich. Abbildung 3-8 zeigt Ergebnisse von Messungen von einem Satellitenterminal⁹¹ und Abbildung 3-9 zeigt die Auswertungen von Datensätzen von Messungen unter Nutzung der globalen Messplattform M-Lab⁹⁹. In beiden Fällen werden jedoch die Messungen nicht zum PoP des Satellitendiensteanbieters, sondern zu verschiedenen Messpunkten im Internet durchgeführt, was zu höheren Latenzen führt. Der jeweils untere Teil der Grafik zeigt die (Verteilungen der jeweils) minimalen Messwerte (rote Linie unten in Abbildung 3-8). Die Grafiken veranschaulichen, dass die Umlaufzeiten bei Satellitenterminals und Messzielen innerhalb Europas im Allgemeinen deutlich unter 100 ms, die Latenzen also unterhalb von 50 ms liegen. Eigene Messungen der Autoren zu Zielen in Europa nahe des PoPs von Starlink bestätigen diese Beobachtungen.

⁹⁵ Die Daten in Abbildung 1a von Tiwari, S. et al. (2023) legen ein stärker als lineares Wachstum nahe.

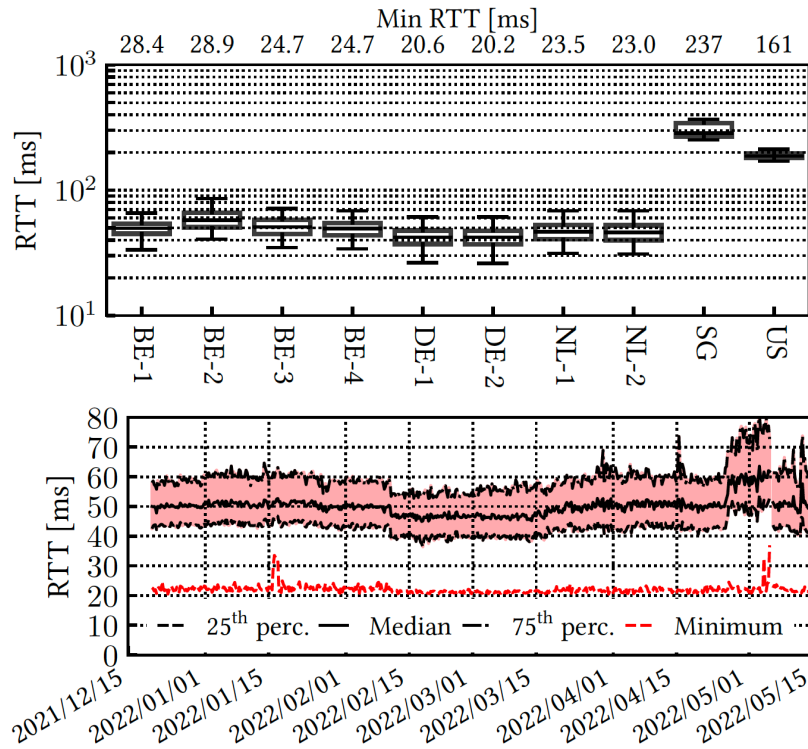
⁹⁶ LLC Starlink Services (2021).

⁹⁷ Tanveer, H.B. et al (2023).

⁹⁸ Vgl. Kulenkampff, G. et al. (2023); Kulenkampff, G. et al. (2024).

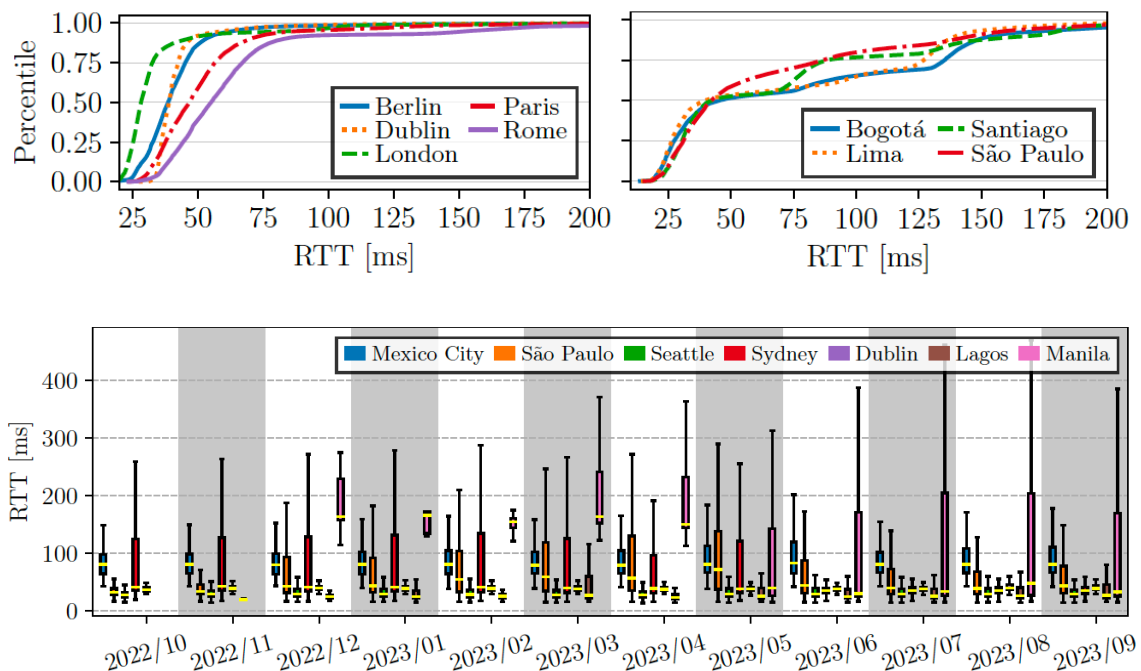
⁹⁹ <https://www.measurementlab.net>.

Abbildung 3-8: Messungen der Umlaufzeit über Starlink von einem Satellitenterminal zu verschiedenen Messpunkten in Europa, Singapur und den USA (oben) und nur in Europa (unten)



Quelle: <https://www.measurementlab.net>.

Abbildung 3-9: Umlaufzeit für Starlink-Satelliterminals nach einem M-Lab-Datensatz: oben (aggregiert) und unten (Minima über die Zeit)



Quelle: Mohan, N. et al. (2023).

2) Datenrate

Analog zu den Umlaufzeiten finden sich auch zu den erzielbaren Datenraten verschiedene Studien, allerdings meist weniger umfassend, weil nicht alle verfügbaren Datensätze Informationen zum erzielten Durchsatz enthalten und auch nicht alle Messplattformen Unterstützung für derartige Messungen anbieten.¹⁰⁰ Im Gegensatz zu Messungen der Umlaufzeit – etwa durch PING – erfordern Durchsatzmessungen eine (kontrollierte) Gegenstelle zum Daten-Upload bzw. Download, die typischerweise nicht am PoP des Satellitendienstbetreibers zur Verfügung steht und gesondert vorhanden sein muss. Als Orte für Gegenstellen bieten sich Datenzentren (etwa der Hyperscaler) in der Nähe der PoPs an, beispielsweise in Frankfurt; jede Studie wählt jedoch ihre eigenen Gegenstellen. Somit ergibt sich, dass ein zusätzliches Netzsegment – vom PoP zur Gegenstelle – in die Messung einbezogen werden muss, was die Eigenschaften des Satellitenabschnitts „verfälscht“: Umlaufzeiten erhöhen sich zwangsweise durch die zusätzliche Strecke und gemessene Datenraten können lastbedingt niedriger ausfallen, als sie durch den Satellitendienstbetreiber zur Verfügung gestellt werden.

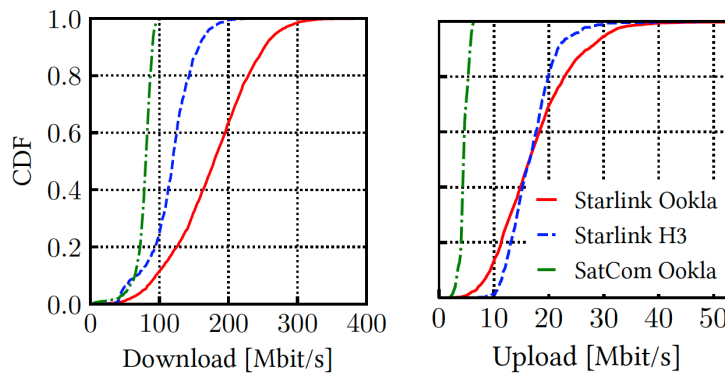
Die folgenden – ohnehin nur beispielhaften – Messergebnisse aus zwei Studien sind also wiederum mit entsprechender Vorsicht zu betrachten, sind nicht zu verallgemeinern und

¹⁰⁰ So bietet beispielsweise die Messplattform RIPE Atlas (<https://atlas.ripe.net>) Messungen der Umlaufzeiten und die Erhebung verschiedener anderer Daten an (etwa der Namensauflösung über DNS), stellt aber allgemein keine Messungen und Daten für erzielbare Datenraten bereit.

lassen keine Vorhersagen zu. Die Ergebnisse stimmen aber bezüglich der erzielbaren Datenraten sowohl im Downlink also auch im Uplink zuversichtlich, dass Starlink einen Beitrag zur Grundversorgung leisten kann.

Abbildung 3-10 zeigt die kumulative Verteilung der gemessenen Datenraten im Up- und Downlink von einem Satelliten-Terminal in Belgien: die rote Kurve zu einem Speedtest-Server, die blaue zu einem HTTP/3-Server (die grüne Kurve zeigt eine Vergleichsmessung über einem geostationären Satelliten eines kommerziellen Anbieters). Über 95% dieser Messungen ergeben eine Datenrate von mehr als 50 Mbps im Downlink und 5 Mbps im Uplink; die Autoren haben vergleichbare Ergebnisse bei ihren eigenen Messungen mit Satelliten-Terminals in Deutschland erzielt.

Abbildung 3-10: Durchsatzmessungen für Datenraten im Up- und Downlink von einem Starlink-Terminal in Belgien zu Ookla Speedtest-Servern¹⁰¹



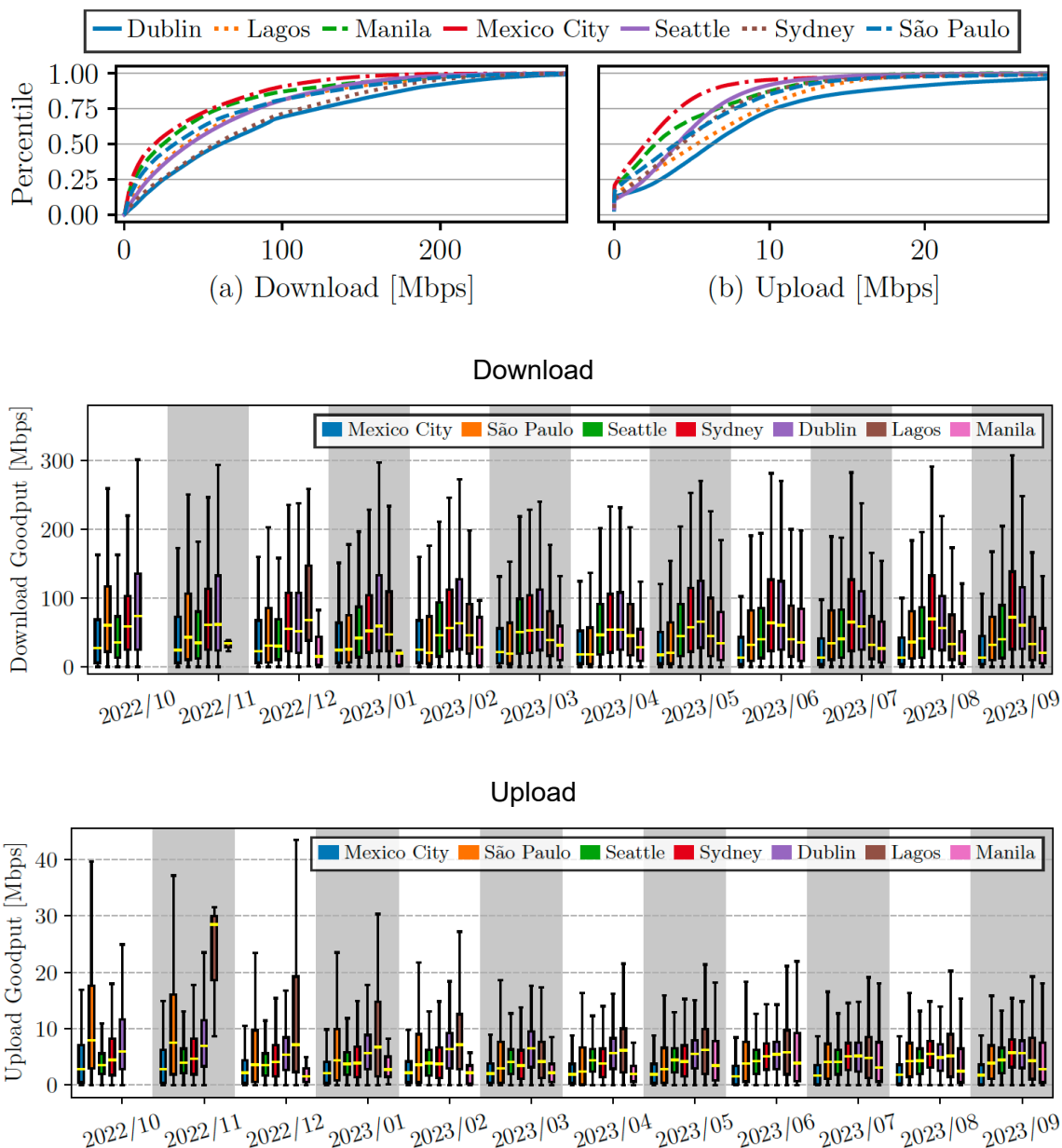
Quelle: Michel, F. et al. (2022).

Abbildung 3-11 zeigt das Verhalten für Messungen von verschiedenen Standorten der Satelliten-Terminals aus (oben), ebenfalls für Uplink und Downlink sowie deren Aufschlüsselung über die Zeit (Mitte, unten). Es wird bei dieser umfassenderen Betrachtung ersichtlich, dass auch für Europa (in diesem Fall Dublin) durchaus nicht nur Datenraten oberhalb von 10 Mbps oder gar 50 Mbps gemessen wurden, wobei die Details zu den einzelnen Satelliten-Terminals und deren punktueller Auslastungen nicht bekannt sind. Eine Studie¹⁰² ermittelt für Terminals in London und Barcelona bessere Werte, zeigt aber ebenfalls ein Spektrum von wenigen bis 300 Mbps für den Downlink und deutliche Schwankungen über die Zeit (Abbildung 6 ebenda).

¹⁰¹ Ookla (o.J.).

¹⁰² Kassem, M. M. et al. (2022).

Abbildung 3-11: Durchsatzmessungen für Datenraten im Up- und Downlink aus Messdaten des M-Lab, kumulativ (oben) und über die Zeit (Mitte, unten)



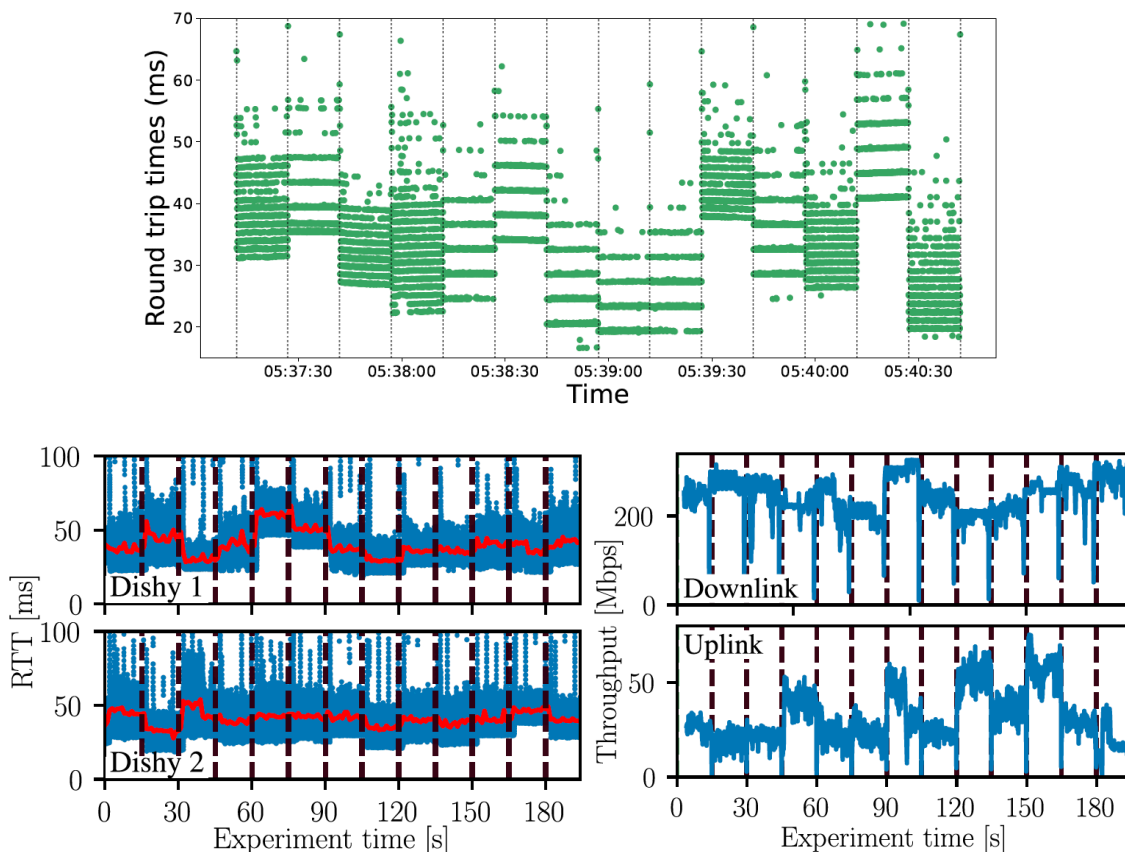
Quelle: Mohan, N. et al. (2023).

Insgesamt ist Starlink also prinzipiell in der aktuellen Form in der Lage, die Voraussetzungen der TKMV für die Grundversorgung zu erfüllen. Allerdings finden sich sowohl bei den Umlaufzeiten als auch bei den Datenraten im Uplink und Downlink signifikante Schwankungen, auch wenn das Gros der Messdaten darauf hinweist, dass die geforderten Datenraten meist erreicht oder deutlich übertroffen werden und die Latenzen typischerweise unter 100 ms liegen.

3) Verfügbarkeit

Die eben beschriebenen Schwankungen zeigen jedoch an, dass es sich bei Starlink um ein sehr dynamisches System handelt, bei dem Terminals regelmäßig Handover von einem Satelliten zum nächsten durchführen müssen. Das kann u. a. zu Paketverlusten und Veränderungen in der Latenz führen, was wiederum beides die Datenrate beeinflussen kann. Ein Handover muss spätestens erfolgen, wenn das Terminal sich nicht mehr in der Ausleuchtungszone des versorgenden Satelliten befindet. Allerdings werden aktuell die Zuordnungen von Terminals zu Satelliten und auch die Wegewahl häufiger überprüft: Die aktuellen Rekonfigurationsintervalle bei Starlink betragen 15 Sekunden, was auch zu den beobachteten Schwankungen passt, vgl. Abbildung 3-12. Hier wird klar ersichtlich, dass sich die minimale Latenz stufenweise von einem 15-Sekunden-Intervall zum nächsten ändert, was auch für die Datenrate gilt. Bei letzterer sind außerdem kurzfristig deutliche Leistungseinbußen an den Intervallgrenzen zu beobachten.

Abbildung 3-12: Schwankungen der Starlink-Leistungsmerkmale eines Satelliten-Terminals in der EU (RTT, oben) und zweier Satelliten-Terminals in DE und UK (RTT und Datenraten, unten)



Quellen: Tanveer, H. B. et al (2023) (oben) und Mohan, N. et al. (2023) (unten).

Das Starlink-System liefert keine unmittelbaren Einblicke in die Konnektivität eines Satelliten-Terminals, so dass Annäherungen für einen Einblick genügen müssen. Eine solche Annäherung sind Paketverluste. Während im Internet Paketverluste ein etabliertes Signal für (kurzzeitige) Überlast darstellen (denn diese treten auf, wenn Warteschlangen in Routern zu lang werden) und damit allgegenwärtig sind, lässt sich die Verfügbarkeit eines Dienstes durch die Anzahl aufeinanderfolgender Paketverluste (engl. *Loss Bursts*) untersuchen. Keine oder einzelne Paketverluste und kurze Loss-Bursts weisen auf normale Funktion des Netzes hin, längere Loss-Bursts können hingegen auf einen vorübergehenden Ausfall der Verbindung hindeuten, etwa wenn während eines Handovers keine Daten gesendet oder empfangen werden können.

