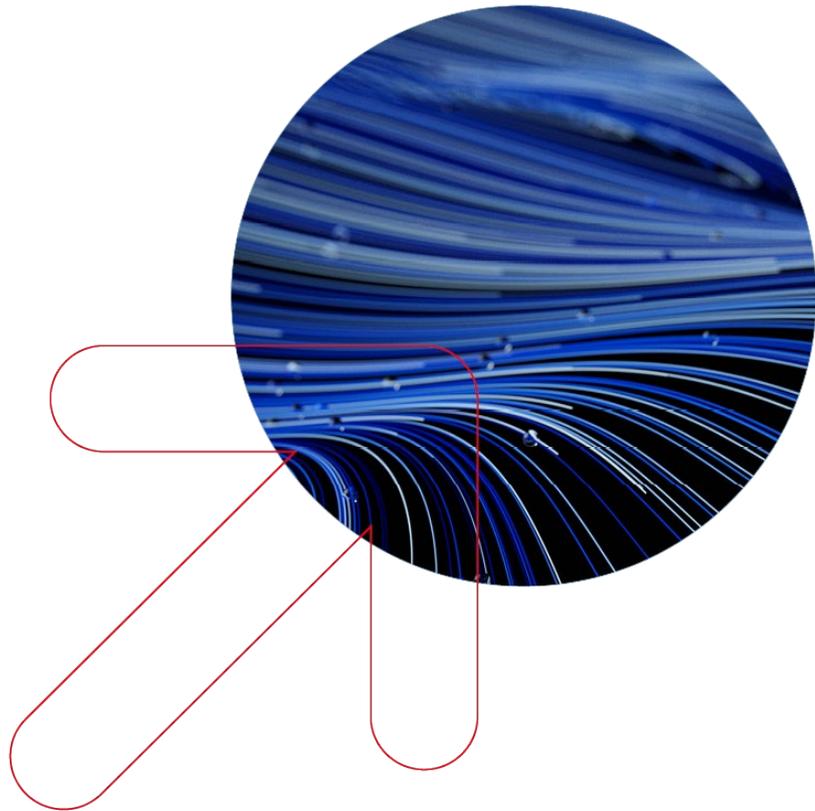


WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 498



Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien

Autor:
Dr. Thomas Plückebaum

Bad Honnef, Mai 2023

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Stand: August 2022

ISSN 1865-8997

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

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:

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

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Zusammenfassung	VI
Summary	VII
1 Einleitung	1
2 Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien	2
2.1 Überblick	2
2.2 Was ist Hochbreitband?	8
2.2.1 Abgrenzung nach Technologien	9
2.2.2 Abgrenzung nach Geschwindigkeit	13
2.2.3 Abgrenzung nach Qualitätskriterien	13
2.2.4 Überblick über die VHCN Definitionen der Europäischen Kommission	14
2.3 Festnetztechnologien	15
2.3.1 VDSL2	15
2.3.2 Vectoring	17
2.3.3 G.fast	26
2.3.4 XG.fast	28
2.3.5 FTTH PtP	29
2.3.6 FTTH PtMP	30
2.3.7 Mehrfaseransätze und Einfaser System	34
2.4 Kabelnetztechnologien	35
2.4.1 DOCSIS 3.0	37
2.4.2 DOCSIS 3.1	39
2.4.3 DOCSIS 4.0	40
2.5 Vergleich der Technologien im Festnetz	42
2.5.1 Sharing und Bandbreite	42
2.5.2 Weitere qualitative Aspekte	44
2.5.3 Energieverbrauch	48
2.5.4 Upgrade Betrachtungen	50
2.5.5 Zusammenfassung Festnetztechnologien	52
2.6 Mobilfunktechnologien	52
2.7 Fixed Wireless Access (FWA)	59
2.8 Satelliten und HAPS (High Altitude Platform Systems)	61
2.9 Systematischer Vergleich	64
3 Literaturhinweise	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Übertragungsbandbreiten bei ADSL 2+ und VDSL2 über die Länge der Anschlussleitung	3
Abbildung 2-2:	NGA Netzarchitekturen im Überblick	4
Abbildung 2-3:	Nachfragepotenzial für stationäre Breitbandanschlüsse in Deutschland 2025	5
Abbildung 2-4:	Verteilung der Kosten in einem FTTH P2P Netz (Beispiel Schweiz), inkl. der Inhausverkabelung	6
Abbildung 2-5:	Bandbreiten von VDSL Profil 17a und 35b im Vergleich (Annex Q = Profil 35b)	17
Abbildung 2-6:	Frequenzbereiche und ihre Nutzung auf Anschlussleitungen	18
Abbildung 2-7:	Funktionsweise von Vectoring	19
Abbildung 2-8:	Bandbreitengewinn durch Vectoring auf den einzelnen Doppeladern eines Anschlusskabels bei 500m Länge	20
Abbildung 2-9:	Bandbreitendegression durch nicht ins Vectoring eingebundene Anschlussleitungen	21
Abbildung 2-10:	Reichweitenverlängerung durch Vectoring	22
Abbildung 2-11:	Phantoming summiert parallele physische und virtuelle Kanäle zu einer Gesamtkapazität	23
Abbildung 2-12:	Bandbreiten von VDSL Profil 17a und 35b im Vergleich (Annex Q = Profil 35b)	25
Abbildung 2-13:	Vorteile von Vectoring und sein Nachteil	25
Abbildung 2-14:	Vectoring Gewinn bei G.fast	26
Abbildung 2-15:	Bandbreiten von G.fast, VDSL Profil 35b und 17a im Vergleich über die Anschlussleitungslänge	27
Abbildung 2-16:	Frequenzplan der verschiedenen optischen Übertragungsverfahren im Anschlussnetz und im Weitverkehrsnetz	32
Abbildung 2-17:	Vom Upgrade betroffene Systeme bei x.PON (und Ethernet PtP)	33
Abbildung 2-18:	Kabel TV Netz und Fibre Node Splitting	37
Abbildung 2-19:	Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.0	38
Abbildung 2-20:	Typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 im Vergleich	40
Abbildung 2-21:	Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.1 FD/ DOCSIS 4.0	41
Abbildung 2-22:	Leistungsaufnahme verschiedene Anschlussnetztechnologien in Abhängigkeit von Ihrer Auslastung im Vergleich	49
Abbildung 2-23:	Reichweite verschiedener Frequenzen	53
Abbildung 2-24:	Mit zunehmendem Abstand von der Zellmitte (Antenne) abnehmende Bandbreite	53

Abbildung 2-25: Versorgung zellperipherer Endgeräte aus mehreren Zellen	54
Abbildung 2-26: Kapazitätserweiterungen über WiFi-Offloading und/oder Femtozellen	55
Abbildung 2-27: Kommunikationscharakteristika von 5G Anwendungen	56
Abbildung 2-28: Technologie und Frequenzmix bei 5G	58
Abbildung 2-29: Gepoolte BBU mit breitbandiger Anbindung der RRH	59
Abbildung 2-30: 5G NR Beamforming überwindet größere Distanzen (bis ca. 6 km)	60
Abbildung 2-31: HAPS und sein Footprint	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: VHCN Eigenschaften	15
Tabelle 2-2: Übliche VDSL-Profile	16
Tabelle 2-3: Vergleich aller kupferbasierten breitbandigen Übertragungstechniken des Anschlussnetzes	28
Tabelle 2-4: x.PON Systemübersicht	31
Tabelle 2-5: DOCSIS 1.0 bis 3.0 in der Übersicht	39
Tabelle 2-6: Übersicht über die wesentlichen Merkmale von DOCSIS 3.0 – 3.1 FD/DOCSIS 4.0	41
Tabelle 2-7: Effektive Bandbreiten je Nutzer bei gemeinsam genutztem Übertragungsmedium im Festnetz und bei Koaxialkabelnetzen	43
Tabelle 2-8: Vergleich Direkter FTTH Ausbau mit einem Ausbau in drei bzw. fünf Schritten, Deutschland	51
Tabelle 2-9: Vergleich der qualitativen Eigenschaften der Technologien im Festnetz	52
Tabelle 2-10: Anwendungsbeispiele für die Anforderungen an 5G Netze	57
Tabelle 2-11: Versorgung mit Breitband aus der Luft: Satelliten und HAPS	61
Tabelle 2-12: Übersicht über die aktuellen und zukünftigen Technologien für die Breitbandübertragung im Vergleich	66

Abkürzungsverzeichnis

BAKOM	Bundesamt für Kommunikation (Schweiz)
ARPU	Average Revenue per User
BRAS	Broadband Remote Access Server
BNetzA	Bundesnetzagentur (Deutschland)
CAPEX	Capital Expenditure
CMTS	Cable Modem Termination System
COAX	Koaxialkabel - koaxial aufgebaute Hochfrequenzkabel
COPP (Kupfer)	Breitbandanschluss über ein reines Kupferanschlussnetz
CPE	Customer Premise Equipment
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Cell
FTTH	Fibre-to-the-Home
FTTS	Fiber to the Street
FTTS/dp	Fibre to the Street/ distribution point
FTTx	Fiber to the X
G.fast	Fast Access to Subscriber Terminals
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
GPON	Gigabit Passive Optical Network, Gigabit Passive Optische Netze
HVt	Hauptverteiler
IP-TV	Internet Protocol Television
Kbit/s	Kilobit pro Sekunde
LLU	Local Loop Unbundling
MPoP	Metropolitan Point of Presence
NGA	Next Generation Access
NGN	Next Generation Network
NGPON2	Next-Generation Passive Optical Network 2
ODF	Optical Distribution Frame
OLT	Optical Line Terminator
ONU	Optical Network Unit

OPEX	Operational Expenditure
PON	Passive Optical Network, Passive Optische Netze
PtMP	Point-to-Multipoint
PtP	Point-to-Point
SLU	Sub-Loop Unbundling
SSLU	SSLU Teil des SLU der für FTTS verwendet wird
TAL	Teilnehmeranschlussleitung
TWDM.PON	Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VHCN	Very High Capacity Networks
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WIK	Wissenschaftliches Institute für Kommunikationsdienste
XG.PON	Extrafast Gigabit PON
XGS.PON	Extrafast Gigabit Symmetrical PON

Zusammenfassung

In den Zugangsnetzen der nächsten Generation (Next Generation Access, NGA) hat sich seit den Zeiten der klassischen Kupferdoppeladern des Telefonnetzes viel getan und es wird sich auch noch viel tun, selbst wenn die Kupferdoppeladern letztlich alle auf Glasfaseranschlussnetze umgestellt sein werden. Diese Umstellung hat viele Implikationen auf die Netze und die darüber angebotenen Dienste, aber auch auf die Entwicklung des Wettbewerbs in den Telekommunikationsmärkten.

Dieser Bericht konzentriert sich auf die technischen und Dienste orientierten Aspekte der unterschiedlichen Zugangstechnologien und Netze. Er fußt auf verschiedenen Arbeiten zu Breitbandzugangsnetzen der WIK bzw. der WIK-Consult GmbH aus den vergangenen Jahren und gibt einen Überblick über die grundlegenden technisch-funktionalen Rahmenbedingungen der verschiedenen Technologien und Topologien für die Anschlussnetze und ihre Bedeutung für die Nutzung in der Praxis.

Eingangs wird auf das Entstehen der Breitband Übertragungsnetze als Ausgangssituation für die heutigen Netze eingegangen. Es folgen verschiedene Begriffsdefinitionen für Breitbandnetze bis hin zum Begriff VHCN (Very High Capacity Network) der Europäischen Kommission, die sicher noch nicht das Ende der Entwicklung darstellen. Wir differenzieren die unterschiedlichen Technologien nach Festnetzen, Kabel(-TV) Netzen und verschiedenen Funknetzen, über Mobilfunknetze, Fixed Wireless Access bis zu HAPS und Satellitennetzen, d.h. einer Versorgung aus der Luft. Ein tabellarischer Vergleich bildet den Abschluss.

Der Bericht fokussiert auf die Darstellung der Technologien für Zugangsnetze und ihre wesentlichen Charakteristika, streift jedoch die unterschiedlichen und durchaus gleichfalls bedeutenden ökonomischen und regulatorischen Dimensionen der Zugangsnetze, wenn auch nur am Rande. Er verweist hierfür im Text und im Abschnitt 3 auf die umfangreiche begleitende Literatur aus der Feder des WIK.

Summary

Since only consisting of classical copper wires the former telephone access network experienced significant changes. We now face the challenge of a multi year lasting migration from the copper to a fibre access network, causing many implications on the networks themselves, but on the services offered and the competition in the telecommunication market too.

This report starts with the coming up of broadband transmission networks as start point of today's networks. Then we define Broadband networks according to its different capabilities including the definition of VHCN (Very High Capacity Network) of the European Commission and the European Code of Electronic Communications (EECC), which certainly is not the end of future technological development, improvement and changes.

The report then focusses on the existing and medium term future technologies for access to the fixed network and its relevant characteristics, finally being summarised in an overview table. In addition The report touches the different and important economical and regulatory dimensions of the access networks, and links it with comprehensive literature and reports and a recent study of WIK.

1 Einleitung

Dieser Bericht ist das Ergebnis verschiedener Arbeiten zu Breitbandzugangsnetzen des WIK bzw. der WIK-Consult in den vergangenen Jahren und soll einen Überblick geben über die grundlegenden technisch-funktionalen Rahmenbedingungen der verschiedenen Technologien für die Anschlussnetze und ihre Bedeutung für die Nutzung in der Praxis.

Nach einem Überblick über das Entstehen von Breitband Übertragungsnetzen und ihrer Entwicklung, die die derzeitige Situation begründet (Abschnitt 2.1), folgt eine Einführung in den Begriff Hochbreitband, auf der Ebene der Europäischen Union auch VHCN (Very High Capacity Networks) genannt (Abschnitt 2.2). Wir differenzieren die unterschiedlichen Technologien nach Festnetzen (Abschnitt 2.3), Kabel(-TV) Netzen (Abschnitt 2.4) und verschiedenen Funknetzen, über Mobilfunknetze (Abschnitt 2.5), Fixed Wireless Access (Abschnitt 2.7) bis zu HAPS und Satellitennetzen, d.h. einer Versorgung aus der Luft (Abschnitt 2.8). Ein tabellarischer Vergleich (Abschnitt 2.9) schließt diesen Bericht ab.

Der Bericht beschränkt sich auf die Darstellung der Technologien für Zugangsnetze, und ihre wesentlichen Charakteristika, streift jedoch die unterschiedlichen und durchaus gleichfalls bedeutenden ökonomischen und regulatorischen Dimensionen der Zugangsnetze nur am Rande. Er verweist hierfür im Text und im Abschnitt 3 auf die umfangreiche begleitende Literatur aus der Feder des WIK.

2 Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien

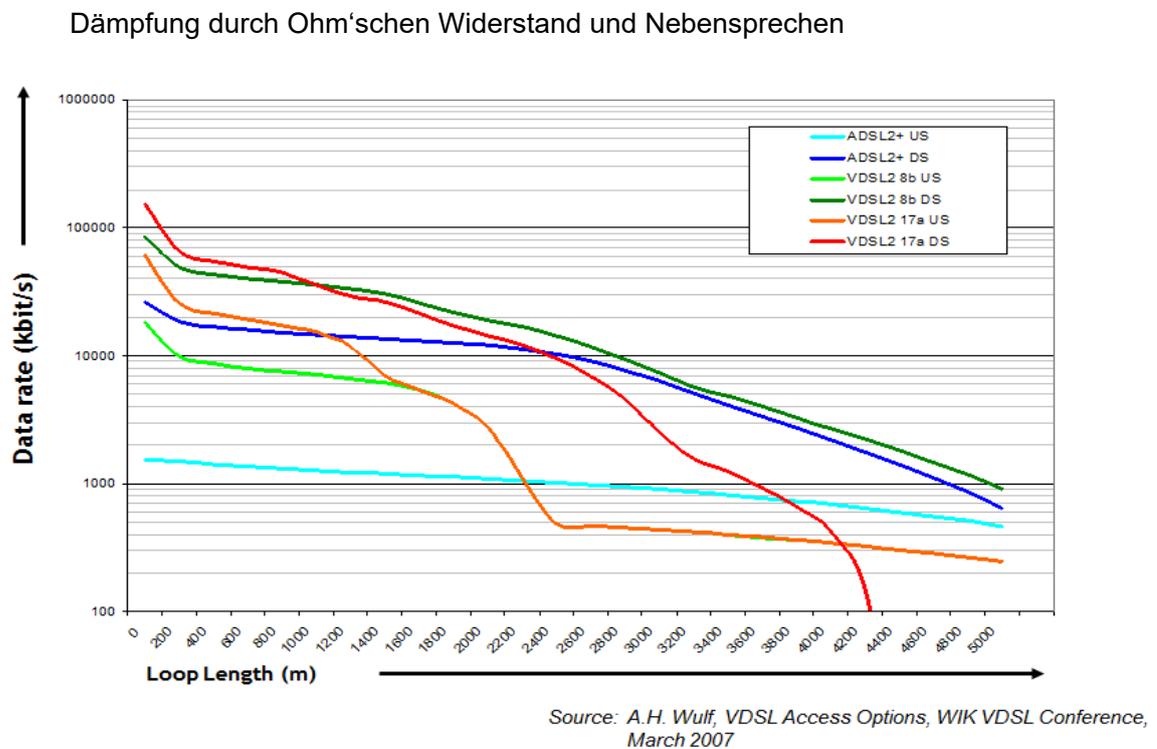
2.1 Überblick

Das Standard Anschlussnetz der Telekommunikation der letzten 130 Jahre war ein Netz, das aus sternförmig zusammenlaufenden Kabeln ungeschirmter Kupferdoppeladern bestand, die von den einzelnen Endstellen zu zentralen Schaltzentralen (Hauptverteilern, HVt) in immer dicker werdenden Kabeln verbunden waren. Jeder Haushalt wurde mit einer eigenen Doppelader bis zur Schaltzentrale verbunden. In den Schaltzentralen waren ursprünglich auch die Vermittlungsstellen angesiedelt, später dann die elektromechanischen automatischen Vermittlungssysteme. Diese wurden mit dem Aufkommen der elektronischen Vermittlungssysteme durch Vorkonzentratoren oder abgesetzte Vermittlungseinheiten ersetzt, deren Zentralen an einer geringeren Zahl hierarchisch höher angesiedelter Schaltzentralen als Teilmenge der ursprünglichen Standorte angesiedelt wurden. Es blieb jedoch das sternförmige Anschlussnetz aus Kupferdoppeladern, das letztendlich immer dichter ausgebaut wurde und zuletzt jeden Haushalt erreichte. Über dieses Netz wurde zunächst die Sprache als niederfrequentes analoges Signal zwischen 300 und 3.600 Hz übertragen.

Die Drähte des Kupferanschlussnetzes dienten zudem für eine frühe Datenübertragung mit einer Datenübertragungsrate bis 9.600 bit/s. Mit dem Aufkommen der elektronischen Vermittlungssysteme und der ISDN-Technologie 1988 wurde die Übertragung der Sprache digitalisiert und im Bereich bis ca. 120 KHz zwei Sprachkanäle mit je 64 Kbit/s und ein Daten- und Steuerungskanal mit 16 Kbit/s codiert. In den darüber liegenden Frequenzbereich bis ca. 2,2 MHz siedelte man ab Ende der 1990er Jahre symmetrische oder asymmetrische Kanäle zur Datenübertragung (xDSL¹) an, die durch Splitter getrennt parallel auf einer Anschlussleitung betrieben werden konnten. Die Anschlussleitungen werden in den Schaltzentralen dann wieder per Splitter in den Sprachfrequenzbereich und den Datenfrequenzbereich aufgeteilt. Ersterer endet auf den ISDN Anschlussystemen, letzterer auf sogenannten Digital Subscriber Lines Access Multiplexers (DSLAMs). Bei der asymmetrischen Datenübertragung ab HVt wurden maximal etwa 16 Mbit/s downstream erreicht, allerdings kamen beim Endkunden über größere Entfernungen (> 4 km) nur noch wenige 100 Kbit/s downstream und noch weniger für den Upstream an. Dies ist zum einen durch die Ohm'sche Dämpfung begründet, die bei jeder Übertragung über Kupferdoppeladern auftritt und die umso größer wird, je höher die zur Übertragung genutzten Frequenzen werden, zum anderen durch die elektromagnetischen Störungen, die sich benachbarte Kupferdoppeladern gegenseitig zufügen, Nebensprechen genannt. Auch dieses wird mit zunehmender Übertragungsfrequenz immer intensiver.

¹ ADLS: Asymmetric Digital Subscriber Line, SDSL: Symmetric Digital Subscriber Line

Abbildung 2-1: Übertragungsbreiten bei ADSL 2+ und VDSL2 über die Länge der Anschlussleitung



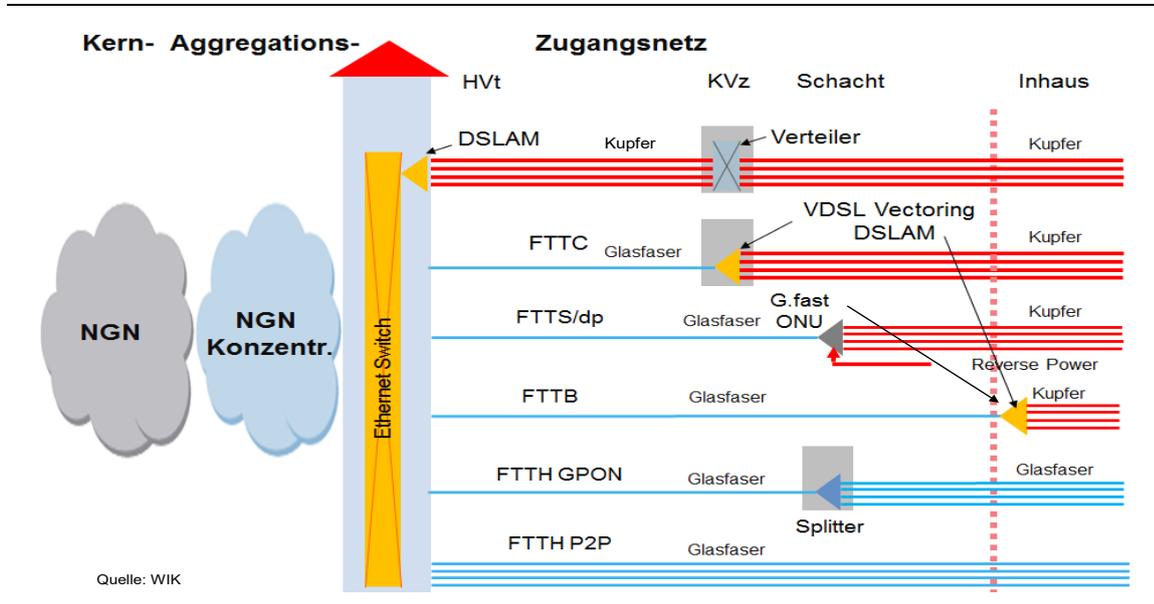
Quelle: WIK

Höhere Bandbreiten kann man mit den VDSL2 Übertragungsverfahren erzielen, die höhere Frequenzen entlang der Kupferdoppeladern nutzen, allerdings damit auch nur noch deutlich geringere Übertragungreichweiten erzielen. Der Einsatz dieser Verfahren kann daher ab einer Schaltzentrale nur für die kürzeren der Anschlussleitungen bis ca. 1000m erfolgen. Für die längeren Anschlussleitungen verlagert man die DSLAMs in die Knotenverzweiger am Straßenrand (FTTC), wodurch sich die Kupferkabelängen deutlich verkürzen. Die DSLAMs werden mit dem ab den Schaltzentralen beginnenden Konzentrationsnetz und dem darüber angeordneten Kernnetz per Glasfaser verbunden, die sehr hohe Bandbreiten über größere Entfernungen (> 100km) ohne Zwischenverstärker zu übertragen erlaubt. Für noch höhere Bandbreiten kann man die DSLAMs noch näher an die Endkunden heranzuführen, z.B. in sogenannte Drop Points (DP) am Straßenrand (FTTS), oder bis in den Keller der Gebäude (FTTB). Wenn die Glasfaser die Wohnungen oder Geschäftsräume der Endkunden erreichen, spricht man von FTTH. Die alten Kupferleitungen und deren Restriktionen sind dann vollständig aus der Übertragungskette eliminiert. Bei einer Glasfaser Punkt-zu-Punkt Topologie (PtP, PtoP oder P2P) kann dann auf der Anschlussleitung die volle Kapazität einer Glasfaser zur Verfügung gestellt werden². Es bleibt dem Wohnungseigentümer (analog dem Geschäftskunden) überlassen,

² Diese liegt im Bereich von Tbit/s.

wie er die Übertragung innerhalb seiner Räumlichkeiten (Wohnung) weiterführt (Kupferdoppeladern, Koaxialkabel, Glasfaser, WiFi), i.d.R. über kurze Distanzen.

Abbildung 2-2: NGA Netzarchitekturen im Überblick



Quelle: WIK

WIK-Consult hat den zukünftigen Bandbreitenbedarf der Kunden in Deutschland wiederholt mit seinem Marktmodell untersucht und für die Zukunft prognostiziert. Basis der Prognose ist die Annahme, dass den Kunden in Zukunft ausreichend Netzressourcen zu erschwinglichen Preisen zur Verfügung stehen. D.h. es wird angenommen, dass ihre Nachfrage nicht durch fehlende oder unbezahlbare Bandbreiten im Zugangnetz eingeschränkt wird.

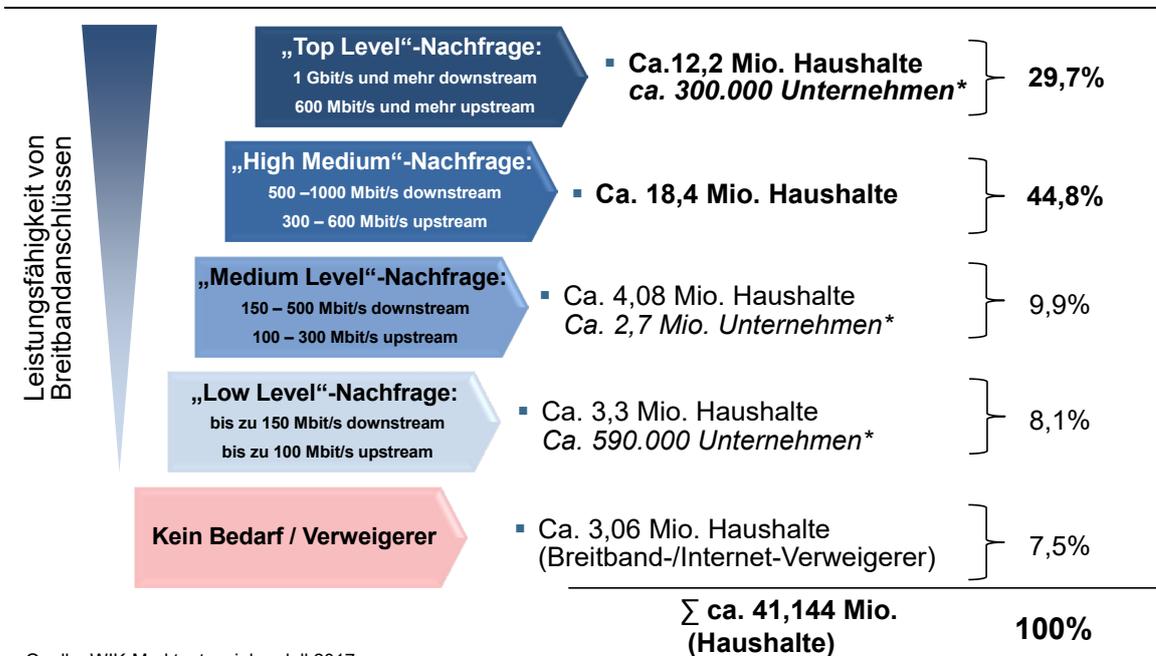
Das Marktmodell geht von verschiedenen Nachfragergruppen in Haushalten mit dem für Deutschland typischen Größenmix aus, die Dienste verschiedener Anwendungsgebiete und die spezifischen und für die prognostizierte Zukunft typischen Bandbreiten (im Jahr 2025) nachfragen, und dies auch parallel, so wie heute einzelne Anwender, aber auch Familien zur Busy Hour³ es tun. Spätere Untersuchungen für andere Länder und Aktualisierungen für Deutschland haben die grundsätzlichen Aussagen dieser Studie bestätigt. Es ergibt sich ein breites Spektrum der Nachfrage von Nutzern, beginnend bei denen, die kein Breitband (im Festnetz) nutzen wollen, bis hin zu den Top Level Nachfragern (s. Abbildung 2-3).⁴ Man kann von einer Nachfragerwelle ausgehen, die sich in ihrer Größe modifiziert weiter in die Zukunft hinein bewegt, d.h. die Nachfrage nach niedrigen Bandbreiten von heute wird die Nachfrage nach höheren Bandbreiten von morgen, die nach niedrigen Bandbreiten sinkt entsprechend. Bei den Unsicherheiten der Prognose mag

³ Hauptverkehrszeit, in Mitteleuropa typischerweise von 20:00 bis 22:00 Uhr.

⁴ Siehe Strube Martins et al. (2017).

der Bedarf bezogen auf das Jahr 2025 auch etwas früher oder später eintreten, aber er wird sich in der hier aufgezeigten Größenordnung einstellen.

Abbildung 2-3: Nachfragepotenzial für stationäre Breitbandanschlüsse in Deutschland 2025



Quelle: WIK-Marktpotenzialmodell 2017

* Die Nachfrageschätzungen für Unternehmen wurden nicht aktualisiert, sondern ohne neue Berechnungen in die Ergebnisse der Fortschreibungen für Privathaushalte integriert.

Quelle: WIK

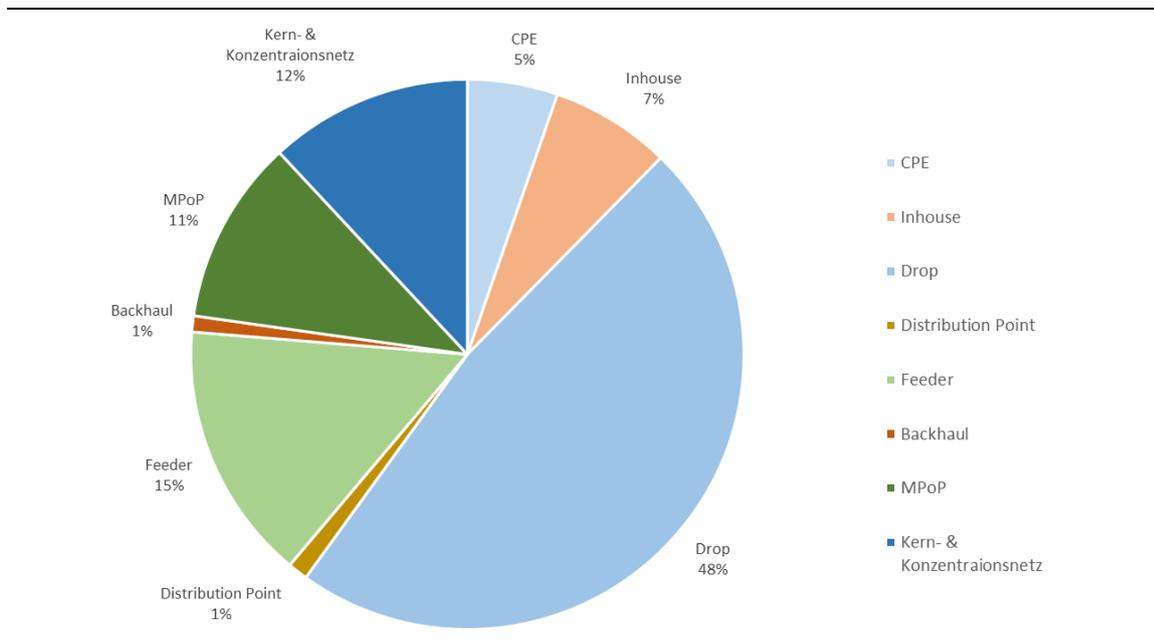
Ohne die Ergebnisse der in den anschließenden Kapiteln dargelegten technischen Möglichkeiten der unterschiedlichen Technologien vorwegzunehmen, ist doch klar, dass die oberste Nutzergruppe nur mit einem Glasfaseranschluss zufrieden gestellt werden kann. Da sich diese Nutzergruppe nicht auf ein Besiedlungsgebiet beschränken lässt, sondern im Lande weit verteilt angesiedelt ist und sich die Nachfragewelle zudem über die Zeit in Richtung höherer Bandbreiten weiterbewegt, muss der Ausbau eines Landes im Ergebnis flächendeckend erfolgen, um alle Nutzer zufrieden stellen zu können. Dies gilt selbst für Gebiete, die mit hybriden Glasfaser/Koaxialkabelsystemen versorgt werden, denn auch hier geht die Glasfaser immer näher an die Gebäude heran bzw. in diese hinein.

Die Kosten des Ausbaus der unterschiedlichen Technologien sind unterschiedlich hoch, weil die FTTC- und FTTS-Technologien einen Teil des bestehenden Anschlussnetzes weiterhin nutzen, also das bestehende Kupfernetz für die immer kürzer werdende „Last Mile“ einsetzen, anstatt sofort alles in Glasfasern zu investieren. Untersuchungen des WIK in den vergangenen 15 Jahren haben immer wieder gezeigt, dass der NGA-Ausbau sich, abhängig von seinen Kosten und erzielbaren Erlösen, mit heutigen und für die

Zukunft prognostizierten Werten nicht flächendeckend eigenwirtschaftlich darstellen lässt.⁵ Im Grundsatz kann man sagen, dass mit abnehmender Besiedlungsdichte die Kosten pro Anschluss steigen, der Erlös bei national einheitlichem Preisbild sich jedoch nicht ändert. Irgendwann tritt bei abnehmender Besiedlungsdichte der Punkt ein, dass sich eine NGA-Technologie nicht mehr von alleine, das heißt aus den Erträgen aus Endnutzerentgelten trägt. Natürlich hängt dieser Punkt auch von der Menge der Teilnehmer ab, die sich anschließen lassen und die die neuen Dienste nutzen. Dieser Punkt tritt für teurere Technologien früher ein als für kostengünstigere.

Je mehr Anschlussnetz man austauscht, d.h. im Wesentlichen, je mehr des alten Kupfernetzes durch Glasfasern ersetzt wird, desto investitionsintensiver wird das Netz, desto mehr kann es allerdings auch in Bezug auf Bandbreite und Übertragungsqualität leisten.

Abbildung 2-4: Verteilung der Kosten in einem FTTH P2P Netz (Beispiel Schweiz), inkl. der Inhausverkabelung



Quelle: WIK

Ein Großteil der Investitionen und der Kosten eines NGA Netzes entfallen auf die passiven Netzstrukturen des Anschlussnetzes. In Abbildung 2-4 sind dies die Netzabschnitte von der Schaltzentrale (HVt) bis zum Kabinet (KVz), hier Feeder genannt, und von dort bis zum Straßenrand und zum Gebäude, hier Drop genannt, und im Gebäude, hier Inhouse genannt. Die Investitionen (bzw. Kosten) verteilen sich auf die Netzsegmente folgendermaßen:

- Feeder: 21% (15%)

⁵ Siehe Elixmann et al. (2008); Ilic et al. (2009); Jay et al. (2011); Neumann (2013), Braun et al (2019).

- Drop: 65% (48%)
- Inhouse: 7% (7%)

Die passiven Infrastrukturen machen in diesem Beispiel 70% der Gesamtkosten aus. Im Prinzip kann man sagen, je weiter ein Glasfasernetz ausgebaut wird, desto mehr steigen die Investitionen und Kosten der passiven Infrastruktur. Man kann auch sagen, je leistungsfähiger die Infrastruktur, desto höher die Kosten. Im Beispiel der drei Architekturen FTTC, FTTS und FTTH (PtP) ergeben sich für eine flächendeckende Versorgung im Beispiel der Schweiz (Greenfield) und der jeweiligen Technologie Investitionen von ca.:

- FTTC: 5,5 Mrd CHF⁶
- FTTS: 16,4 Mrd CHF
- FTTH: 45,7 Mrd CHF

Wir haben bereits in der Vergangenheit gezeigt, dass der Ausbau der Breitband-Infrastrukturen nicht für alle Regionen ein sich selbst tragendes Geschäft ist, d.h. dass mit den gängigen Erlösen das Breitbandnetz profitabel betrieben werden kann⁷. Diese Grenzen der Profitabilität unterscheiden sich je nach verwendeter NGA-Technologie. Neben den Untersuchungen nach der profitablen Reichweite der einzelnen Technologien und deren Subventionsbedarf in den nicht profitablen Gebieten kann man aber auch eine Kombination aus den verschiedenen Technologie derart erwägen, dass immer die leistungsfähigste Technologie bis zum Rand ihrer Profitabilität ausgebaut wird und dann die nächst leistungsfähige Technologie folgt. Aus diesem Grund untersuchen wir zum einen die Technologien und ihre Leistungsfähigkeit und zum anderen ihre spezifischen Kosten bei einem flächendeckenden Ausbau. Hierbei berücksichtigen wir in einer weiteren Betrachtung zudem, dass ein Teil der Gebiete bereits mit einer leistungsfähigen Breitband-technologie ausgebaut ist. Der hier angesprochene stufenweise Ausbau mit preiswerteren Technologien am Rand des profitablen FTTH Ausbaus haben wir in einer Studie von 2017 für die Schweiz beschrieben.⁸ Betrachtet man ein auf Wohlfahrtsoptimierung fokussiertes Unternehmen, dass die Erträge aus profitabel ausbaubaren Gebieten in unprofitable Gebiete transferiert, kann, abhängig von der Struktur der Gebiete und deren Ausbaukosten und erzielbaren Erträge auch eine im Gesamtsaldo unsubventionierte Infrastruktur entstehen.⁹ Diese Fragen werden in dieser auf die Technologien fokussierten Studie nicht weiterverfolgt.

⁶ Wert 2017, wurde in neueren Studien nicht mehr bestimmt, weil die Technologie bei den neuen Versorgungszielen ungeeignet ist und nicht mehr neu ausgebaut wird.

⁷ Siehe Elixmann et al. (2008); Ilic et al. (2009); Jay et al. (2011, beide Studien); Neumann (2013), Neumann et al. (2017), Braun et al. (2019), Plückebaum, Ockenfels (2020), Kulenkampff et al. (2020), Zoz (2021).

⁸ Neumann et al. (2017).

⁹ Kulenkampff et al. (2020), Zoz (2021).

Nachdem wir die Relevanz des Breitbandausbaus und der verschiedenen Festnetztechnologien angerissen haben, konzentrieren wir uns im folgenden Abschnitt auf den Begriff Hochbreitband.

2.2 Was ist Hochbreitband?

Breitband ist ein Begriff für die Datenübertragung, der im Laufe der Zeit mit den wachsenden Anforderungen einerseits und den steigenden technischen Möglichkeiten andererseits immer wieder eine neue Interpretation erfahren hat, was die objektiv hinterlegten Bandbreiten in Kbit/s oder Mbit/s angeht. In der Definition der EU-Kommission im letzten Jahrzehnt sprach man von Breitband bei Datenraten ab 2 Mbit/s, von NGA-Breitband ab 30 Mbit/s und von Ultra-Breitband ab (deutlich über) 100 Mbit/s.¹⁰ Mit diesen Bandbreiten ist im allgemeinen Verständnis und der weiten Verbreitung der asymmetrischen Übertragung nur die Downstream-Richtung gemeint. Upstream wird typischerweise nur ein Bruchteil (10 – 30%) der Downstream-Bandbreite angeboten.

Im Rahmen des neuen Europäischen Kodex für Elektronische Kommunikation (EKEK)¹¹ wurde der Begriff „Very High Capacity Network“ (VHCN) definiert, einem Netz mit sehr hoher Kapazität, das ganz aus Glasfaser zumindest bis zum Verteilerpunkt am Ort der Nutzung besteht. Der EKEK (Art. 72) beauftragt GEREK¹² mit einer Detaillierung der Definition der VHCN: Der zu Folge sind alle FTTB und natürlich alle FTTH Netze VHCN, zudem solche Netze, die unter normalen Spitzenlastbedingungen den Endkunden eine Mindestqualität entsprechend der Zielwerte (performance threshold 1) bereitstellen. D.h., die Definition von VHCN Netzen unterliegt immer dann einer Qualitätsbewertung, wenn das Netz nicht FTTB oder FTTH ist. Für Koax-Netze kann ab DOCSIS 3.1 aus heutiger Sicht auch von VHCN gesprochen werden (siehe unten).

Die Bezeichnungen und Werte werden in der Zukunft weitere Veränderungen erfahren, wenn man die wachsenden Bedarfe und technischen Möglichkeiten betrachtet.¹³ In den folgenden Abschnitten betrachten wir den Begriff Hochbreitband aus 3 Blickrichtungen, aus der Welt der

- Technologien (Abschnitt 2.2.1),

¹⁰ State Aid Guidelines der EU Kommission 2013. Diese Rahmenregeln wurden im Dezember 2022 aktualisiert und traten am 31. Januar 2023 in Kraft (Europäische Kommission (2023)).

¹¹ Europäischer Kodex für elektronische Kommunikation (EKEK) vom 11.12.2018, Amtsblatt der Europäischen Union L 321/36, englisch: European Electronic Communication Code (EECC).

¹² Gremium Europäischer Regulierungsstellen für elektronische Kommunikation (GEREK), englisch: Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC), BEREC Guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165 vom 1.10.2020, https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2020/10/BoR_%2820%29_165_BEREC_Guidelines_VHCN.pdf

¹³ So spricht die Europäische Kommission in Ihrem Bestreben um High Performance Computing (HPC) bereits heute von Terabit-Netzen, die zukünftig bis in jedes Haus reichen sollen (Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team; Supporting the implementation of CEF2 Digital – SMART 2017/0018, European Commission, Brussels/Luxembourg, January 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8947e9db-4eda-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-116100663>.

- Geschwindigkeiten (Abschnitt 2.2.2),
- Qualitätskriterien (Abschnitt 2.2.3) und der
- VHCN Definition (Abschnitt 2.2.4), die diese Aspekte kombiniert.

2.2.1 Abgrenzung nach Technologien

Im Grundsatz gibt es heute sechs Technologien, die sich für die Breitbandübertragung im Anschlussnetz eignen:

- Kupferdoppeladern (Telefondraht),
- Koaxialkabel,
- Glasfaserkabel,
- Fixed Wireless Access (fester Funkanschluss),
- Mobilfunkanschlüsse mit fest installiertem Endgerät
- Anschlüsse an Satelliten und HAPS (high Altitude Platform Systems).

Kupferkabel

Andere Kupferkabel als die aus Telefondrähten gibt es im Anschlussnetz so gut wie nicht, wengleich es deutlich leistungsfähigere Kabel als Kupferdoppeladern gibt, die in der Inhausverkabelung und insbesondere bei Bürogebäuden und in der Industrie schon seit Jahrzehnten Verwendung finden. Dies sind Kabel aus geschirmten und eng verdrillten Kupferdoppeladern, heute spezifiziert bis zur Kategorie 8¹⁴. 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 statt dessen die leistungsfähigeren, dünneren und preiswerteren Glasfaserkabel verwenden kann.

Kupferkabel ebenso wie PtP Glasfaserkabel eignen sich prinzipiell auch gut für eine symmetrische Übertragung. Die Asymmetrie kommt nur ins Spiel, wenn die eine Richtung (Down) gegenüber der anderen Richtung (Up) bevorzugt werden soll, weil das Nutzerverhalten und das Datenangebot ebenso sei. In den Kupferkabeln wird dann die Frequenznutzung entsprechend asymmetrisch aufgeteilt. Vorstellbar ist, dass man Hochbreitband ab Bandbreiten definiert, die mit FTTC produziert werden können. FTTC qualifiziert sich jedoch nicht als VHCN.

¹⁴ ISO/ IEC 11801 bzw. Kat 8.2 (supra Kat 8) draft IEC 61156-10 mit doppelter Schirmung, Kategorie 8 reicht für 40 – 100 Gbit/s Ethernet oder auch DOCSIS 3.1 über kurze Längen bis 100m.

Koaxialkabel

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. 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. An ein Kabel wurden ursprünglich mehrere Tausend Endteilnehmer angeschlossen. Das Kabel ist ein Shared Medium, ein zwischen allen angeschlossenen Kunden in seiner Nutzung geteiltes Übertragungsmedium. Die hohe Frequenz 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), der bei den Koaxialnetzen typischerweise von einem zentralen Gerät auf einer Ebene vergleichbar mit den Metropolitan Points of Presence (MPoP) administriert wird, indem es Senderrechte an die verschiedenen angeschlossenen Sendewilligen für bestimmte Zeitintervalle vergibt. Sofern nur ein Teilnehmer senden und empfangen will, steht die gesamte Kapazität dieser beiden gerichteten Kanäle (Down und Up) diesem Teilnehmer zur Verfügung. Andernfalls muss er sich die Kapazität mit den anderen kommunikationswilligen Teilnehmern teilen. Diese bidirektionale Datenkommunikationsform ist im DOCSIS Standard¹⁵ 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 ein Cable Modem, an das neben dem Fernseher das Inhouse Netz über eine Ethernet Schnittstelle und einen Router angeschlossen wird.

Bis zum Standard DOCSIS 3.1 ist ein asymmetrisches Verhältnis von Up- und Downstream von 1:10 im Standard vordefiniert. Bei der heute oft weniger asymmetrischen Nachfrage kommt es daher bei diesen Releases vor, dass die Upstream Richtung voll ausgelastet ist, während die Downstream Richtung nicht einmal voll für die Kommunikation genutzt werden kann. DOCSIS 3.0 begrenzt den Upstream auf maximal ca. 120 Mbit/s shared, bei DOCSIS 3.1 wird dies auf 1,2 Gbit/s erweitert. Ab DOCSIS 3.1 kann man daher sicher aus heutiger Sicht von Hochbreitband oder auch von VHCN sprechen¹⁶.

¹⁵ Data over Cable Service Interface Specification fing bei Release 1.0 an; heute 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.

¹⁶ BERC guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165 vom 1.10.2020, vgl. Abschnitt 2.2.

Glasfaserkabel

Glasfaserkabel können einerseits breitbandiges, sogenanntes weißes (oder graues) Licht übertragen, andererseits aber auch sehr viel feiner in einzelne Frequenzen separierte Lichtstrahlen unterschiedlicher Frequenz (oder auch Farbe genannt) darstellen. Dieses Nebeneinander verschiedener Farbkanäle nennt man auch Wellenlängen-Multiplex (WDM: Wave Division Multiplex). Man unterscheidet in Coarse (grobe) oder Dense (dichte) Farbabstände und Bereiche.¹⁷ Ein Farbstrahl kann derzeit typischerweise bis zu 100 Gbit/s übertragen, 400 Gbit/s stehen in der Markteinführung. So sind die Kapazitäten von Glasfaserkabeln aus heutiger Sicht nahezu unbegrenzt, zumal die Entwicklung im Gegensatz zu den Kupferdoppeladern erst am Anfang steht, Kupferkabel sich im Rahmen ihrer elektrischen Übertragung aber eher am Ende ihrer physikalischen Möglichkeiten befinden.¹⁸ Glasfaserkabel sind daher unbestritten ein Übertragungsmedium für Hochbreitband und extrem zukunftssicher. Dies wird durch ihre lange Lebensdauer unterstützt.

Fixed Wireless Access

Bei Fixed Wireless Access (FWA) kommunizieren fest installierte auf den Sender gerichtete Empfängerantennen mit Sektorantennen auf zentralen, ein Gebiet versorgenden Masten, die das Gebiet optimiert, u.a. mit Beamforming¹⁹ ausleuchten. Dies erlaubt die Verwendung hoher Frequenzen über größere Distanzen, als dies im Mobilfunk möglich wäre. In Italien wurden zu diesem Zweck Frequenzen im Bereich von 26 und 28 GHz im Wettbewerb an mehrere Lizenznehmer vergeben. Frequenzen im GHz Bereich ermöglichen Bandbreiten von mehr als 1 Gbit/s. In Bezug auf eine begrenzte Anzahl Teilnehmer im geteilten (Shared) Übertragungsmedium (Funkkanal) lassen sich solche Netze deshalb als VHCN qualifizieren. Gerade die hier verwendeten Antennenstandorte sind aufgrund der hohen Übertragungsbandbreiten typischerweise über Glasfaseranschlüsse zu erschließen.

Mobilfunk

Die Mobilfunktechnologie entwickelte sich im letzten Jahrzehnt weg von einer Sprachkanäle aufbauenden reinen Telefonielösung mit Datenübertragungsunterstützung ähnlich wie im ISDN hin zu einem vornehmlich paketvermittelten Datennetz. Heute existieren

¹⁷ CWDM unterstützt bis zu 32 Farben, DWDM bis zu 162, abhängig vom Glasfaserkabel können auch Frequenzbereiche in den OH-Dämpfungsbarrieren mitgenutzt werden, wodurch sich die Zahl der Wellenlängenkanäle noch erhöhen lässt. Unter dem Begriff CWDM werden sowohl passive, ausschließlich optisch gesplittete Multiplexer als auch mit Laserdioden ausgestattete aktive Multiplexer in einem großen Wellenlängenraaster zu verstehen.

¹⁸ Die Shannon-Grenze ist die Obergrenze des auf einem Kommunikationskanal Übertragbaren. Die Übertragungstechnik für die Kupferkabel hat diese nahezu erreicht, im Vergleich zu den Optionen auf den Glasfaserkabeln. Neue Ansätze für optische Übertragungsverfahren entlang von Kupferdoppeladern, die 1Tbit/s über 100m prognostizieren, sind eher für den Inhabsbereich anwendbar. (Hejazi et al, Calculating Millimeter-Wave Mode of Copper Twisted-Pair Cables Using Transformation Optics, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9391993>). Von den Entwicklern sind sie als eine nächste leistungsgesteigerte Variante von XG.fast konzipiert, auch als Terrabit DSL (TDSL) bezeichnet (vgl. auch Abschnitt 2.3.4).

¹⁹ Über spezielle Antennen geformte Funkkeulen.

diese Netze hybrid nebeneinander und reichen technologisch von GSM über UMTS zu LTE und 5G.²⁰ Bei LTE und 5G wird die Telefonie als VoIP paketvermittelt übertragen. Allen gemeinsam ist, dass sie ein flächendeckendes Netz aus Sendestationen (Basisstationen) benötigen, um die Konnektivität zu den sich bewegenden Endgeräten (Mobiltelefonen, Smart Phones und Tablets) herzustellen. Zwischen den Endgeräten und den Basisstationen besteht eine für die jeweilige Mobilfunktechnik spezifische Funkschnittstelle in den jeweils lizenzierten Frequenzbereichen. Jeder dieser Frequenzbereiche stellt ein Shared Medium dar, vergleichbar mit den Koaxialkabelnetzen. Ein Empfänger nimmt sich die für ihn bestimmte Nachricht aus der Luft, als Sender muss er einen freien Zeitschlitz und/ oder einen Frequenzbereich mit der Basisstation „aushandeln“. Steht keine Kapazität zur Verfügung, kann eine Verbindung nicht aufgebaut oder ein Datenpaket nicht versendet werden.