Einigen Studien untersuchen Paketverluste auf der Basis eigener Messungen^{103,104,91}, wobei dann die Protokolle TCP, UDP oder QUIC verwendet werden. Eine Arbeit¹⁰⁵ stellt in Abschnitt 3.2 der Studie Paketverluste von < 2% fest, wobei einzelne Loss-Bursts weniger als 1,5 ms (95%-il) bzw. 7,5 ms (99%-il) andauern. Die Autoren dokumentieren aber auch, dass sie wiederholt (selten) Loss-Bursts beobachten, die länger als eine Sekunde andauern. Die andere Studie¹⁰⁶ dokumentiert kurzzeitig wiederholt außergewöhnliche hohe Paketverlustraten von bis zu 50%, wobei 12% der Messungen Paketverlustraten von mehr als 5% aufweisen, was für moderne Netze ungewöhnlich ist. Eine Korrelation der Uhrzeiten der Messungen mit den Flugbahnen verschiedener Starlink-Satelliten zeigt eine Korrelation und mögliche Ursache der kurzzeitig hohen Verlustraten: Diese treten oft auf, wenn sich das Satelliten-Terminal am Rand der Ausleuchtungszone eines Satelliten befindet. Auch hier werden also gelegentlich Loss-Bursts beobachtet, die sich auf Handover zwischen Satelliten zurückführen lassen. Punktuelle Messungen der Autoren bestätigen diese Ergebnisse. Meist werden alle Pakete empfangen; falls nicht kommen individuelle Paketverluste in allen Studien klar am häufigsten vor (25% der Fälle bei Michel, F. et al. (2022)). Loss-Bursts, die eine temporäre Nichtverfügbarkeit bedeuten, finden sich auch, sind aber deutlich seltener als Handover oder die von Starlink durchgeführten Rekonfigurationen im 15-Sekunden-Takt. Hinweise auf eine deterministische Nichtverfügbarkeit bei jedem Satellitenwechsel finden sich weder in diesen Studien noch in den Beobachtungen der Autoren, so dass Starlink trotz gelegentlich längerer Paketverluste im Regelbetrieb als Option für die Grundversorgung in Frage kommt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass LEO-basierte Satellitenkonstellationen für den Universaldienst prinzipiell einsetzbar sind, sofern die Konfiguration der Konstellation eine vollständige und kontinuierliche Ausleuchtung des Gebiets der Bundesrepublik gewährleistet. Je nach lokalen (geographischen) Gegebenheiten kann es aufgrund von Hindernissen vorkommen, dass Nutzer den Dienst selbst innerhalb der Ausleuchtungszone nicht nutzen können. Darüber hinaus können Wetter und andere Umweltein-

¹⁰³ Kassem, M. M. et al. (2022).

¹⁰⁴ Michel, F. et al. (2022).

¹⁰⁵ Michel, F. et al. (2022).

¹⁰⁶ Kassem, M. M. et al. (2022).

flüsse zu Schwankungen der Leistungsfähigkeit führen, auch kurzzeitige Dienstunterbrechungen wurden beobachtet. Die grundsätzlichen Leistungsmerkmale der angebotenen Internetzugangsdienste, insbesondere von Starlink, sind relativ zum Universaldienst jedoch großzügig dimensioniert, so dass auch kleinere Leistungseinbußen die Internet-Nutzung nicht wesentlich beeinträchtigen. Hinsichtlich der Latenzanforderungen lässt sich ebenfalls festhalten, dass diese in den derzeit messbaren Konstellationen und gegenwärtigen Auslastungen tendenziell erfüllt werden können.

4 Mobilfunkgestützte Technologien

Mobilfunkgestützte Netze lassen sich in erster Linie durch die verwendete Mobilfunk-Technologie unterscheiden. Grundsätzlich sind hier die in Deutschland Verwendung findenden Mobilfunkgenerationen relevant:

- 2G (GSM),
- 3G (UMTS),
- 4G (LTE) und
- 5G

Neben der verwendeten Mobilfunktechnologie der jeweiligen Generation (2G, 3G, 4G und 5G) ist ein weiteres, wichtiges Unterscheidungskriterium das verwendete Frequenzband. Während bei den älteren Mobilfunkstandards 2G und 3G die verwendeten Frequenzen in einem engen, spezifischen Rahmen lagen, können die neueren Mobilfunkstandards 4G und 5G vielfältige Trägerfrequenzen nutzen. Aufgrund der mit den jeweiligen Frequenzbändern einhergehenden deutlich unterschiedlichen Wellenausbreitungseigenschaften resultieren daraus spezifische Eigenschaften der Technologien hinsichtlich möglicher Reichweite und möglicher Datenübertragungsrate.

Eine Sonderform der mobilfunkgestützten Netze sind sogenannte „High Altitude Platform Stations“ (HAPS). Hierbei werden Mobilfunkbasisstationen und deren Antennen nicht über stationäre Masten betrieben, sondern in fliegenden, unbemannten Drohnen verbaut, welche quasi-stationär in der Stratosphäre positioniert werden. Wesentliche Unterschiede zu terrestrischem Mobilfunk sind hier die Reichweite im Sinne der ausgeleuchteten Fläche und die erreichbare Datenübertragungsrate.

Als eine weitere Sonderform der mobilfunkgestützten Netze werden Fixed Wireless Access-Lösungen betrachtet. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um Mobilfunktechnik, allerdings entfällt der Mobilitätsaspekt, was im Detail zu veränderten Möglichkeiten bei der Antennentechnik führt und damit Einfluss auf Reichweite und mögliche Datenübertragungsraten hat.

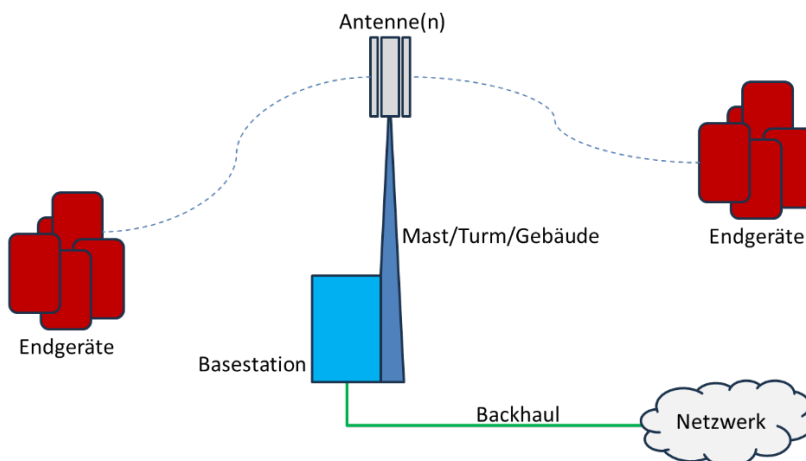
Allen Mobilfunktechnologien ist gemein, dass die maximal technisch möglichen Bandbreiten zwischen Sendeanlage und Empfangsgerät zwar durch äußere Einflüsse wie Topologie und Entfernung sowie Oberflächen- und Wetterbedingungen determiniert werden, es sich jedoch immer um ein Shared Medium handelt, bei welchem sich alle nutzenden Endgeräte (präzise: die aktiven Endgeräte in einem Sektor einer Funkzelle) die vorhandene Bandbreite untereinander teilen müssen.

4.1 Allgemeine Eigenschaften mobilfunkgestützter Technologie

4.1.1 Netzkomponenten und Aufbau mobilfunkgestützter Technologie

Bei den mobilfunkgestützten Technologien handelt es sich um eine Funkverbindung zwischen den im Regelfall mobilen Endgeräten und den Antennen der Basisstationen.¹⁰⁷ Zur Verbesserung der Reichweite und Umgehung von Hindernissen werden die Antennen erhöht montiert, meistens auf Masten, Türmen oder entsprechend hohen Gebäuden. Bei den Gebäuden kann es sich um Häuser, aber auch andere Bauwerke wie z. B. Getreidesilos oder Windkraftanlagen handeln. Ab der Antenne liegt in der Regel eine Leitungsverbindung zur Basisstation vor, die von dort weiter bis ins Kernnetz führt. Diese Anbindungen müssen spätestens ab 5G in Glasfaser ausgeführt sein, um die hohen Datenmengen transportieren zu können. Alternativ kann ein Teil der Strecke zwischen der Basisstation und dem Kernnetz auch über Richtfunk ausgeführt sein. Dies erfolgt jedoch i. d. R. nur noch in Ausnahmefällen, z. B. bei schwierigem Gelände (Gebirge, Tal, ...).

Abbildung 4-1: Darstellung Mobilfunk allgemein



Quelle: wik

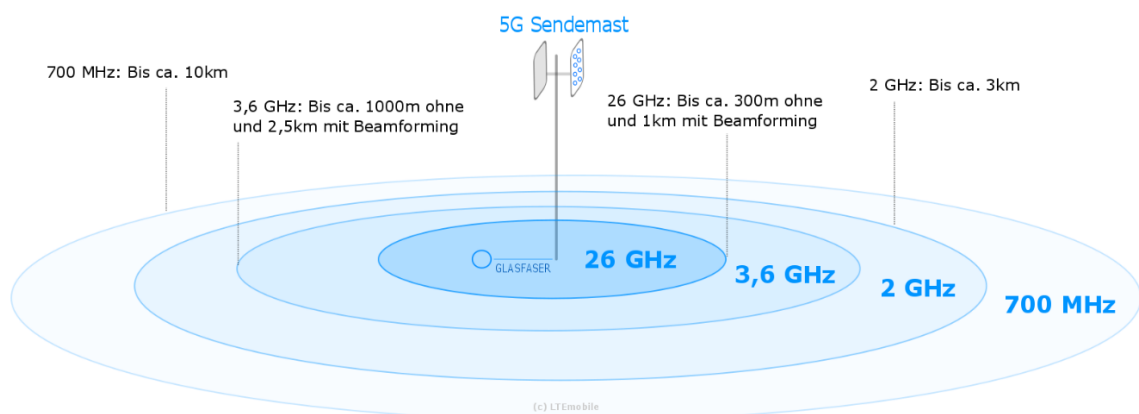
Die Reichweite der Funkverbindung ist primär von der verwendeten Frequenz abhängig. Generell haben niedrige Frequenzen eine höhere Reichweite, jedoch ist die Bandbreite im Rahmen der Möglichkeiten der verwendete Mobilfunktechnologie bei niedrigen Frequenzen geringer, weil weniger Frequenzblöcke zur Verfügung stehen. Eine weitere Eigenschaft von niedrigen Frequenzen ist die bessere Durchdringung von Gebäuden. Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Frequenz und Reichweite am Beispiel 5G.

¹⁰⁷ HAPS bilden hier – wie bereits erläutert – eine Ausnahme, da die Basisstation in diesem Sonderfall nicht stationär ist.

4.1.2 Technologie, Frequenz und Erstreckung als Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit von Mobilfunktechnologien

Der Zusammenhang zwischen der an einer Antenne eingesetzten Frequenz und der erzielbaren Reichweite ist in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel von 5G dargestellt. Sie illustriert die abnehmende Reichweite mit steigender Frequenz.

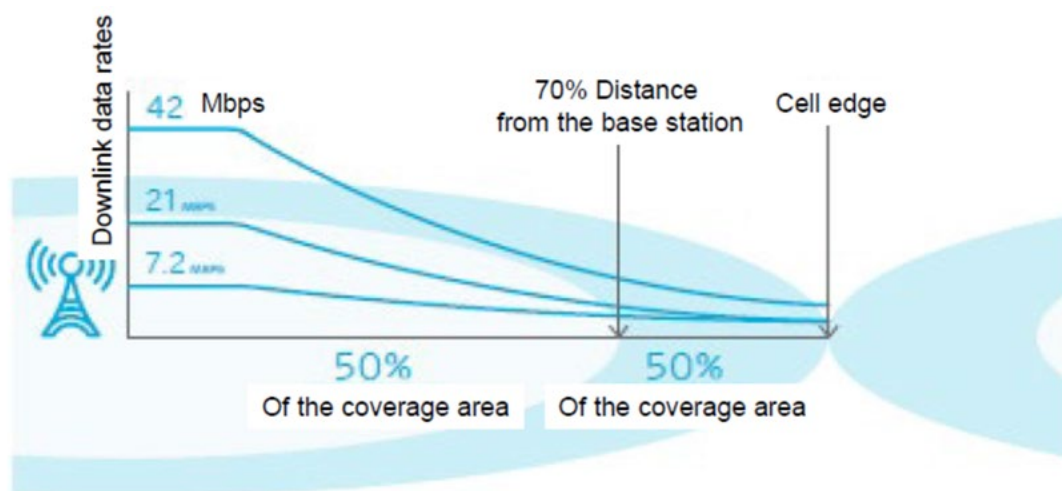
Abbildung 4-2: Zusammenhang Frequenz-Reichweite am Beispiel 5G



Quelle: <https://ltemobile.de/5g-sendereichweiten-mit-unterschiedlichen-frequenzen/>

Auch innerhalb der Reichweite ist die Bandbreite nicht konstant, sondern nimmt zum Zellrand hin ab. Grund dafür ist die mit der Entfernung von der Antenne abnehmende spektrale Dichte, wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht.

Abbildung 4-3: Mit zunehmendem Abstand von der Zellmitte (Antenne) abnehmende Bandbreite



Quelle: Ericsson Mobility Report November 2012

Dieses Phänomen kann durch eine zusätzliche Versorgung desselben Endgerätes aus den Nachbarzellen zumindest teilweise kompensiert werden, setzt aber eine entsprechende Zelldichte und -überlappung voraus. Auch technische Maßnahmen, wie die Veränderung von Neigungswinkeln oder Beamforming der Sektorantennen und MIMO können unterstützen.¹⁰⁸ Siehe hierzu auch Kapitel 4.4 „4G – Realisierungen“ und Kapitel 4.5 „5G – Realisierungen“.

Die üblicherweise genannten Reichweiten von Mobilfunktechnologien beziehen sich auf die Wahrscheinlichkeit, eine stabile Verbindung zum Netz am Zellrand aufzubauen (sogenannte „Einbuchungsschwelle“), geben aber keinen Aufschluss darüber, welche Datenraten dann erreichbar sind.

Ein Versuch, die Zusammenhänge von Frequenz und Reichweite, also der Wellenausbreitung zu beschreiben, finden sich im sogenannten Okumura-Hata-Modell.¹⁰⁹ Das Modell beschreibt die Wellenausbreitung für unterschiedliche Umgebungen (Freiflächen, verschiedene Wohngebietsgrößen) bis zu einer Frequenz von 1,5 GHz. Die dem Modell zugrundeliegenden Algorithmen wurden tatsächlich durchgeführten Tests angenähert.

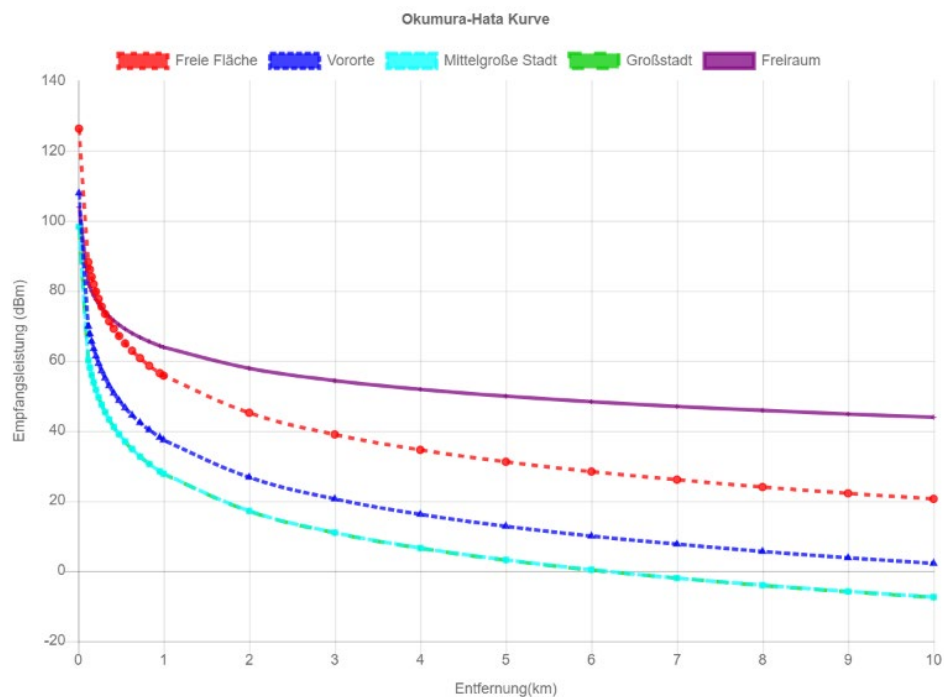
Für eine Frequenz von 700 MHz, einer Sendeleistung von 50W¹¹⁰, einer Distanz von 10 km, einer Antennenhöhe von 30 m und einer Endgerätehöhe von 1,5 m ergibt sich der in der folgenden Abbildung dargestellte Zusammenhang.

¹⁰⁸ Plückebaum, T. (2023).

¹⁰⁹ Circuit Design (o.J.).

¹¹⁰ Itemobile.de (o.J.).

Abbildung 4-4: Okumura-Hata-Kurve 700 MHz, 50W



Quelle: Circuit Design (o.J.).

Zur Abschätzung der möglichen frequenzabhängigen Reichweite unter Einhaltung der technischen Mindestanforderungen gemäß TKMV kann unter Verwendung des Okumura-Hata-Modells und des daraus abgeleiteten Pfadverlustes¹¹¹ ein Zusammenhang mit der Distanz zwischen Sender und Empfänger hergestellt werden. Hierzu müssen jedoch zahlreiche Annahmen getroffen werden:

- Anwendung für bebaute Gebiete („small and medium sized city“)
- Antennenhöhe Sender 30 m und Empfänger 2 m
- Sendeleistung 5G 50W \approx 47dBm, Antennengewinn 10dB
- Spektrale Effizienz 5 bit/s/Hz¹¹²
- Empfängerempfindlichkeit -96dB
- Berücksichtigung des Spektrums der DTAG, keine Berücksichtigung von MIMO-Gewinnen, Carrier-Aggregation und Beamforming
- Keine Berücksichtigung von Sharing > Kapazität ist für Grenznutzer „reserviert“

Daraus ergeben sich bei Einsatz des vollständigen zur Verfügung stehenden Spektrums für die Bereitstellung von 10 Mbps im Download und 1,7 Mbps im Upload Reichweiten von etwa:

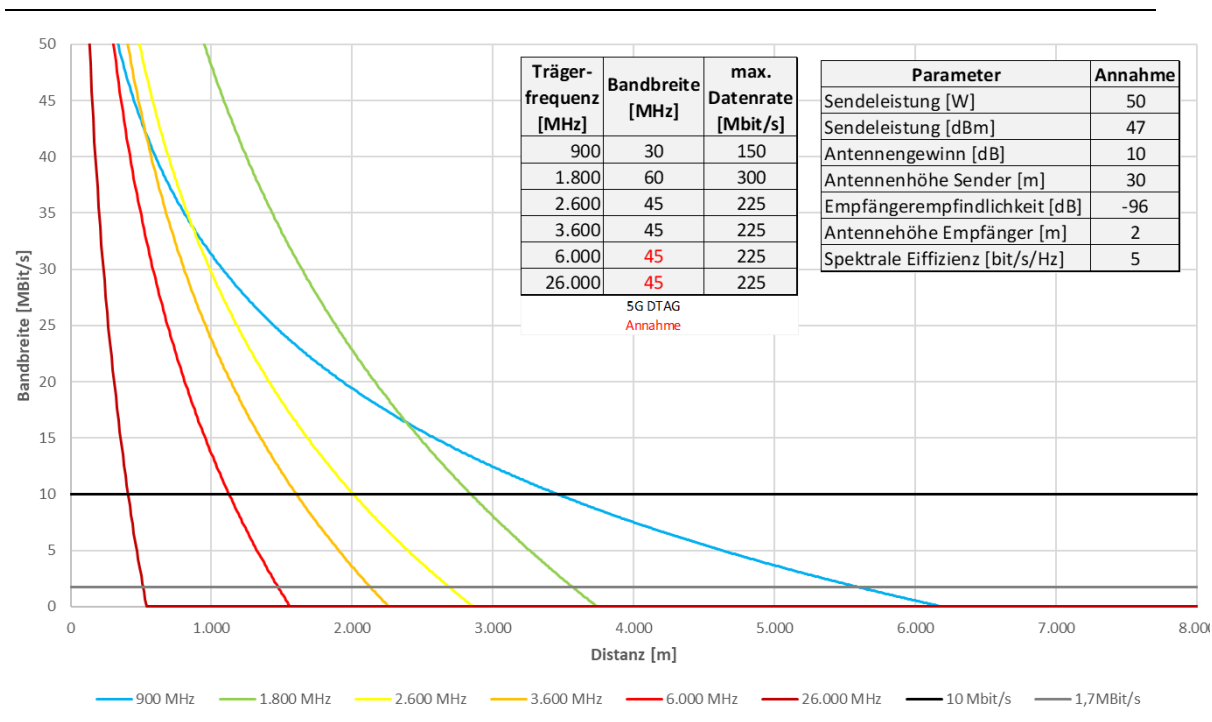
¹¹¹ RF Wireless World (o.J.).