Die Kapazität des Funkkanals richtet sich im Wesentlichen nach seiner Bandbreite. Die Reichweite einer Basisstation richtet sich einerseits nach der Höhe der Frequenz, andererseits natürlich auch nach der Sendeleistung (und der spektralen Dichte beim Empfänger). Die Sendeleistung wird typischerweise aus umweltpolitischen und gesundheitlichen Aspekten begrenzt, so dass die Höhe der Frequenz insbesondere in den ländlicheren Bereichen eine größere Bedeutung hat. Andererseits verbessern niedrige Frequenzen die Penetration der Gebäude und so die Indoor Coverage, was den Einsatz niedriger Frequenzen auch in den dichter besiedelten Bereichen sinnvoll werden lässt. Mit größerer Entfernung des mobilen Endgerätes vom Sendemast sinkt die spektrale Dichte und damit die empfangbare Bandbreite. Als Shared Medium ist Mobilfunk natürlich in der übermittelbaren Kapazität je Kunde von der gleichzeitigen Zahl der aktiven Kunden in einer Funkzelle abhängig. Aktuelle 4G+/LTE Implementierungen erlauben z.B. in der Schweiz über das Mobilfunknetz eine theoretische Bandbreite von bis zu 700 Mbit/s. Bereits heute werden 90% der Schweizer Bevölkerung mit bis zu 300 Mbit/s versorgt und 72% können bereits Geschwindigkeiten von bis zu 500 Mbit/s nutzen. Mit dem neuesten Mobilfunkstandard 5G sind aktuell Geschwindigkeiten von bis zu 2 Gbit/s verfügbar.²¹

Der große Vorteil und das Alleinstellungsmerkmal von Mobilfunk ist seine Unterstützung der Mobilität der Endkunden. Allerdings lässt sich die Mobilfunktechnik auch als Ersatz für einen Festnetzanschluss einsetzen. Typische Beispiele finden sich hierfür in Schweden, Finnland, Norwegen oder auch in Neuseeland in den dort sehr dünn besiedelten Gebieten, wo der Festnetzanschluss verteilt stehender Gebäude sehr teuer wird. Auch wenn der breitbandige Mobilfunk in diesen Gebieten den Ausbau einer Glasfaser bis nahe zum Endkunden oder gar bis zu dessen Gebäude hin ersetzen kann, so muss doch die Basisstation mit Glasfaser versorgt werden. Unter Umständen lassen sich die

²⁰ GSM: Global System for Mobile Communications, 2. Generation (2G); UMTS: Universal Mobile Telecommunications System, 3. Generation (3G); LTE: Long Term Evolution, 4. Generation (4G), 5 Generation (5G).

²¹ Swisscom 2022, FAQ Mobilfunktechnologie kurz erklärt, : https://www.swisscom.ch/de/about/netz/5g.html#%2F%3Flib_gcr_topic=Netz&lib_publish-Date=custom&lib_startDate=NOW-36MONTHS&lib_startEnd=NOW&acc%5Btab%5D=.

Glasfaserinfrastrukturen für Breitband-Festnetze und Mobilnetze auch gemeinsam ausbauen.²²

Mit der 5G Mobilfunktechnik, deren Rollout in den vergangenen 2 Jahren begonnen hat kann man aus heutiger Sicht von einer Hochbreitbandtechnik sprechen.²³

2.2.2 Abgrenzung nach Geschwindigkeit

Einen ersten Ansatz zur Definition von Hochbreitband nach Übertragungsgeschwindigkeiten haben wir bereits eingangs dieses Kapitels unternommen, indem wir uns an die Definitionen der Europäischen Kommission angelehnt haben. Allen Orientierungen an festen Zahlenwerten gemeinsam ist, dass sie rasch altern und sich eine Aushöhlung oder Entwertung sprachlicher Superlative ergibt. Welche Übertragungsgeschwindigkeit in der Vergangenheit „super“ war, ist heute normal. Dennoch ist eine Orientierung an Zahlen faktenorientiert und präzise, erlaubt eine bessere Einordnung und Vergleichbarkeit und ist einzig objektiv. Aus heutiger Sicht würden wir Hochbreitband etwa bei der EU-Definition von VHCN ansiedeln.

2.2.3 Abgrenzung nach Qualitätskriterien

Auch Qualitätskriterien entbehren nicht einer gewissen Subjektivität und Veränderung über die Zeit. Für Hochbreitband meinen wir die Qualität eines hochauflösenden Video- oder TV-Kanals heranziehen zu können. Dieser soll ohne Blockbildung, rüttelfrei kontinuierlich und mit hoher Farbqualität und kontrastreich empfangen werden. Dieser Maßstab lässt sich auch auf andere Anwendungsgruppen anwenden, wie z.B. an Gaming, Tele-Health oder Security – jeweils in ihrer Video-Komponente.

Aber auch die Bewegtbild-Übertragung unterliegt der Veränderung über die Zeit. So reduzieren Kompressionsverfahren die benötigte Bandbreite, aber mehrkanalige 3 D-Darstellungen vervielfachen dafür die Zahl der benötigten Kanäle. Insgesamt scheint daher eine solche Definition eher mit der Entwicklung über die Zeit Schritt zu halten als die anderen, zuvor diskutierten Ansätze.

Das höchste Maß an Objektivität hat jedoch die Abgrenzung bzw. Definition nach Geschwindigkeit und ergänzenden Qualitätsmerkmalen, die allerdings über die Zeit fortgeschrieben werden müsste, und dies idealerweise einheitlich zumindest für große geographische Räume und/ oder Wirtschaftsräume.

²² Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team (2020).

²³ Da es sich um ein shared Medium handelt gilt diese Aussage eher für das Potential der Technik und hängt wesentlich von der Zahl der gleichzeitig aktiven Nutzer ab.

Im Kontext der VHCN Definition der Europäischen Kommission hat GEREK aktuell die folgenden Qualitätsparameter für seinen „performance threshold 1“ definiert:²⁴

- | | |
|---|------------------|
| a. Downlink Datenrate | ≥ 1000 Mbit/s |
| b. Uplink Datenrate | ≥ 200 Mbit/s |
| c. IP Packet Error Ratio (Y.1540) | ≤ 0.05% |
| d. IP Packet Loss Ratio (Y.1540) | ≤ 0.0025% |
| e. Round-trip IP Packet Delay (RFC 2681) | ≤ 10 ms |
| f. IP Packet Delay Variation, Jitter (RFC 3393) | ≤ 2 ms |
| g. IP Service Availability (Y.1540) | ≥ 99.9% per year |

GEREK hat sich zum gleichzeitigen Nutzerverhalten nicht quantifiziert festgelegt. Die EU-Kommission jedoch hat im Kontext der Fördermittelvergabe festgelegt, dass die Qualitätsparameter in der Hauptverkehrszeit (Spitzenlastzeitbedingung) eingehalten werden müssen, wenn mindestens 10% der angeschlossenen Nutzer gleichzeitig aktiv sind.²⁵

Für die Versorgung über den Mobilfunk hat GEREK einen „performance threshold 2“ definiert. Dieser ist jedoch für den Mobilfunk gedacht und nicht für feste Anschlüsse, wie sie hier Gegenstand der Untersuchungen sind. Für Fixed Wireless Access gelten die „performance thresholds 1“.

2.2.4 Überblick über die VHCN Definitionen der Europäischen Kommission

Die folgende Tabelle fasst die VHCN (Very High Capacity Network) Definitionen zusammen, wie sie 2020 von GEREK (BoR (20) 165) festgelegt wurden:

²⁴ BEREC guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165 vom 1.10.2020, article 18, werden im Jahr 2025 überprüft.

²⁵ Europäische Kommission (2023): EC State Aid Guidelines 2023/C 36/01 vom 31.1.2023, Anhang 1, Abschnitt 2.1, [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)).

Tabelle 2-1: VHCN Eigenschaften

	Festnetz	Mobilnetz
Kriterium 1/2	FTTB	FTT-Basisstation
und/oder Kriterium 3/4	Performance Threshold 1	Performance Threshold 2
Downlink	≥ 1000 Mbps	≥ 150 Mbps
Uplink	≥ 150 Mbps	≥ 50 Mbps
IP Paketfehlerrate (Y.1540)	≤ 0.05%	≤ 0.01%
IP Paket-Verlustrate (Y.1540)	≤ 0.0025%	≤ 0.005%
Roundtrip Delay (RFC 2681)	≤ 10 ms	≤ 25 ms
Delay Variation (RFC 3393)	≤ 2 ms	≤ 6 ms
IP Service Availability (Y.1540)	≥ 99.9% pro Jahr	≥ 99.81% pro Jahr

Quelle: WIK

Ein VHCN liegt vor, wenn Kriterium 1 (Glasfaser bis ins Gebäude) bzw. 2 (Glasfaser bis zum Mobilfunkmast) gegeben ist und damit der zugehörige Performance Threshold (2 für Mobilfunk) eingehalten werden kann oder wenn er auf andere Weise eingehalten wird (z.B. über HFC-Netze).

Die in Tabelle 2-1 aufgeführten Charakteristika unterliegen 2025 einer Überprüfung durch GEREK. Die VHCN Definition kann sich daher dann ändern.

Zur Abgrenzung dazu bestehen feste ultraschnelle Breitbandnetze aus FTTx (ab FTTC Vectoring) oder DOCSIS Netzen (ab 3.0) mit eine Bandbreite beim Kunden von mehr als 100 Mbit/s zu Spitzenlastzeitbedingungen.²⁶

2.3 Festnetztechnologien

Eine grobe Übersicht über die Festnetztechnologien haben wir bereits im einleitenden Überblick (Abschnitt 2.1), insbesondere mit Abbildung 2-2 gegeben. In den nachfolgenden Abschnitten gehen wir detaillierter auf die spezifischen Charakteristika der verschiedenen Technologien ein.

2.3.1 VDSL2

Die VDSL Übertragungsverfahren nutzen Frequenzbereiche über 2,2 MHz. Sie können das Frequenzband unter 120 KHz aussparen, um dort über Splitter getrennt die Übertragung von POTS²⁷ oder ISDN Telefonie zuzulassen. Je höher die Frequenz, desto höher

²⁶ Diese Abgrenzung ist im EU-Förderkontext von Bedeutung, weil der für eine Förderung notwendige Bandbreitensprung (stepchange) mindestens das Dreifache der besten im Ausbaugbiet angebotenen Bandbreite betragen muss.

²⁷ Plain old Telephone System, analoge Telefonie.

ist die insgesamt übertragbare Bandbreite. Allerdings wird die Reichweite für die höheren Frequenzen immer kürzer, so dass sich hier ein trade-off ergibt. Dies lässt sich gut in Abbildung 2-1 erkennen. ADSL2+ hat eine verhältnismäßig wenig abnehmende Bandbreite über die Leitungslänge, bietet dafür aber auch über kurze Längen eine relativ geringe Übertragungsbandbreite. Es wurde für die frühe Breitbandübertragung ab HVt entworfen. Entsprechend dem antizipierten Nutzerverhalten wurde bei der Planung der Nutzung der Frequenzbereiche eine Asymmetrie zwischen Up- und Downstream unterstellt, um die begrenzte Bandbreite möglichst optimal auszunutzen. Dennoch ist auch eine symmetrische Nutzung auf dem Niveau der Upstream-Kapazität möglich²⁸. Spätere Entwicklungen weiteten den Frequenzbereich und die übertragbaren Bandbreiten aus. Eine Übersicht gibt Tabelle 2-1. Heute in Mitteleuropa weit verbreitet ist VDSL2 mit dem Profil 17a (ca. Frequenzband bis 17 MHz). Es wird ab HVt und bei größeren Anschlussleitungslängen ab KVz eingesetzt. Auf kurzen Leitungslängen, eher schon im Bereich von FTTB, findet man auch das Profil 30a (bis 30 MHz). Eine relativ neue Entwicklung ist das Profil 35b, das noch höhere Bandbreiten bietet und (anders als in der Tabelle dargestellt und von der ITU-T intendiert) auch für den Einsatz im FTTC-Bereich von verschiedenen Netzbetreibern vorgesehen wird.²⁹

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

Die VDS-Profile übertragen grundsätzlich asymmetrisch, d.h. bieten downstream eine deutlich höhere Kapazität als upstream (Faustregel: upstream = 1/3 downstream). Dies liegt an dem Design der Übertragungsverfahren, die unterstellen, dass die Kunden mehr aus dem Internet herunterladen als in die andere Richtung ins Netz hinein. Tabelle 2-1 beschreibt die aggregierte Bandbreite beider Übertragungsrichtungen. Der Bandbreitengewinn aus der höheren Frequenznutzung dient bei Profil 35b ausschließlich der Bandbreitenerhöhung im Downstream, die Upstream-Kapazität bleibt unverändert.

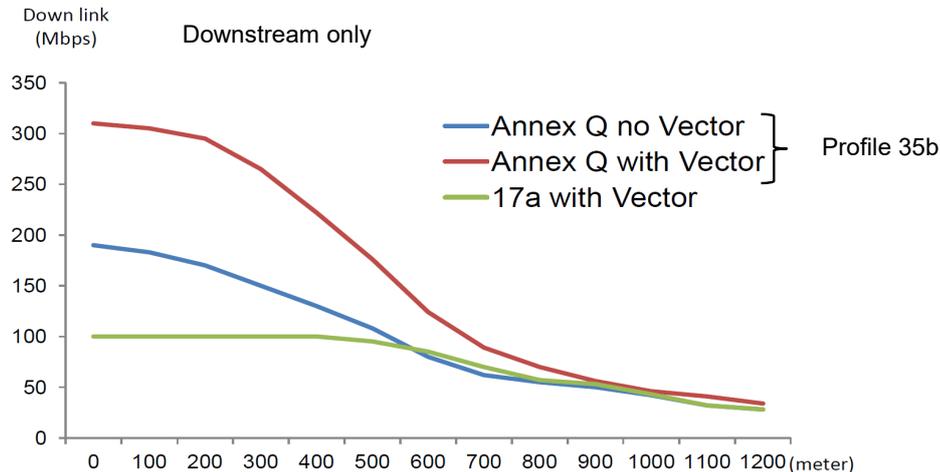
Man erkennt in Abbildung 2-5 den Bandbreitenverlauf, der sich bei Leitungslängen über 600m wieder annähernd angleicht. Die Abbildung zeigt mit der blauen Kurve den

²⁸ Es könnten auch spezifische xDSL Systeme für eine symmetrische Nutzung eingesetzt werden. Dies entspricht aber nicht dem (derzeitigen) Bedarf im Massenmarkt.

²⁹ So z.B. von der Deutschen Telekom.

Frequenzverlauf für VDSL2 Profil 35b ohne Vectoring (Vectoring wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert).

Abbildung 2-5: Bandbreiten von VDSL Profil 17a und 35b im Vergleich (Annex Q = Profil 35b)

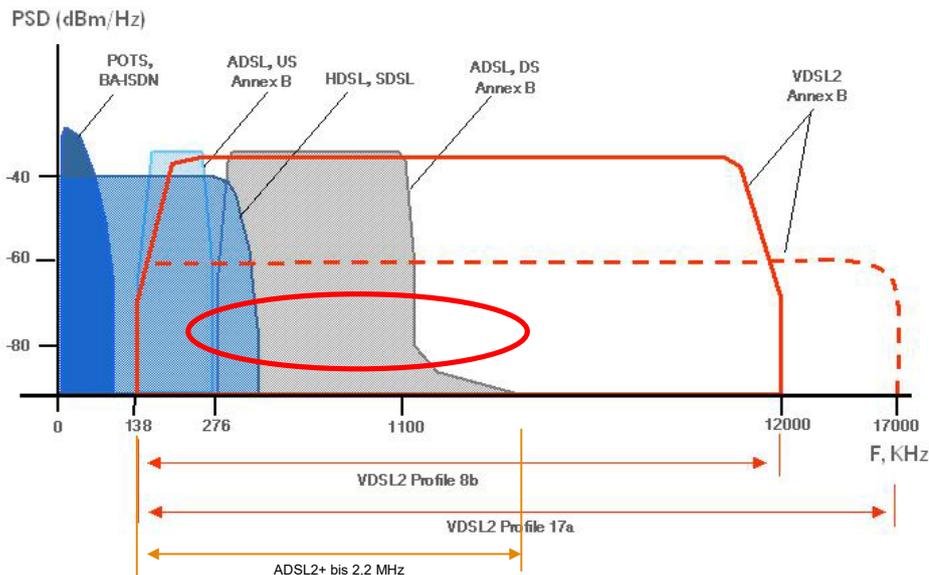


Quelle: Huawei (2015)

2.3.2 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. Dieses Nebensprechen hat ganz überwiegend dieselbe Frequenz, die das Ausgangssignal hat. Würde auf allen Doppeladern eines Kabels jeweils in einem anderen Frequenzbereich übertragen, würden sich die Störungen durch das Nebensprechen auf das Nutzsignal der anderen Doppeladern nicht auswirken. Eine solche Frequenzaufteilung geht aber nicht, wenn die Kabel für die Breitbandübertragung voll ausgenutzt werden sollen. Auch schon in der reinen Telefonieanwendung war das nicht der Fall, dort stellte sich das Problem aber auch noch nicht, weil die Störungen im niedrigen Frequenzbereich marginal sind und erst mit wachsender Übertragungsfrequenz immer intensiver werden.

Abbildung 2-6: Frequenzbereiche und ihre Nutzung auf Anschlussleitungen



Quelle: Nokia (2005) **30**

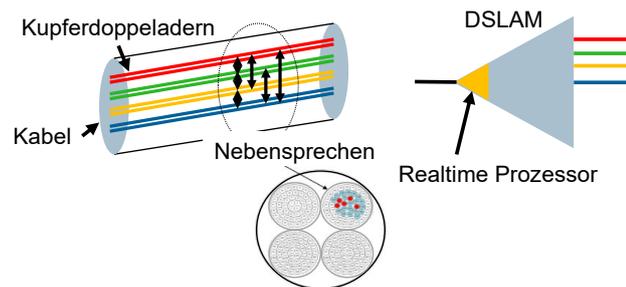
Abbildung 2-6 zeigt die auf Telefonkabeln heute noch weitgehend üblichen Frequenznutzungen. Neu hinzugekommen sind die Profile 30a und 35b, die den Frequenzbereich bis 30 bzw. 35 MHz nutzen (in der Abbildung nicht dargestellt). Viele Übertragungsverfahren haben darauf geachtet, den POTS und ISDN-Frequenzbereich erst gar nicht zu nutzen, so dass zwischen Telefonie- und Datensignalen kein Nebensprechen entstehen kann. Die deutsche Regulierung hat für die VDSL2 (17a) Übertragung darauf geachtet, auch den Bereich bis 2,2 MHz für ADSL2+ und viele darunter liegende herkömmliche Übertragungsverfahren auszusparen und die breitbandige Übertragung erst für den Bereich darüber zuzulassen, so dass sich alt und neu nicht stören. In Österreich ist das nicht der Fall, so dass es dort zu Verdrängungen kommen kann (s. rote Ellipse in Abbildung 2-6).

Nicht vermieden werden kann das Nebensprechen zwischen Doppeladern mit gleichen Frequenzen. Wie erwähnt, wird dies in den höheren Frequenzbereichen immer stärker, 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 Bandbreiten gehen wegen der Störungen dramatisch herunter.

Schnelle Prozessrechenstechnik erlaubt es im Rahmen des technischen Fortschritts aber inzwischen, die Störungen, die die Kupferdoppeladern untereinander ausüben, für jedes gestörte Adernpaar abzuschätzen und dann vom gestörten Nutzsignal wegzunehmen – zu subtrahieren (vgl. Abbildung 2-7). Der DSLAM wird dazu mit einem Vectoring Prozessor ausgerüstet, mit dem jeder Port intern verbunden wird. 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 Verzweigerkabel korrigiert.

Abbildung 2-7: Funktionsweise von Vectoring



Quelle: WIK

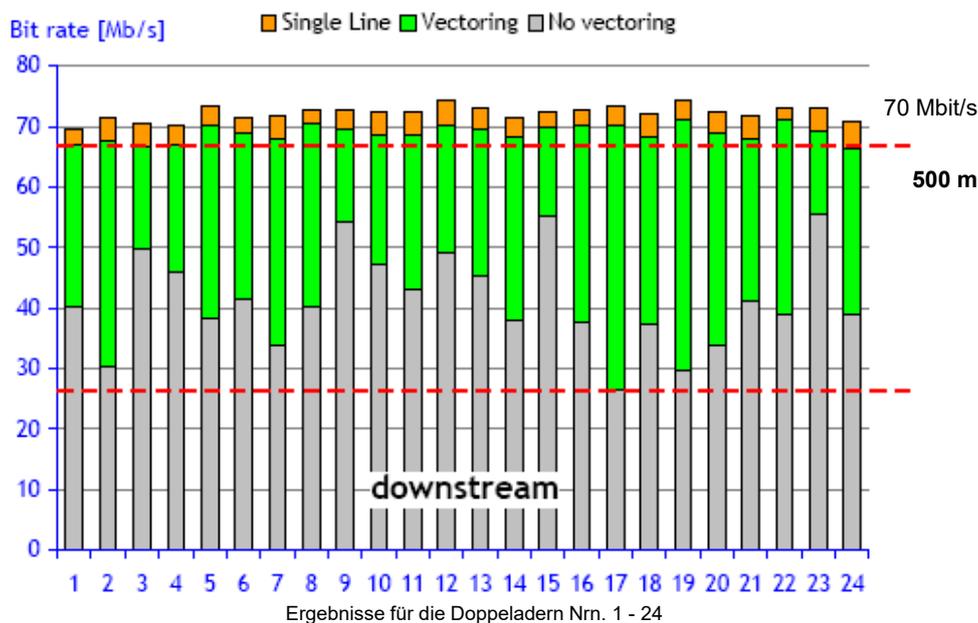
Durch das Vectoring erhält man wieder das bereinigte Nutzsignal. Bereits Abbildung 2-1 und Abbildung 2-5 zeigen die Bandbreitengewinne, die mit Hilfe von Vectoring bei verschiedenen VDSL Profilen erreicht werden können.

Abbildung 2-8 zeigt die Wirkung von Vectoring auf die Doppeladern eines Kabels aus 24 Doppeladern. Die grauen Balken zeigen die Bandbreite, die die Doppeladern eines mit VDSL2 (17a) beschalteten Kabels bedingt durch das Nebensprechen haben. Die orangen Balken zeigen die sogenannte Single Line Performance, d.h. die Übertragungsbandbreite der Doppelader, wenn keine weiteren Signale auf das Kabel aufgeschaltet sind. Die Diskrepanz ist recht groß und beschreibt eindrücklich die Bandbreitendegression durch Nebensprechen³¹. Wird nun Vectoring eingeführt, dann wird das Nebensprechen weitgehend eliminiert und die Doppeladern erreichen nahezu die Single Line Performance. Während zuvor die durch Nebensprechen beeinträchtigten Bandbreiten je Doppelader deutlich variierten und so der eine Nachbar nur 28 Mbit/s downstream erhielt und ein anderer 55 Mbit/s, sind nun alle relativ gleich und über 68 Mbit/s und damit nahe am Optimum.

³¹ Die Ohm'sche Dämpfung drückt sich dadurch aus, dass die Single Line Performance nicht mehr 100 Mbit/s ist, wie sie nach vielleicht 100m Leitungslänge noch wäre, sondern nur noch etwas über 70 Mbit/s, bedingt durch die 500m Leitungslänge für alle Doppeladern.

Abbildung 2-8: Bandbreitengewinn durch Vectoring auf den einzelnen Doppeladern eines Anschlusskabels bei 500m Länge

- Das Kabel bedient die Kunden gleichermaßen und kann voll ausgelastet werden

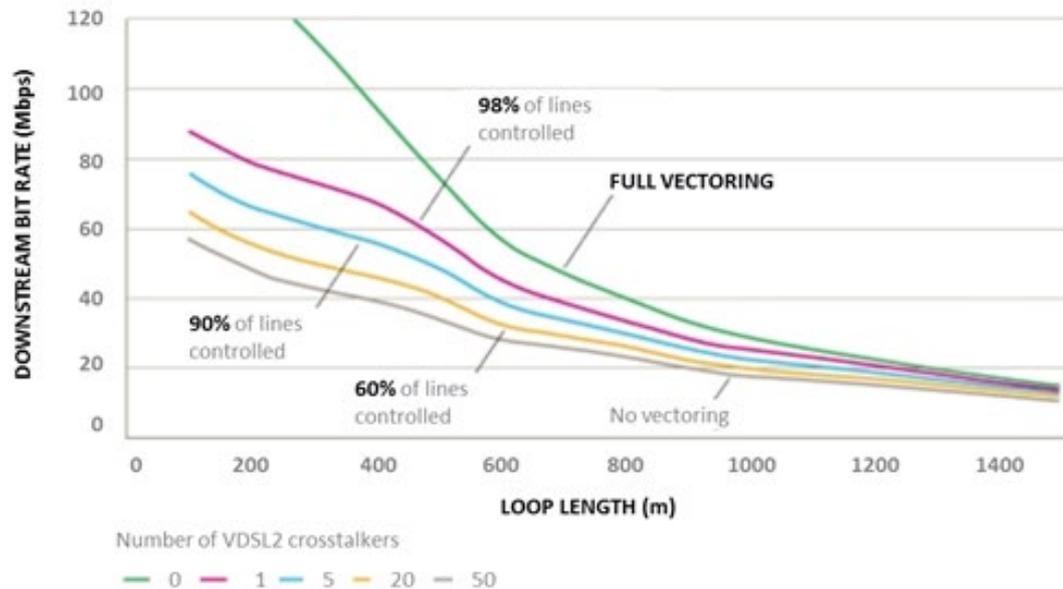


Quelle: Nokia (2011)³²

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 die Übertragungsleistung weiterhin beeinträchtigen (vgl. Abbildung 2-9). Bereits 1 Störer (s. violette Linie) führt zu einem signifikanten Einbruch der Übertragungskapazität.