¹¹² Qualcomm (2020).

- ca. 3.500 m bei 900 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 6.200 m
- ca. 2.900 m bei 1.800 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 3.700 m
- ca. 2.000 m bei 2.600 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 2.900 m
- ca. 1.600 m bei 3.600 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 2.200 m
- ca. 1.100 m bei 6.000 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 1.500 m
- ca. 400 m bei 26.000 MHz, Einbuchungsschwelle ca. 500 m

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge zwischen der Distanz zwischen Mobilfunkgerät und Senderstandort und der geschätzten erreichbaren Bandbreite in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz, unter Verwendung der angegebenen Annahmen und Parameter für 5G.

Abbildung 4-5: Abschätzung der Reichweite zur Erzielung der in der TKMV vorgegebenen Datenübertragungsraten (10 Mbps Downstream und 1,7 Mbps Upstream)

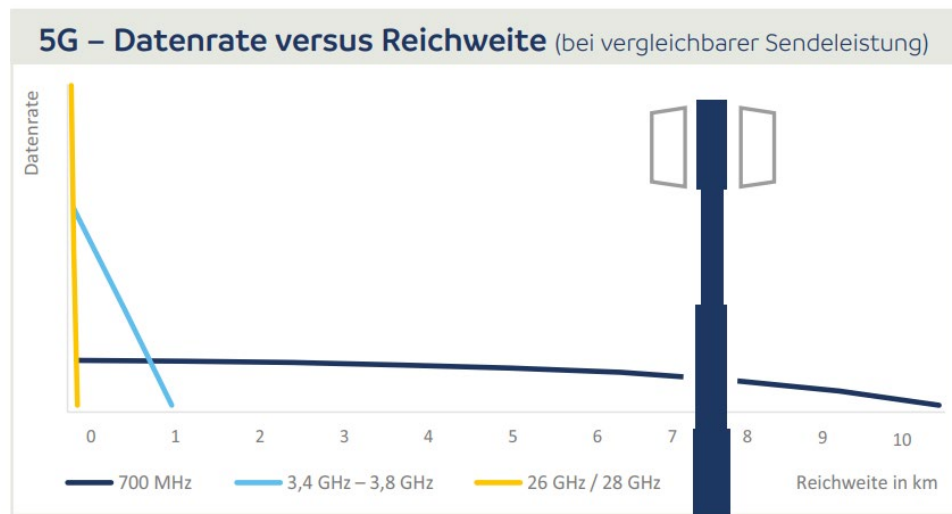


Quelle: wik, Berechnung des Pfadverlusts auf Basis von RF Wireless World (o.J.).

Auch die niedrigen Frequenzen sind grundsätzlich geeignet die Anforderungen der TKMV zu erfüllen, wenn hier ausreichende Bandbreiten verfügbar sind.

Ein rein qualitativer Vergleich der Zusammenhänge zwischen Datenrate und Entfernung ist auch in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 4-6: Qualitativer Zusammenhang zwischen Datenrate und Reichweite



Quelle: Informationszentrum-mobilfunk.de (2022).

4.1.3 Verfügbares Spektrum als Bestimmungsfaktor der Leistungsfähigkeit

Darüber hinaus ist auch noch relevant, welches Spektrum dem jeweiligen Anbieter zur Verfügung steht bzw. in der jeweiligen Zelle auch eingesetzt wird. Je mehr Spektrum ein Anbieter in einer Funkzelle zur Verfügung hat, umso mehr Bandbreite kann (z. B. über Kanalbündelung) auch zur Verfügung gestellt werden. Das Spektrum bezeichnet hier den tatsächlich durch dem Mobilfunkanbieter nutzbaren Frequenzbereich, welcher üblicherweise versteigert wird.

Die tatsächlich bei einem Nutzer ankommende Datenrate ist sowohl von (allen!) oben genannten Faktoren als auch von der Nutzung innerhalb der Mobilfunkzelle abhängig. So ist nicht nur die Anzahl der aktiven Endgeräte von Bedeutung, sondern auch deren Aufenthaltsort bzw. Verteilung innerhalb der Zelle. Im Extremfall kann die gesamte Kapazität einer Mobilfunkzelle benötigt werden, um nur einen Nutzer am Zellrand mit ausreichender Datenrate versorgen zu können, welche ansonsten zur Versorgung einer Vielzahl von Nutzern in näherer Umgebung zum Senderstandort mit gleicher Datenrate ausreichend wäre. Dies wäre theoretisch nur dann möglich, wenn sich kein weiterer aktiver Nutzer innerhalb der Zelle aufhält, da sonst die Zusammenhänge des Sharing gelten.¹¹³ Praktisch lässt sich also keine generell gültige Aussage zur möglichen Datenrate in einem bestimmten Abstand zu einem auf einer bestimmten Frequenz sendenden Mobilfunkantenne machen.

¹¹³ Konkret bedeutet dies, dass ein Nutzer, welcher sich am Zellrand aufhält, mehr Bandbreite beansprucht als ein Nutzer in der Nähe der Sendeantenne, auch bei identischer Datenrate.

4.1.4 Exogene Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit

Weiteren Einfluss auf die Reichweite haben neben der

- eingesetzten Mobilfunktechnologie (**spektrale Effizienz**) jedoch auch Faktoren wie
- **Bebauungsstruktur** (hohe Gebäude oder dichte Bauweise),
- **Topografie** der Landschaft (Hügel oder Berge),
- eventuell vorhandene **Vegetation** (Bäume oder Wald),
- die Sende- und Empfangsleistung (Mobilfunkbasisstation und Mobilfunkgerät) und sogar
- **Wettereinflüsse** (Nebel, Starkregen oder Hagel).¹¹⁴

Diese Einflüsse wirken sich bei hohen Frequenzen immer stärker aus und werden vom Faktor Entfernung zwischen Sender und Empfänger zusätzlich überlagert. Weiterhin reduziert sich die Reichweite, wenn eine Versorgung innerhalb von Gebäuden erfolgen soll, weil Materie zusätzlich dämpfend auf elektromagnetische Wellen wirkt.

4.1.5 Sharing in Mobilfunknetzen

Das Sharing bezieht sich bei den Mobilfunktechnologien immer auf die gleichzeitige Nutzung des verfügbaren Spektrums einer Senderantenne. Im Gegensatz zu den Festnetztechnologien ist hier aber nicht nur die reine Anzahl der gleichzeitigen (aktiven) Nutzer relevant und deren konkretes Nutzungsverhalten, sondern auch deren Distanz zur Senderantenne. Je näher sich ein Nutzer an der Sendeantenne aufhält, umso mehr Bandbreite kann genutzt werden. Dies vermindert zwar die für andere Nutzer zur Verfügung stehende Bandbreite, jedoch bleibt auch mehr Bandbreite für andere Nutzer verfügbar.

4.2 2G – Realisierungen

4.2.1 2G – Charakterisierung von Realisierungsformen

Der Mobilfunk der 2. Generation (2G – GSM – Global System for Mobile Communications) ist die erste digitale leitungsvermittelte Mobilfunktechnologie in Deutschland. Die zuerst möglichen Datenübertragungsverfahren waren CSD (Circuit Switched Data) und SMS (Short Message Service). Später wurden die Datenraten erhöht (GSM-Phase-2) indem auf die Fehlerkorrektur der Daten verzichtet wurde. Dies führte im Gegenzug aber zu einer Reduktion der Verbindungsqualität.¹¹⁵ Darauf folgend wurde in der GSM-Phase-

¹¹⁴ umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022).

¹¹⁵ Elektronik-Kompendium.de (o.J., c).

2+ eine Kanalbündelung von bis zu 8 Kanälen ermöglicht, um die Datenraten weiter zu erhöhen (HSCSD – High Speed Circuit Switched Data). Bei diesen Datenübertragungsverfahren werden tatsächliche digitale Verbindungen mit fest reservierter Bandbreite zwischen dem Mobilfunkgerät und einem Gateway aufgebaut. Die Abrechnung erfolgte nach Zeit und nicht nach Datenvolumen. Dies bedeutet praktisch, dass für jede Internetnutzung auch eine Verbindung aufgebaut werden muss. Durch diese Eigenschaft handelt es sich bei CSD und HSCSD nicht um ein Shared Medium, da jedem Nutzer die volle Bandbreite der Verbindung exklusiv zur Verfügung steht. Die GSM-Mobilfunknetze in Deutschland verwenden Frequenzen in den Bändern 900 MHz und 1.800 MHz.

Etwa ab dem Jahr 2000 wurde der verbindungslose und paketorientierte Datendienst GPRS (General Packet Radio Service)¹¹⁶ als Datenübertragungsverfahren im GSM-Netz eingeführt. Dieser ermöglicht erstmals, eine dauerhafte Internetverbindung aufrecht zu erhalten. Die Abrechnung erfolgt nun nicht mehr nach Zeit, sondern nach Datenvolumen. Die zur Verfügung stehende Bandbreite einer Funkzelle kann bei Bedarf nun von allen Nutzern genutzt werden, muss aber auch von allen Nutzern geteilt werden: Shared Medium. Hierdurch kann die Kapazität aber insgesamt besser ausgenutzt werden. Es ist eine Kanalbündelung von bis zu 8 Kanälen möglich. Die möglichen Datenraten erhöhen sich durch GPRS erneut.

Etwa ab dem Jahr 2006 wurde mit EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)¹¹⁷ ein Verfahren eingeführt, welches die Datenübertragungsverfahren GPRS und HSCSD im GSM-Netz beschleunigt. Hierzu mussten die Basisstationen umgerüstet und die Sendeverstärker angepasst werden. Zwar ist auch bei EDGE eine Kanalbündelung möglich, aber die Steigerung der Datenraten wurde hierbei durch eine Optimierung der Modulation erreicht, wodurch mehr Bit/s pro Kanal übertragen werden können, was zu einer etwa dreifachen Übertragungsrate pro Kanal führt.

Außer dem Datenübertragungsverfahren CSD sind die Netze der 2. Mobilfunkgeneration auch für Telefonie, SMS und frühe IoT Anwendungen weiterhin in Deutschland aktiv. Der Ausbau der 2G Netze in Deutschland liegt bei etwa 99,68% der Fläche¹¹⁸.

¹¹⁶ Elektronik-Kompendium.de (o.J., b).

¹¹⁷ Elektronik-Kompendium.de (o.J., d).

¹¹⁸ BNetzA (o.J., a).

4.2.2 2G – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die nachfolgende Tabelle stellt die Qualitätsparameter der 2. Mobilfunkgeneration dar.

Tabelle 4-1: Qualitätsparameter 2. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
MobilFunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
2G-GSM (CSD)	0,0144	0,0144	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
2G-HSCSD	0,0432	0,0288	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
2G-GPRS	0,0536	0,0268	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend
2G-EDGE	0,2368	0,1184	35.000	>300	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: Elektronik-Kompodium.de (o.J., c)

Alle 2G-Technologien sind für eine Mindestversorgung ungeeignet, da sowohl die Datenraten als auch die Latenzen den aktuellen Anforderungen nicht genügen.

4.3 3G – Realisierungen

4.3.1 3G – Charakterisierung von Realisierungsformen

Der Mobilfunk der 3. Generation (3G – UMTS – Universal Mobile Telecommunications System)¹¹⁹ ist die zweite digitale und erste vollständig paketvermittelte Mobilfunktechnologie in Deutschland, basierend auf dem Internetprotokoll. Allerdings wurde das UMTS-Netz 2021 in Deutschland abgeschaltet und durch die neueren und effizienteren Mobilfunkgenerationen 4G und 5G ersetzt. Die UMTS-Mobilfunknetze in Deutschland verwendeten Frequenzen in den Bändern zwischen 1.900 MHz und 2.100 MHz. In der ersten Ausbaustufe lagen die Datenraten nur wenig oberhalb der mit GSM-EDGE möglichen. Eine Besonderheit war der vom Nutzer wahrgenommene „Ramp-Up“ bei Datenverbindungen über das UMTS-Netz. Zwar war eine ständige Verbindung mit dem Internet vorhanden, jedoch fiel die Priorität des Nutzers (gegenüber anderen Nutzern in der Zelle) bei Nichtnutzung, und bei neu einsetzendem Datenverkehr dauerte es etwa 2 bis 3 Sekunden, bis die gesamte mögliche Bandbreite wieder zur Verfügung stand. Dies wurde als Latenz wahrgenommen. Auch im UMTS-Netz teilten sich alle Nutzer in einer Zelle die verfügbare Bandbreite: Shared Medium.

¹¹⁹ Elektronik-Kompodium.de (o.J., c) und Elektronik-Kompodium.de (o.J., a).

Ein erste Verbesserung erfuhr das UMTS-Netz ab etwa 2002 mit der Einführung von HSPA (High Speed Packet Access)¹²⁰. Durch eine optimierte Modulation und die Nutzung mehrerer paralleler Datenströme konnten die Datenraten vervielfacht werden. Die Verbesserungen wurden in zwei getrennten Protokollzusätzen definiert:

- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) für den Downlink
- HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) für den Uplink

Durch diese Verbesserungen wurden die Datenlast in der Basisstation optimiert und die Reaktionszeiten des UMTS-Netzes verbessert.

Eine weitere Verbesserung erfuhr das UMTS-Netz ab etwa 2007 mit HSPA+ (HSPA Evolution)¹²¹. Durch die Einführung verbesserter Modulationsverfahren (QAM – Quadratur-Amplituden-Modulation)¹²² und die Nutzung von MIMO-Antennen (Multiple Input Multiple Output) – es können dann mehrere Antennen parallel genutzt werden – konnten die Datenraten nochmal um ein Vielfaches gesteigert werden und – zumindest theoretisch – Datenübertragungsraten vergleichbar zu der von ADSL2+ ermöglicht werden. Bei HSPA+ findet also nicht nur eine Kanalbündelung statt, sondern auch eine gleichzeitige Mehrfachnutzung von Kanälen. Zur Nutzung von HSPA+ mussten die Basisstationen weiter aufgerüstet werden und auch die Mobilfunkgeräte mussten diese Technik unterstützen.

4.3.2 3G – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die nachfolgende Tabelle stellt die Qualitätsparameter der 3. Mobilfunkgeneration dar.

Tabelle 4-2: Qualitätsparameter 3. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
3G-UMTS	0,384	0,128	20.000	>200	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
3G-HSPA	7,2	3,6	20.000	<200	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird inD nicht mehr angeboten
3G-HSPA+	42,2	11,5	20.000	<200	nein, Latenz zu hoch, Dienst wird in D nicht mehr angeboten

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: Elektronik-Kompendium.de (o.J., c)

¹²⁰ Elektronik-Kompendium.de (o.J., f).

¹²¹ Elektronik-Kompendium.de (o.J., g).

¹²² Hierbei werden zwei amplitudenmodulierte Signale in einem Kanal kombiniert.

Alle 3G-Technologien sind für eine Mindestversorgung ungeeignet, da diese in Deutschland nicht mehr eingesetzt werden.

4.4 4G – Realisierungen

4.4.1 4G – Charakterisierung von Realisierungsformen

Der Mobilfunk der 4. Generation (4G – LTE – Long Term Evolution)^{123,124} ist die dritte digitale Mobilfunktechnologie in Deutschland und eine Weiterentwicklung von UMTS. Während die vorhergehenden Mobilfunkgenerationen noch für beides, sowohl für die Telefonie als auch für die Datenübertragung ausgelegt waren, fokussiert LTE vollständig auf die Übertragung von Daten auch für die Sprachübertragung mit VoIP (Voice over IP), hier VoLTE (Voice over LTE) genannt. Ziele der Weiterentwicklung sind die Verringerung des Stromverbrauchs der Basisstationen und schnelles mobiles Internet. Als wichtigste neue Funktionen sind CA (Carrier Aggregation)¹²⁵ und eine verbesserte Nutzung von Multi-Antennentechniken (MIMO) zu nennen. Auch bei LTE müssen sich die Nutzer einer Zelle die verfügbare Bandbreite teilen, d. h., auch hier handelt es sich um ein Shared Medium. Die LTE-Mobilfunknetze in Deutschland verwenden Frequenzen in den Bändern 800 MHz, 1.800 MHz, 2.000 MHz und 2.600 MHz. Die größten Reichweiten sind hierbei mit den niedrigen Frequenzen zu erreichen, welche entsprechend auch in eher ländlichen Regionen eingesetzt werden. Allerdings sind dann nicht die maximal möglichen Bandbreiten zu erzielen. Die höheren Frequenzen dagegen finden eher in urbanen Gebieten Anwendung, da ihre Reichweite begrenzt ist, dafür aber die maximal möglichen Bandbreiten erreicht werden können. Demzufolge ist auch die Dichte an Antennenstandorten bei niedrigen Frequenzen geringer, bei hohen Frequenzen höher. Die Kapazität einer Funkzelle liegt bei etwa 200 aktiven Nutzern je 5 MHz.

Eine erste Erweiterung von LTE zu LTE-A (LTE Advanced)¹²⁶ erfolgte etwa im Jahr 2014. Durch Trägerbündelung (Carrier Aggregation), der Nutzung von bis zu 8 Antennen (MIMO) und einer Verbesserung der spektralen Effizienz¹²⁷ konnte die Empfangsbandbreite erheblich vergrößert werden. Die Kapazität einer Funkzelle konnte auf etwa 600¹²⁸ aktive Nutzer je 5 MHz gesteigert werden.

¹²³ Elektronik-Kompendium.de (o.J., c): Datenübertragung im Mobilfunk [Blog], <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0910141.htm> und Elektronik-Kompendium.de (o.J., e): LTE - Long Term Evolution [Blog], <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1301051.htm>.

¹²⁴ Plückebaum, T. (2023).

¹²⁵ Hierbei werden mehrere Frequenzblöcke parallel zur Datenübertragung genutzt.

¹²⁶ Elektronik-Kompendium.de (o.J., h).

¹²⁷ Darunter versteht man das Verhältnis zwischen Datenübertragungsrate [Bit/s, Bps] und der Bandbreite des Signals [Hz]. Je höher die spektrale Effizienz, umso mehr Daten können übertragen werden.

¹²⁸ Dies bezieht sich lediglich auf die Spezifikation von LTE-A und sagt aus, dass diese Anzahl aktiver Nutzer gleichzeitig vom System verwaltet werden können und lässt keinen Rückschluss zu, mit welchen Datenübertragungsraten die Nutzer versorgt werden können. Aktiv ist hier im Sinne von "im Netz eingebucht" zu verstehen.

Eine zweite Erweiterung von LTE-A zu LTE-A pro¹²⁹ erfolgte etwa im Jahr 2017. Ziel war es, Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 1 Gbps zu erreichen. LTE-A pro wird als Zwischenschritt in Richtung 5G verstanden und wird daher häufiger als 4.5G bezeichnet. Auch in diesem Schritt konnte durch Verbesserung der Trägerbündelung (Carrier Aggregation) und einer weiteren Verbesserung der spektralen Effizienz die Empfangs- und auch Sendebandbreite erheblich vergrößert werden. Wie auch bei LTE und LTE-A teilen sich die Nutzer einer Zelle die verfügbare Bandbreite (Shared Medium).

Die Netze der 4. Mobilfunkgeneration sind weiterhin in Deutschland aktiv. Der Ausbau der 4G-Netze in Deutschland liegt bei etwa 96,88% der Fläche¹³⁰.

4.4.2 4G – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die maximal möglichen Datenübertragungsraten haben sich im Laufe der Evolution von LTE zu LTE Advanced Pro signifikant erhöht, Reichweiten und Latenzen bleiben stabil.

Tabelle 4-3: Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
MobilFunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
4G-LTE	300	75	10.000	50	ja
4G-LTE adv.	600	75	10.000	50	ja
4G-LTE adv. Pro	1000	500	10.000	50	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Elektronik-Kompendium.de (o.J., c)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., e)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., h)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., i)
 Plückebaum, T. (2023)
 umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022).

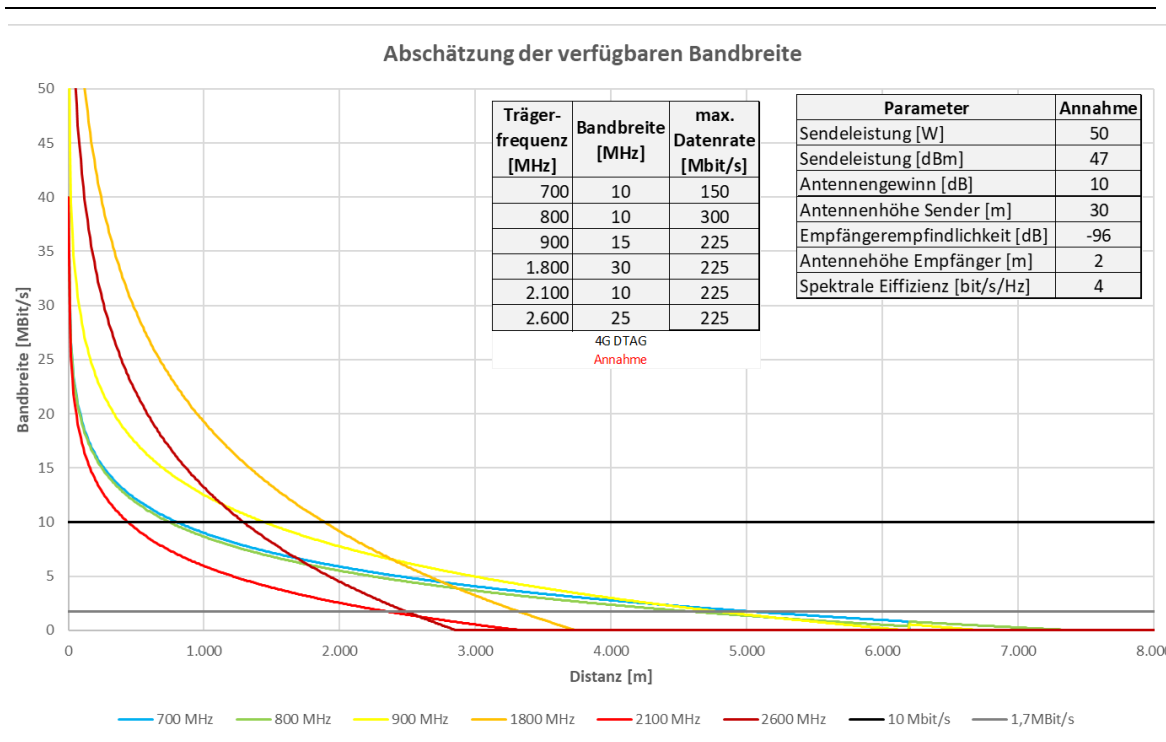
Alle 4G-Technologien sind vom Grundsatz her für eine Mindestversorgung nach TKMV geeignet. Jedoch sind bei jedem Einzelfall die Rahmenbedingungen zu überprüfen, ggf. sind auch konkrete Messungen in der betreffenden Mobilfunkzelle notwendig.

¹²⁹ Elektronik-Kompendium.de (o.J., i).

¹³⁰ BNetzA (o.J., a).

Die in der Tabelle 4-3 dargestellten Datenübertragungsraten sind im Einzelfall abhängig vom eingesetzten Spektrum des jeweiligen Mobilfunkanbieters. Die Reichweiten beziehen sich auf die niedrigen Frequenzbänder. In den höheren Frequenzbändern sind deutlich niedrigere Reichweiten zu erwarten:

Abbildung 4-7: Abschätzung der Reichweite zur Erzielung der in der TKMV vorgegebenen Datenübertragungsraten (10 Mbps downstream und 1,7 Mbps upstream)



Quelle: wik, Berechnung des Pfadverlusts auf Basis von <https://www.rfwireless-world.com/calculators/Hata-model-path-loss-calculator.html>

4.5 5G – Realisierungen

4.5.1 5G – Charakterisierung von Realisierungsformen^{131 132}

Etwa im Jahr 2019 wurde in Deutschland mit dem Aufbau der 5G-Netze begonnen. Zunächst wurde hierbei vorwiegend auf die bestehende 4G-Infrastruktur aufgesetzt, da in einem ersten Schritt die 5G-Funktechnik an das bereits bestehende 4G-Kernnetz angebunden wird. Diese Variante wird auch 5G NSA (Non-Stand-Alone) bezeichnet. In den 5G NSA-Netzen werden also zunächst noch keine zusätzlichen Dienste oder Funktionen

¹³¹ umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022).

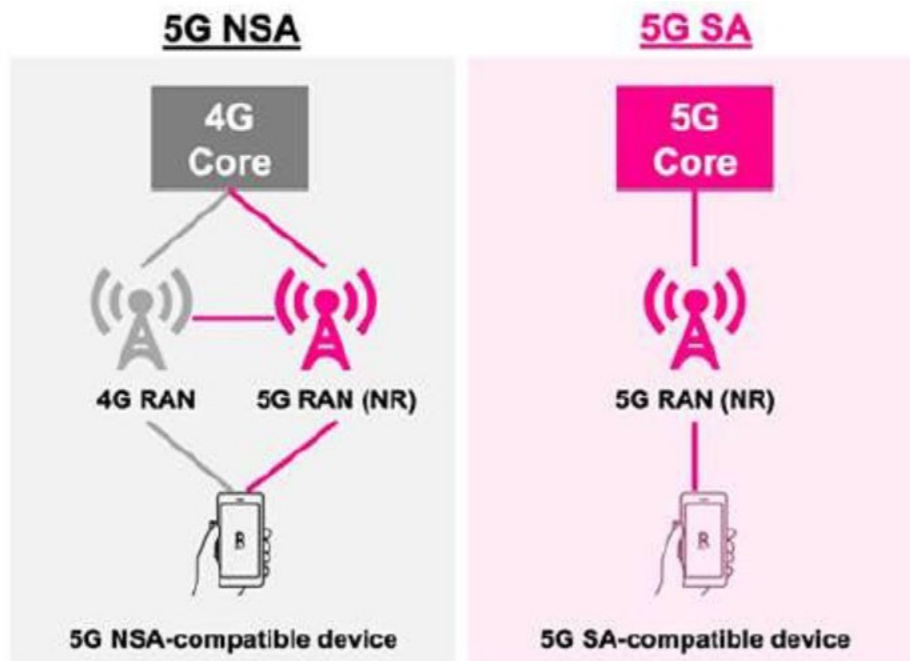
¹³² Plückerbaum, T. (2023).

angeboten, sondern es werden zusätzliche Übertragungskapazitäten geschaffen, was auch als eMBB (Enhanced Mobile BroadBand) bezeichnet wird.

Die neuen Fähigkeiten eines vollständigen 5G-Netzes (5G-Funktechnik & 5G-Kernnetz) wie uRLLC (ultra Reliable Low Latency Communication) oder Network Slicing werden erst in einem nächsten Schritt ermöglicht, auch 5G SA (Stand-Alone) genannt, siehe Abbildung 4-4. Hierzu werden, nachdem das Kernnetz auf 5G aufgerüstet wurde, die 5G NSA-Basisstationen auf 5G SA umgestellt.

Das Vorgehen in den zwei skizzierten Schritten scheint umständlich, bietet aber praktisch den Vorteil, dass neu errichtete 5G-Funkzellen sofort über das 4G-Kernnetz ihren Betrieb aufnehmen können und damit zusätzliche Kapazitäten zur Verfügung stellen, während parallel das 5G-Kernnetz aufgebaut werden kann. Die nachfolgende Abbildung zeigt die beiden Varianten. Die Bezeichnung NR (New Radio) bezeichnet hierbei die 5G-Funktechnik.

Abbildung 4-8: 5G Non-Stand-Alone (NSA) und Stand-Alone (SA)



Quelle: „Rakuten Mobile Successfully Verifies Data Transfer on 5G Standalone Mobile Network“, verfügbar unter: https://corp.mobile.rakuten.co.jp/english/news/press/2021/07/12_01

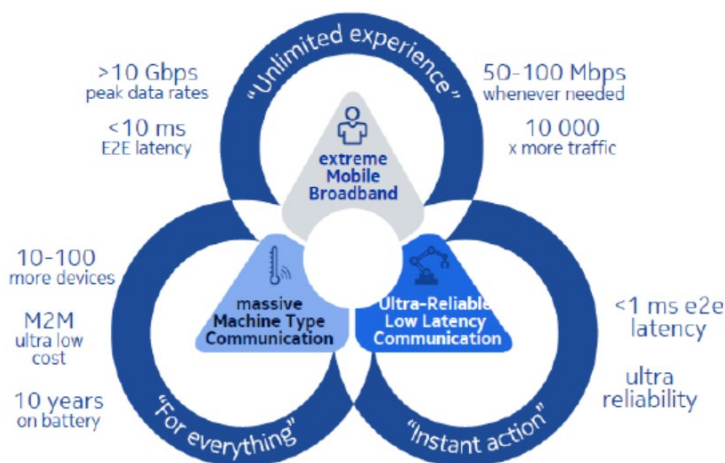
Bei den neuen Funktionen, welche erst mit der Fertigstellung der vollständigen 5G-Infrastruktur (5G SA), handelt es sich insbesondere um:

- Sehr hohe mobile Datenübertragungsraten (eMBB – enhanced Mobile Broad-Band)

- Hohe Zuverlässigkeit und kurze Latenzzeiten (uRLLC – ultra Reliable Low Latency Communication)
- Große Anzahl direkt kommunizierender Endgeräte (mMTC – massive Machine Type Communication)

Die nachfolgende Abbildung und Tabelle stellen die neuen Anwendungsfelder (eMMB, mMTC, uRLLC) dar, welche durch 5G SA erschlossen werden. Diese Funktionen sind jedoch im Kontext der Mindestversorgung nach TKMV als nicht relevant anzusehen.

Abbildung 4-9: Kommunikationscharakteristika von 5G-Anwendungen



Quelle: Pfeifer, T. (2017) [71]

Tabelle 4-4: Anwendungsbeispiele für die Anforderungen an 5G-Netze

Anwendungsfall	Hauptanforderungen	Beispiele	
Massive „Machine-Type Communications“ (mMTC)	Sehr hohen Batterielebensdauern	Smart City	Wearables
	Hohe Flächenverfügbarkeit	Smart Home	Sensoren
		Smart Metering	Object Tacking
Kritische MTC oder „Ultra-Reliable Low-Latency Communications“ (uRLLC)	Hohe Zuverlässigkeit	Autonomes Fahren	Industriearomatisierung
	Sehr niedrige Latenz (< 1ms E2E)	Robotics	Aviation
	Extreme Verfügbarkeit	Smart Grids	Medical
Extremes Mobiles Breitband (eMMB)	Extrem hoher Datendurchsatz (Gbit/s)	3D/UHD Video Telepresence	Taktiler Internet
	Sehr niedrige Latenz (< 1ms E2E)	UHD Video Streaming	Virtual Reality

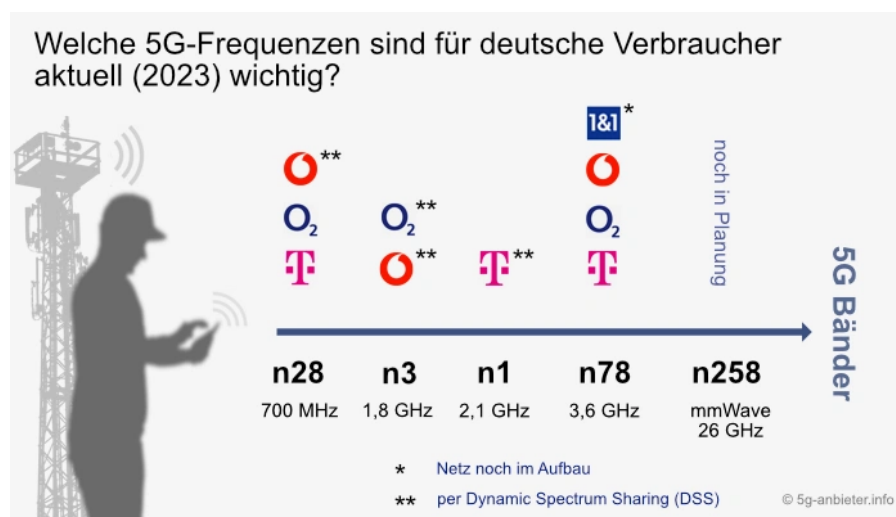
Quelle: wik

Bei 5G gibt es hinsichtlich der Reichweite deutliche Unterschiede, die durch die jeweils verwendeten Frequenzbereiche bedingt sind. Die größten Reichweiten werden im Frequenzbereich unterhalb 1 GHz erreicht, bereits die Frequenzen im Bereich 3 GHz lassen nur noch etwa ein Zehntel dieser Reichweite zu. Die möglichen Datenraten verhalten sich auch bei 5G reziprok dazu, sind aber zusammenfassend für die aktuellen Anforderungen im Rahmen der Grundversorgungs-Thematik prinzipiell ausreichend.

5G hat bezüglich der verwendeten Frequenzen eine deutlich größere Spannweite, als dies in den vorangegangenen Mobilfunkgenerationen der Fall war. Für eine gute Indoor-Abdeckung und große Reichweiten in ruralen Regionen werden Frequenzen unterhalb 1 GHz eingesetzt. Für eine gute Balance zwischen Reichweite und Datenübertragungsrate werden Frequenzen um 2 GHz eingesetzt, dies vor allem in mitteldicht besiedelten Gebieten. Dagegen werden in dichtbesiedelten Regionen Frequenzen im Bereich 3,5 GHz verwendet. Dies erfordert aber auch ein hohe Dichte der Sendeanlagen. Zur punktuellen Steigerung des Angebots von nutzbaren Datenübertragungsraten werden auch Frequenzen deutlich oberhalb 3,5 GHz verwendet (auch Micro-, Pico- und Femtozellen genannt), welche sich aber generell nicht für eine flächige Abdeckung und mit steigender Frequenz immer weniger für eine Penetration von Gebäudewänden eignen und daher immer in Kombination mit Sendeanlagen in einem der unteren Frequenzbereiche (Makrozellen genannt) installiert werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die aktuell durch die Mobilfunkanbieter genutzten Trägerfrequenzen (Frequenzbänder) und deren typische Einsatzgebiete.

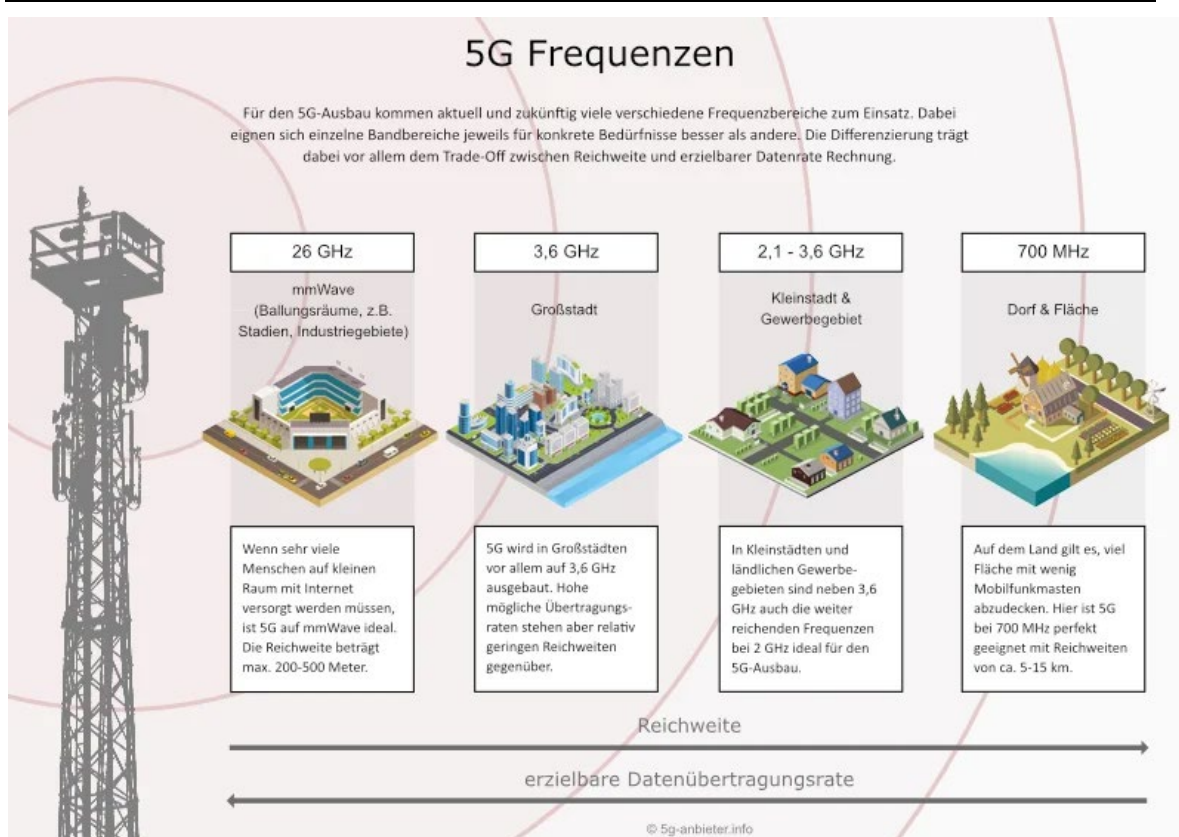
Abbildung 4-10: Aktuelle relevante 5G-Frequenzen in Deutschland¹³³



Quelle: 5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Frequenzen: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html> (Stand 23.09.2023)

¹³³ DSS – Dynamic Spectrum Sharing erlaubt die gleichzeitige Nutzung von 4G und 5G im gleichen Frequenzbereich (Quelle: BNetzA (o.J., b)).

Abbildung 4-11: Einsatzgebiete der verschiedenen 5G-Frequenzbereiche



Quelle: 5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Frequenzen: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html> (Stand 28.09.2023)

4.5.1.1 Beamforming

Generell haben Mobilfunkantennen eine flächige Ausleuchtungscharakteristik. Ausgehend vom Antennenstandort wird die umgebende Fläche weitestgehend gleichmäßig abgedeckt. Zur punktuellen Verbesserung der Versorgung werden inzwischen auch Antennentechnologien angewendet, die das sogenannten Beamforming ermöglichen. Hierbei werden die Funkwellen gebündelt und gezielt geformt, um entweder die Reichweite oder die Bandbreite in einem zielgerichteten Bereich zu erhöhen. Ziel ist es z. B. einzelne Nutzer gezielt zu versorgen. Durch den Einsatz des Beamforming ist es möglich, auch bei höheren Frequenzen eine Reichweitenverbesserung zu erreichen, ohne dabei die Verringerung der Datenübertragungsrate hinnehmen zu müssen, wenn stattdessen eine geringere Frequenz verwendet werden würde. Beispielsweise bei 3,5 GHz lässt sich die Reichweite einer Antenne durch Beamforming um etwa 1,5 km vergrößern.

4.5.1.2 Priorisierung

Eine weitere Möglichkeit der punktuellen Verbesserung der Mobilfunkversorgung ist die Priorisierung. Während normalerweise die Datenpakete im Mobilfunknetz nach dem Best-Effort-Prinzip, also gleich behandelt werden, besteht auch die Möglichkeit, bestimmten Nutzern Vorrang einzuräumen.

4.5.1.3 Network Slicing

In 5G SA-Netzen besteht darüber hinaus die Möglichkeit des sogenannten Network Slicing. Hierbei werden logisch getrennte virtuelle Netze für unterschiedliche Nutzungsszenarien mit verschiedenen Eigenschaften realisiert. Diese Scheiben können auf bestimmte Anwendungsfälle zugeschnitten sein:

- Hohe Datenraten
- Verbesserte Reichweite
- Besonders geringe Latenz
- Hohe Übertragungskapazität
- Hohe Nutzeranzahlen

Sie nutzen sozusagen Scheiben der Gesamtkapazität des Mobilfunknetzes.

Der Ausbau der 5G-Netze in Deutschland liegt bei etwa 63,46% der Fläche für 5G Stand-Alone und 67,99% der Fläche für 5G Non-Stand-Alone¹³⁴.

4.5.2 5G – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die maximal möglichen Datenübertragungsraten und die maximale Reichweite sind bei 5G stark frequenzabhängig, Latenzen bleiben stabil und liegen deutlich unterhalb der Werte bei 4G.

¹³⁴ BNetzA (o.J., a).

Tabelle 4-5: Qualitätsparameter 5. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
5G-0,7-1GHz	75	25	10.000	<10	ja
5G-1-2GHz	150	50	3.000	<10	ja
5G-2-5GHz	1000	200	1000-2500	<10	ja
5G-5-10GHz	>1000	>200	300-1000	<10	ja, aber in Deutschland noch nicht angeboten
5G-10-30GHz	>2000	>1000	<300	<10	ja, aber in Deutschland noch nicht angeboten

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: ComputerWeekly.de: Leistungsdaten und Frequenzen von 5G und Wi-Fi-6: <https://www.computerweekly.com/de/feature/Leistungsdaten-und-Frequenzen-von-5G-und-Wi-Fi-6> (Stand 23.09.2023)

5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Geschwindigkeit: <https://www.5g-anbieter.info/speed/wie-schnell-ist-5g.html> (Stand 23.09.2023)

5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Frequenzen: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html> (Stand 23.09.2023)

umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022)

Plückebaum, T. (2023).