³² Frank van der Putten, Alcatel Lucent, Answer to BIPT 18.02.2011; Alcatel ist heute ein Teil von Nokia.

Abbildung 2-9: Bandbreitendegression durch nicht ins Vectoring eingebundene Anschlussleitungen



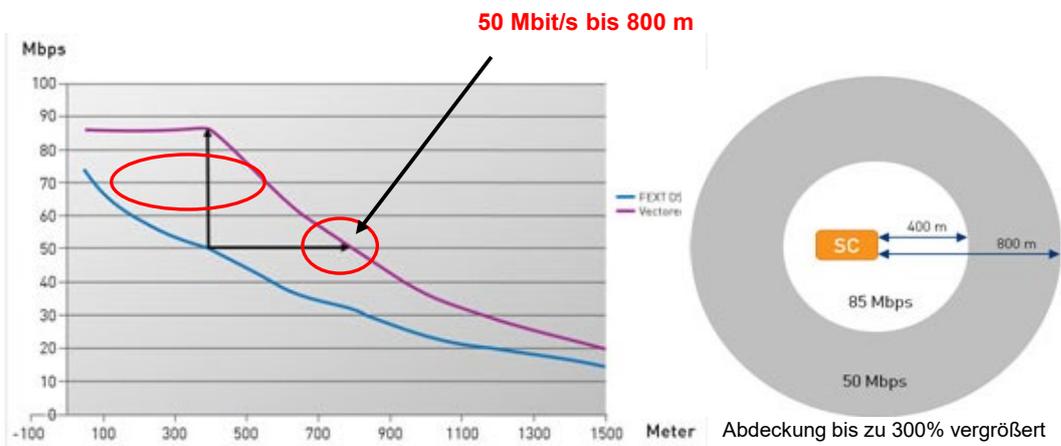
Quelle: Nokia (2012)

Im Grundsatz ist mit Vectoring die Single Line Performance einer ungestörten Übertragung weitgehend wiederherstellbar (vgl. auch Tabelle 2-1). 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, aber nicht grundsätzlich abstellen, weil es am Design des zugrundeliegenden Übertragungsverfahrens nichts ändert.

Abbildung 2-10: Reichweitenverlängerung durch Vectoring

Über größere Entfernungen höhere Bandbreite



Quelle: WIK/ ECI Telecom (2012)

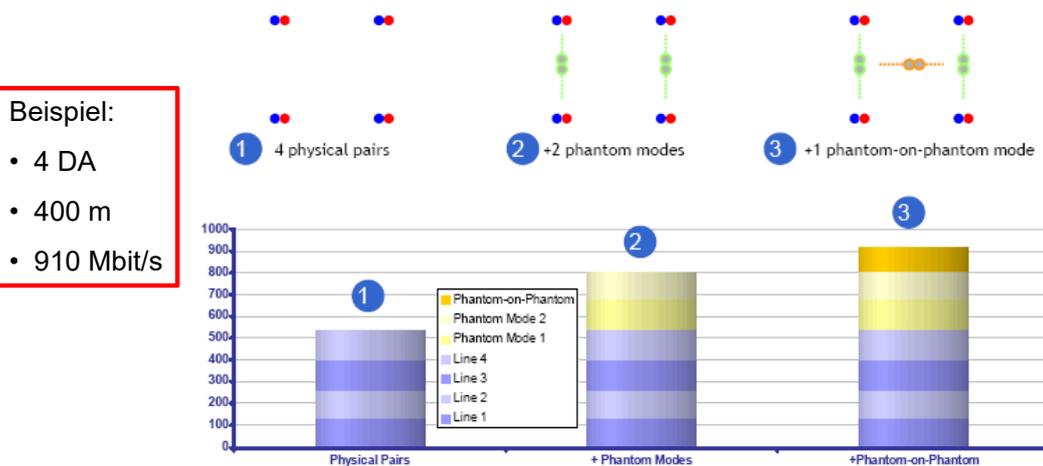
Vectoring wirkt insbesondere auch Reichweiten verlängernd für die hohen Bandbreiten, wie dies Abbildung 2-10 zeigt. Dort ergibt sich eine Verdoppelung der Reichweite für eine Bandbreite von mehr als 50 Mbit/s, aber eine Vergrößerung der abgedeckten Fläche und typischerweise auch eine Vergrößerung der erreichbaren Haushalte von ca. 300%.

Zwei Ergänzungen zur Vergrößerung der Bandbreite sollen hier noch angeführt werden, die insbesondere im Kontext mit Vectoring ihre Bedeutung haben, die allerdings bisher im Markt keine besondere (ergänzende) Verbreitung gefunden haben. Es ist dies zum ersten **Bonding**, bei dem zwei Doppeladern zum selben Endkunden parallel genutzt werden und so die Bandbreite nahezu verdoppelt wird. Auch hier hilft Vectoring, das Nebensprechen zu eliminieren. Das zweite Verfahren 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 Bandbreite im Beispiel aus Abbildung 2-11 beträgt im Ergebnis 900 Mbit/s über 400m bei 4 Doppeladern.

Abbildung 2-11: 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 (plus Phantom on Phantom)
- 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 virtuellen wie der parallelen physischen Kanäle (Doppeladern) 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.

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 DSLAMs kollozieren und die notwendigen Korrekturinformationen aus den eigenen Doppeladern mit den/dem anderen Betreiber(n) austauschen³³, 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

³³ Ein solches Verfahren wird auch Node Level Vectoring genannt.

das Verbindungskabel auswirken bzgl. des Übertragungsmediums und dem maximalem Abstand der DSLAMs zueinander³⁴.

Es gibt unterschiedliche Ansätze für den regulatorischen Umgang mit der Anforderung nach exklusivem Zugang nur eines Netzbetreibers zu den Doppeladern eines Anschlusskabels bzw. zum DSLAM Standort z.B. am KVz. Dies auszuführen würde den Rahmen der Studie sprengen. Vielmehr verweisen wir auf einschlägige Veröffentlichungen.³⁵ Für den Fall, dass einem Netzbetreiber Exklusivität für den Ausbau eines KVz-Standortes zugesprochen wird, wird diesem im Rahmen des Geltungsbereiches der TK-Regulierungen der Europäischen Union die Bereitstellung eines Virtuellen Entbündelten Teilnehmerzugangs³⁶ auferlegt, der den Produktgestaltungsmöglichkeiten und -freiheiten für den Zugangsnachfrager möglichst nahe kommt³⁷. Hierbei ergeben sich viele technische und betriebliche Restriktionen, denn der Zugangsnachfrager ist immer auf die Qualität und die Produkteigenschaften des Vorleistungsproduktes angewiesen. Auch diese Aspekte würden den Rahmen dieser Studie sprengen³⁸.

Abbildung 2-12 (identisch mit Abbildung 2-5) zeigt mit der blauen Kurve den Frequenzverlauf für VDSL2 Profile 35b ohne Vectoring. Sie zeigt damit auch, wie speziell beim Profil 35b höhere Datenraten erreicht werden können, ohne das Vectoring Verfahren einsetzen zu müssen – mit Vectoring sind die Bandbreiten jedoch noch höher. Insofern muss die erzielbare Bandbreite gegen den Verzicht auf Wettbewerb abgewogen werden.

³⁴ Es wird von maximalen Abständen von weniger als 2m gesprochen. Das ist für eine Outdoor Kollokation zu gering.

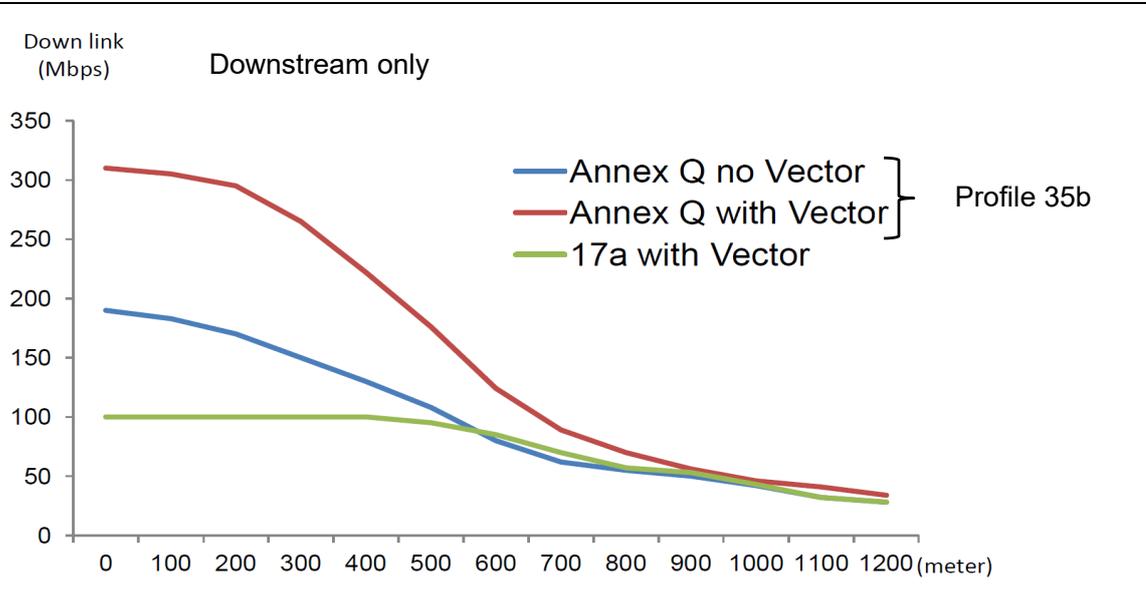
³⁵ Plückebaum et al. (2014).

³⁶ VULA, Virtual Unbundled Local Access.

³⁷ EU-Märkteempfehlung 2014 und zugehöriges Staff Working Dokument.

³⁸ Vgl. Kroon et al. (2017).

Abbildung 2-12: Bandbreiten von VDSL Profil 17a und 35b im Vergleich (Annex Q = Profil 35b)



Quelle: Huawei 2015

Die wesentlichen Vorteile und Nachteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Abbildung 2-13: Vorteile von Vectoring und sein Nachteil

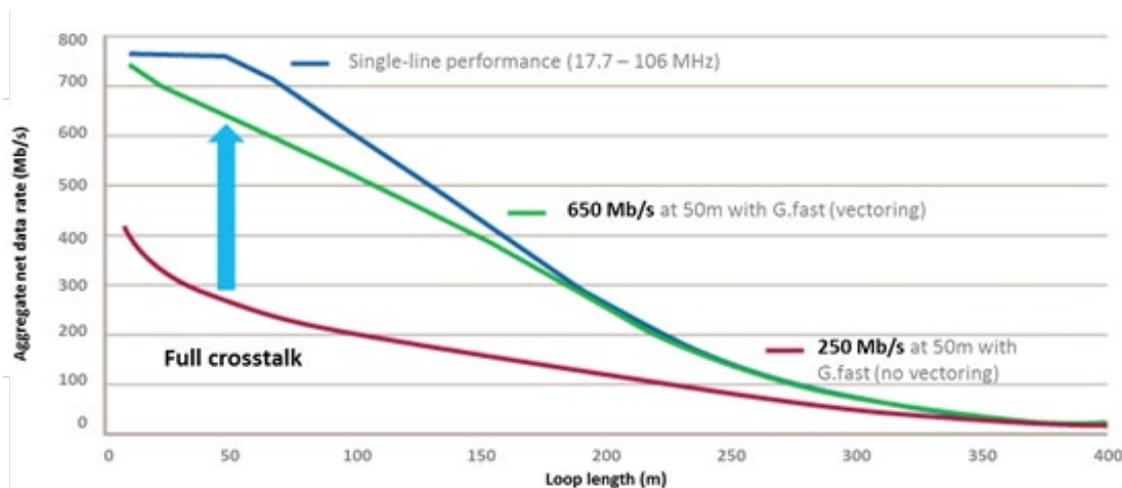
VDSL	VDSL Vectoring erhöht die Bandbreite je Kunde und verringert den Abstand Up-/ Downstream Es erfüllt die DAE Targets (30 Mbit/s)
VDSL	Vectoring erlaubt, die Anschlusskabel höher auszulasten (bis 100% Beschaltungsgrad bei voller Bandbreite)
VDSL	VDSL Vectoring erlaubt annähernd gleiche Dienste für Kunden gleichen Abstandes vom KVz
VDSL	Vectoring verlängert die Reichweite der Anschlussleitungen, z.B. für 50 Mbit/s Dadurch deutlich überproportionales Wachstum der erreichbaren Kunden (πr^2)
(VDSL-Signale*, die nicht ins Vectoring einbezogen werden, verringern die Vorteile signifikant,	
	Vectoring verlangt, dass alle Doppeladern mit demselben DSLAM eines einzigen Betreibers verbunden werden)

Quelle: DAE: Digitale Agenda der EU

2.3.3 G.fast

G.fast³⁹ 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. Seine Übertragungsbandbreite kommt in der Summe von Up- und Downstream auf ca. 1 Gbit/s. Die Aufteilung der Übertragungsrichtungen ist je DPU⁴⁰ frei einstellbar. So kann ein Betreiber sukzessive der zunehmend symmetrischeren Bandbreitennachfrage nachkommen.

Abbildung 2-14: Vectoring Gewinn bei G.fast



Quelle: Nokia (2013)

Abbildung 2-14 belegt, dass einerseits zur Erzielung hoher Bandbreiten Vectoring erforderlich ist, andererseits der Vectoring Gewinn nur über kurze Reichweiten hält und schon bei 350m auf das Niveau von VDSL Vectoring abgesunken ist. Es handelt sich daher um eine typische FTTS- / FTTB-Technologie, also kurz vor oder in den Kundengebäuden einsetzbar. 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.

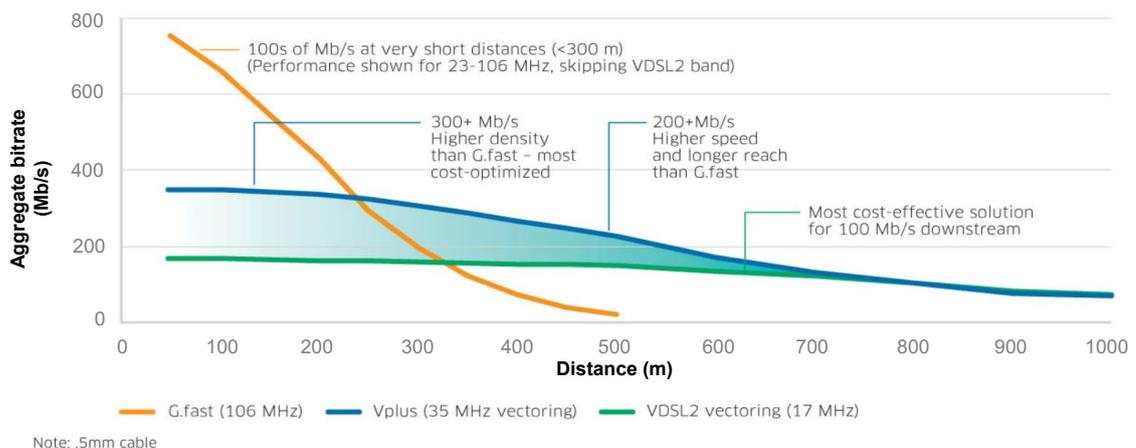
In realen FTTB Installationen kann G.fast bei einer Inhausverkabelung aus sternförmig geführten, geschirmten Kat 6 oder höherwertigen Doppeladern ohne Vectoring auskommen, weil es bei dieser Topologie und Kabeltechnik so gut wie kein Nebensprechen gibt. Eine solche Verkabelung findet man in modernen 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

³⁹ ITU-T G.7900, 2014.

⁴⁰ Distribution Point Unit.

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 die Zahl korrigierbarer Ports. Diese Restriktion hat praktisch keine Auswirkung, weil die Größe der DPU gleichfalls auf maximal 48 Ports beschränkt ist.

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



Quelle: Nokia (2014) ⁴¹

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 einschließlich an Telefonmasten oder in bereits existierenden Schächten vor den Kundengebäuden untergebracht. Nach Pilotversuchen in Bibern hat beispielsweise die Swisscom ab Oktober 2016 den ersten kommerziellen FTTS Ausbau mit G.fast umgesetzt⁴². 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. In den U.K. gab es in größerem Umfang Pilotinstallationen an kleineren KVz-Standorten.

⁴¹ <https://insight.nokia.com/vplus-gets-more-out-vdsl2-vectoring>.

⁴² Swisscom, "Swisscom to be the first European telecommunications service provider to launch G.fast", 18 October 2016, <https://www.swisscom.ch/en/about/medien/press-releases/2016/10/20161018-MM-Gfast.html>.

2.3.4 XG.fast

Für den nächsten Erweiterungsschritt XG.fast wurde der Frequenzbereich bis 500 MHz erweitert. Dem folgend soll die Übertragungsbandbreite 10 Gbit/s (Summe) erreichen. Diese kann nur bei Übertragungslängen von maximal 50 bis 100m 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 Inhausnetzes dieses erfordern (s. G.fast, Abschnitt 2.3.3).

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die auf dem Markt befindlichen kupferdoppeladerbasierten Teilnehmeranschlussstechniken für die breitbandige Übertragung.

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

	Frequenz	Max. DS Rate	Max. US Rate	Standardisiert in Jahr
ADSL	1.1 MHz	8 Mbit/s	1 Mbit/s	1999
ADSL2	2.2 MHz	12 Mbit/s	2 Mbit/s	2002
ADSL2+	2.2 MHz	25 Mbit/s	1 Mbit/s	2003
VDSL	12 MHz	55 Mbit/s	19.2 Mbit/s	2004
VDSL2	8.8 – 30 MHz	150 Mbit/s (aggregiert DS + US)		2006
VDSL2 (17a Vectoring)	17.7 MHz	150 Mbit/s (aggregiert DS + US)		2010
VDSL (35b Vectoring)	35.3 MHz	350 Mbit/s (aggregiert DS + US)		2015
G.fast 106 MHz	106 MHz	1 Gbit/s		2014
G.fast 212 MHz	212 MHz	2 Gbit/s		2016
XG.fast	500 MHz	10 Gbit/s		2020

Quelle: Kroon et al. (2017), WIK

Auf weitere sich in der Entwicklung befindenden Übertragungstechnologien für die Übertragung über Kupferdoppeladern geben wir nachfolgend einen kurzen Ausblick. Diese können in Ländern, in denen FTTs oder FTTB mit Nutzung der bestehenden Inhausverkabelung auf adäquater Bandbreite interagieren sollen, eine Relevanz haben:

Die auf XG.fast folgende Technologie ist MGfast, die im Bereich bis 424 oder bis 848 MHz voll Duplex (mit Echounterdrückung) operiert und die über ungeschirmte Doppeladern oder Viererbündel betrieben werden kann, aber auch auf geschirmten Doppeladern und mit diesen als Viererbündel übertragen werden kann. Auch Koaxialkabel können als Übertragungsmedium genutzt werden. Auf Übertragungsmedien, bei denen sich die einzelnen

Kabel gegenseitig durch Nebensprechen stören können, kommt Vectoring zum Einsatz. Es sind Übertragungsgeschwindigkeiten von 5 bzw. 10 Gbit/s erzielbar. Die Reichweite derartiger Verbindungen ist jedoch kurz und hängt stark vom Übertragungsmedium ab.⁴³

Auf MGfast folgt Terrabit -DSL (TDSL), bei dem entweder im Phantoming Mode eine Vielzahl von Doppeladern (ca. 100) mit zwischen Ihnen aufgespannten Phantoming Kanälen in denselben Frequenzbereichen wie auf den Leitern zusätzliche Übertragungskapazität generieren oder eine elektrisch geführte hochfrequente elektromagnetische Welle im Bereich von 30 GHz bis 1 THz entlang der Oberfläche von Leitern, sozusagen im umhüllenden Kunststoff, geführt wird. Der erste Ansatz (Phantoming) disqualifiziert sich für den Massenmarkt durch das Fehlen entsprechend vieladriger Kabel bis in die Wohnungen hinein. Der zweite Ansatz (elektrisch geführte hochfrequente Wellen außen auf dem Leiter) soll über eine Doppelader mit Vectoring 10 Gbit/s über 500m, 100 Gbit/s bis zu 300m und 1 Tbit/s über 100m übertragen können.⁴⁴ Bisher ist eine Einsatzreife nicht in Sicht. Probleme können sich beispielsweise bei der Überbrückung der Welle über Verteilfelder, Patchkabel und andere Verbindungen ergeben.

2.3.5 FTTH PtP

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. 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 – 100 Gbit/s, 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 DWDM⁴⁵: bis zu Faktor 160, bei 160 Wellenlängen). Der Einsatz separater Wellenlängen-Multiplexer ist jedoch eine nur theoretische Option für die Zukunft, denn derzeit sind die Kapazitäten mit einer Bandbreite von 100 Gbit/s symmetrisch je Teilnehmeranschluss noch längerfristig mehr als ausreichend (vgl. Abschnitt 2.1, Abbildung 2-3).

⁴³ MGfast: Multi-gigabit fast access to subscriber terminals, ITU-T G.7010 und 7011, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9711-202104-I/en>.

⁴⁴ <https://assia-inc.com/wp-content/uploads/2017/05/TDSL-presentation.pdf>.

⁴⁵ Dense Wave Division Multiplex.

Der große Vorteil einer Ethernet Anschlussnetz-Infrastruktur ist ihre Flexibilität im Bedienen aller Endkunden jeweils individuell mit der Bandbreite 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 und in der Skalierung nach unten oder 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. Die Verteilung des Endkundenbedarfs in der Fläche richtet sich aber nicht nach dem Angebot von Infrastrukturen, sondern kann durch ein begrenztes Angebot eher behindert und geschäftliche Potentiale volkswirtschaftlicher Natur können behindert, in ihrer Entwicklung und Kreativität zeitlich verzögert oder ganz unterdrückt werden.

2.3.6 FTTH PtMP

Bei einer PtMP Glasfaserstruktur werden die Endteilnehmer jeweils mit einer Glasfaser (oder wie bei PtP alternativ mit einem Glasfaserpaar) angeschlossen. Diese Fasern werden jedoch auf dem Weg zum ODF in der Schaltzentrale über ein Splitter genanntes passives optisches Element auf eine Faser (ggf. auf ein Faserpaar) zusammengeführt so, dass das Licht von der Zentrale auf alle angeschlossenen Fasern gleichermaßen aufgeteilt wird bzw. von den Endteilnehmern kommend auf die einzelne, konzentrierende und weiterführende Faser geführt wird und diese beleuchtet (vgl. Abbildung 2-2). Diese konzentrierende Faser wird auch Feeder Faser genannt. 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. Hierzu wird in der Schaltzentrale am ODF ein sogenannter OLT (Optical Line Terminator) aufgebaut, bei jedem Endkunden wird eine ONU eingefügt. 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.

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

hat sprechen wir von der x.PON-Familie.⁴⁶ Derzeit sind die folgenden Technologien marktverfügbar (Tabelle 2-3):

Tabelle 2-4: 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

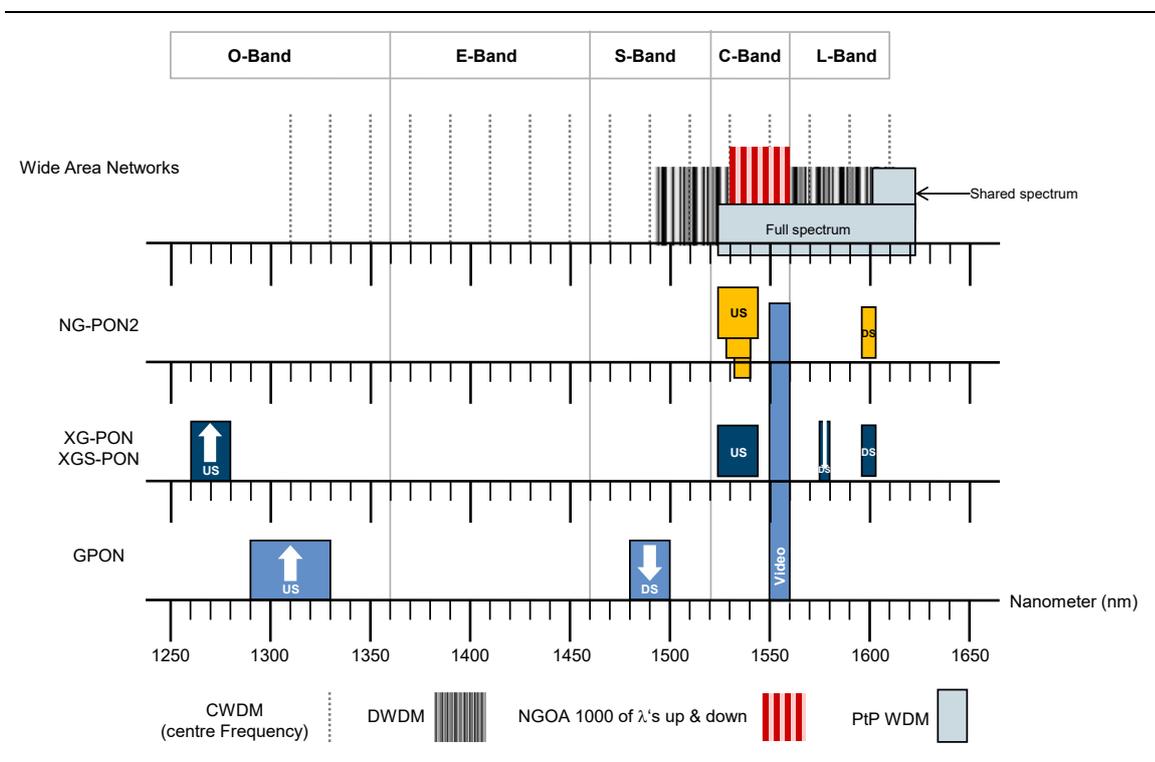
Die Technologien unterscheiden sich hinsichtlich der Bandbreiten, mit denen die Daten übertragen werden, und hinsichtlich des maximal zulässigen Splitting-Faktors. Dieser gibt an, wie viele Endteilnehmer über Splitter maximal auf eine Feederfaser aufgeschaltet werden dürfen. Bestimmend dafür ist die 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 Dämpfungsplan⁴⁷ 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. 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 Bandbreite von 10 Gbit/s in beide Übertragungsrichtungen und unterscheidet sich dadurch von den Vorgängersystemen GPON und XG.PON. Die Nachfolgegeneration NG-PON2 vervielfacht die XGS.PON Technik in der Übertragung desselben Prinzips auf mehrere separaten Wellenlängen (farbiges Licht, „Farben“). Derzeit sind bis zu 8 Wellenlängen einsetzbar, die alle jeweils 10 Gbit/s symmetrisch übertragen können. In der Entwicklung befinden sich 25 Gbit/s und 50 Gbit/s Übertragungssysteme.

⁴⁶ Viele sprechen auch verkürzt nur von „PON“ und grenzen damit PtoP Ethernet Architekturen fälschlicherweise aus. Es kommt immer wieder zu Missverständnissen.

⁴⁷ Man könnte auch laienhaft von einem Lichtstärkeplan sprechen.

Abbildung 2-16: Frequenzplan der verschiedenen optischen Übertragungsverfahren im Anschlussnetz und im Weitverkehrsnetz



Quelle: WIK

Wesentliche Essenz aus Abbildung 2-16 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 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 vielen Ländern die Regel ist. Für das Upgrade der Bandbreiten von GPON über XG.PON oder XGS.PON auf NG-PON2 müssen immer die OLT und ONU der Kunden erneuert werden, die von der höheren Bandbreite profitieren wollen, weil sich die Bandbreiten/Kapazitäten und dafür genutzten Wellenlängen ändern (Abbildung 2-17), (vgl. auch Abschnitt 2.5.4).

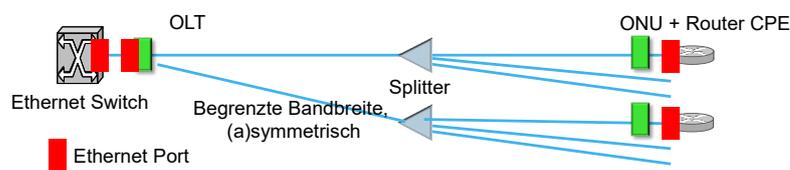
Abbildung 2-17: Vom Upgrade betroffene Systeme bei x.PON (und Ethernet PtP)

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



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

Bemerkenswert ist der mit „Video“ gekennzeichnete Bereich bei 1550 nm, der für die downstream-Übertragung von Kabel-TV vorgesehen ist. D.h., auch mit den PtP und PtMP Übertragungsverfahren kann ergänzend ein TV-Signal übertragen werden. Dies ist jedoch nicht für die Rückrichtung und damit nicht für DOCSIS geeignet. Das macht aber auch wenig Sinn, wenn gleichzeitig auf separaten Wellenlängen bidirektionale Breitbandkommunikation mit Internetzugang angeboten wird.

NG-PON2 Systeme sind im Prinzip bzgl. ihrer Wellenlängen in der Schaltzentrale entbündelbar, indem dort über Coexistence Elemente die OLTs weiterer Netzbetreiber eingekoppelt werden können, die dann eine oder mehrere der zur Verfügung stehenden Wellenlängen für den Zugang zu ihren eigenen Kunden nutzen.

Bei NG-PON2 sind Kapazitätserweiterungen von bis zu 40 Gbit/s je Wellenlänge angekündigt.⁴⁸

Mit den sich in der Entwicklung befindenden MW-PON Netzen tun sich Kapazitätserhöhungen auf. Es werden mehr Wellenlängen als bei NG-PON2 nutzbar. Die ONUs können mit dynamisch getunten Laserinterfaces ausgerüstet werden, die sich auf die verschiedenen Wellenlängen der OLT einstellen können. Jede Wellenlänge kann 25 Gbit/s oder 50 Gbit/s im geteilten Kanal übertragen, symmetrisch oder asymmetrisch, mit dem Faktor 0,5 oder 0,25 vom Downlink für den Uplink.⁴⁹ Die Vielzahl der Wellenlängen bleibt auch bei dieser Netzarchitektur auf Wellenlängenebene entbündelbar. Die neuen technischen

⁴⁸ ITU-T G.989.1, Amendment 1, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201508-!!Amd1/en>.

⁴⁹ MW-PON steht für Multi Wavelength PON. Vgl. ITU-T G.9802, G9804.1 und G9804.3, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9802>, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.1/en>, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.3-202109-1>.

Features erhöhen die Komplexität des Frequenzmanagements im optischen Verteilnetz (ODN: Optical Distribution Network) und verteuern insbesondere die optischen Einheiten an den ONU.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der x.PON Systeme sei daran erinnert, dass die aufgeführte Bandbreite allen Teilnehmern am OLT gemeinsam zur Verfügung steht, also geteilt werden muss (vgl. Abschnitt 2.5.1). Zudem wirkt sich der Splittinggrad auf das Optische Budget der Anschlussleitungen aus und damit besteht ein direkter Zusammenhang mit der möglichen Ausdehnung des Netzes.⁵⁰ Um die Reichweite der Anschlussleitungen beizubehalten und ein bereits errichtetes Netz weiterhin nutzen zu können hat der MW-PON Standard reach-extender eingeführt. Das sind aktive Verstärker im Feld, eine Abweichung von dem eigentlichen PON (Passives Optische Netz).

2.3.7 Mehrfaseransätze und Einfaser System

Mit seinem Mehrfaserangebot der Swisscom und anderer Investoren (meist Elektrizitätswerke der großen Kommunen) in der Schweiz oder in anderen Regionen Europas, die z.B. aus Förderauflagen heraus mit mehreren Fasern pro Haushalt versorgt werden, können Endkunden von mehreren Anbietern gleichzeitig parallel versorgt werden, so sie es wünschen. Bei paralleler Nutzung mehrerer Anschlüsse zahlt der Kunde jedoch auch mehrere Anschlüsse. Eine signifikante Nachfrage nach gleichzeitiger Kontrahierung mehrerer Anschlüsse haben wir bisher jedoch nicht beobachtet, auch deshalb nicht, weil die meisten Dienste und Inhalte von jedem Internetanschluss aus erreicht werden können.

Der Ausbau der Endkundenanschlüsse ist der kapitalintensivste Teil des Ausbaus (vgl. Abbildung 2-4, Drop). Ein wenig Geld kann man einsparen, wenn der Mehrfaserausbau nur von den Endkunden bis zu den Verteilerpunkten (cabinets) erfolgt, im Feederbereich also entfällt. Für einen wettbewerblichen Zugang auf das Mehrfaserangebot am Verzweiger können sich die Zugangsnachfrager dann nicht mehr in den Schaltzentralen des Anschlussnetzbetreibers kollozieren, sondern müssen mit eigener oder angemieteter Glasfaserinfrastruktur die Verteilpunkte erschließen, um sich dort zu kollozieren. Das verringert die bei der Kollokation an der Schaltzentrale erzielbaren Skaleneffekte. Für 10% Marktanteil in einem Verzweigerbereich sind die Kosten einer eigenen, separaten Feeder Infrastruktur deutlich höher gegenüber dem Fall, dass diese Feeder-Infrastruktur gemeinsam genutzt wird. Kosteneffizienter ist daher die gemeinsame Nutzung des Feederkabels, wenn nicht in der Mehrfaservariante, dann als einzelne Dark Fiber, die nur der den Endkunden kontrahierende Betreiber in entbündelter Form nutzen kann.

⁵⁰ Je höher der verbaute Splittinggrad, desto höher die Dämpfung und desto geringer die Reichweite. Dies gilt auch, wenn die Splitter nicht voll beschaltet sind, weil sich der Downstream Lichtstrahl auf alle Ports gleichermaßen aufteilt (power splitting).

Im Verzweigerbereich kann man beide Glasfasertopologien verwenden, PtP und PtMP. Der größte Einspareffekt im Glasfaserausbau wäre der Verzicht auf den Ausbau eines Mehrfasersmodells im Verzweigerbereich vom Verzweigerpunkt zum Endkunden. Dies ist das Netzsegment mit den höchsten Investitionen. Mit der geringen Wahrscheinlichkeit, dass mehrere (Glasfaser-)Anschlüsse von einem Endkunden bezogen werden ist es volkswirtschaftlich wenig sinnvoll, wenn alle Anschlüsse mit einem Mehrfaseransatz ausgebaut werden. Anstelle dessen würde eine Einfaserversorgung mit einem diskriminierungsfreien Regulierungs- und/oder kontrollfähigen Selbstverpflichtungsregime ökonomisch deutlich mehr Sinn machen. Der verhältnismäßig teure Mehrfaserausbau im Verzweigerbereich würde entfallen, der Wettbewerb würde durch Entbündelung sichergestellt und der Mehrfaseransatz im Feedersegment wären gleichfalls überflüssig. Ggf. kann man je Gebäude eine bestimmte Zahl Reservefasern vorsehen, die die wenigen Nachfrager nach parallelen Anschlüssen befriedigen können.

Bei einem Einfaser PtMP Ansatz mit Splittern am Verzweigerpunkt ist eine physische Entbündelung in der Schaltzentrale nicht möglich. Ein Wholesale Nachfrager kann in diesem Fall nur einen Bitstromzugang erhalten, maximal zu den technischen Möglichkeiten des zugrundeliegenden x.PON Systems. Der Wholesale-Anbieter bestimmt das Niveau des Breitbandangebotes und seiner Qualität. Kein Mitbewerber kann Besseres anbieten. Der Markt ist indifferent. Eine PtMP Einfaserstruktur ist immer technologieabhängig – von der PON-Technologie und deren weiteren Entwicklung. Upgrades verlangen i.d.R. den Austausch der PON-Übertragungskomponenten in der Zentrale und bei jedem Endkunden.

Anders ist dies bei einer Einfaser PtP Glasfasertopologie. Im entbündelten Zugang zur Faser kann jeder wettbewerbliche Nachfrager seine individuelle Übertragungstechnik anschalten und hat einen sehr hohen Produktgestaltungsspielraum. Er kann auch jede x.PON Technologie anschalten. Am effizientesten erfolgt dies in diesem Fall in der Schaltzentrale, weil dann Platzbedarf und Arbeiten in den dezentralen Verzweigern für den Aufbau von Splittern entfallen. Um dies zu erreichen muss der Glasfaserzugang diskriminierungsfrei reguliert oder eine entsprechende justiziable Selbstverpflichtung ausgesprochen werden.

2.4 Kabelnetztechnologien

Die grundsätzlichen Charakteristika von Koaxialkabeln haben wir bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert. Wesentlicher Unterschied zu den Kupferkabeln ist, dass es sich bei ihnen besonders im Teilnehmeranschluss um ein Shared Medium handelt. 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. Mit DOCSIS⁵¹ wurden die Radio- und TV Frequenzbereiche um gerichtet nutzbare Frequenzen für die bidirektionale Kommunikation

⁵¹ Data Over Cable Service Interface Specification, beginnend mit Release 1.0.

(Up- und Downstream) erweitert. Auch für diese Frequenzbereiche gilt, dass alle in einem Koaxialkabelsegment angeschlossenen Teilnehmer gemeinsam auf das Übertragungsmedium zugreifen und sich die Bandbreite teilen müssen. Hierfür gibt es für jedes derartige Segment (Koaxialkabelbaum) ein zentrales Koordinationssystem, das den Zugriff der einzelnen Parteien grundsätzlich regelt und die ihr für eine bestimmte Zeit zugewiesene Kapazität und Qualität im Upstream zuweist und auch für den Downstream die Teilnehmer adressiert und den Datenverkehr koordiniert und qualitativ kontrolliert. Dieses System, das CMTS⁵², kommuniziert dazu mit den bei den Teilnehmern das Koaxialnetz abschließenden Kabel-Modems, die wiederum die TV-Signale auf Koaxialports und den Telekommunikationsverkehr (Internet und Telefonie) auf entsprechenden Schnittstellen⁵³ zugänglich machen. In dieser Hinsicht sind CMTS und Kabel-Modems vergleichbar mit den OLT und ONU der x.PON Glasfasertechnologie (vgl. Abschnitt 2.3.6).

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.

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

Eine 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 (klassisches HFC-Netz⁵⁴), 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

⁵² Cable Modem Termination System.

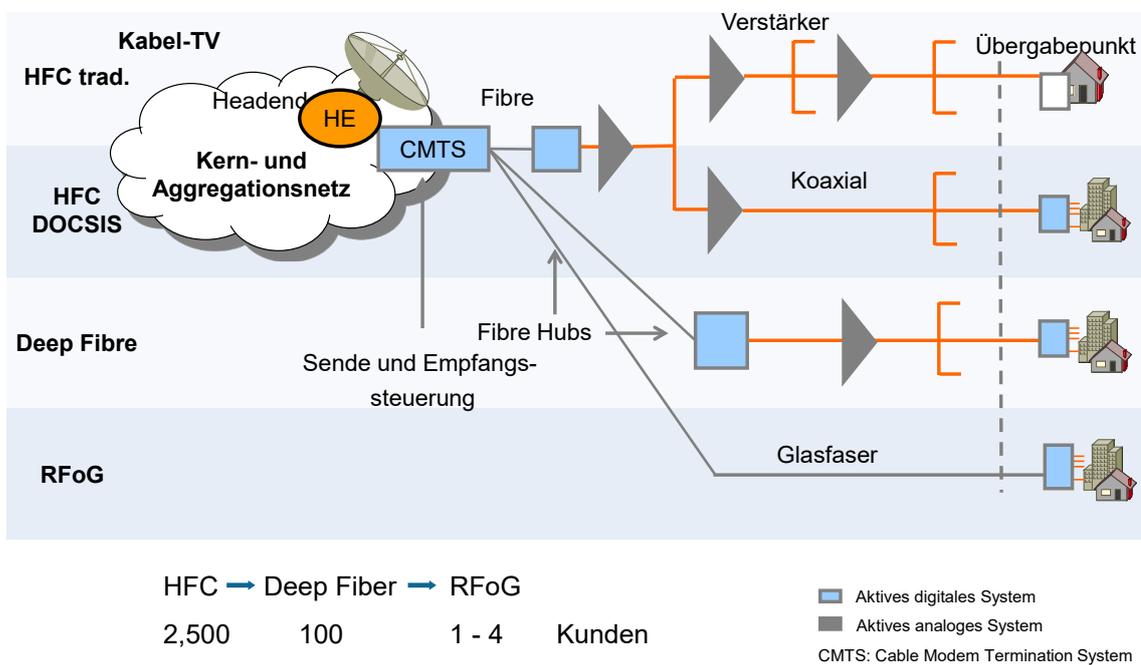
⁵³ Heute typischerweise Ethernet und VoIP, ältere Modems unterstützen auch direkt analoge PSTN- und ISDN-Schnittstellen für die Telefonie. Oft wird heute auch ein WLAN Zugang und ggf. DECT Schnurlos-Telefonie angeboten.

⁵⁴ Hybrid Fibre Coax.

sie dann von kleinen Fibre Nodes abgeschlossen wird, spricht man auch von einer RFoG⁵⁵-Topologie (vgl. Abbildung 2-18). 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 nachfragebezogen die Kapazität erweitert werden kann und jedenfalls keine Umbaumaßnahmen für das gesamte Netz innerhalb kurzer Zeit erforderlich werden. ⁵⁶

Abbildung 2-18:Kabel TV Netz und Fibre Node Splitting



Quelle: WIK

Die folgenden Abschnitte beschreiben daher, ausgehend von der heute typischerweise in Europa ausgebauten DOCSIS 3.0 und 3.1 Architektur, weitergehende kapazitätserweiternde Maßnahmen im Frequenz- und damit Bandbreitenbereich auf elektronischer Seite, ohne unmittelbar in Tiefbauinvestitionen gehen zu müssen.

2.4.1 DOCSIS 3.0

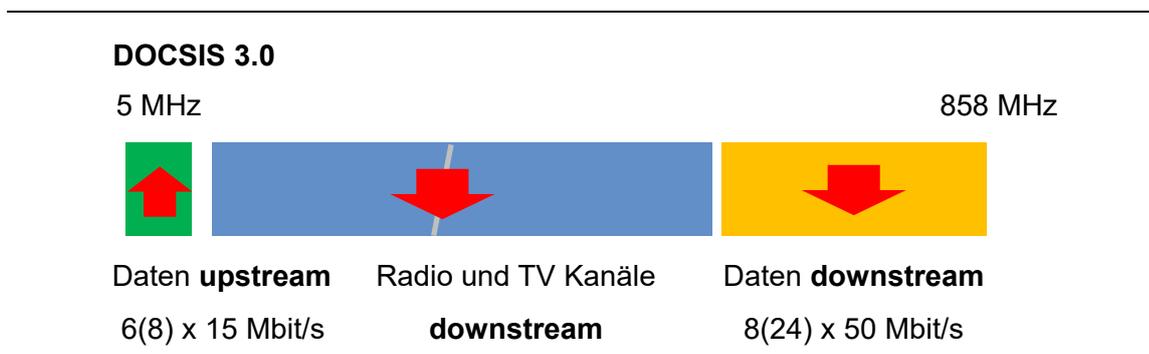
DOCSIS 3.0 ist heute in Mitteleuropa nur noch in einem geringeren Umfang im Einsatz. DOCSIS 3.0 sieht den Frequenzbereich von 5 bis ca. 858 MHz für die Übertragung von Daten (incl. Telefonie) sowie Radio- und TV-Signalen vor. Typischerweise ist der untere

⁵⁵ Radio Frequency over Glas.

⁵⁶ Vgl. auch Jay et al. (2013), Plückebaum et al. (2019).

Frequenzbereich für die (individuelle) Upstream Kommunikation vorgesehen. Dies macht den Bau entsprechend gerichteter Verstärker einfacher, als diese für einen irgendwo gelegenen Kanal im Mittelfeld oder am oberen Rand des Frequenzspektrums auszuliegen. Der Downstream-Verstärker muss dann für den darüber gelegenen zusammenhängenden Downstream-Bereich ausgelegt werden. Dies macht ein Verschieben der Grenze zwischen Radio/ TV- und dem Datenbereich zu einem späteren Zeitpunkt einfacher und zu niedrigeren Kosten gestaltbar. Im unteren Upstream-Bereich sind bis zu 8 Frequenzblöcke für 15 Mbit/s, insgesamt also 120 Mbit/s vorgesehen. In der anderen Richtung kommen wir für die Datenkommunikation downstream auf maximal 24 Frequenzblöcke für je 50 Mbit/s, d.h. auf insgesamt 1,2 Gbit/s (vgl. Abbildung 2-19). 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/ brachliegt, oder für andere, zusätzliche TV-Kanäle genutzt werden kann.

Abbildung 2-19: 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. So spielt also die Marktstrategie im Auftritt der Kabel-TV Welt auch eine Rolle bei der Kapazität oder Bandbreite der Datenkanäle.

Tabelle 2-5: 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

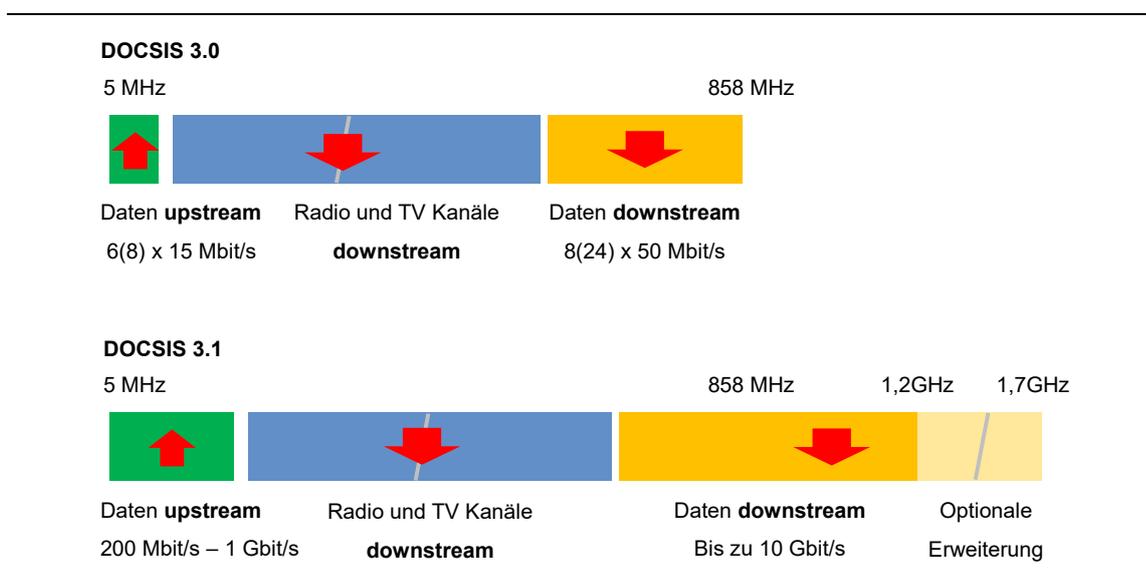
Quelle: CableLabs (<https://www.cablelabs.com/full-duplex-docsis/>)

2.4.2 DOCSIS 3.1

DOCSIS 3.1 ist die heute in Mitteleuropa überwiegend verwendete Koaxialkabel-Technologie. Bei DOCSIS 3.1, das 2013 standardisiert wurde, 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 Gbit/s im mit anderen geteilten Kanal möglich und Downstream 10 Gbit/s. Sofern die Verstärker im Feld die neuen Frequenzbereiche für ihre Richtungen noch nicht unterstützen, müssen sie überall dort, wo 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 wurde die Aufrüstung längerfristig vorbereitet.

Abbildung 2-20 zeigt eine typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 im Vergleich.

Abbildung 2-20: Typische Frequenzbelegung von DOCSIS 3.0 und 3.1 im Vergleich



Quelle: WIK

2.4.3 DOCSIS 4.0

Für den nächsten Entwicklungsschritt wurde von den Cable Labs und nahezu parallel von Nokia's Bell Labs im Jahr 2017 angekündigt, DOCSIS 3.1 um die Möglichkeit zu erweitern, über den vollen Frequenzbereich auch upstream kommunizieren zu können.⁵⁷

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, ähnlich den Vectoring-Erweiterungen an den DPU und CPE bei G.fast und XG.fast⁵⁸. Sofern Verstärker noch in 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.

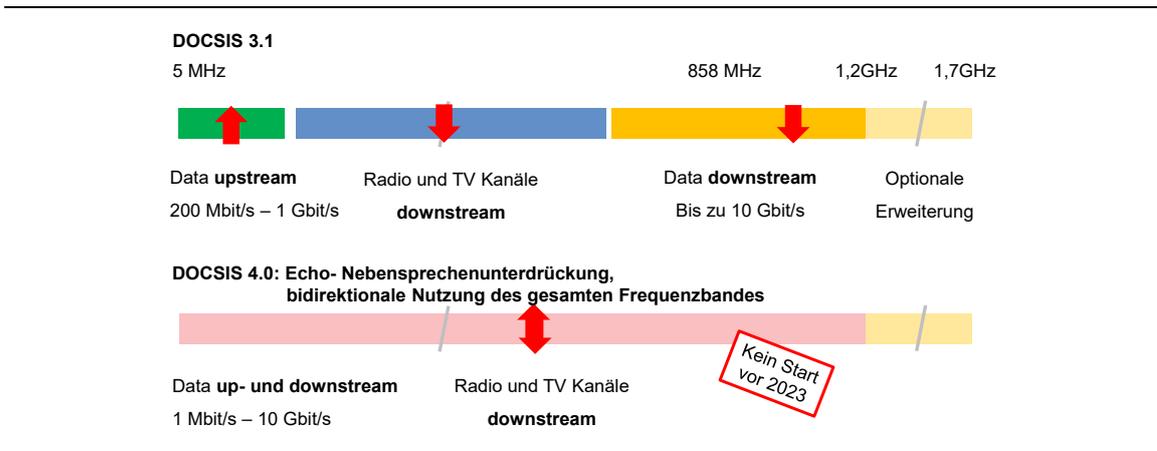
Das Glasfasernetz muss auf eine Deep Fibre oder RFoG Topologie hin erweitert werden. Wieviel zusätzliche Investitionen hierfür erforderlich sind, richtet sich im Wesentlichen danach, wieviel davon schon zuvor für Fibre-Node-Splitting investiert worden ist.⁵⁹

⁵⁷ CableLabs 2017: https://www-res.cablelabs.com/wp-content/uploads/2016/12/28093128/Full_Duplex_DOCSIS.Press_Release.pdf.

⁵⁸ Im Fall von XG.Cable von Nokia.

⁵⁹ Vgl. Plückerbaum et al. (2019).

Abbildung 2-21: Typische Frequenzbelegung bei DOCSIS 3.1 FD/ DOCSIS 4.0



Quelle: WIK

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.

Die Systemhersteller und Standardisierungsgremien haben inzwischen die technischen Spezifikationen abgestimmt und publiziert.⁶⁰ Nokia mit XG-Cable und die Cable Labs mit ihrem weniger konturierten Ansatz für FD haben sich auf einen gemeinsamen, erfolgversprechenden Lösungsweg geeinigt, der unter DOCSIS 4.0 vermarktet wird. Erste Pilotinstallationen sind für 2023 angekündigt⁶¹.

Tabelle 2-5 gibt noch einmal einen Überblick über die breitbandigen Kabel-TV Technologien.