Elektronik-Kompodium.de (o.J., i)

Die tatsächlich verfügbare Datenübertragungsrate ist auch abhängig vom dem einzelnen Mobilfunkanbieter zur Verfügung stehenden Spektrum, welches in einer Auktion ersteigert werden konnte.

Alle 5G-Technologien sind vom Grundsatz her für eine Mindestversorgung geeignet. Jedoch sind bei jedem Einzelfall die Rahmenbedingungen zu überprüfen, ggf. sind auch konkrete Messungen in der betreffenden Mobilfunkzelle notwendig.

4.6 FWA

4.6.1 FWA – Charakterisierung von Realisierungsformen¹³⁵

FWA (Fixed Wireless Access) stellt einen Ersatz oder eine Ergänzung für Festnetzanschlüsse dar. Verwendet wird hierbei Mobilfunktechnik der Generationen 4 und 5. Grundsätzlich wäre aber auch Richtfunk, HAPS oder WIMAX nutzbar. Es gelten grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Größter Unterschied zum herkömmlichen Mobilfunk ist die Tatsache, dass die Mobilität der Teilnehmer entfällt und hierdurch nutzerseitig eine andere Antennentechnik (zum Sendestandort hin ausgerichtete Outdoor-Antennen) verwendet werden kann, um eine

¹³⁵ Plückebaum, T. (2023).

Verbesserung der Funkverbindung zu erreichen. Um eine ausreichend große Datenübertragungsrate bei Endkunden zu erreichen, werden eher die höheren oder hohen Frequenzen eingesetzt, was aber häufig eine Sichtverbindung zwischen Sendeantenne und Empfängerantenne erfordert. Dies stellt ggf. besondere Anforderungen an den zu wählenden Antennenstandort, der für breitbandige Dienste bereits mit Glasfaser oder alternativ mit breitbandigen Richtfunkverbindungen erschlossen sein muss.

Typische Einsatzgebiete sind rurale Gegenden, die (noch) nicht mit breitbandigem Internet versorgt sind. Es ist zu beachten, dass sich die über eine Sendeantenne angebundene Nutzer die Datenübertragungsrate teilen müssen: Shared Medium.

Durch die Kombination verschiedener Faktoren können über Entfernungen von bis zu 6 km sehr hohe Datenübertragungsraten (>1 Gbps) realisiert werden:

- Nutzung von 5G NR
- Nutzung hoher Frequenzen
- Beamforming
- Sichtverbindung
- Gerichtete Outdoor-Antennen
- Verwendung von MIMO-Antennen

Dennoch kann die Verbindungsqualität trotz der zuvor genannten Faktoren durch unvermeidbare Wettereinflüsse schwanken. Regen, Schneefall oder Nebel können zu einer deutlichen Beeinträchtigung führen. Bei Gewittern sind durch Blitzeinschlag sogar Verbindungsabbrüche möglich.

4.6.2 FWA – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die Datenübertragungsraten und die Latenz sind grundsätzlich für eine Mindestversorgung nach TKMV geeignet, da es sich grundsätzlich um Mobilfunktechnik der 4. oder 5. Generation handelt.

Tabelle 4-6: Qualitätsparameter Fixed Wireless Access

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
FWA (5G NR)	>2000	>1000	4.000 - 6.000	<10	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Plückebaum, T. (2023).

Die konkreten Qualitätsparameter sind abhängig von der tatsächlich verwendeten Mobilfunktechnologie und der Nutzung von Optimierungsoptionen.

FWA ist vom Grundsatz her für eine Grundversorgung geeignet. Jedoch sind bei jedem Einzelfall die Rahmenbedingungen zu überprüfen, ggf. sind auch konkrete Messungen in der betreffenden Mobilfunkzelle notwendig.

4.7 WIMAX

4.7.1 WIMAX – Charakterisierung von Realisierungsformen¹³⁶

Bei WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) handelt es sich um eine drahtlose Breitbandtechnik, welche früher als drahtlose Alternative zu DSL angesehen wurde.

WIMAX kann größere Entfernungen von bis zu 50 km (120 km bei WIMAX2) überbrücken, jedoch nehmen die Bandbreiten mit zunehmender Entfernung zum Senderstandort ab. Tatsächlich sind die erreichbaren Datenraten für Nutzer etwa mit denen von DSL vergleichbar.

Spätestens mit der Einführung von LTE hat sich WIMAX überholt, wird nicht mehr weiterentwickelt und hat daher auch keine praktische Relevanz mehr in Deutschland.

4.7.2 WIMAX – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die Datenübertragungsraten bleiben deutlich hinter den Möglichkeiten von 4G und 5G zurück, jedoch sind signifikant größere Reichweiten möglich. Allerdings hat WIMAX in Deutschland keine Relevanz mehr und spielt daher für die Mindestversorgung nach TKMV keine Rolle.

Tabelle 4-7: Qualitätsparameter WIMAX

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
WIMAX	10	10	50.000	50	keine Relevanz in Deutschland, technische Leistungsfähigkeit bis 10 Mbps ist gegeben

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Elektronik-Kompodium.de (o.J., j), eolo Südtirol EOLowave: <https://eolo.suedtirol.it/blog/eolowave#:~:text=Die%20Latenz%20ist%20mit%20WiMAX,mit%202%2D3Mbps%20recht%20limitiert>

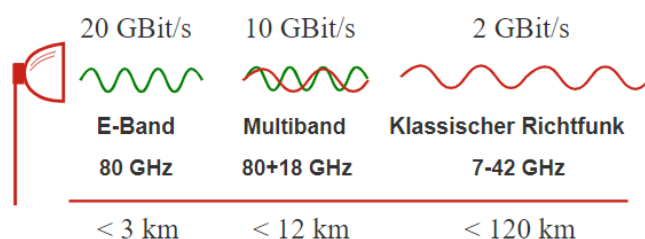
WIMAX ist für eine Grundversorgung ungeeignet, da es in Deutschland keine Relevanz mehr hat.

4.8 Richtfunk

4.8.1 Richtfunk – Charakterisierung von Realisierungsform^{137 138}

Bei Richtfunk handelt es sich um eine Funkübertragungstechnik zur Datenübertragung mit hohen Datenübertragungsraten. Es werden PtP- (Punkt-zu-Punkt) und PtMP- (Punkt-zu-Multipunkt) Verbindungen unterschieden. Bei PtP-Verbindungen werden zwei Antennen mit großer Richtwirkung aufeinander ausgerichtet. Bei PtMP finden Sektorantennen Verwendung, welche aber geringere Datenübertragungsraten und Entfernungen zulassen. Wie auch bei 5G ist der Einsatz von Beamforming möglich. Grundsätzlich sind Sichtverbindungen zwischen Sender und Empfänger notwendig. Sollte dies nicht möglich sein, können Relaisstationen zum Einsatz kommen.

Abbildung 4-12: Reichweiten und Datenübertragungsraten des Richtfunks



Quelle: TWS Technologies (o.J.)

¹³⁷ TWS Technologies (o.J.).

¹³⁸ Telko Service (o.J.).

Wegen der hohen Errichtungskosten sind Richtfunklösungen für gewerbliche Anwendungen oder auch die Anbindung von Mobilfunkstandorten ohne Glasfaserzugang im Einsatz, nicht jedoch direkt für Endkundenanschlüsse im Massenmarkt.

4.8.2 Richtfunk – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die Datenübertragungsraten und die Latenz wären grundsätzlich für eine Mindestversorgung nach TKMV geeignet, jedoch wird Richtfunk nicht für den Massenmarkt eingesetzt und spielt daher für die Mindestversorgung nach TKMV keine Rolle.

Tabelle 4-8: Qualitätsparameter Richtfunk

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
Richtfunk (PtP/PtMP)	>50	>50	100 - 120.000	<10	keine Relevanz für Privatkunden in Deutschland, technische Leistungsfähigkeit ist gegeben

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen TWS Technologies (o.J.); Telko Service (o.J.); Plutex: *PLUTEXwave: Internet per Richtfunk – konstante, redundante Hochgeschwindigkeit*: <https://www.plutex.de/internet/wave>

Richtfunk ist grundsätzlich für eine Mindestversorgung geeignet, aufgrund des hohen technischen und finanziellen Aufwands ist es aber für Privatkunden i. d. R. keine Option.

4.9 High Altitude Platform Systems (HAPS)

4.9.1 HAPS – Charakterisierung von Realisierungsform^{139 140}

Als Alternative zur Versorgung von Gebieten ohne schnellen Internetzugang über Festnetz oder terrestrischen Mobilfunk wird aktuell eine neue Technologie entwickelt, um z. B. Haushalte aus der Luft zu versorgen. Bei dieser als HAPS (High Altitude Platform Systems) bezeichneten Technologie handelt es sich um autonom fliegende Drohnen, welche auf einer Höhe zwischen 15 km und 20 km in der Stratosphäre quasi-stationär ein aus-zuleuchtendes Gebiet überfliegen. Im Gegensatz zu den Satellitenlösungen sind wegen der vergleichsweise geringen Flughöhe die Signallaufzeiten vom Erdboden zum Fluggerät und zurück vernachlässigbar. Die Fluggeräte, haben sie ihre Position in der Stratosphäre erreicht, halten die Position in der vorhandenen Luftströmung und können so geostationär arbeiten. Der Antrieb und auch die Stromversorgung erfolgt über Wasserstoff-Brennstoffzellen oder auch ergänzend durch Solarzellen. Ist der Energievorrat nach einer

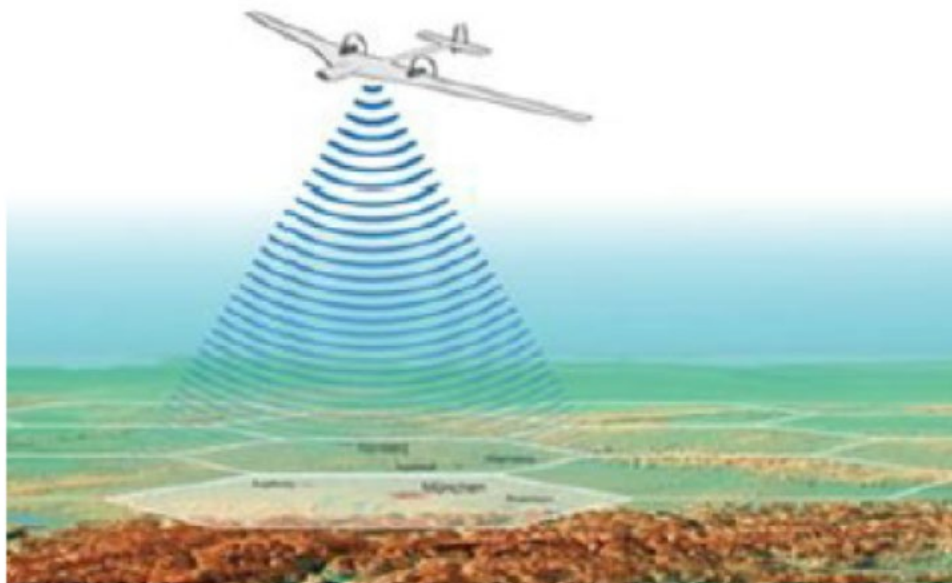
¹³⁹ Plückebaum, T. (2023).

¹⁴⁰ Plückebaum, T. & Wernick, C. (2021).

Flugdauer von etwa einer Woche ausgeschöpft, so kehren die Fluggeräte zum Nachtanken und für eventuelle Wartungsarbeiten, Updates oder Upgrades zurück zum Boden. Gleichzeitig werden sie durch jeweils ein anderes Fluggerät an gleicher Position ersetzt, wodurch ein unterbrechungsfreier Betrieb aus Nutzersicht gewährleistet wird. Ausgerüstet werden die HAPS mit üblicher Mobilfunktechnik, welche auf lizenzierten Frequenzen arbeiten sollen. Damit sind HAPS für eine Flächenversorgung mit Mobilfunk, zur Versorgung von Haushalten als FWA-Lösung oder auch zur Mobilfunkversorgung in Notlagen (Naturkatastrophen) geeignet. Ein besonderer Vorteil von HAPS ist die problemlose Ausleuchtung auch von topologisch schwierigen Gebieten, z. B. Hochgebirgsregionen oder größeren Seen, da die Funkversorgung von oben erfolgt.

Der Footprint eines HAPS hat einen Radius von etwa 100 km am Boden, dies ist allerdings abhängig von der genutzten Mobilfunktechnik, den verwendeten Antennen und den genutzten Frequenzen.

Abbildung 4-13: HAPS und sein Footprint



Quelle: Leichtwerk AG 2020

HAPS sind aktuell noch in der Erprobung und stellen in Deutschland kein marktreifes System dar.

4.9.2 HAPS – Konkrete Ausprägungen der Qualitätsparameter

Die Datenübertragungsraten und die Latenz wären grundsätzlich für eine Mindestversorgung nach TKMV geeignet, da es sich grundsätzlich um Mobilfunktechnik der 4. oder 5. Generation handelt. Jedoch gibt es in Deutschland noch keine konkreten Angebote, daher spielen HAPS für die Mindestversorgung nach TKMV keine Rolle.

Tabelle 4-9: Qualitätsparameter HAPS

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
HAPS	>50	>25	100.000	<10	derzeit noch keine Relevanz in Deutschland, technische Leistungsfähigkeit ist gegeben

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Plückebaum, T. (2023): Plückebaum, T. & Wernick, C. (2021)

HAPS könnten zukünftig für eine Mindestversorgung zur Option werden, aktuell ist aber noch kein nutzbarer Dienst in Deutschland verfügbar.

5 Analyse der technischen Rahmenbedingungen (AP4)

Ziel des Gutachtens ist es, für die als geeignet identifizierten Technologien abzuleiten, welche (ggf.) nur eingeschränkt die Anforderungen, Dienste „stets“ technisch zu ermöglichen, erfüllen können, welche Faktoren die „regelmäßige“ Verfügbarkeit bestimmen, und ob und wenn ja, in welchen Fällen, die „regelmäßige“ Verfügbarkeit in ihrem Niveau skalierbar ist und mit Hilfe welcher technologiebezogenen Maßnahmen Rahmenbedingungen geschaffen werden können, um die Mindestanforderungen zu erfüllen.

5.1 Leistungsfähigkeit der Technologien im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen

Die Ausführungen zu den Arbeitspaketen 1 - 3 haben für die sehr unterschiedlichen Anschlussnetztechnologien gezeigt, dass manche gar nicht in der Lage sind, die Mindestanforderungen der Grundversorgung zu erfüllen, manche nur unter bestimmten Umständen und manche in jedem Fall. Diese Eignung der Technologien würde sich verändern, wenn sich die Anforderungen an die Mindestanforderungen erhöhen würden. Pauschale Aussagen für diesen Zusammenhang lassen sich jedoch nicht ableiten.¹⁴¹

Es lassen sich zwei Kategorien von Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit von Anslusstechnologien unterscheiden: Dies sind zunächst einzelfallbezogene Störgrößen der Übertragungsqualität mancher Technologien. Dieser Kategorie sind z. B. Fehler in Splices bei Glasfaserkabeln oder Feuchtigkeitseinbrüche in den Kupferdoppeladern, Mantelschäden an den Koaxialkabeln oder ins Netz rückwirkende Störungen der Kabelmodems oder ONU zuzurechnen. Diese Kategorie wird durch die Netzbetreiber im Rahmen des Netzbetriebs im Kontext von Störungen der Anschlussleitung betrachtet und benötigt in diesem Kontext keine tiefergehende Berücksichtigung. Davon abzugrenzen sind die strukturellen, entfernungsabhängigen, beschaltungsabhängigen und durch Nutzerverhalten im Sharing beeinflussten Qualitätsauswirkungen, die von den örtlichen Gegebenheiten in der Nutzung der Anschlussinfrastrukturen bestimmt werden.

Ob oder in welchem Umfang die genannten Bestimmungsfaktoren zum Tragen kommen, ist von den jeweiligen individuellen Rahmenbedingungen abhängig, die sich im Netz standortabhängig deutlich voneinander unterscheiden können. Wir können daher in diesem Gutachten nur globale Aussagen zu der Eignung der Übertragungstechnologien zur Erfüllung der Mindestanforderungen der Grundversorgung in Abhängigkeit der Bestimmungsfaktoren machen.

Die Eignung von Übertragungstechnologien zur Erfüllung der durch die TKMV festgelegten Mindestanforderungen an den Universaldienst ist daher zunächst durch die unter optimalen Bedingungen technisch maximale Leistungsfähigkeit einer Technologie beschränkt. Ist eine Technologie technisch grundsätzlich imstande, die Anforderungen zu

¹⁴¹ Dies wäre z. B. bei VDSL2+-Vectoring der Fall, wenn die Mindestbandbreite auf 100 Mbps downstream und 50 Mp/s upstream angehoben würde. Damit wäre ein großer Teil der heute bestehenden (NGA) Breitbandinfrastrukturen ungeeignet.

erfüllen, haben im konkreten Einzelfall zusätzlich individuelle technische Bestimmungsfaktoren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Technologie am jeweiligen Endkundenanschluss. Die Bestimmungsfaktoren lassen sich dabei teilweise durch geeignete Maßnahmen beeinflussen, sodass eine Leistungssteigerung hinsichtlich der stets technisch verfügbaren Datenübertragungsrate und der regelmäßig zur Verfügung stehenden Datenübertragungsrate erwirkt werden kann.

Vielen Übertragungstechniken gemeinsam ist die Nutzung eines gemeinsam genutzten Übertragungsmediums bzw. -kanals für eine Gruppe daran „angeschalteter“ bzw. dieses nutzende Endkunden, Sharing genannt. Bei den leitungsgebundenen Technologien sind davon betroffen die koaxialkabelbasierten Anschlüsse und Anschlüsse der xPON-Architekturen. Maßgeblich sind immer die am Fiber Node oder an einer Splitterkaskade angeschlossenen Kunden. Relevant ist die Zahl der zur Hauptverkehrszeit (Busy Hour, BH) gleichzeitig nutzenden Kunden. Natürlich spielt auch die Art der Nutzung eine Rolle. Streams für Konferenzen und individuell angeschauter Videos, ggf. auch verbunden mit Gaming und/oder Musik sowie die Nutzung der Mediatheken der Medienanstalten spielen durch ihre kontinuierlichen Datenströme eine besondere Rolle. Wesentlich ist auch die Qualität der übertragenen Bilder, die die Datenübertragungsraten der einzelnen Streams bestimmt. In der Privatkundenwelt beginnt die Hauptverkehrszeit in Deutschland typischerweise um 20 Uhr. In der Regel wird die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Nutzung für diese Zeit mit 10 - 20% der angeschlossenen Kunden kalkuliert.¹⁴² Man kann auf diesen für die Datenübertragungsrate relevanten Effekt dadurch Einfluss nehmen, dass man die Zahl der an das Übertragungsmedium angeschalteten Kunden begrenzt. (z. B. Verkleinerung der Fiber Nodes in der DOCSIS Koax-Welt, Verkleinerung des xPON Splitting-Faktors, Verdichtung (Vergrößerung der Zahl) der Funkzellen bzw. stärkere Sektorsierung). Auch könnte man (theoretisch) auf eine ausgewogene Mischung der Nutzer nach deren Nutzungsverhaltensmuster achten, um eine Agglomeration von Heavy Users zu vermeiden.¹⁴³

Die Verfügbarkeit einer Technologie zur Erbringung des Universaldienstes nach TKMV ergibt sich damit maßgeblich durch die generelle Leistungsfähigkeit der Technologie, die am Endkundenanschluss gegebenen technischen Bestimmungsfaktoren, das Nutzungs-

¹⁴² Vgl. Dimensionierungsregel der EU für geförderten Netzausbau: EU Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen (2023), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2023/C 36/01), Anhang I
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131(01)).

¹⁴³ Ein Zahlenbeispiel: Wenn an einem Fiber Node 100 Kunden angeschlossen sind, könnten im ungünstigsten Fall 20%, d. h. 20 gleichzeitig zugreifen. Bei 1 Gbps downstream verbleiben je Kunde $1000/20 = 50$ Mbps. Das reicht für die Mindestversorgung. Sind jedoch 2000 Kunden an einem Fiber Node, reicht das nicht ($1000/400 = 2,5$ Mbps). Wird nur eine Gleichzeitigkeit von 10% angenommen, wird die Situation prinzipiell besser, aber bei 2.000 Kunden bleiben nur 5 Mbps je Kunde. Um die Mindestversorgung sicherzustellen, müsste der Fiber Node verkleinert werden (Node-Splitting): $1000/10 = 100$ gleichzeitige Kunden. Bei 20% Gleichzeitigkeit ergibt das eine Fiber Node-Größe von maximal 500 angeschalteten Kunden, bei 10% Gleichzeitigkeit wären es 1000 angeschaltete Kunden. Der Fiber Node müsste also verkleinert werden, oder die Bandbreite des Kanals wird vergrößert (z. B. Releasewechsel von DOCSIS 3.0 auf 3.1). Relevant ist nicht nur die Untersuchung des Downstreams, sondern auch die des Upstreams.

verhalten der Teilnehmer und die vor Ort möglichen Maßnahmen, die Rahmenbedingungen zu beeinflussen, beispielsweise durch eine Verringerung der Entfernung zwischen aktiven Netzelementen und den Endkunden.

Diese Zusammenhänge beschreiben wir in den nachfolgenden Abschnitten für die drei Gruppen von untersuchten Übertragungstechnologien, leitungsgebunden, satellitengestützt und mobilfunkgestützt.

5.2 Verfügbarkeit und Maßnahmen zur Erfüllung der Mindestanforderungen

5.2.1 Leitungsgebundene Technologien

5.2.1.1 Kupferdoppelader

Die Übertragungstechniken ADSL und ADSL2 stehen aufgrund ihrer technischen maximalen Leistungsfähigkeit grundsätzlich nicht zur Verfügung. Eine Ermöglichung des Universaldienstes ist mit ihnen technisch nicht gegeben.

Die Techniken G.fast (106/212) und XG.fast überschreiten die Mindestanforderungen an den Universaldienst im Rahmen ihrer technischen Spezifikation hinsichtlich der Güte der Kupferdoppelader (siehe Längenbeschränkung, Tabelle 2-3 und Tabelle 5-1) deutlich. Es kann daher in der Praxis davon ausgegangen werden, dass sie auf den Anschlusslinien – auf denen sie technisch sinnvoll einsetzbar sind – stets zur Erbringung des Universaldienstes geeignet sind.

Die Übertragungstechniken ADSL2+ und VDSL2 (8b/17a/30a/35b) sind aufgrund ihrer Spezifikation technisch imstande, die aktuell definierten Mindestanforderungen an den Universaldienst zu erbringen. Ihre Verfügbarkeit für die Erbringung des Universaldienstes hängt dabei im konkreten Einzelfall von den vor Ort gegebenen technischen Bestimmungsfaktoren ab, deren individuelle Kombination die Leistungsfähigkeit der Technik auf der Anschlusslinie bestimmt. Maßgeblich sind dabei die Dämpfung und die Störung, die das Signal bei der Übertragung auf der Kupferdoppelader erfährt (vgl. Abschnitt 2.1.1, abhängig von der Entfernung zwischen dem Infrastrukturknoten und dem Endnutzerstandort).

Die Auswirkung von Einflussfaktoren auf die Signalqualität ist dabei mannigfaltig und aufgrund ihrer Komplexität für xDSL-basierte Übertragungstechniken in ihrer Größe nicht allgemeingültig zu beziffern. Untersuchungen von Einflussfaktoren auf die unter realen Bedingungen erwartbaren Datenübertragungsraten sind daher als Stichproben unter optimalen und ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen anzusehen (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Sie erlauben damit lediglich eine Abschätzung der Größenordnung des Einflusses auf die zu erreichenden Datenübertragungsraten.

Tabelle 5-1: Vergleich aller kupferbasierten breitbandigen Übertragungstechniken des Anschlussnetzes

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Kupfer Doppelader		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
ADSL	FTTN/FTTEx	10	1	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2	FTTN/FTTEx	12	1,5	0	5.000	< 10	nein, Bb zu gering
ADSL2+	FTTEx/FTTC	16	2,4	400	2.600	< 7	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 (8b)	FTTC	50	15	2.200	4.000	< 5	ja, längen- und beschaltungsabhängig
VDSL2 Vectoring (17a)	FTTC	90	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Vectoring (30a)	FTTB	200	40	2.200	4.000	< 5	ja, längenabhängig
VDSL2 Supervect. (35b)	FTTC	300	40	2.200	300	< 5	ja, längenabhängig
Bonding	FTTN - FTTC	nb * BW(DA)	nb * BW(DA)		s.o.	< 7	nein, nicht verfügbar
Phantoming	FTTN - FTTC	(nb + np) * BW	(nb + np) * BW		s.o.	< 9	nein, nicht verfügbar
G.fast (106)	FTTS/dp	350	350	400	250	< 5	ja
G.fast (212)	FTTS/dp	600	600	400	250	< 5	ja
XG.fast	FTTB	5.000	5.000	400	50	< 5	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Legende: nb: Anzahl der im Bonding betriebenen parallelen DA,
 np: Anzahl der davon zusätzlich im Phantoming betriebenen Kanäle
 BW: Bandwidth (Bandbreite)
 DA: Doppelader

Quelle: wik, identisch mit Tabelle 2-3

Im Fall von auf ADSL basierender Übertragungstechnik hat die Leitungslänge den vermeintlich größten und in der Praxis am vergleichsweise einfachsten zu steuernden Einfluss auf die Güte der Leitung und damit auf die auf ihr erreichbaren Datenübertragungsraten. In Abhängigkeit zur Leitungslänge ergibt sich eine näherungsweise zu bestimmende Eignung für die Erbringung des Universaldienstes. Die in Tabelle 5-1 dargestellten maximalen Längen zur Erfüllung der Mindestanforderungen nach TKMV sind jedoch aufgrund der sonstigen Einflussfaktoren als Richtwerte unter optimalen Bedingungen zu betrachten, die in der Praxis einer nicht zu vernachlässigen Abweichung unterliegen.

Verfügbarkeit zur Erbringung des Universaldienstes

Unserer Kenntnis nach existiert für die Bundesrepublik keine aktuelle öffentliche Datenquelle, aus der eine hinreichend granulare Verteilung von Teilnehmeranschlussleitungslängen hervorgeht.¹⁴⁴ Es ist daher nicht möglich, eine Verfügbarkeit, unter Betrachtung der in Tabelle 5-1 aufgeführten maximal möglichen Leitungslängen, für einzelne xDSL-Übertragungstechniken zu beziffern. Selbst wenn eine solche Datenbasis verfügbar wäre, würden realistische Verfügbarkeitswerte in Bezug auf eine Übertragungstechnik aufgrund der zuvor erwähnten zusätzlichen Einflussfaktoren (Beschaltungsgrad, Leitungsquerschnitte, Störquellen, etc.) und deren in der Fläche unbekannter Größenordnung kaum sinnvoll zu bestimmen sein. Es ist zudem davon auszugehen, dass Einflussfaktoren in ihrer Ausprägung aufgrund des Leitungsalters und lokal unterschiedlich ausfallender Netzstrukturen sich in der Realität regional unterschiedlich darstellen. Von einer prozentualen Verfügbarkeitsangabe einer Übertragungstechnik zur Ermöglichung des Universaldienstes nach TKMV muss daher Abstand genommen werden.

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen

Die technisch stetige und die regelmäßige Verfügbarkeit der durch die TKMV geforderten Datenübertragungsraten kann für die jeweiligen Übertragungstechniken durch die Ergreifung von Maßnahmen beeinflusst werden. Diese sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

¹⁴⁴ Die in Abschnitt 2.1.1 in Abbildung 2-5 aufgeführten Daten geben nur einen summarischen Blick auf Westdeutschland in den 1990er Jahren.

Tabelle 5-2: Übersicht möglicher Maßnahmen zur Beeinflussung der Verfügbarkeit ADSL-basierender Technologien zur Erbringung des Universaldienstes

Übertragungs- Technik (FTTx)	Gründe für Abweichung in der techn. stetigen Ermöglichung	Gründe für Abweichung in der regelmäßigen Verfügbarkeit
	mögliche Maßnahmen für eine Verbesserung der techn. möglichen Bandbreite	mögliche Maßnahmen für eine Verbesserung der regelmäßigen Verfügbarkeit
ADSL2+ (FTTC)	Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte beeinflussen diese negativ.	Zahl der Kunden auf dem gleichen Anschlusskabel bestimmt Nebensprechen
	- Reduktion der TAL Länge, FTTC, Schaltverteiler errichten - Vectoring / Nutzung einer VDSL-Technologie mit Vectoring - Reduktion des Beschaltungsgrads (Nebensprechen unter Kupferdoppeladern)	Beschaltungsgrad des Kabels reduzieren, Kunden auf neue Technologien migrieren, die den ADSL Frequenzbereich nicht nutzen (z.B.) VDSL
VDSL2 (8b) (FTTC)	Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte beeinflussen diese negativ.	Zahl der Kunden auf dem gleichen Anschlusskabel bestimmt Nebensprechen
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Beschaltungsgrad des Kabels reduzieren, Kunden auf Technologien migrieren, die Nebensprechen eliminieren (Vectoring)
VDSL2 Vectoring (17a) (FTTC)	Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL bzw. KVz-TAL). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte beeinflussen diese negativ.	Allens/ G-Vector inkompatible Anschlüsse können Vectoring Ergebnisse beeinträchtigen
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren
VDSL2 Vectoring (30a) (FTTB)	Inhaus-Technologie (FTTB), Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader ("TAL"). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte beeinflussen diese negativ.	Allens/ G-Vector inkompatible Anschlüsse können Vectoring Ergebnisse beeinträchtigen
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren
VDSL2 Supervect. (35b) (FTTC)	Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte beeinflussen diese negativ.	Allens/ G-Vector inkompatible Anschlüsse können Vectoring Ergebnisse beeinträchtigen
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren
G.fast (106) (FTTS/dp)	FTTS/FTTB Technologie: Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL/ Inhausleitung). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte (Schirmung, Parallelität der DA) beeinflussen diese negativ.	Störungen durch Frequenzüberlappung mit anderen Technologien
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren, überlappende Frequenzen aussparen, Inhaus-Verkabelung ändern
G.fast (212) (FTTS/dp)	FTTS/FTTB Technologie: Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL/ Inhausleitung). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte (Schirmung, Parallelität der DA) beeinflussen diese negativ.	Störungen durch Frequenzüberlappung mit anderen Technologien
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren, überlappende Frequenzen aussparen, Inhaus-Verkabelung ändern
XG.fast (FTTB)	FTTS/FTTB Technologie: Die im Einzelfall techn. mögliche Bandbreite ist abhängig von der Leitungscharakteristik der Kupferdoppelader (TAL/ Inhausleitung). Insbesondere Leitungslänge und Leitungsgüte (Schirmung, Parallelität der DA) beeinflussen diese negativ.	Störungen durch Frequenzüberlappung mit anderen Technologien
	- Reduktion der TAL Länge (siehe Tabelle Kupfertechnologien)	Störende Anschlüsse migrieren, überlappende Frequenzen aussparen, Inhaus-Verkabelung ändern

Für Übertragungstechniken basierend auf Kupferdoppeladern ist für die Praxis anzunehmen, dass hauptsächlich die technischen Bestimmungsfaktoren über die Eignung zur Erbringung des Universaldienstes bestimmen. Einschränkungen der Verfügbarkeit treten in Bezug auf die Anschlusslinie dabei nachrangig auf.

Insbesondere für ADSL2+ ist anzumerken, dass bereits mit der derzeitigen Setzung der Mindestanforderungen nach TKMV 2022 eine Eignung nur für vergleichsweise geringe Leitungslängen gegeben ist. Eine zukünftige Anhebung der mindestens bereitzustellenden Datenübertragungsraten, vornehmlich im Upload, würde daher die kupferbasierten Leitungslängen noch stärker begrenzen und somit in vielen Fällen zum Ausschluss der Übertragungstechnik führen oder vor Ort die Ergreifung der aufgeführten Maßnahmen erforderlich machen.

5.2.1.2 Glasfaser

Die im Markt verfügbaren Glasfaser-Übertragungstechniken übererfüllen die Mindestanforderungen nach TKMV deutlich. Eine Beschränkung aufgrund der Leitungslänge ergibt sich in der Praxis nicht.

Tabelle 5-3: Übersicht der glasfaserbasierten Anschlussnetztechniken

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Glasfaser		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
GPON (PtMP)	FTTH	2.500	1.250		20.000	< 2	ja
XG.PON	FTTH	10.000	2.500		40.000	< 2	ja
XGS.PON	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
TWDM GPON/ NG-PON2	FTTH	10.000	10.000		40.000	< 2	ja
DWDM GPON	FTTH	1.000	1.000		100.000	< 2	ja
Ethernet PtP	FTTH	10.000	10.000		80.000	< 2	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik (identisch mit Tabelle 2-7)

Verfügbarkeit zur Erbringung des Universaldienstes

Selbst bei vollständiger Ausschöpfung des technisch möglichen Teilungsfaktors, der leistungsschwächsten aufgeführten Glasfasertechnologie, x.GPON-Technologien (1:64), ist eine regelmäßige Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten (2.500 Mbps/64 = 39 Mbps) gegeben. Glasfaserbasierende Lösungen stehen damit – wenn verfügbar – immer zur Erbringung des Universaldienstes zur Verfügung.

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen sind im Kontext der hier aufgeführten Glasfasernetze in der Praxis im Rahmen der TKMV nicht relevant.

5.2.1.3 Koaxialkabel

Die DOCSIS-basierenden Übertragungstechniken der Generationen 2.0 bis 4.0 sind technisch imstande, die Leistungsanforderungen nach TKMV zu erbringen. Durch den flexiblen Einsatz von Signalverstärkern, die der Leitungsdämpfung entgegenwirken, in wenigen 100 m Abstand, ergeben sich faktisch keine technischen Bestimmungsfaktoren, die die realisierbaren Datenübertragungsraten in Bezug auf die Leitungslänge beschränken. Zudem sind die genutzten HFC-Netze bereits technisch für eine Übertragung von Hochfrequenzsignalen ausgelegt, sodass andere störende Einflussfaktoren dank hinreichender Abschirmung des Kabels zu vernachlässigen sind. DOCSIS kann daher die geforderten Datenübertragungsraten des Universaldienstes erfüllen. Je höher dabei die Technikgeneration, desto höher auch die Datenübertragungsrate des Koaxialkabels.

Dem gegenüber steht bei DOCSIS-basierenden Netzen die Shared Medium-Charakteristik des genutzten HFC-Netzes (vgl. auch Abschnitt 2.2). Die an einem CMTS/Fibre Node angeschlossenen Endkunden teilen sich dabei die insgesamt verfügbare Datenübertragungsrate des Segments. Die Anzahl der Teilnehmer und ihr Nutzungsverhalten ergibt dabei den Teilungsfaktor und bestimmt maßgeblich die regelmäßig verfügbare Datenübertragungsrate am jeweiligen Anschluss. In der Praxis ist die punktuell verfügbare Datenübertragungsrate von der gleichzeitigen Auslastung der in einem Segment realisierten Anschlüsse in Kombination mit dem genutzten DOCSIS-Standard abhängig.

Tabelle 5-4: Übersicht der koaxialkabel-basierten Anschlussnetztechniken (DOCSIS)

Übertragungs-Technik	FTTx	Bandbreite down	Bandbreite up	Max. Länge für Mindestversorgung	Längen-Beschränkg	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Koaxialkabel		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
Docsis 2.0	CMTS	40	30		160.000	< 5	nein, nicht wirtschaftlich
Docsis 3.0	fibre node	1.200	200		160.000	< 5	ja
Docsis 3.1	fibre node	10.000	1.000		160.000	< 5	ja
Docsis 4.0 (FD)	deep fibre	10.000	10.000		160.000	< 5	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik (identisch mit Tabelle 2-5)

Verfügbarkeit zur Erbringung des Universaldienstes

Die Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten hängt bei DOCSIS-Übertragungstechniken relevant von der Anzahl gleichzeitig nutzender Endkunden ab. Um Verfügbarkeit quantifizieren zu können, müssen die Anzahl der Teilnehmer im Segment (Teilungsfaktor) und Informationen über die gleichzeitige Nutzung (Gleichzeitigkeitsfaktor) bekannt sein. Während der Teilungsfaktor eine vergleichsweise stabile Größe darstellt, unterliegt der Gleichzeitigkeitsfaktor einer stetigen Veränderung im Tagesverlauf und wird durch das individuelle Nutzungsverhalten der Endkunden bestimmt. Entsprechend kann sich die Verfügbarkeit von Segment zu Segment stark voneinander unterscheiden. Es lassen sich daher keine generellen Aussagen zur Verfügbarkeit machen.

Netzbetreiber treffen bei der Auslegung ihrer Anschlussnetze entsprechende Annahmen. Der Teilungsfaktor wird dabei durch den Anbieter in der Regel auf Basis von Erfahrungswerten und eigenen individuellen betriebswirtschaftlichen Risikomanagements in Bezug auf Überbuchung von Segmenten festgelegt. Angaben zu in Deutschland gängigen Teilungsfaktoren in DOCSIS-Netzen sind daher, aufgrund ihres Charakters als Geschäftsgeheimnis, nicht öffentlich zugänglich. Für den Gleichzeitigkeitsfaktor können statistische Annahmen getroffen werden, die auf Erfahrungswerten beruhen. In der Praxis variiert die regionale Gleichzeitigkeit dabei allerdings stark und ist von verschiedenen lokalen Einflussfaktoren abhängig. Nicht zuletzt die Homogenität der Bevölkerungsstruktur des betrachteten DOCSIS-Anschlusssegments ist dabei ursächlich für die Größenordnung des Gleichzeitigkeitsfaktors (s. auch Abschnitt 5.1).

Bei Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Aspekte ist für DOCSIS 2.0 davon auszugehen, dass sich mit dieser Technologie die Erbringung des Universaldienstes für Anbieter nicht sinnvoll umsetzen lässt und DOCSIS 2.0 damit in der Realität für die Erbringung des Universaldienstes nicht zur Verfügung steht. Aufgrund des vergleichsweise geringen Datenübertragungsratenbudgets innerhalb des Segments kann in der Praxis nur mit sehr geringen Teilungsfaktoren bzw. hohen Einbußen bei der regelmäßigen Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten gearbeitet werden. Die Ertüchtigung des Netzes zu neueren DOCSIS-Generationen dürfte dabei für den Anbieter stets kosteneffizienter sein (vgl. Kapitel 2.2.5).

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen

Die in Tabelle 5-5 aufgeführten Maßnahmen zielen auf die Beeinflussung der technisch verfügbaren Datenübertragungsraten nach TKMV ab.

Tabelle 5-5: Übersicht möglicher Maßnahmen zur Beeinflussung der Verfügbarkeit DOCSIS-basierender Technologien zur Erbringung des Universaldienstes

Übertragungstechnik (FTTX)	Gründe für Abweichung in der techn. stetigen Ermöglichung	Gründe für Abweichung in der regelmäßigen Verfügbarkeit
	mögliche Maßnahmen für eine Verbesserung der techn. möglichen Bandbreite	mögliche Maßnahmen für eine Verbesserung der regelmäßigen Verfügbarkeit
DOCSIS 2.0 (FTTC)	keine	Zahl der Kunden am Fibre Node/ Koaxialsegment bestimmt Teilungsfaktor, gleichzeitig aktive Kunden und deren Nutzungsverhalten bestimmen Bandbreite, bei einer simultanen Nutzung von mindestens 4 Anschlüssen ist davon auszugehen, dass die Vorgaben der TKMV nicht mehr erfüllt werden können.
		Reduktion der Anzahl der Teilnehmer pro CMTS/ Fibre Node/ Koaxialkabelsegment
DOCSIS 3.0 (FTTS/dp)	keine	Zahl der Kunden am Fibre Node/ Koaxialsegment bestimmt Teilungsfaktor, gleichzeitig aktive Kunden und deren Nutzungsverhalten bestimmen Bandbreite, bei einer simultanen Nutzung von mindestens 600 Anschlüssen ist davon auszugehen, dass die Vorgaben der TKMVUpstream nicht mehr erfüllt werden können.
		Reduktion der Anzahl der Teilnehmer pro CMTS/ Fibre Node/ Koaxialkabelsegment Situation eher theoretisch
DOCSIS 3.1 (FTTS/dp)	keine	Zahl der Kunden am Fibre Node/ Koaxialsegment bestimmt Teilungsfaktor, gleichzeitig aktive Kunden und deren Nutzungsverhalten bestimmen Bandbreite, bei einer simultanen Nutzung von mindestens 600 Anschlüssen ist davon auszugehen, dass die Vorgaben der TKMVUpstream nicht mehr erfüllt werden können.
		Reduktion der Anzahl der Teilnehmer pro CMTS/ Fibre Node/ Koaxialkabelsegment Situation eher theoretisch
DOCSIS 4.0 (FD) (FTTB)	keine	
		Marktverfügbarkeit und Einsatzbereitschaft der Betreiber prüfen

Quelle: wik

5.2.2 Satellitengestützte Technologien

Von den in Abschnitt 3 beschriebenen drei Satellitentechnologien – LEO, MEO und GEO – eignen sich geostationäre Satelliten (GEO) aufgrund ihrer hohen Latenz von mindestens 250 ms nicht für den Universaldienst und sind daher auszuschließen. MEO-Satelliten könnten je nach Flughöhe und davon implizierter Latenz prinzipiell für den Universaldienst in Frage kommen. LEO-Satelliten sind aufgrund ihrer niedrigen Flughöhe und den damit erzielbaren geringen Latenzen ebenfalls für den Universaldienst geeignet.