Tabelle 2-6: Übersicht über die wesentlichen Merkmale von DOCSIS 3.0 – 3.1 FD/ DOCSIS 4.0

	DOCSIS 3.0	DOCSIS 3.1	DOCSIS 4.0
Highlights	Grosse Kapazitätserweiterung	Kapazitäts und Effizienzverbesserungen	Symmetrische Datenraten
DS Kapazität	1 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s
US Kapazität	100 Mbit/s	1-2 Gbit/s	10 Gbit/s
Produktiv Datum	2008	2016	Nicht vor 2023

Quelle: WIK

⁶⁰ <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).

⁶¹ 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>.

2.5 Vergleich der Technologien im Festnetz

Das Kabel-TV Netz ist gleichfalls ein Festnetz. Es erlaubt den Wettbewerb im Festnetz zwischen den klassischen Telekommunikationsdiensten von Telefonie, Internet und TV-Angeboten auf zwei unterschiedlichen Infrastrukturen. In diesem Abschnitt werden diese Infrastrukturen und Technologien miteinander verglichen bzgl. ihrer qualitativen Eigenschaften, im Hinblick auf die Auswirkung geteilter Infrastruktur, weiterer qualitativer Aspekte sowie bzgl. ihres Energieverbrauches als Indikator für ihren ökologischen Fußabdruck.

2.5.1 Sharing und Bandbreite

Die Qualität der Anschlussleitung bestimmt wesentlich mit, welche Qualität ein Endteilnehmer erhalten kann. Die Anschlussleitung ist ein letztes Glied in der Telekommunikationskette. Dahinter – vom Netz aus gesehen – liegt noch das Inhausnetz. Auf der anderen Seite der Anschlussleitung liegen noch das Aggregationsnetze und das Kernnetz, die Server, die die Dienste und Inhalte anbieten, und ggf. auch noch Netzübergänge in andere Netze und Länder. Alle tragen zur Qualität der Telekommunikationsdienste bei.

Für das Inhausnetz ist der Endkunde verantwortlich, ggf. auch noch der Gebäudebesitzer bzw. Vermieter. In einigen Ländern wird bei einem Ausbau von FTTH in bestehenden Liegenschaften die Steigzone vom Netzbetreiber übernommen.

Im Aggregations- und Kernnetz ist jeder Netzbetreiber jeweils selbst in der Lage, die Qualität (Bandbreite je Kunde, Delay, Jitter, Latenz und Paketverlustrate) zu bestimmen, soweit er diese Netze selbst betreibt. Wir gehen davon aus, dass jeder Netzbetreiber für sich und seine Zielkunden hier ein hinreichendes Maß an Qualität produzieren wird.

Bei der Anschlussleitung bestimmt der Anschlussnetzbetreiber deren Qualität. Ein Wholesale-Kunde kann seinen Endteilnehmern keine bessere Qualität anbieten, als dieses Stück der Kette zulässt. Insofern sind die Qualitätsunterschiede der verschiedenen Anschlussnetze durchaus von Bedeutung, gerade auch im Kontext von Wettbewerb im Telekommunikationsmarkt. Hier ist also bei mit mehreren Kunden geteilten Anschlussmedien relevant, wie hoch die Bandbreite im ungeteilten Fall sein kann, wie viele der Kunden sich diese Bandbreite teilen und wie die Vergabe oder Zuteilungsmechanismen und deren Algorithmen arbeiten.

Bei den PtP Glasfaser FTTH-Netzen gibt es kein Sharing im Anschlussnetz. Bei den x.PON Netzen ist das Sharing bedingt durch die gemeinsame genutzte Faser im Feeder-Segment des Anschlussnetzes, d.h. durch den Splitting-Faktor. Bei den DOCSIS Netzen ist es die Größe des Fibre Nodes, d.h. dessen faktische Teilnehmerzahl, die auf einen Koaxialkabelbaum im Drop-Segment des Anschlussnetzes zugreifen. Die tatsächliche Bandbreite, die ein Kunde auf einem geteilten Anschlussnetz erfährt, hängt von der aktuellen Nutzung der Anschlüsse von allen angeschalteten Endkunden ab.

Für einen Vergleich der effektiven Bandbreiten verwenden wir die Regel der EU-Kommission (vgl. Abschnitt 2.2.3) und unterstellen, dass 10% der Teilnehmer gleichzeitig aktiv sind.

Tabelle 2-7: Effektive Bandbreiten je Nutzer bei gemeinsam genutztem Übertragungsmedium im Festnetz und bei Koaxialkabelnetzen

	Nominale Bb down [Gbit/s]	Nominale Bb up [Gbit/s]	Anzahl Nutzer auf gemeinsamer Infrastruktur	% simultan aktive Nutzer	Bb down je Nutzer [Gbit/s]	Bb up je Nutzer [Gbit/s]
G.PON	2,5	1,25	32	10%	0,78125	0,390625
XG.PON	10	2,5	32	10%	3,125	0,78125
XGS.PON	10	10	32	10%	3,125	3,125
NG-PON2	10	10	32	10%	3,125	3,125
DOCSIS 3.0	1	0,1	200	10%	0,05	0,005
DOCSIS 3.1	10	2	100	10%	1	0,2
DOCSIS 4.0	10	10	50	10%	2	2

Quelle: WIK

Für die x.PON Techniken haben wir einen Splitting-Faktor von 1:32 gewählt, um überhaupt in den Bereich von > 1 Gbit/s je Kunde zu gelangen. Wenn man den maximal möglichen Splittingfaktor von 1:256 wählen würde, würde sich die Bandbreite auf 1/8 (0,125) reduzieren. Bei den DOCSIS Technologien verlangt die symmetrische Übertragung auf dem Koaxialkabel und der Verzicht auf die Trennung von Hin- und Rückkanal kleine Kollisionsinseln, d.h. Fibre Node Größen von maximal 50 Teilnehmern, um die Entstörungsberechnungen nicht zu komplex werden zu lassen.⁶²

Bei den Kupferdoppeladern basierten Anschlussleitungen (FTTC/S/B) hängt die Bandbreite für den Endkunden immer von der Länge der Anschlussleitung ab. Solange kein Vectoring das Nebensprechen korrigiert, kann sich die Bandbreite abhängig von der Menge der beschalteten Kupferpaare unterscheiden, zudem aber auch noch davon, wann eine Doppelader eingeschaltet wurde und wie die Signalsynchronisierung auch im Hinblick auf die anderen in Betrieb befindlichen Doppeladern abgelaufen ist (vgl. Abbildung 2-8).

⁶² Hier ergibt sich eine Analogie zur Vectoring Komplexität bei XG.fast.

2.5.2 Weitere qualitative Aspekte

In aller Regel ist aus der Nutzerperspektive die effektive Bandbreite, die ihm (in der Hauptverkehrszeit) zur Verfügung steht, der vorrangige qualitative Aspekt bei der Auswahl eines Hochbreitbandangebotes. Aber andere Aspekte können hinzutreten und haben ggf. aus regulatorischer oder volkswirtschaftlicher Sicht eine höhere Relevanz als aus der Sicht der Endnutzer.

2.5.2.1 Latenz und Jitter

Latenz ist die Zeit, die eine Information braucht, um durch einen Nachrichtenkanal, hier über die Anschlussleitung, übertragen zu werden. Sie wird auch Laufzeitverzögerung genannt. Im Grundsatz geht man bei elektrischen wie optischen Signalen von einer Übertragung mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Geschwindigkeit ist, je nach Übertragungsmedium, jedoch nicht wirklich gleich. Dennoch halten wir diese Unterschiede für vernachlässigbar, da sie sich nur im Nanosekundenbereich auswirken, wenn überhaupt. Relevante Latenz entsteht vielmehr durch die Zahl der elektronischen Systeme, die durchlaufen werden müssen, und durch die Komplexität (und Rechenzeit) für die Bearbeitung der Nachrichten in den elektronischen Systemen.

Jitter ist das Schwanken der Laufzeitverzögerung. Derartige Schwankungen entstehen, wenn die Zeitbedingungen im Übertragungskanal nicht immer gleich sind. Sicht- und hörbar werden die Effekte des Jitter insbesondere in der Echtzeitkommunikation bei der Sprachübertragung/ Telefonie oder in der Video-Übertragung/ Video-Konferenz.

Gegenüber einem PtP Übertragungskanal, bei dem die einzige Begrenzung in der dem Endteilnehmer exklusiv zur Verfügung stehenden Bandbreite besteht, kommt es nur zu leichten, aber weitgehend konstanten geringfügigen Verzögerungen durch das Durchlaufen von Router und dessen Ethernet Schnittstelle auf der einen und der Ethernet Schnittstelle auf der anderen Seite im aggregierenden Ethernet Switch. Bei PtMP mit x.PON kommen neben OLT- und ONU-Verzögerungen durch das Vergabeverfahren um die Zeitschlitzes im Upstream und das Zuteilen eines Zeitschlitzes für das Übertragen in downstream Richtung hinzu. Diese Verzögerungen hängen von der Auslastung des Übertragungskanals ab und schwanken zeitlich. Sie produzieren ein Jitter. Um den Jitter Effekt beim Empfänger nicht spürbar werden zu lassen werden Puffer verwendet, die die Datenpakete aufsammeln und in einem konstanten Strom an den Empfänger weiterleiten. Auch dieses Puffern führt zu ergänzenden Verzögerungen, im Grundsatz in der Höhe der maximal zu erwartenden zeitlichen Schwankung. Bei PtMP mit DOCSIS entstehen aus analogen Ursachen in CMTS und Kable-Modem gleichfalls Latenz und Jitter, je nach

DOCSIS Generation liegen diese auch noch höher als bei x.PON. Neue Low Latency Techniken für DOCSIS sind derzeit in der Entwicklung.⁶³

Im Gegensatz zu den x.PON Systemen, die keine aktive Technik im Feld (entlang der Anschlussleitung) benötigen, müssen die Signale auf den Koaxialkabeln der DOCSIS-Welt regelmäßig (ca. alle 400m) zwischenverstärkt werden. Auch dies trägt etwas zu einer höheren Latenz bei.

2.5.2.2 Überbuchung und Paketverlust

Durch die Möglichkeit, insbesondere bei den Shared Media mehr Informationen übertragen zu wollen als der Kanal hergibt – und dieses Verhalten lässt sich nicht vorhersehen, weil es von allen angeschlossenen Endteilnehmern in Menge und Zeit abhängt – kann es zu Verstopfungen bzw. Nachrichtenstaus kommen. Dies wird durch Zwischenspeichern (Warteschlangen) an den Eingangspunkten zu dem Nachrichtenkanal Anschlussleitung aufgefangen, allerdings nur bis zu einer bestimmten Kapazität der Warteschlange. Läuft eine Warteschlange über, werden Nachrichtenpakete verworfen und je nach Datensicherungsprotokoll ggf. später noch einmal gesendet. Dies führt zu ergänzendem Jitter oder aber zu Löchern in Ton oder Bildübertragung.⁶⁴ Abstriche in der Qualität der Übertragung sind die Folge. Bei anderen Übertragungsinhalten muss die Korrektheit vollständig sichergestellt werden. Sofern fehlerkorrigierende Codes nicht ausreichen, bleibt nur das spätere Neusenden mit hohen Latenzen bzw. Jitter. Derartige Probleme sind in den Netzen mit hohen Übertragungskapazitäten geringer und kommen in Netzen ohne Überbuchungsgefahr (PtP) eher selten bzw. gar nicht vor. Dort ist die Auslastung der Anschlussleitung einzig durch das Verhalten eines Endteilnehmers bestimmt, ersatzweise insbesondere bei Mehrpersonenhaushalten durch die gewählte Priorisierung im Router.

2.5.2.3 Elektromagnetische Beeinflussung

Kupferdoppeladern sind besonders empfindlich gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen von außen, insbesondere bei den ungeschirmten Adern des Telefonnetzes. Aber auch Koaxialkabel, insbesondere, wenn deren Schirmung nicht mit hoher Qualität ausgeführt ist, können diesbezüglich empfindlich sein. Nicht so die Glasfaserkabel.

Stehen Übertragungssysteme im Feld, sind auch diese vor elektromagnetischen Einflüssen von außen zu schützen, oder sie sind dagegen empfindlich. Bei den hier betrachteten

⁶³ CableLabs: Low Latency DOCSIS, February 2019, <https://www.cablelabs.com/full-duplex-docsis/>.

⁶⁴ Die Llöcher können ggf. durch Interpolation aus Nachbarwerten überbrückt werden, mit einer gewissen Verfälschung des übertragenen Signals. Derartige Verfahren verteuern und verkomplizieren die eingesetzte Übertragungstechnik.

PON Netzen (PtP und PtMP) stehen keine Übertragungssysteme im Feld, bei FTTx und DOCSIS jedoch schon.

Elektromagnetische Störungen könne u.a. zu Paketverlusten führen, wenn die Schäden am Bitstrom nicht durch fehlerkorrigierende Codes behoben werden können.

Anders herum kann ein Anschlussnetz auch seine Umgebung stören, insbesondere die hochfrequente Übertragung stört dann schnell Funkfrequenzen des lizenzierten oder auch des unlizenzierten, aber frei nutzbaren Frequenzbereiches.

2.5.2.4 Feuchtigkeit und Schwellwasser im Feld

Gerade Kupferkabel (ungeschirmte oder geschirmte Doppeladern, aber auch Koaxialkabel, sind empfindlich gegen das Eindringen von Feuchtigkeit, weil diese die Übertragungseigenschaften der Kabel zum Nachteil und nicht vorherbestimmbar verändert. Schäden in den Außenmänteln der Kabel können z.B. bei Grabungsarbeiten entstehen, oder beim Ausziehen von Nachbarkabeln in einer Rohranlage. Weitere typische Schwachstellen sind die Muffen der Kupferkabel, insbesondere wenn die Rohrschächte voll Wasser laufen. Glasfaserkabel sind diesbezüglich nahezu unempfindlich.

Natürlich vertragen auch die elektronischen Übertragungssysteme des Zugangsnetzes, insbesondere wenn sie relativ ungeschützt im Feld stehen, nur begrenzt Feuchtigkeit. Korrosionssichere Unterbringungen, Gehäuse, trockene Gebäude bzw. Technikräume sind erforderlich, aber in vielen Ländern keine Selbstverständlichkeit. Oft beobachtet sind auch Wasser führende Rohrleitungen unter der Decke von Technikräumen, die bei ungeplanter Undichtigkeit die darunter aufgebauten Übertragungssysteme beeinträchtigen oder zerstören.

Problematisch sind insbesondere auch unkontrollierbare Schwellwässer oder Überflutungen bei Starkregen o.ä., die insbesondere im Feld stehende Übertragungssysteme beeinträchtigen können. Betroffen hiervon sind insbesondere FTTx Übertragungsverfahren oder die Fibre Nodes und Verstärker der DOCSIS Technologien.

Zusammenfassend stellen wir fest, dass die FTTH Systeme diesbezüglich als weitgehend unproblematisch klassifiziert werden können. Alle Übertragungssysteme sind ähnlich empfindlich gegen Wassereintrüche in den zentralen Technikräumen.

2.5.2.5 Providerwechsel durch Endkunden

Für Endteilnehmer ist relevant, welche Hürden er für einen Wechsel zu einem alternativen Anbieter in Kauf nehmen muss. Er wird es mit Sicherheit begrüßen, wenn er nicht erst für eine geeignete Kabelinfrastruktur in dem Gebäude sorgen oder gar Baumaßnahmen initiieren muss.

Aus diesem Blickwinkel heraus ist jeder Endteilnehmer gut positioniert, wenn er an einem PtP Anschluss angeschlossen ist, denn dieser erlaubt, Dienste von jedem Endkunden-Provider beziehen zu können, der Wholesale-Zugang zu diesen Anschlüssen hat.

Ist der Endteilnehmer auf Basis einer PtMP Glasfasertopologie erschlossen, kann er Dienste eines anderen Anbieters nur dann beziehen, wenn dieser im Wholesale Bitstrom auf Basis irgendeiner x.PON Technologie des Anschlussnetzbetreibers bezieht. Das Produkt kann damit kaum besser sein als die Produkte des Anschlussnetzbetreibers. Dies gilt selbst dann, wenn im Fall von MW-PON Wellenlängen entbündelt würden. Damit stünde dann nur ein geteilter Übertragungskanal zur Verfügung, nicht jedoch der Produktgestaltungsspielraum einer entbündelten Glasfaser.

Ist der Kunde jedoch „nur“ mit einem Anschluss auf Basis der bestehenden Kupferdoppeladern erschlossen, kann er maximal mit der Leistungsfähigkeit dieser Anschlüsse bedient werden, typischerweise über ein Bitstromprodukt des Anschlussnetzbetreibers. Er ist in seiner Wahlfreiheit sehr eingeschränkt.

Bei einem höchstwertigen Anschluss auf der Basis von DOCSIS ist bei einem Wechselwunsch zu einen alternativen Wettbewerber in aller Regel ein Wechsel des Anschlusses auf eine andere Infrastruktur erforderlich, weil die Koaxialkabelnetze typischerweise nicht Wholesale-fähig sind bzw. derartige Zugänge nicht angeboten werden. Erst der Wechsel auf eine andere Infrastruktur macht die Teilnahme am Wettbewerbsmarkt Telekommunikation möglich.

Unser Schluss aus diesen Überlegungen ist, dass der geförderte Ausbau von Hochbreitband Infrastrukturen nur für FTTH PtP erfolgen sollte, um wettbewerbsoffen und -neutral zu bleiben. Auch ist diese Topologie sehr zukunftssicher und weitestgehend technologie-neutral.

2.5.2.6 Resilienz Aspekte

Manche der hier vorgetragenen Eigenschaften der Anschlussnetzarchitekturen und -topologien berühren auch die wichtigen Aspekte der Resilienz der Telekommunikationsnetze. So ist die Störwirkbreite, d.h. die maximale Zahl der Kunden, die durch einen einzelnen Fehler nicht mehr kommunizieren können, eine relevante Größe für Resilienz. Auch spielen Fragen zum Ausmaß der Schäden bei Naturkatastrophen eine wichtige Rolle, z.B. um Hilferufe absetzen zu können oder Einsatzkräfte zu steuern.

Shared Anschlussstrukturen können verhältnismäßig leicht gestört werden, indem nicht-konforme Signale auf das gemeinsame Übertragungsmedium gegeben werden. Auch defekte Netzabschlüsse können ein solches Störungs-Ergebnis für alle angeschlossenen Teilnehmer zur Folge haben. Bei PtP Glasfasernetzen können derartige Sabotageangriffe allenfalls an den öffentlich zugänglichen Faserverzweigern vorgenommen werden. In dieser Hinsicht sind unterirdische Faserverzweiger Schaltschränken am Straßenrand

vorzuziehen. Schaltschränke werden u.U. bei Entbündelungen eingesetzt, um bequem Zugang zu den Splittern zu haben und Schaltungen vornehmen zu können, einerlei ob auf Ein- oder Vierfasermodellen.

DOCSIS und FTTx Netze mit aktivem Equipment im Feld sind besonders durch Schwellwasser gefährdet, ggf. auch großflächiger.

Der Ausfall eines OLT oder CMTS, der ggf. mehrere Anschlussstränge bedient, kann bereits eine Störwirkbreite von mehr als 1000 Kunden haben. Auch Ethernet Switches können ausfallen. Allerdings ist die Störwirkbreite u.U. in DOCSIS und xPON Netzen grösser als in PtP Ethernet Umgebungen, weil dort schnell die Netze ganzer Schaltzentralen betroffen sein können, wenn auf einem Switch alle voraggrierenden CMTS oder OLT zusammengefasst werden.

Je mehr sich parallele Glasfaserinfrastrukturen von den Kernnetzen hinaus in die Fläche bewegen, desto mehr Resilienz könnte das landesweite Netz aufweisen, könnte man annehmen. Eine solche Aussage braucht jedoch einen tieferen Blick in die Details und stimmt im allgemeinen nicht. Denn die parallelen Netze können so aufgebaut sein, dass jedes für sich nicht resilient ist, insbesondere gegenüber gezielter Sabotage oder gegenüber Naturkatastrophen, insbesondere bei Flutkatastrophen mit großflächigerer Ausdehnung. Dann können alle Netze von derartigen Ereignissen betroffen sein.⁶⁵ Eine generelle Abstimmung der Strukturen aller Betreiber wäre erforderlich, um umfassende Resilienz garantieren zu können.

2.5.3 Energieverbrauch

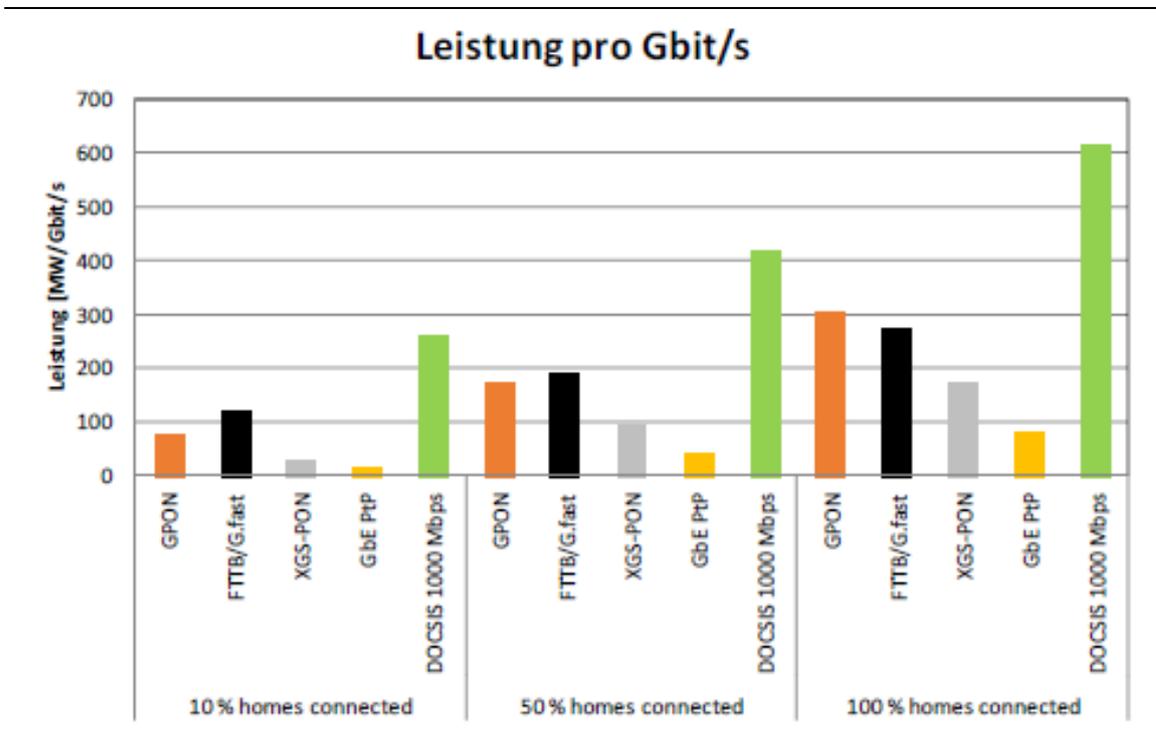
In einer Energieverbrauchsstudie für den BREKO (Bundesverband Breitbandkommunikation), in dem sich sehr viele alternative Netzbetreiber in Deutschland zusammen organisiert haben, wird der Energieverbrauch verschiedener Teilnehmernetztechnologien miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um FTTC mit VDSL Vectoring und Supervectoring, FTTB mit G.fast, FTTH PtMP mit G.PON und XGS.PON sowie FTTH PtP Ethernet.

Untersucht wird der Energieverbrauch je Teilnehmer in Abhängigkeit von der Auslastung des Netzes (10%, 50% und 100% Homes Connected). Weil die Leistungsfähigkeit der Netze stark divergieren wurde zudem der Energieverbrauch auf Gbit/s bezogen.

In einem weiteren Schritt wird als Analogie für den Ressourcenverbrauch das Gewicht der Netzelemente zum Vergleich herangezogen. Diesen Aspekt nehmen wir in diese Darstellung nicht mit auf, weil sie nicht zur Vergleichsbewertung beiträgt.

⁶⁵ So z.B. bei dem Elbehochwasser in Deutschland und Polen 2002 oder den Katastrophen in der Eifel in Deutschland und Belgien 2021. Insbesondere stark betroffen war das Ahrtal. Die Netze aller Betreiber waren gleichzeitig von massiven Ausfällen betroffen.

Abbildung 2-22: Leistungsaufnahme verschiedene Anschlussnetztechnologien in Abhängigkeit von Ihrer Auslastung im Vergleich



Quelle: Obermann (2022), GPON ist in diesem Vergleich mit einem Splittingfaktor von 1:32 konfiguriert, ebenso wie XGS-PON, kann jedoch bei dieser Beschaltung keine 1 Gbit/s je Teilnehmer sicherstellen. Die Werte von VDSL2 sind aus dieser Übersicht wegen der geringen Anschlussgeschwindigkeiten bereits herausgenommen.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass es signifikante Energieverbrauchsunterschiede zwischen den FTTH Architekturen und den Koaxialkabel und Kupferdoppelader Architekturen gibt. Am schlechtesten schneidet DOCSIS ab. Das liegt an den aktiven Netzkomponenten im Feld einschließlich der Verstärker. Dann folgt FTTH mit G.fast. GPON schließt sich an, gefolgt von XGS.PON. Es führt PtP Ethernet (GbE PtP). Der Unterschied zwischen den Technologien vergrößert sich mit wachsender Auslastung der Netze.