Alle Satellitensysteme sind in der Lage, hohe Datenübertragungsraten sowohl im Downlink als auch im Uplink zu erzielen. Allerdings vergrößert sich die Ausleuchtungszone quadratisch mit steigender Flughöhe von rund 1.880 km Durchmesser für LEO-Satelliten in 550 km Flughöhe auf die Abdeckung eines ganzen Kontinents durch GEO-Satelliten. Mit der größeren Abdeckung einher geht, dass sich mehr potenzielle Nutzer innerhalb der Ausleuchtungszone befinden, die sich die verfügbare Satellitenkapazität teilen. Allen Satellitensystemen gemeinsam ist, dass sich die Qualität der Übertragung im Hinblick auf

Datenübertragungsrate und Latenz nur ungenau angeben lässt und von der konkreten Situation vor Ort (Sharing, Art und Gleichzeitigkeit der Kommunikationswünsche, sich zeitlich und in der Qualität ständig ändernde Übertragungswege (insbesondere bei LEO)) abhängig ist. Verfügbarkeitsstufen lassen sich daher bei LEO-Satelliten nicht angeben, bei den anderen Satellitenarten disqualifiziert bereits die Latenz weitestgehend in die Kategorie „ungeeignet“. Tabelle 5-6 fasst die Leistungsmerkmale geplanter und verfügbarer MEO- und GEO-Satellitensysteme zusammen, soweit Kenntnisse vorliegen.

Tabelle 5-6: Übersicht über LEO- und MEO-Satellitensysteme

Übertragungs-Technik	Footprint	Bandbreite down	Bandbreite up	Bandbreite, relevant down	Bandbreite relevant up	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
LEO							
Starlink (2024)	Deutschland***	43	11,3	100 Mbps	10–50 Mbps*	20–80ms	x
OneWeb (2024)	Deutschland***	5,9	1,2	?	?	> 70ms	(x)
Amazon Kuiper (2024)	Deutschland***	6,9	2,1	?	?	ähnlich**	(x)
Telesat Lightspeed (2025)	Deutschland***	0,8	0,3	?	?	ähnlich**	(x)
	* Messungen	** Simulationen					
	*** Abdeckung eines höhenabhängigen Bereichs pro Satellit, aber ganz Deutschland durch alle Satelliten zusammen						
Übertragungs-Technik	Footprint	Bandbreite down	Bandbreite up	Bandbreite, relevant down	Bandbreite relevant up	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
MEO							
Astra O3b MEO (Power)	Teile Deutschlands	vage	vage	?	?	50-200ms*	
	* Messungen						

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quelle: wik

Verfügbarkeit zur Erbringung des Universaldienstes

Von den oben genannten LEO- und MEO-Satellitendiensten sind mindestens Starlink, OneWeb und Astra O3b kommerziell am Markt verfügbar, allerdings finden sich nur für Starlink öffentlich verfügbare Informationen, die auf eine Leistungserbringung im Sinne der Grundversorgung Rückschlüsse erlauben. Der Starlink-Dienst ist quasi im ganzen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verfügbar.¹⁴⁵ Im Dezember 2023 liegt die monatliche Gebühr für die Starlink-Nutzung bei 50 EUR, zuzüglich einmaliger Kosten für das Satellitenterminal von 300 EUR (und 23 EUR Versandt).¹⁴⁶

Wie oben bereits angemerkt, ist festzustellen, dass LEO-basierte Satellitenkonstellationen für den Universaldienst prinzipiell einsetzbar sind, sofern die Konfiguration der Konstellation eine vollständige und kontinuierliche Ausleuchtung des Gebiets der

¹⁴⁵ Starlink (o.J., b).

¹⁴⁶ Gemäß der Bestellseite auf <https://www.starlink.com/>.

Bundesrepublik gewährleistet. Je nach lokalen (geographischen) Gegebenheiten kann es aufgrund von Hindernissen sein, dass Nutzer den Dienst selbst innerhalb der Ausleuchtungszone nicht nutzen können. Darüber hinaus können Wetter und andere Umwelteinflüsse zu Schwankungen der Leistungsfähigkeit führen, auch kurzzeitige Dienstunterbrechungen wurden beobachtet. Die grundsätzlichen Leistungsmerkmale der angebotenen Internetzugangsdienste, insbesondere von Starlink, sind relativ zum Universaldienst jedoch großzügig dimensioniert, so dass auch kleinere Leistungseinbußen die Internetnutzung nicht wesentlich beeinträchtigen.

Hinsichtlich der Latenzanforderungen lässt sich ebenfalls festhalten, dass diese in den derzeit messbaren Konstellationen und gegenwärtigen Auslastungen tendenziell erfüllt werden können. Weltweit nutzen derzeit rund zwei Millionen Kunden Starlink (Stand: September 2023), die Qualitätsparameter des Dienstes wurden oben in Abschnitt 3.4 beschrieben. Anekdotischen Berichten zufolge¹⁴⁷ beobachten Nutzer mit steigenden Nutzerzahlen schlechtere Leistungsmerkmale, so dass heutige Messungen nur begrenzt für eine Projektion in die Zukunft taugen und wissenschaftliche Langzeitstudien zu den Leistungsmerkmalen noch ausstehen. Aufgrund der aktuellen Performanz relativ zu den Anforderungen des Universaldienstes ist jedoch davon auszugehen, dass dieser auch in naher Zukunft erbracht werden kann, natürlich in Abhängigkeit vom Anstieg der Nutzerzahlen: Wenn die Nachfrage (in einer Region) steigt, akzeptiert ein Anbieter ggf. keine neuen Nutzer mehr, um die Dienstqualität nicht zu gefährden. Dann scheidet der Dienst jedoch für den Universaldienst aus. Alternativ kann ein Anbieter mehr Nutzer zulassen, was dann jedoch zulasten der Dienstqualität geht, was wiederum problematisch für den Universaldienst werden kann. Wie bereits erwähnt, ist ein Satellitendienst systembedingt eher als Ergänzung in Nischen geeignet.

Weder Starlink noch die anderen am Markt verfügbaren LEO- und MEO-Satellitendienste haben ihren Ursprung in Deutschland. Inwieweit es durch gesetzliche oder regulatorische Vorgaben möglich ist, diese Unternehmen zur Erbringung eines Dienstes nach den Vorgaben des Rechts auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten im Sinne der TKMV zu verpflichten, ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen

Satellitendienste können potenziell eine Vielzahl von Nutzern versorgen, so dass die verfügbare Kapazität aufgeteilt werden muss: Dies betrifft die Aufteilung des verfügbaren elektromagnetischen Spektrums wie auch die Anzahl und Kapazitäten der Sende- (Downlink) und Empfangsantennen (Uplink) eines jeden Satelliten, der jeweils nur begrenzt viele Satellitenterminals gleichzeitig bedienen können.

¹⁴⁷ Etwa die Kommentare unter: https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/tkn3ue/foiks_who've_had_starlink_for_a_while_is_service/.

Die Kapazität lässt sich prinzipiell – aber nicht beliebig – durch zusätzliche Satelliten erhöhen, wobei damit auch eine entsprechende Anpassung der Netzinfrastruktur (Bodenstationen, POPs und deren Vernetzung) einher gehen muss. Hier wären dann potentiell weitere Schalen und Umlaufbahnen notwendig; ggf. muss auch die Abstimmung innerhalb einer Satellitenkonstellation angepasst werden. Mehr Satelliten können durch einen Anbieter innerhalb seiner Konstellation bereitgestellt werden oder durch weitere Anbieter am Markt. Verbesserte Übertragungstechniken können – ggf. im Zuge der regelmäßig erforderlichen Erneuerung des Satellitenbestands (innerhalb weniger Jahre) – routinemäßig zu erhöhten Kapazitäten beitragen.

Aufgrund der steigenden Kollisionsrisiken, die bereits jetzt autarke Steuerungen auf den Satelliten erfordern, und des erhöhten Risikos des Entstehens von Weltraumschrott – und nicht zuletzt der „Verschmutzung“ des Nachthimmels – werden Auf- und Ausbau von Megakonstellationen kritisch gesehen.

Die oben genannten Maßnahmen zur Verbesserung der Verfügbarkeit sind offensichtlich auf den Anbieter des Satellitendienstes beschränkt. Aufgrund der globalen Ausrichtung der GEO-Satellitendienste muss es für diesen vermutlich bei weltweiter Betrachtung ökonomische Anreize für einen Ausbau geben, so dass Belange einzelner Staaten eher von nachrangiger Bedeutung sein mögen.

5.2.3 Mobilfunkgestützte Technologien

Der Mobilfunkstandard 2G steht aufgrund seines geringen Datenübertragungsratenbudgets aus technischen Gründen nicht zur Erbringung des Universaldienstes zur Verfügung. Selbiges gilt für alle Ausprägungsformen des Mobilfunkstandards 3G, wobei dieser darüber hinaus in Deutschland generell keine Anwendung mehr findet.

Tabelle 5-7: Qualitätsparameter 2. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
MobilFunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
2G-GSM (CSD)	0,0144	0,0144	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
2G-HSCSD	0,0432	0,0288	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
2G-GPRS	0,0536	0,0268	35.000	>500	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend
2G-EDGE	0,2368	0,1184	35.000	>300	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Elektronik-Kompendium.de (o.J., c)

Quelle: wik, identisch mit Tabelle 4-1

Tabelle 5-8: Qualitätsparameter 3. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
3G-UMTS	0,384	0,128	20.000	>200	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
3G-HSPA	7,2	3,6	20.000	<200	nein, Datenrate u Latenz nicht hinreichend, Dienst wird in D nicht mehr angeboten
3G-HSPA+	42,2	11,5	20.000	<200	nein, Latenz zu hoch, Dienst wird in D nicht mehr angeboten

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Elektronik-Kompendium.de (o.J., c)

Quelle: wik, identisch mit Tabelle 4-2

Die für 4G und 5G genutzten Generationen (Releases) und Frequenzspektren sind technisch imstande, die derzeitigen Mindestanforderungen des Universaldienstes nach TKMV zu erbringen. Ihre Verfügbarkeit zur Erbringung hängt dabei im konkreten Einzelfall von den vor Ort gegebenen Bestimmungsfaktoren und deren Kombination ab, die eine technische Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten beeinflussen.

Tabelle 5-9: Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[ms]	
4G-LTE	300	75	10.000	50	ja
4G-LTE adv.	600	75	10.000	50	ja
4G-LTE adv. Pro	1000	500	10.000	50	ja

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: Elektronik-Kompendium.de (o.J., c)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., e)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., h)
 Elektronik-Kompendium.de (o.J., i)
 Plückebaum, T. (2023)
 umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022).

Quelle: wik, identisch mit Tabelle 4-3

Zunächst ist dies das verfügbare Budget an Übertragungskapazitäten innerhalb der Mobilfunkzelle. Dieses ergibt sich aus den dem Anbieter zur Verfügung stehenden Frequenzblöcken, deren möglichen Kombinationen über Trägerfrequenzen hinweg (Carrier Aggregation) und der zum Einsatz kommenden Mobilfunkgeneration bzw. deren Ausprägung.

Die Verfügbarkeit der bereitzustellenden Datenübertragungsraten für den einzelnen Teilnehmer hängt darüber hinaus von den Bestimmungsfaktoren Abstand (zwischen Sender und Empfänger), Topologie, Bebauung und Vegetation ab. Aus der Kombination dieser Faktoren ergibt sich die Signalqualität der Funkübertragung, welche die Größenordnung der nutzbaren spektralen Effizienz beeinflusst. Diese hat einen maßgeblichen Einfluss auf die am Teilnehmeranschluss erzielbare Datenübertragungsrate.

Die maximal für die Grundversorgung erzielbare Reichweite ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-10: Qualitätsparameter 4. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Max. Länge für Grundversorgung
MobilFunk	[m]	[m]
4G-0,7-0,8GHz	10.000	800
4G-0,9GHz	10.000	1.500
4G-1,8GHz	10.000	1.900
4G-2,1GHz	10.000	500
4G-2,6GHz	10.000	1.300

Quelle: wik

Die Qualitätsparameter Signalstärke (spektrale Dichte) und Signalstörung werden dabei dominierend durch den vor Ort gegebenen Abstand zum Sendemast und der damit einhergehenden Signaldämpfung definiert. Die Leistungsfähigkeit einer Mobilfunkverbindung nimmt daher generell mit steigender Distanz zum Standort des Mobilfunkmasts ab, wobei dieser Effekt aufgrund von Dämpfungseigenschaften mit steigender Trägerfrequenz zunimmt (vgl. Abschnitt 4.1.2 - Technologie, Frequenz und Erstreckung als Bestimmungsfaktoren der Leistungsfähigkeit von Mobilfunktechnologien). Hieraus ergibt sich auch, dass höhere Trägerfrequenzen ab einem bestimmten Abstand zum Funkmast (Reichweite der „Einbuchungsschwelle“) für eine Verbindung generell nicht mehr zur Verfügung stehen. Die externen Einflussfaktoren Topologie, Bebauung und Vegetation können die Signalqualität zusätzlich in unterschiedlicher Stärke beeinflussen.

In Tabelle 5-9 und Tabelle 5-11 sind die für die jeweilige Mobilfunkgeneration und Frequenzspektren unter ansonsten optimalen Einflussfaktoren zu erwartenden maximal möglichen Abstände zwischen Endgerät und Funkmast für eine technische Ermöglichung der Mindestanforderungen nach TKMV dargestellt. In der Praxis können die Grenzwerte

für die Distanzangaben aufgrund der zuvor genannten sonstigen Einflüsse dabei teils deutlich davon abweichen.

Tabelle 5-11: Qualitätsparameter 5. Mobilfunkgeneration

Übertragungs-Technik	Bandbreite down	Bandbreite up	Längen-Beschränkung (Reichweite)	Max. Länge für Grundversorgung	Latenz (Delay)	Eignung Grundversorgung?
Mobilfunk	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[m]	[m]	[ms]	
5G-0,7-1GHz	75	25	10.000	3.500	<10	ja
5G-1-2GHz	150	50	3.000	2.900	<10	ja
5G-2-5GHz	1000	200	1000-2500	2.000	<10	ja
5G-5-10GHz	>1000	>200	300-1000	1.100	<10	ja, aber in Deutschland noch nicht angeboten
5G-10-30GHz	>2000	>1000	<300	400	<10	ja, aber in Deutschland noch nicht angeboten

Anmerkung: Der Begriff „Bandbreite“ steht in der Tabelle für den im übrigen Gutachten verwendeten Begriff „Datenübertragungsrate“.

Quellen: ComputerWeekly.de: Leistungsdaten und Frequenzen von 5G und Wi-Fi-6: <https://www.computerweekly.com/de/feature/Leistungsdaten-und-Frequenzen-von-5G-und-Wi-Fi-6> (Stand 23.09.2023)

5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Geschwindigkeit: <https://www.5g-anbieter.info/speed/wie-schnell-ist-5g.html> (Stand 23.09.2023)

5G-Anbieter.info: Alles zum superschnellen LTE-Nachfolger, 5G Frequenzen: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html> (Stand 23.09.2023)

Elektronik-Kompendium.de (o.J., i)

Quelle: wik, identisch mit Tabelle 4-5

Die Signalqualität wird darüber hinaus von einer Vielzahl weiterer, zeitlich variabler Faktoren (Jahreszeit, Wetter, etc.) bestimmt.

Ferner hat das Nutzungsverhalten der Endkunden einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der für die Grundversorgung vorgesehenen Datenübertragungsraten. Innerhalb einer Mobilfunkzelle teilen sich die Netzteilnehmer die Kapazitäten des jeweiligen Funkspektrums, also den Übertragungskanal, untereinander auf. Es handelt sich daher um ein Shared Medium (Vgl. Abschnitt 5.1). Die am Endkundenanschluss regelmäßig verfügbare Datenübertragungsrate hängt damit zusätzlich vom Teilungsfaktor (Anzahl der Teilnehmer), dem Gleichzeitigkeitsfaktor (paralleler Zugriff aufs Netz) und dem Kapazitätsbedarf der einzelnen Verbindungen auf dem Übertragungskanal (spektrale Effizienz) ab. Anders als bei den leitungsgebundenen Technologien kann der Netzbetreiber den Teilungsfaktor aufgrund der Mobilität der Nutzer nicht steuern, sondern lediglich auf regionale Erfahrungswerte zurückgreifen.

Verfügbarkeit zur Erbringung des Universaldienstes

Die Verfügbarkeit von 4G und 5G zur Erbringung des Universaldienstes nach TKMV hängt sowohl von der in der Fläche zu erwartenden Abdeckung in hinreichend guter Signalqualität als auch von den zu erwartenden Auslastungen der Funkzellen ab. Zudem

beeinflussen sich die beiden Einflussfaktoren in Bezug auf die regelmäßig verfügbare Datenübertragungsrate gegenseitig (vgl. Abschnitt 4.1.5 - Sharing in Mobilfunknetzen).

Um Aussagen allein für die technisch bestimmte Verfügbarkeit der bereitzustellenden Datenübertragungsraten zu treffen, ist es letztlich erforderlich, die konkreten Ausprägungen der genannten Bestimmungsfaktoren zu quantifizieren. Hierzu wäre ein Modell mit Bezug auf die Distanz zwischen Endkundenanschluss und Mobilfunkmast denkbar. Eine derartige, stark Annahmen-behaftete Analyse, basierend auf Modellen der Funkwellenausbreitung, kann dabei sonstige Einflussfaktoren in ihrer Größe und Häufigkeit des Auftretens kaum realistisch berücksichtigen. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen keine Daten zu Abständen zwischen potenziellen Anschlussstandorten des Universaldienstes und Mobilfunkmasten und der dort zum Einsatz kommenden Mobilfunktechniken und Trägerfrequenzen vor. Nicht zuletzt deswegen ist die Bezifferung einer prozentualen Verfügbarkeit von Mobilfunktechniken zur Erbringung der Mindestanforderungen nach TKMV nicht möglich.

Für eine Erbringung der Grundversorgung im Nahbereich des Mobilfunkmastes (< 2 km) können neben den sub-1-GHz-Bändern auch zusätzliche Bandbreitenkapazitäten in höheren Spektren genutzt werden. Es kann daher in der Praxis davon ausgegangen werden, dass im Regelfall die geforderten Datenübertragungsraten mit LTE und 5G bei zusätzlicher Nutzung dieser Kapazitäten und der abstandsbedingten besseren Signalabdeckung technisch stets möglich sind.

Für die Verfügbarkeit einer Mobilfunktechnik zur Erbringung des Universaldienstes spielt die regelmäßige Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten eine Rolle. Diese wird bei Mobilfunkverbindungen maßgeblich durch die Auslastung der Funkzelle bestimmt. Der Teilungs- und Gleichzeitigkeitsfaktor ist im Vergleich zu leitungsgebundenen Technologien hochdynamisch (z. B. ICE-Strecke innerhalb der Zellabdeckung) und unterliegt einer ständigen Veränderung. Er kann tageszeitabhängig (z. B. Gewerbegebiet) oder saisonal abhängig sein (z. B. Tourismusregion). Anbieter von Mobilfunknetzen haben dabei keinen unmittelbaren Einfluss auf die Anzahl der Teilnehmer innerhalb einer Funkzelle, da die Teilnehmer mobil sind. In Bezug auf Ausprägung und Häufung der beschriebenen Effekte existieren keine Informationsquellen. Eine prozentuale Bestimmung in Bezug auf die Verfügbarkeit hinsichtlich der regelmäßig verfügbaren Datenübertragungsrate ist daher nicht möglich.

Ebenfalls über Mobilfunktechnik realisierte Fixed-Wireless-Access-Anschlüsse (FWA) unterliegen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit den gleichen Rahmenbedingungen wie die Mobilfunkanschlüsse. Durch ihre örtliche Unveränderbarkeit ergeben sich in der Praxis allerdings Lösungen, die die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren abmindern bzw. ausräumen können (vgl. Abschnitt 4.6.1). Auch ist davon auszugehen, dass mit der Verfügbarkeit von 5G Network Slicing die regelmäßige Verfügbarkeit von Datenübertragungsraten bei Nutzung von 5G-Übertragung deutlich zuverlässiger durch den Betreiber gesteuert werden kann.

In Einzelfällen könnte mit dem Fokus auf Geschäftskunden auch eine Grundversorgung mittels Richtfunk erreicht werden. Die Qualitätsparameter sind vom Grundsatz her dafür ausreichend (siehe Abschnitt 4.8 Richtfunk). Wesentlich ist die Sichtverbindung zwischen den Sende- und Empfangsantennen. Hierbei sind die Errichtungskosten zu beachten, insbesondere wenn die Richtfunkstrecke über mehrere Segmente errichtet werden soll. In jedem Fall handelt es sich um ein individuelles Projekt.