In den Technologien, in denen Router mit „Sleep Modus“ verwendet werden können, lässt sich der Energieverbrauch der CPE um ca. 40% reduzieren (hier nicht enthalten). Diese Router benötigen ihren vollen Energieverbrauch nur dann, wenn gesendet oder empfangen wird. Andernfalls wechseln sie in einen energieverbrauchersamen Ruhezustand (Stand by Modus). Derartige Router können bei PtP Ethernet direkt als Netzabschlüsse eingesetzt werden. Die Kabel-Modems bei DOCSIS und ONU bei x.PON müssen immer aktiv sein, um an sie gerichtete Nachrichten zu erkennen und zu empfangen und an den Zugriffsvergabeprozessen teilnehmen zu können.

2.5.4 Upgrade Betrachtungen

Es besteht kein Zweifel, dass die Bandbreitennachfragen mit neuen Anwendungen weiter wachsen werden. So spricht die EU-Kommission bereits von Terabit Netzen bis zum Endteilnehmer (Studenten, Garagenfirmen, Krankenhäuser und Sanitätsstationen, Forschungseinrichtungen, Wetterdienste etc.).⁶⁶ Diese lassen sich aus heutiger Sicht nur mit Glasfaser PtP Netzen realisieren.

Wir beschreiben daher an dieser Stelle einige Gedanken und Beobachtungen zum Upgrade der verschiedenen Festnetztechnologien bis hin zu einem zukunftssicheren FTTH PtP Netzwerk.

Im Grundsatz besteht auf der einen Seite in den klassischen Fernmeldenetzen ein Weg von FTTC über FTTS und FTTB zu FTTH, zunächst jeweils PtMP gebaut, um anschließend auf FTTH PtP zu enden. Geht man davon aus, dass das zugehörige aktive Equipment jeweils auf 7 Jahre abgeschrieben werden soll und ggf. noch in einer Glasfasertopologie ein Technologiewechsel beispielsweise von G.PON zu XGS.PON oder zu NG-PON 2 erfolgen soll, so kämen bei 4 Schritten, die also nicht alle Optionen durchlaufen, sondern manche überspringen, auf $4 \times 7 = 28$ Jahre. Das dauert u.E. zu lange. Verkürzt man die Nutzungsdauer des jeweiligen Ausbaustandes vor dem Wechsel auf die nächste Stufe auf 4 Jahre, wären Restabschreibungen auf die gestrandeten Investitionen die Folge. Dies würde die Profitabilität erheblich verschlechtern. Jeden dieser Schritte mit Fördermitteln zu begleiten würde die drohende Ineffizienz nur vergrößern. Bei der Betrachtung auf dem Zeitstrahl kommt hinzu, dass ein flächendeckender Ausbau bereits in der einfachen Form mindestens ein Jahrzehnt benötigt. Kommen noch weitere Tiefbaumaßnahmen dazu, die die zuerst geschaffenen Infrastrukturen (im Feederbereich) erweitern, verlängert sich das Ausbauproblem. Hinzu käme Unverständnis in der Bevölkerung durch wiederholtes behinderndes Aufgraben der Gehwege und Straßen.

Auch die Kabelnetzbetreiber folgen einem Evolutionspfad, der zwar FTTB ausbaut, mit einem Fiber Node im Keller jeden Gebäudes, ggf. das Koaxialkabel im Gebäude ersetzend durch Glasfaser. Auch ist im Fernziel eine RFoG Struktur in jede Wohnung hinein angedacht und vorstellbar, also im Grundsatz FTTH. Ob ein Kabelnetzbetreiber dann dort mit eigener Faser in die Wohnungen gehen würde oder aber im Gebäude vorhandene Fasern anmietet, wird eine rein wirtschaftliche Entscheidung sein.

Die Untersuchungen des WIK haben an zwei beispielhaften Migrationspfaden für Deutschland gezeigt, dass ein solcher Migrationsweg für das klassische Festnetz, bei FTTH (Glasfaser bis zur Schaltzentrale (HVt)) startend, etwa die doppelten bis nahezu dreifachen Investitionen benötigen können wie der unmittelbare Ausbau von FTTH PtP.

⁶⁶ Vgl. Ecorys (2020).

Tabelle 2-8: Vergleich Direkter FTTH Ausbau mit einem Ausbau in drei bzw. fünf Schritten, Deutschland

Migrationsweg von FTTH zu FTTH PtP	Invest gesamt	Zzgl. gestrandet gesamt	Invest gesamt per Home Passed
direkt	61,- Mrd. €	0,- €	1.379,- €
3 Schritte	114,8 Mrd. €	6,4 Mrd. €	2.741,- €
5 Schritte	128,3 Mrd. €	20,3 Mrd. €	3.361,- €

Quelle: WIK, Plückebaum (2020)

Der Ausbau in 3 Schritten: FTTH > FTTC > FTTB > FTTH PtP

Der Ausbau in 5 Schritten: FTTH > FTTC > FTTS > FTTB > FTTH PtMP > FTTH PtP

Detailliertere Überlegungen und Kostenmodellierungen für Deutschland finden sich in Plückebaum (2019) für DOCSIS und in Plückebaum (2020) für FTTH – FTTH PtP.

FTTH PtP Netze sind im Prinzip individuell je nach Teilnehmerbedarf in den übertragbaren Bandbreiten aufrüstbar, indem an den beiden Enden der Anschlussfaser das geeignete Übertragungsequipment aufgebaut wird. So könnte auch jedes besondere Protokoll (z.B. für Terabit Netze) realisiert werden. Typischerweise sind derartige Netze mit Ethernet Switches in den Schaltzentralen ausgerüstet. Es gibt Standardschnittstellen mit 1, 10 und 100 Gbit/s. Nicht jeder Switch kann die hohen Anschlussgeschwindigkeiten aufnehmen, insofern müssen ggf. nach Bedarf separate Systeme aufgebaut werden.

Bei PtMP mit XGS.PON oder NG-PON2 sind Anschlussgeschwindigkeiten grösser als 10 Gbit/s nicht realisierbar, d.h. für manche (Geschäftskunden-)Anschlüsse sind diese Technologien bereits heute schon ungeeignet. In der Entwicklung befinden sich MW-PON Netze mit einer größeren Zahl Wellenlängen, die 25 oder 50 Gbit/s im geteilten Kanal einer Wellenlänge bereitstellen, symmetrisch oder asymmetrisch nutzbar (vgl. Abschnitt 2.3.6). Sie erlauben auch eine dynamischere Verwaltung der genutzten Wellenlängen und mehr Flexibilität bei den eingesetzten OLT und ONU und deren Wellenlängen-Zuordnung und ermöglichen in Zukunft ein vereinfachtes Upgrade.⁶⁷ Dennoch: Es muss ein paralleles PtP Fasernetzwerk im Feederbereich mit ausgebaut werden, wenn ungeteilte und symmetrische hochleistungsfähige Kundenanschlüsse zur Verfügung gestellt werden sollen.⁶⁸

⁶⁷ MW-PON steht für Multi Wavelength PON. Vgl. ITU-T G.9802, G9804.1 und G9804.3, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9802>, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.1/en>, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.3-202109-I>.

⁶⁸ In Neuseeland werden daher Feeder Netze, die nicht von Beginn an ausreichend dimensioniert waren, derzeit mit Feederfasern nachgerüstet.

2.5.5 Zusammenfassung Festnetztechnologien

Die in Abschnitt 2.5 beschriebenen und diskutierten qualitativen Aspekte fassen wir in einem tabellarischen Überblick zusammen, bewertet nach einem ordinalen Ranking, ausgedrückt in „-“ bis „++“.

Tabelle 2-9: Vergleich der qualitativen Eigenschaften der Technologien im Festnetz

Qualitäts-Eigenschaften	FTTC/VDSL	FTTs/G.fast	DOCSIS 3.1	DOCSIS 4.0	FTTH PtMP	FTTH PtP
Vorhersagbare Bandbreite	--	--	+	+	+	++
Latenz/ Jitter	-	-	-	-	+	++
Überbuchung, Paketverlust	+	+	--	-	+	++
Elektromagn.Sensitivität	--	--	-	-	++	++
Feuchtigkeit/Schwellwasser	--	--	--	--	++	++
Verfügbarkeit/ Verletzlichkeit	-	-	-	-	+	++
Anbieterwechsel	+	-	--	--	+	++
Energieverbrauch	-	-	--	--	+	++
Upgrade	-	-	--	--	+	++

Quelle: WIK, „-“ sehr schlecht, „-“, schlecht, „+“ recht gut, „++“ sehr gut

Eine solche Bewertung ist naturgemäß mit einem subjektiven Element behaftet. Die Hintergründe für diese Bewertung sind in den Abschnitten zuvor erläutert. Die Übersicht soll helfen, die unterschiedlichen Aspekte vergleichend in den Blick zu nehmen. Auf eine Gesamtbewertung der Einzelaspekte wurde bewusst verzichtet. Es wird jedoch offenbar, dass die Glasfasertechnologien gegenüber denen mit Kupferdoppeladern und Koaxialkabeln qualitativ hervorstechen. Auch sprechen viele weitere qualitative Aspekte für FTTH PtP im Vergleich mit PtMP.

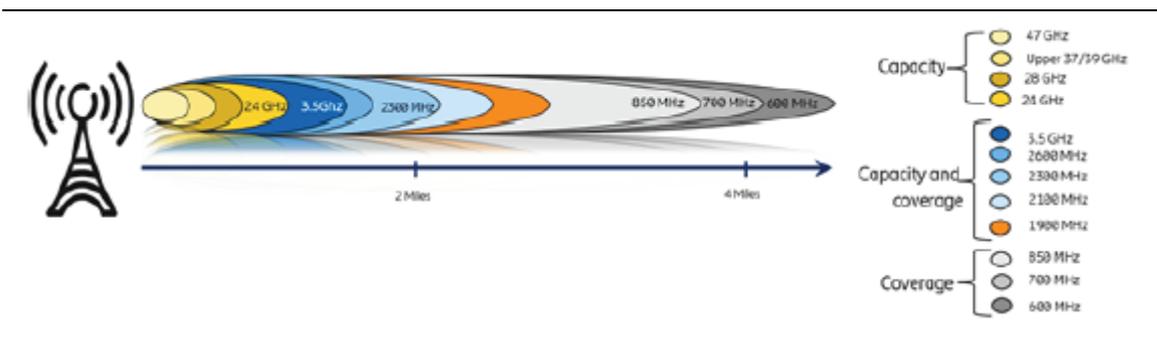
2.6 Mobilfunktechnologien

Die dem Stand der Technik entsprechende Mobilfunktechnik für die breitbandige Datenkommunikation ist LTE (Mobilfunk der 4. Generation), die zum ersten Mal vollständig auf eine paketvermittelte Datenkommunikation aufsetzt, auch für die Sprache (mit VoIP, VoLTE). LTE hat sich permanent über neuer Release-Stände über LTE advanced hin zu Netzen der 5. Generation (5G) weiterentwickelt, die sich anschließend auch wieder über verschiedene Release-Stände hinweg weiter entwickeln werden. Dabei steht LTE derzeit nicht alleine im Netz. In der Schweiz sind die Netze der 2. Generation (GSM) im Prinzip abgeschaltet. Die Netze der 3. Generation (UMTS) werden noch betrieben, Ausstiegs-szenarien sind jedoch für die mittlere Zukunft angekündigt. In Deutschland sind die 2G Netze noch für die reine Sprachkommunikation genutzt, die 3G Netze werden jedoch systematisch zurückgebaut. Diese Vorgehensweise erlaubt, die Lebensdauern der alten

Technologien möglichst effizient auszunutzen. Auf Dauer werden diese verschwinden und durch LTE oder höherwertige Techniken (5G, später 6G) ersetzt, die in den alten oder in neu vergebenen Frequenzbereichen arbeiten werden.

Die unterschiedlichen Frequenzbereiche für den Mobilfunk haben aufgrund ihrer verschiedenen Ausbreitungseigenschaften auch unterschiedliche Reichweiten und damit Funkzellgrößen. Dies wird in Abbildung 2-23 anschaulich illustriert.

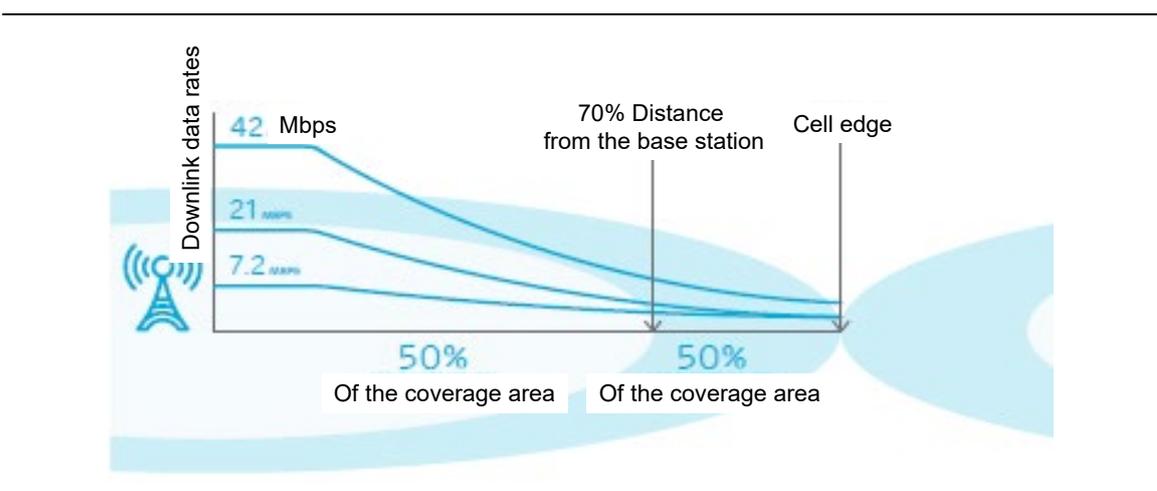
Abbildung 2-23: Reichweite verschiedener Frequenzen



Quelle: 5G Americas, Fixed Wireless Access with 5G Networks, Nov 2021,⁶⁹ Die Entfernungangaben lauten auf 2 bzw. 4 Meilen. Je höher die Frequenz, desto kürzer die Reichweite.

Für die breitbandige Übertragung im Mobilfunk ergibt sich regelmäßig das Phänomen, dass die Teilnehmer am Zellrand wegen der geringeren spektralen Dichte des Funknetzes auch geringere Bandbreiten empfangen können (Abbildung 2-24).

Abbildung 2-24: Mit zunehmendem Abstand von der Zellmitte (Antenne) abnehmende Bandbreite

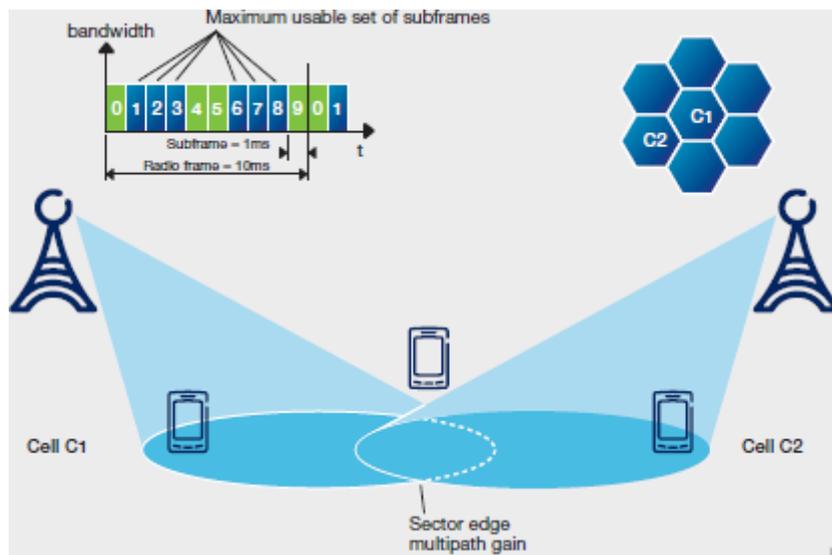


Quelle: Ericsson Mobility Report November 2012

69 <https://www.5gamericas.org/fixed-wireless-access-with-5g-networks/>.

Dem Stand der Technik entsprechend kann dies durch eine Versorgung über zusätzliche Wege aus den Nachbarzellen behoben werden, ggf. unterstützt durch die Veränderung von Neigungswinkeln der betroffenen Sektorantennen (Abbildung 2-25) oder durch Beamforming der Sendekeulen der MIMO Sektorantennen.

Abbildung 2-25: Versorgung zellperipherer Endgeräte aus mehreren Zellen



Quelle: Ericsson Review 2013-1, Delivering content with LTE Broadcast, 11. February 2013, Die Subframes erlauben zeitlich parallele Verbindungen.

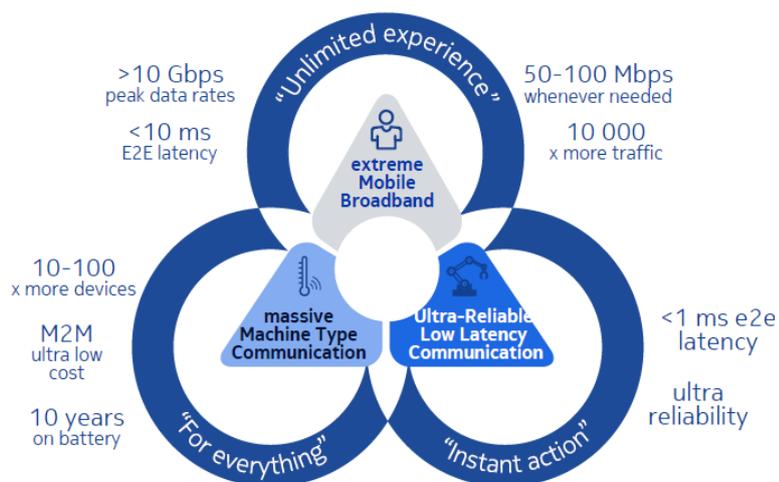
jedem Teilnehmer 1 Gbit/s angeboten – auch hier ist Glasfaser vonnöten. Je Antenne ergeben sich (unter Optimalbedingungen) für:

- LTE: 100 Mbit/s
- LTE advanced: 1 Gbit/s
- 5G: 10 – 20 Gbit/s

Die neuen Anwendungen, die über ein solches Netz unterstützt werden, folgen im Prinzip drei Merkmalsgruppen:

- Extrem hohe mobile Bandbreite (eMBB, enhanced Mobile Broadband),
- Hohe Zuverlässigkeit und geringe Latenz, d.h. Echtzeitkommunikation (uRLLC, ultra Reliable Low Latency Communication),
- Grosse Zahl kommunizierender Endgeräte (M2M, mMTC, massive Machine Type Communication).

Abbildung 2-27: Kommunikationscharakteristika von 5G Anwendungen



Quelle: Nokia (2017) ⁷¹

⁷¹ T. Pfeiffer, Konvergente 5G fähige Access Netze, 11. ITG Fachtagung Breitband für Deutschland, 29. – 30. März 2017.

Tabelle 2-10: 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

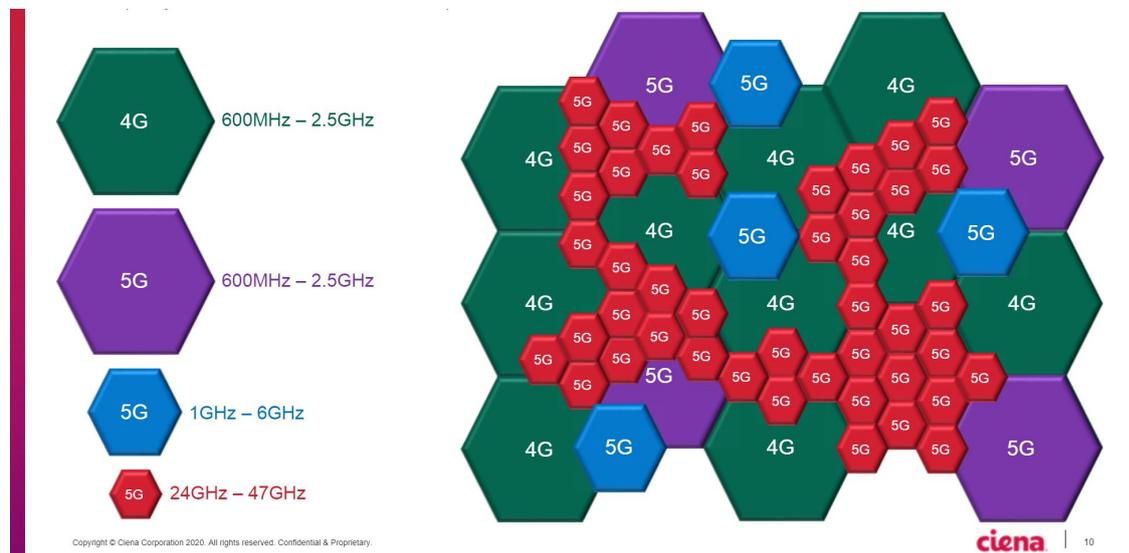
Insbesondere die in Abbildung 2-27 genannten sehr kurzen Latenzzeiten können nur über breitbandige Glasfaseranschlüsse bis zu den Antennen erreicht werden. Natürlich könnte es sein, dass diese Latenzen abhängig von den Anwendungen nicht überall erreicht werden müssen.

5G wird einerseits die heute bereits bestehenden Frequenzräume für den Mobilfunk nutzen und diese für eine bessere Abdeckung in der Fläche und für eine bessere indoor Abdeckung um Frequenzen im 700 MHz-Bereich erweitern wollen, realisiert seine hohen Bandbreiten aber auch im Bereich höherer Frequenzen. Hier wurde der Bereich um 3,5 bis 3,8 GHz in vielen Ländern vergeben. Im Gespräch sind aber auch zusätzlich der Bereich um 6 GHz und für die Pico- und Femtozellen auch die Bereiche um 25 bis 29 GHz, 39 GHz und ab 60 GHz. Derart hohe Frequenzen können nur in kleinen Funkzellen ohne Penetrationsleistung durch Wände hinweg eingesetzt werden, was eine kleine Zellgröße und eine hohe Zelldichte erfordert. Eine kleine Zellgröße und eine hohe Bandbreite erfordern für die Erschließung eine hohe Versorgungsdichte mit Glasfasern, zumindest dort, wo sich viele Teilnehmer aufhalten. Die 5G Netze werden sich aus einer Mischung aus sich überlagernden Macro- (lower frequency) und unterlagerten (high frequency) Microzellen zusammensetzen.

Abbildung 2-28: Technologie und Frequenzmix bei 5G

Mix von Funkzellen verschiedener Frequenzen, Reichweiten und Bandbreiten

Verdichtung der 5G Zellen benötigt dichteres Glasfasernetz



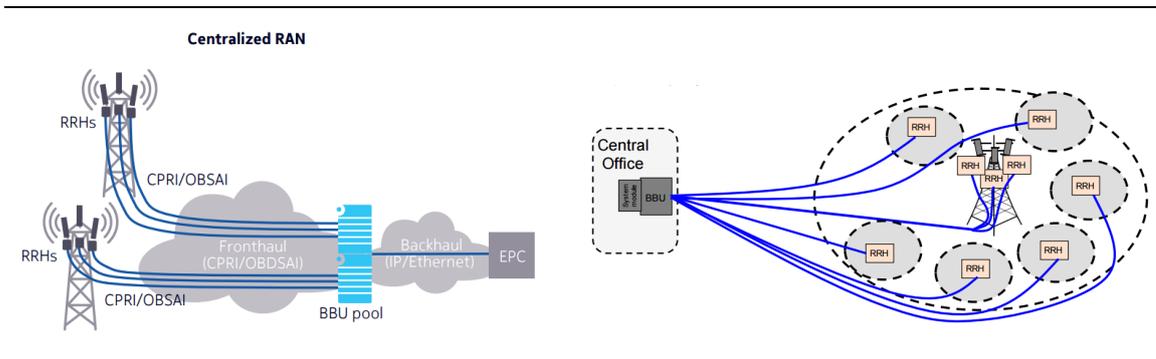
Quelle: Ciena, von WIK modifiziert

Die Vielzahl der Zellen erfordert aber auch schon aus ökonomischen Gründen eine Veränderung der Systemstrukturen für die Mobilfunknetze. Anstatt an jeden noch so kleinen Antennenstandort eine sogenannten Base-band Unit (BBU) für die Antennenansteuerung zu setzen, die on-site mit den „Radio-Heads“ über dedizierte breitbandige Protokolle (in Echtzeit) über Glasfaser kommunizieren (D-RAN), werden die BBU zentraler aufgestellt und sind so leichter zu betreiben (C-RAN) ⁷². Nicht mehr jeder dann Remote stehende Radio-Head (RRU) bekommt seine eigene physische BBU, sondern diese werden an den zentraleren Standorten über virtuelle Maschinen abgebildet, die sich dort sicherer, zuverlässiger und erheblich energiesparender betreiben lassen. Hier kommen die neuen Prinzipien des Network Function Virtualisation (NFV) und Software Defined Networking (SDN) auf Standard-Servern erstmals netzweit zum Tragen.

Eine spezielle Herausforderung in diesem Kontext sind die Anforderungen an die Echtzeit-Kommunikation nicht der Anwendungen, sondern bereits des Netzes und seiner Komponenten selbst. Die BBU steuern die Interaktion der Antennen bzgl. Frequenzlage, Interferenz, Antennenneigung etc. und neuerdings auch des schnellen Roaming. Die speziellen hierzu verwendeten Protokolle erfordern bereits Echtzeit-Bedingungen auch ohne jegliche Anwendungsanforderung. Das ist nur über breitbandige Glasfaseranschlüsse zu realisieren.

⁷² Distributed bzw. Centralized Radio Access Network.