Verfügbarkeitsbeeinflussende Maßnahmen

In Tabelle 5-12 sind Maßnahmen beschrieben, die möglichen Beeinträchtigungen der technisch möglichen Datenübertragungsrate bzw. der regelmäßigen Verfügbarkeit der geforderten Datenübertragungsraten entgegenwirken können.

Tabelle 5-12: Übersicht möglicher Maßnahmen zur Beeinflussung der Verfügbarkeit Mobilfunk-basierender Technologien zur Erbringung des Universaldienstes

Verringerung des Abstands zum Funkmast
Nutzung einer Außen-/Dachantenne
Nutzung von Carrier Aggregation
Nutzung von MIMO / höherem MIMO-Faktor
Nutzung von Beamforming
Nutzung von Dual Connectivity (EN-DC)
Reduktion der Teilnehmer innerhalb der Funkzelle
Nutzung von Network Slicing (garantierte Bandbreite pro Slice / Skalierung der Anzahl der Anschlüsse

Quelle: wik

6 Fazit

Im Bereich der kupferdoppeladerbasierten Anschlüsse im Festnetz gibt es noch Übertragungstechniken, die eine Mindestversorgung nicht garantiert sicherstellen können. Dies hängt zum einen von der nutzbaren Datenübertragungsrate der Übertragungstechnik selbst ab, d. h. unter anderem, aus welcher Zeit diese stammt, zum anderen aber auch von dem Beschaltungsgrad der Telefonkabel mit Breitbandtechniken und der Frage, ob und inwieweit nebensprechenkompensierende Verfahren (Vectoring) zum Einsatz kommen können. Die Gegebenheiten vor Ort spielen daher eine wichtige Rolle.

Bei kupferdoppeladerbasierten Anschlusslinien spielt zudem deren Länge eine wesentliche Rolle, oder aus anderer Sicht betrachtet spielt es eine Rolle, wo die aggregierenden Übertragungssysteme ihren Standort haben.

Generell kann man erwarten, dass moderne NGA-orientiert ausgebaute Kupferdoppeladernetze die derzeit festgelegten Mindestversorgungsansprüche zumeist erfüllen können. Mindestversorgungsunterstützende Maßnahmen wären beispielsweise der Austausch der Anschluss technik durch höherwertige Systeme bzw. Schnittstellen. Auch die Verkürzung der Anschlussleitung durch Aufbau näher zum Kunden liegender Schaltverteiler kann Abhilfe schaffen.

Koaxialkabel-gestützte Festverbindungen bekommen u. U. Probleme mit der Erfüllung der Mindestversorgungsansprüche, wenn alte Release-Stände (DOCSIS 2.0) verbaut sind oder auch, wenn die Koaxialkabelinseln noch eine hohe Teilnehmerzahl aufweisen, sich also viele Teilnehmer ein Anschlusskabel teilen. Dies wird in der Praxis eher selten vorkommen. Abhilfe könnte ein Update der DOCSIS-Übertragung auf ein höheres, aktuelleres Release bringen.

Bei Glasfaseranschlussnetzen steht das Einhalten einer Mindestversorgung nach derzeitiger Festlegung nicht in Frage. Dies gilt für beide Glasfasertopologien, Punkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Multipunkt. Mit wachsenden Ansprüchen an die Mindestversorgung könnte es jedoch zukünftig beim Einsatz der älteren x.PON-Systeme (GPON) mit Punkt-zu-Punkt Topologie und hohem Splittingfaktor zu einer Unterversorgung kommen. Abhilfe böte hier ggf. ein Release-Update (z. B. auf XGS.PON) oder eine Verringerung des Beschaltungsgrades der Feeder-Faser durch Erweiterung der Faserzahl.

Mobilfunknetze älterer Generation sind für die Erfüllung der Ansprüche der Mindestversorgung im Allgemeinen und großflächig nicht geeignet, zumal Mobilfunknetze ein geteiltes Übertragungsmedium darstellen. Je höherwertiger (und moderner) die Übertragungstechnologie, je höher die verwendete Frequenz, je intelligenter die Antennentechnik und je kleiner die Funkzelle, desto besser können die Mindestversorgungsansprüche erfüllt werden. In Abhängigkeit der jeweiligen regionalen Konstellation ist es aber auch möglich, dass einzelne Haushalte auch durch ältere Übertragungstechnologien in einer Region

mit größeren Funkzellen versorgt werden können. Letztlich hängt auch hier die Beurteilung einer Mindestversorgung und der Abhilfemaßnahmen bei einer Unterversorgung von der konkreten Situation vor Ort ab. HAPS eignen sich im Prinzip gut für eine Mindestversorgung in sehr dünn besiedelten Gebieten, sind jedoch bisher nicht einsatzbereit.

Die Mindestversorgung über hoch fliegende Satelliten (GEO und MEO) scheitert an der hohen Latenz derartiger Verbindungen. Niedrig fliegende Satelliten (LEO) haben eine geringere, aber deutlich schwankende Latenz. Sie sind in Einzelfällen geeignet, eine Mindestversorgung sicherzustellen. Ob diese dann ökonomischer ist als eine andere Variante kommt auf die Umstände an.

In diesem Gutachten konnten die Bestimmungsfaktoren im Sinne von technischen Anforderungen benannt werden. Anhand der Eigenschaft des Shared Mediums konnte z. B. gezeigt werden, dass die Verfügbarkeit maßgeblich von dem Nutzungsverhalten der über einen gemeinsamen Knoten angeschlossenen Teilnehmer bestimmt ist (Gleichzeitigkeitsfaktor). Der Handlungsspielraum des Netzbetreibers ist bei leitungsgebundenen Technologien auf die Begrenzung der Teilnehmerzahl beschränkt (Teilungsfaktor); auch enge ökonomische Zusammenhänge schränken die Spielräume ein. Betreiber von mobilfunk- und auch satellitengestützten Technologien sind hinsichtlich der Verfügbarkeit aufgrund der Mobilität der Teilnehmer und des Nutzungsverhaltens der Kunden im Vergleich zu den leitungsgebundenen Technologien einer größeren Unsicherheit ausgesetzt. Auf Basis dieser technischen Gegebenheiten ist eine Ableitung einer stets oder regelmäßig herzustellenden Mindestversorgung nicht möglich. Ein Monitoring der lokalen Netzauslastung und eine standortbezogene Dimensionierung von Kapazitäten erlauben es den Netzbetreibern innerhalb technischer und ökonomischer Grenzen, eine Verfügbarkeit statisch zu gewährleisten.

Literatur

- BNetzA (o.J., b): 5. Mobilfunkgeneration (5G) – DSS [Blog], https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/A_Z_Glossar/G/5G%20DDS.html#:~:text=DSS%20steht%20f%C3%BCr%20Dynamic%20Spectrum,in%20der%20Fl%C3%A4che%20erreicht%20werden)
- BNetzA (o.J.,a): Breitbandatlas [Internet], www.breitbandatlas.de (Stand: 28.09.2023)
- Border, J., Kojo, M., Grinter, J., Montenegro, G. & Shelby, Z. (2001): Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations, Internet RFC 3135, Juni 2001
- Braun, M., Tenbrock, S., Wernick, C. und Knips, J. (2023): Ergebnisse der WIK-Befragung unter den Glasfaser ausbauenden Unternehmen in, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 513, Dezember 2023, www.wik.org
- CableLabs (2017): CableLabs Significantly Increases Internet Speeds on HFC Network. Full Duplex DOCSIS doubles efficiency of spectrum usage for upstream and downstream traffic flows, Louisville, Colo., Oct. 11, 2017, https://www-res.cablelabs.com/wp-content/uploads/2016/12/28093128/Full_Duplex_DOCSIS.Press_Release.pdf, Abrufdatum 10.01.2024
- CableLabs (o.D.): <https://www.cablelabs.com/specifications/search?category=DOCSIS&subcat=DOCSIS%204.0&doctype=Specifications&query=&content=false&archives=false> (2022)
- Circuit Design (o.J.): Tool zur Berechnung der Okumura-Hata-Kurve, Technische Tools [Blog], https://circuitdesign.de/technical_tools/okumura-hata-curve/
- Comcast, USA: <https://www.golem.de/sonstiges/zustimmung/auswahl.html?from=https%3A%2F%2Fwww.golem.de%2Fnews%2Fdocsis-4-0-kabelnetz-betreiber-fuehrt-in-2023-symmetrisches-10g-ein-2209-168227.html&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
- DE-CIX Management (o.J.): Angeschlossene Netzwerke in Frankfurt [Blog], <https://www.de-cix.net/de/standorte/frankfurt/angeschlossene-netzwerke>
- Doug, J. (2020): On the Path to 10G: CableLabs Publishes DOCSIS® 4.0 Specification, DOCSIS [Blog], Mar 26,2020, <https://www.cablelabs.com/blog/on-the-path-to-10g-cable-labs-publishes-docsis-4-0-specification>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., a): UMTS - Universal Mobile Telecommunications System [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0601231.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., b): GPRS - General Packet Radio Service [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0411241.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., c): Datenübertragung im Mobilfunk [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0910141.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., d): EDGE - Enhanced Data Rates for GSM Evolution [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0910171.htm>

- Elektronik-Kompodium.de (o.J., e): LTE - Long Term Evolution [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1301051.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., f): HSPA - Highspeed Paket Access [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1301141.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., g): HSPA+ / HSPA Evolution [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1402201.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., h): LTE Advanced (LTE-A) [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1402271.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., i): LTE-AP - LTE Advanced Pro [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/2109121.htm>
- Elektronik-Kompodium.de (o.J., j): IEEE 802.16 / WiMAX [Blog], <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0904211.htm>
- EU (2023): EU Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen (2023), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2023/C 36/01), Anhang I [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131(01))
- Fraunhofer IIS (2021): Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Satellit im Kontext des novellierten Universaldienstes, Studie für die Bundesnetzagentur, 2021
- Google (o.J.): HTTPS encryption on the web [Blog], <https://transparencyreport.google.com/https/overview>, Abrufdatum: 2023
- Grevers, T., Jr. (2008): Application Acceleration and WAN Optimization Fundamentals. Cisco Press, 2008
- Handley, M. (2019): Using ground relays for low-latency wide-area routing in megaconstellationsProc, ACM HotNets, 2019
- Informationszentrum-mobilfunk.de (2022): 2G-Mobilfunk: Warum wird GSM noch gebraucht?, [Blog], 21. Februar 2022, <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/2022/02/21/2g-mobilfunk-warum-wird-gsm-noch-gebraucht/>
- Jewett, R. (2023): Starlink Surpasses 2 Millions Subscribers, <https://www.satelitoday.com/broadband/2023/09/25/starlink-surpasses-2-million-subscribers/>, September 25, 2023
- Kassem, M. M., Raman, A., Perino, D. & Sastry, a. (2022): A Browser-side View of Starlink Connectivity, Proc. of ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2022
- Kassing, S., Bhattacharjee, D., Baptista Águas,A., Saethre,J. E. & Singla, A. (2020): Exploring the “Internet from space” with Hypatia, Proc. of the ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2020
- Kulenkampff, G., Hackbarth, K., Kosek, M., Ockenfels, M., Ott, J., Plückebaum, T., Portugall, O. & Zuloaga, G.: Mehrpersonenhaushalte – Technische Mindestanforderungen an den Internetzugang, Gutachten für die BNetzA, Bad Honnef, Januar 2024
- Kulenkampff, G., Hackbarth, K., Ott, J., Plückebaum, T. & Portugall, O. (2023): Qualitätsparameter, Gutachten für die BNetzA, Bad Honnef, 1. Dezember 2023, <https://www.bundesnetz->

[agentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_WIK_zafaco_Qualit%C3%A4tsparameter%20-%20Vorabfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=3](https://www.agentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_WIK_zafaco_Qualit%C3%A4tsparameter%20-%20Vorabfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

- Let's Encrypt Statistics (o.J.): Percentage of Web Pages Loaded by Firefox Using HTTPS, <https://letsencrypt.org/stats/>, Abrufdatum 2023
- Li, Y, Li, H., Liu, W., Liu, L., Zhao, W., Chen, Y., Wu, J., Wu, Q., Liu, J., Lai, Z. & Qiu, H. (2023): A Networking Perspective on Starlink's Self-Driving LEO Mega-Constellation. Proc. of ACM MobiCom, October 2023
- LLC Starlink Services (2021): Petition of Starlink Services, LLC for Designation as an Eligible Telecommunications Carrier, Submitted to the Department of Telecommunications and Cable, Commonwealth of Massachusetts, 2021
- Itemobile.de (o.J.): 5G-Sender Reichweite mit verschiedenen Frequenzen [Internet], <https://itemobile.de/5g-sendereichweiten-mit-unterschiedlichen-frequenzen/>
- Luber, S. (2021): Was ist DOCIS? Definition [Blog], 14.06.2021, <https://www.ip-insider.de/was-ist-docsis-a-7bc8cd1e60be57d2f01505a63808a248/>
- Ma, S., Ching Chou, Y., Zhao, H., Chen, L., May, X. & Liu, J. (2022): Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users, Proc. of IEEE INFOCOM (2023) and arXiv:2212.13697v1 (2022)
- McDowell, Jonathan C. (2023): Jonathan's Space Pages: StarlinkStatistics, <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>, Abrufdatum: 2023-10
- Measurement Lab (o.J.): <https://www.measurementlab.net>
- Mertz, A. & Pollakowski, M. (2000): xDSL & Access Networks. Grundlagen, Technik und Einsatzaspekte von HDSL, ADSL und VDSL, Prentice-Hall, 2000, ISBN 3-8272-9593-9, 462 Seiten, S. 48 ff
- Michel, F., Trevisan, M., Giordano, D. & Bonaventure, O. (2022): A First Look at Starlink Performance. Proc. of ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2022
- Mohan, N., Ferguson, A., Cech, H., Renatin, P. R., Bose R., Marina, M. & Ott, J.(2024): A Multifaceted Look at Starlink Performance. Proc. Of the WebConf. To appear. arXiv, 2024: Eine Vorab-Veröffentlichung der Ergebnisse ist verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2310.09242.pdf>
- Nokia Bell Labs (2014): Vplus gets more out of VDSL2 vectoring [Blog], 29 July 2014, <https://www.bell-labs.com/institute/publications/itd-14-55171s/#gref> <https://insight.nokia.com/vplus-gets-more-out-vdsl2-vectoring>, Abrufdatum: 10.01.2024
- OFCOM (2008): UK broadband speeds, https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0020/35930/bbspeed_jan09.pdf
- Ookla (o.J.): Speedtest [Internet], <https://www.speedtest.net>
- Pfeifer, T. (2017), Konvergente 5G fähige Access Netze, 11. ITG Fachtagung Breitband für Deutschland, 29. – 30. März 2017

- Plückebaum, T. & Wernick, C. (2021): Die Rolle von HAPS für die Breitbandversorgung im ländlichen Raum, Kurzpapier für die Leichtwerk AG, WIK-Consult GmbH, Bad Honnef, Mai 2021, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/Kurzstue-die_HAPS_deutsch.pdf
- Plückebaum, T. (2013): VDSL Vectoring, Bonding und Phantoming, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 374, Bad Honnef, Januar 2013, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_374.pdf
- Plückebaum, T. (2023): Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 498, Bad Honnef. https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_498.pdf
- Qualcomm (2020): Qualcomm and CBN Achieve the World's First 700 MHz Band 5G Data Call, Milestone Will Further Enhance the Spectral Efficiency of the 700 MHz Band and Accelerate CBN's Commercial 5G Rollouts Nationwide, Press Note [Blog], San Diego, Aug 15, 2020, <https://www.qualcomm.com/news/releases/2020/08/qualcomm-and-cbn-achieve-worlds-first-700-mhz-band-5g-data-call>
- Raman, A., Varvello M., Chang, H. & Sastry, N. (2023): Dissecting the Performance of Satellite Network Operators. arXiv: <https://arxiv.org/abs/2310.15808v1>, October 2023
- Reddit (o.J.): https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/tkn3ue/folks_who've_had_starlink_for_a_while_is_service/
- RF Wireless World (o.J.): Hata model path loss calculator, Hata model path loss formula, Calculators [Blog], <https://www.rfwireless-world.com/calculators/Hata-model-path-loss-calculator.html>
- RIPE NCC (o.J.): RIPE Atlas [Internet], <https://atlas.ripe.net>
- Seifert, N. (2000): Verfahren zum Übertragen strukturierter Datenmengen zwischen einer Client-einrichtung und einer Servereinrichtung, Offenlegungsschrift DE 100 39 901 A 1, August 2000
- SES Astra Insight Paper (2023): Reimagine Your Success Story -- Redefining network services with O3b mPOWER, heruntergeladen im Oktober 2023
- SES S.A. (o.J.) : O3b mPOWER [Internet], <https://www.ses.com/o3b-mpower>
- Starlink (o.J., a): <https://www.starlink.com/>
- Starlink (o.J., b): Map [Internet], <https://www.starlink.com/map>
- Strube Martins, S.; Wernick, C.; Plückebaum, T.; Henseler-Unger, I. (2017): Die Privatkunden-nachfrage nach hochbitratigem Breitbandinternet im Jahr 2025, WIK-Bericht, Bad Honnef, März 2017, <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/die-privatkundennachfrage-nach-hochbitratigem-breitbandinternet-im-jahr-2025>
- Swisscom (2016): Swisscom to be the first European telecommunications service provider to launch G.fast, Berne, 18 October 2016, <https://www.swisscom.ch/dam/swisscom/en/about/media/press-release/2016/20161018-mm-gfast-en.pdf.res/20161018-mm-gfast-en.pdf>

Tanveer, H.B., Puchol, M., Singh, R., Bianchi, A. & Nithyanand, R. (2023): Making Sense of Constellations: Methodologies for Understanding Starlink's Scheduling Algorithms, arXiv: <https://arxiv.org/abs/2307.00402>, July 2023

Telko Service (o.J.): Richtfunk, Die hervorragende Alternative der Netzanbindung [Blog], <https://telko-service.com/richtfunk/>

Tiwari, S., Bhushan, S., Taneja, A., Kassem, M., Luo, C., Zhou, C., He, Z., Raman, A., Sastry, N., Qiu, L. & Bhattacharjee, D. (2023): T3P: Demystifying Low-Earth Orbit Satellite Broadband, arXiv: <https://arxiv.org/abs/2310.11835>, October 2023

TWS Technologies (o.J.): Business Richtfunk, Professionelle drahtlose Datenverbindungen bis 20 Gbit/s, Richtfunk [Blog], [https://tws-technologies.de/technologie/richtfunk/#:~:text=H%C3%A4ufig%20gestellte%20Fragen-,Was%20ist%20Richtfunk%3F,%2DPunkt%20\(PtP\)%20genannt](https://tws-technologies.de/technologie/richtfunk/#:~:text=H%C3%A4ufig%20gestellte%20Fragen-,Was%20ist%20Richtfunk%3F,%2DPunkt%20(PtP)%20genannt)

umlaut communications GmbH & WIK-Consult GmbH (2022): Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes, Version 1.6, Studie im Auftrag der BNetzA, Kennziffer 2021/003a/Z25-7, 03.01.2022, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_umlaut_WIK_Mobilfunk.pdf?__blob=publicationFile&v=3

vdsl-tarifvergleich.de (o.J.): Was ist die Pingzeit und warum ist diese wichtig?, Ping Ratgeber [Blog], <https://www.vdsl-tarifvergleich.de/speed-optimierung/ping-zeiten.html>, Abrufdatum: 10.01.2024

Verbraucherzentrale (2023): 3G-Netze werden abgeschaltet – Achtung bei älteren Handys und Verträgen [Blog], 20.03.2023, <https://www.verbraucherzentrale.de/aktuelle-meldungen/digitale-welt/3gnetze-werden-abgeschaltet-achtung-bei-aelteren-handys-und-vertraegen-56539#:~:text=Die%20gro%C3%9Fen%20Mobilfunkanbieter%20haben%20in,Ihr%20mobiles%20Internet%20deutlich%20langsamer>

White, G., Sundaresan, K., Briscoe, B. (2019): Low Latency DOCSIS – Overview And Performance Characteristics, SCTE – ISBE and NCTA, <https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2019/2019-low-latency-docsis>

Zuloaga, G. & Plückebaum, T. (2022): In-Building Telecommunications Infrastructure, WIK Working Paper No. 5, Bad Honnef, December 2022, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/WIK_Working_Paper_No5_In-Building-Telecommunications-Infrastructure.pdf

Zuloaga, G., Kulenkampff, G., Ockenfels, M. & Plückebaum, T. (2022): Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 493, Bad Honnef, Dezember 2022, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_493.pdf