Abbildung 2-29: Gepoolte BBU mit breitbandiger Anbindung der RRH



Quelle: Nokia (2016) und Orange (2014)

Während früher die Anbindung der BBU an der Basisstation in das Netz hinein als Backhauling bezeichnet wurde, kommt durch das Auseinandernehmen des Standortes und seiner Komponenten ein neuer Teil Konnektivität hinzu: Vom RRH zur BBU ist dies das Front-Hauling, von der BBU ins Netz hinein bleibt das Backhauling.

2.7 Fixed Wireless Access (FWA)

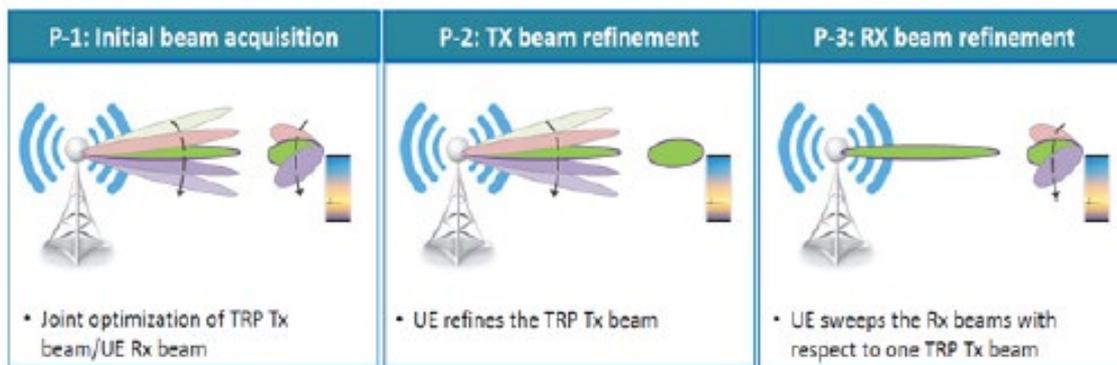
Fixed Wireless Access soll den Festnetzanschluss durch einen Funkanschluss ersetzen oder diesen durch höhere Bandbreiten auf einem zweiten Kommunikationskanal kapazitatativ ergänzen. Derartige Lösungen sind vornehmlich für den ländlichen Raum gedacht, in dem es keine auf Glasfasern basierenden Anschlüsse gibt. Typische Gebiete für derartige Anschlüsse sind neben Wüsten und Heidelandschaften oder kleinen Inseln u.U. auch Gebirgsregionen. Allerdings ist hier auch zu beachten, dass die Funkverbindungen, je höher die verwendeten Frequenzen sind, eine Sichtverbindung zwischen der Antenne und dem Endkundenstandort brauchen. Dies stellt auch Anforderungen an die Auswahl geeigneter Antennenstandorte, die in jedem Fall, wenn sie Gigabit-Anschlüsse bereitstellen sollen, mit Glasfasern (oder breitbandigen Richtfunkverbindungen) erschlossen werden müssen.

Im Unterschied zum Mobilfunk bewegt sich der Standort des Endteilnehmers bei FWA nicht. Er kann daher seine Empfangsantenne am Maststandort des FWA ausrichten und damit einen Reichweiten- und Qualitätsvorteil erzielen. Auch muss die Antenne nicht in die Hosentasche passen und kann damit für einen besseren Empfang optimiert werden. In der Regel kommen Außenantennen zum Einsatz, weil die Indoor Coverage bei hohen Frequenzen und generell auch mit wachsender Entfernung abnimmt. Derartige Lösungen gibt es bereits auch bei LTE und 5G Mobilfunknetzen für feste Anschlüsse. Allerdings teilen sich die quasi festen Teilnehmer den Frequenzbereich mit den mobilen Teilnehmern.

Bei FWA muss die maximale Zahl der Teilnehmer mit in das Kalkül der Standortauswahl und der Antennenausstattung einbezogen werden, um Bandbreitengarantien (wie bei der staatlichen Förderung in der EU) einhalten zu können. Da der Ausleuchtungsbereich der FWA Antenne und deren Frequenzbereich ein geteiltes Übertragungsmedium darstellt gelten auch hier im Prinzip die Ausführung für geteilte Übertragungsmedien im Festnetz (vgl. Abschnitt 2.5.1). Im Geltungsbereich des EU-Rechtes müssen die Regelungen für das Festnetz, z.B. auch bei der staatlichen Förderung, eingehalten werden.

Mit hohen Frequenzen, einer großen Funkkanalbündelung von bis zu 1 GHz Bandbreite und einer geeigneten modernen Funkschnittstelle, derzeit der von 5G New Radio (NR), sind FWA Anschlüsse marktreif geworden, die zudem noch Nutzen ziehen vom Beamforming der zentralen massive MIMO Antennen in Verbindung mit dem Richtcharakter der fest installierten outdoor Endteilnehmer-Antennen. So können die Entfernungseinschränkungen der hohen Frequenzen (vgl. Abbildung 2-23) für FWA Anschlüsse auf eine Reichweite von ca. 6 km angehoben und Bandbreiten von bis zu 20 Gbit/s down und bis zu 10 Gbit/s upstream bereitgestellt werden, in der Regel geshared. Die Empfängerantennen unterstützen derzeit Bandbreiten bis maximal 2 Gbit/s.⁷³

Abbildung 2-30: 5G NR Beamforming überwindet größere Distanzen (bis ca. 6 km)



Quelle: 5G Americas, Fixed Wireless Access with 5G Networks, Nov 2021, ⁷⁴ Die Funckeulen „finden“ zueinander

Bei FWA handelt es sich um eine Funkübertragung, die empfindlich auf Wetterbedingungen reagiert. Die Qualität kann bereits durch Regen oder Schneefall und durch Nebel/Wolken) beeinträchtigt werden, auch sind Blitze bei Gewittern Grund für zumindest kurzzeitige Unterbrechungen. Im besten Fall erhöht sich die Bitfehlerrate auf den Verbindungen (Paketverlust, Latenz, Jitter), im schlechteren Fall bricht die Verbindung für eine gewisse Dauer ab, im schlechtesten Fall wird die Sende und Empfangsanlage am Endkundenstandort zerstört (z.B. Blitzeinschlag, Überspannung).

⁷³ Ericsson Fixed Wireless Access Handbook, 4th edition 2021, <https://www.ericsson.com/en/fixed-wireless-access>.

⁷⁴ <https://www.5gamericas.org/fixed-wireless-access-with-5g-networks/>.

2.8 Satelliten und HAPS (High Altitude Platform Systems)

Zur Versorgung dünner besiedelter Gebiete ist eine terrestrische Erschließung mit Glasfasernetzen aufgrund der hohen Kosten je Anschluss aus ökonomischer Sicht nur wenig geeignet. Derartige Anschlüsse können Grenzkosten von mehr als 100.000 € haben. Auch gibt es in Mitteleuropa bisher keine wirklich flächendeckende Versorgung mit breitbandigem Mobilfunk, weniger, was die Haushalte angeht, sondern eher noch in Bezug auf eine flächendeckende Versorgung auch aller unbesiedelten Gebiete, in denen sich jedoch Menschen aufhalten können, erreichbar sein oder auch zumindest Notrufe absetzen wollen. Dies gilt für Reisende, die Logistik oder den Tourismus und Sport sowie dem Bergsport in besonderem Maße.

Anstelle der terrestrischen Versorgung der verstreuten Endkundengebäude mit Glasfaserkabeln oder der wenig oder unbesiedelten Gebiete mit Mobilfunkmasten und deren glasfaserbasierten Backhaul-Anschlüssen bietet sich als Alternative eine Versorgung über Funk aus der Luft. Hierzu zählen die schon als klassisch zu bezeichnenden Satellitenlösungen, die man abhängig von der Höhe über dem Grund in GEO (Geostationary Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit) und LEO (Low Earth Orbit) untergliedert.

Die Höhe bedingt eine nicht vernachlässigbare Signal-Laufzeit von der Erdoberfläche zum Satelliten und wieder zurück, und beim Dialog nimmt die Antwort den Rückweg ebenso, rauf und runter. Anstatt den Flugkörper mit seinen Sende- und Empfangseinrichtungen außerhalb der Erdatmosphäre zu platzieren kann man ihn dank moderner Drohentechnik auch innerhalb der Atmosphäre in einer Höhe zwischen 15 und 20 km ansiedeln. Derartige Flugsysteme werden auch als High Altitude Platform Systems (HAPS) bezeichnet. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Optionen gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 2-11: Versorgung mit Breitband aus der Luft: Satelliten und HAPS

Flugkörper	Höhe/ Länge [Km]	Signallaufzeit 1 Weg Up/Down [ms]	Anzahl Flugkörper* [Anzahl]	Antennenabdeckung
GEO	36.000	500 - 700	1	Kontinente
MEO	10.000	125 - 250	1	Teilkontinente
LEO	600 - 2000	20 - 50 (variierend)	40 - 1680	Elipsoid-Streifen (Länder)
HAP	12	< 5	80	Regionale Kreise

Quelle: WIK, Plückerbaum (2021)

Die Problematik wird auf den ersten Blick deutlich: Die Flughöhe bestimmt zum ersten die Laufzeit des Signals. Danach sind Satelliten für eine Grundversorgung mit einer

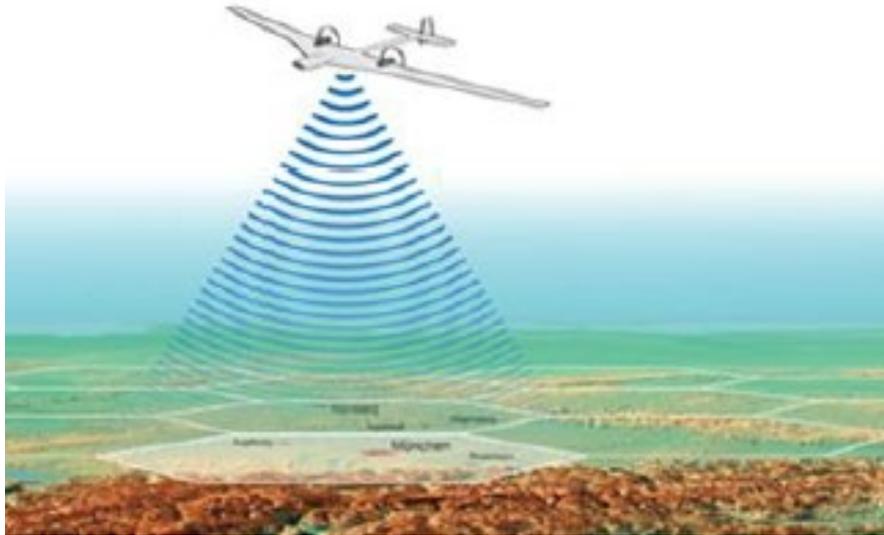
maximalen Latenz von 150 ms (eine Richtung) ungeeignet, selbst wenn man unterstellt, dass die Übertragung durch Protokollmanipulationen beschleunigt wird. Der Dialog braucht seinen Hin- und Rückweg und die zeitnahe Interaktion miteinander. Ein weiteres Problem kommt bei der Telearbeit über getunnelte Verbindungen hinzu, weil die Protokollveränderungen dort nicht umgesetzt werden können. Für den Universaldienst in Deutschland (Mindest-Grundversorgung der Bevölkerung) haben sich die GEO und MEO Lösungen daher nicht qualifizieren können.

Beim LEO umkreisen die Satelliten die Erde in ellipsoiden Bahnen und verändern verhältnismäßig schnell ihre Höhe und Position über Grund. Die Satelliten produzieren dadurch Laufzeitschwankungen (Jitter). Hinzu kommt, dass ein LEO-Satellit nicht für die gesamte Dauer einer Verbindung zur Verfügung stehen kann. Er verschwindet hinter dem Horizont und ein anderer mit etwas anderer Flugbahn übernimmt. Eine Verbindung kann ggf. über mehrere LEOs aufgebaut werden, die unmittelbar untereinander kommunizieren, ohne dass der Kanal über die Erdoberfläche geführt werden muss. Die Kommunikation mit den Endkunden und die der LEOs untereinander erfordert im Prinzip die Nachführung der Antennen oder einen nicht unerheblichen Signalverlust durch suboptimale Positionierung. Für die Kommunikation der Satelliten untereinander werden Laserlinks verwendet, die eine unmittelbare Kommunikation ermöglichen, ohne Umweg über die Erde, allerdings immer noch mit variablen Entfernungen (Jitter).

All dies ist bei HAPS nicht der Fall. Die Drohnen sind im Prinzip Gleiter in der Stratosphäre, die einmal auf Position in der Stratosphären Luftströmung stehen bleiben und so geostationär arbeiten. Sie werden mit Wasserstoff Brennstoffzellen ausgerüstet, die den Antrieb für den Start und die Rückkehr versorgen sowie marktübliche Mobilfunk Basisstationen, die auf lizenzierten Frequenzen arbeiten. Damit brauchen die Kunden keine speziellen Endgeräte (wie bei LEO), sondern nutzen die serienmäßigen Terminals (Smartphones u.a.) ihrer Betreiber, die eben ihre terrestrischen Funktürme durch Funkzellen auf den HAPS ergänzen können, für die Regionen, in denen dies zur Flächendeckung angebracht oder in Notlagen (z.B. Naturkatastrophen) erforderlich ist. Sie sind nahtlos in die bestehenden Mobilfunknetze eingliederbar. Zudem können sie auch Fixed Wireless Access (FWA) Lösungen anbieten, dies umso effizienter, wenn Ihre Position sich über die Zeit nicht verändert oder die Antennen an den festen Standorten ihre optimale Ausrichtung automatisch adjustieren.

Der Footprint, der Ausleuchtungskreis der HAPS, hat einen Radius von ca. 100 km, abhängig von den genutzten Frequenzen. Dies ermöglicht die Versorgung von deutlich mehr Kunden pro Fläche durch ein System als bei den höher fliegenden Satelliten. Die Ausleuchtung im Hochgebirge ist nach Angabe der Hersteller durch die Flughöhe gleichfalls sichergestellt.

Abbildung 2-31: HAPS und sein Footprint



Quelle: Leichtwerk AG 2020

Die HAPS kehren in regelmäßigen Intervallen auf die Erdoberfläche zurück. Primär zum Nachtanken von Wasserstoff. Allerdings können sie in dieser Zeit bei Bedarf auch Upgrades in Hardware und Software erhalten, anders als die Satelliten, die ja nicht zerstörungsfrei zurückkehren können. In dieser Zeit übernimmt eine andere Drohne dessen Aufgaben an derselben Stelle.

Derzeit befinden sich verschiedene HAPS in der Erprobung, so dass sie eine ernst zu nehmende Alternative insbesondere für national oder kontinental agierende Betreiber darstellen. Ihre Fixkosten liegen deutlich unter denen der global agierenden und Kommunikationsdienste anbietenden Satellitenbetreiber. Erste Pilotversuche in Deutschland sind erfolgversprechend gelaufen.

2.9 Systematischer Vergleich

Tabelle 2-11 enthält eine Übersicht über die gängigen heutigen oder in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Übertragungstechnologien für die Übertragungsmedien

- Kupferdoppelader (ungeschirmt)
- Koaxialkabel (einschließlich Hybrid Fibre Coax (HFC))
- Glasfaser (in den Topologien Punkt-zu-Punkt (PtP) und Punkt-zu-Mehrpunkt (PtMP) und
- terrestrischen Funk

im Vergleich. Nicht enthalten sind die Funkübertragungstechnologien aus der Luft. Die Mobilfunktechniken incl. Fixed Wireless Access (FWA) sind jedoch in der Tabelle wiedergegeben.

Die Tabelle beschreibt die Anschlusstechnologien hinsichtlich wesentlicher übertragungstechnischer Qualitätsparameter, beginnend mit der nominalen Bandbreite auf der Anschlussleitung in beiden Richtungen, down- und upstream. Wird die Anschlussleitung gemeinsam mit anderen Anschlüssen geteilt genutzt (geshared), erhält jeder Nutzer nur einen Teil der nominellen Bandbreite des gemeinsamen Übertragungskanal. Die Zahl der Nutzer gibt an, wie viele auf den Übertragungskanal des Anschlussnetzes gemeinsam zugreifen können. Im Fall von x.PON PtMP Architekturen gibt sie gleichzeitig den Splittingfaktor an, der maximal einzustellen ist, damit die in Abschnitt 2.2.3 genannten Kriterien für ein Gigabit Netz (VHCN) erfüllt werden können. Im Fall der DOCSIS Koaxialkabelnetze wird hier die Größe der Fibre Nodes angegeben, im Fall der Funknetze ist dies die Zahl der sich gleichzeitig in einer Funkzelle (in einem Funksektor) befindenden Teilnehmer.

Die Spalte Nutzungsverhalten illustriert, wie viele der Nutzer (bzw. deren Anteil an der Gesamtmenge) maximal gleichzeitig auf dem Übertragungskanal aktiv sind. Daraus ergibt sich die effektive Bandbreite pro Nutzer. Diese ist der Maßstab der Klassifizierung als Gigabitnetz (VHCN, Abschnitt 2.2.3). Dieser Wert wird überschritten, wenn sich weniger Nutzer gleichzeitig die verfügbare Bandbreite teilen müssen. Er sollte jedoch zur Hauptverkehrszeit auch nicht unterschritten werden und ist somit der am unteren Rand der möglichen Skala liegende Bandbreiten-Wert der sich das Medium teilenden Nutzer. Die Tabelle gibt die effektiven Bandbreiten für down- und upstream bei gemeinsamer Nutzung als unteren Erwartungswert wieder. Sie beschreibt zudem in ergänzenden Spalten, ob es sich um ein geteiltes (s: Shared) Medium oder ein nur individuell (i) je Endteilnehmer genutztes Übertragungsmedium handelt und inwieweit beide Übertragungsrichtungen gleiche Kapazität aufweisen, also symmetrisch (s) übertragen, oder eben nicht (a: asymmetrisch).

Dieses Vergleichsverfahren hebt die Shared Medien zwar nicht auf dieselbe Ebene wie leistungsfähige PtP Netze, wertet sie in der Betrachtung der effektiven Nutzbarkeit jedoch signifikant auf und bringt die Darstellungen auf ein besser vergleichbares Niveau als der stumpfe Vergleich von Peak-Bandbreiten im Downstream, wie sie derzeit im Marketing üblich sind, oder der Vergleich auf Basis der reinen Durchschnitte (Nominalbandbreite dividiert durch die Zahl der Nutzer), die von den Kritikern der Shared Medien gerne gebraucht werden. Immerhin kann so 5G mit FTTS mithalten, während FTTH PtP noch auf weite Sicht ungeschlagen bleiben wird.

Tabelle 2-12: Übersicht über die aktuellen und zukünftigen Technologien für die Breitbandübertragung im Vergleich

Übertragungs-Technik	FTT...	Bandbreite down	Bandbreite up	Anzahl Nutzer	Nutzer-Verhalten [Erlang]	Effektive Bandbreite down	Effektive Bandbreite up	Längen-Beschränkg	individuell/shared	symmetr./asymmetr.	EU VHCN	QoS	HVt Entbündelg	VULA (L2)
Kupfer Doppelader		[Gbit/s]	[Gbit/s]			[Gbit/s]	[Gbit/s]	[m]			1 G down - 0,2 G up			
ADSL2+	FTTC	0,01	0,004	1	1	0,01	0,01	2,600	i	a	n	3	y	y
VDSL2	FTTC	0,05	0,015	1	1	0,05	0,015	400	i	a	n	3	y	y
VDSL2 Vectoring	FTTC	0,09	0,04	1	1	0,09	0,04	400	i	a	n	3	n	y
VDSL2 Supervect.	FTTC	0,25	0,1	1	1	0,25	0,1	300	i	a	n	3	n	y
G.fast	FTTS/dp	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	250	i	a/s	n	3	n	y
XG.fast	FTTB	5	5	1	1	5	5	50	i	a/s	y	3	n	y
Koaxialkabel														
Docsis 3.0	fibre node	1,2	0,12	50	0,1	0,24	0,024	160.000	s	a	n	2	n	n
Docsis 3.1	fibre node	10	1	50	0,1	2	0,2	160.000	s	a	?	2	n	n
Docsis 4.0 (FD)	deep fibre	10	10	50	0,1	2	2	160.000	s	s	y	2	n	?
Glasfaser														
GPON (PtMP)	FTTH	2,5	1,25	32	0,1	0,7813	0,3906	20.000	s	a	?	2	n	y
XG.PON (PtMP)	FTTH	10	2,5	32	0,1	3,1250	0,7813	40.000	s	a/s	y	2	n	y
XGS.PON (PtMP)	FTTH	10	10	32	0,1	3,125	3,125	40.000	s	s	y	2	n	y
TWDM GPON/ NG-PON2 (PtMP)	FTTH	4 - 8 x 10	4 - 8 x 10	32	0,1	3,125	3,125	40.000	s	a/s	y	2	4 - 8 Ops	y
Ethernet PtP	FTTH	n x 25,000	n x 25,000	1	1	25	25	80.000	i	s	y	1	y	y
Funk														
LTE adv. (4G)	?	1	0,15	80	0,1	0,125	0,01875	10.000	s	a	n	3	n	n
5G (mobil)	Antenna	20	0,5	80	0,1	2,5	0,0625	50 - 10.000	s	a	n	3	n	n
FWA (5G NR)	Antenna	20	10	100	0,1	2	1	4.000 - 6.000	s	a	y	3	n	?

Quelle: WIK, NG-PON2 arbeitet mit bis zu 8 Wellenlängen, die am HVt entbündelt von mehreren Betreibern genutzt werden können

In der Tabelle folgt eine Einordnung, inwieweit sich die Übertragungsverfahren für eine Klassifizierung als VHCN (Very High Capacity Network) der EU-Kommission eignen, den Bandbreitenergebnisse je Kunde folgend, d.h. ohne Überprüfung der qualitativen Anforderungen (Abschnitt 2.2.3, BEREC guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165 vom 1.10.2020, article 18). Die Tabelle enthält auch eine QoS (Quality of Service) Spalte mit einer 3-stufigen qualitativen Bewertung der Übertragungstechnischen Parameter Latenz, Jitter und Paketverlustrate, mit 1 als dem besten Wert. Diese Bewertung ergibt sich im Grundsatz aus den in dieser Übersichtsstudie dargestellten Eigenschaften, insbesondere in den Abschnitte 2.2.3, 2.5.2.1 und 2.5.2.2.

Hinzu kommen qualitative Eigenschaften für eine regulatorischen Beurteilung:

- Erlauben die Übertragungsverfahren eine physische Entbündelung am MPoP (Hauptverteiler)?
- Eigen sich die Übertragungsverfahren für eine virtuelle Entbündelung (VULA, Virtual Unbundled Local Access) entsprechend der Markdefinitionen der EU von 2013⁷⁵

Die Übertragungsqualität, insbesondere auch die übertragbare Bandbreite, hängt zum einen von den Eigenschaften der Anschlussleitung ab, insbesondere davon, inwieweit diese gemeinsam genutzt (geshared) wird. Aber natürlich werden die Kundendaten auf den Leitungen des übergeordneten Aggregations- und Kernnetzes gemeinsam paketvermittelt im sogenannten NGN (Next Generation Network, all-IP-Netz) übertragen und auch dies bestimmt die Qualität ergänzend (additiv) mit. Diese ist allerdings für alle Anschlusstechniken als gleichermaßen ausreichend dimensioniert zu betrachten, so dass für eine Beurteilung der Anschlussnetze nur deren eigenen Charakteristika von Relevanz sind.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass FTTH PtP mit Gbit/s Ethernet die leistungsfähigste, qualitativ hochwertigste, zukunftssicherste und ökologisch sauberste der Übertragungstechnologien ist. Zudem fußt dieser Ansatz auf der einzig technologieneutralen Glasfasertopologie PtP.

Für den ökonomischen Vergleich der Architekturen verweisen wir auf die Literaturquellen im folgenden Abschnitt.

75 Ein VULA ist ein qualitativ hochwertiger Layer 2 Bitstrom mit Eigenschaften, die einem Wholesale Nachfrager einen höheren Produktgestaltungsspielraum einräumt als dies bei einem klassischen Layer 2 Best Effort Vorleistungsprodukt der Fall wäre (vgl. Plückerbaum (2018)).

3 Literaturhinweise

- Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) (2020): BEREC Guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165 vom 1.10.2020, https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2020/10/BoR_%2820%29_165_BEREC_Guidelines_VHCN.pdf
- Braun M.R., Wernick C., Plückebaum, T. Ockenfels M. (2019): Parallele Glasfaserausbauten auf Basis von Mitverlegung und Mitnutzung gemäß DigiNetzG als Möglichkeiten zur Schaffung von Infrastrukturwettbewerb, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 456, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_456.pdf
- Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team (2020); Supporting the implementation of CEF2 Digital – SMART 2017/0018, European Commission, Brussels/Luxembourg, January 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8947e9db-4eda-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-116100663>
- Elixmann, D., Ilic, D., Neumann, K.-H., Plückebaum, T. (2008): The Economics of Next Generation Access, Study for the European Competitive Telecommunication Association (ECTA), 10 September 2008, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/ECTA_NGA_Study_2008.pdf
- Europäische Kommission (2023), Mitteilung über Leitlinien für Staatliche Beihilfe zur Förderung von Breitbandnetzen (EC State Aid Guidelines) 2023/C 36/01 vom 31.1.2023, [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))
- Godlovitch, I.; Hoceped, C.; Lemstra, W.; Plückebaum, T.; Strube-Martins, S.; Kroon, P.; Lucidi, S.; Alexiadis, P.; Char, S. (2019); Future electronic communications product and service markets subject to ex-ante regulation, European Commission Brüssel/ Luxemburg, Juni 2019, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7309fa31-b758-11ea-bb7a-01aa75ed71a1>
- Ilic, D., Neumann, K.-H., Plückebaum, T. (2009): Szenarien einer nationalen Glasfaserausbaustrategie in der Schweiz, Studie für das BAKOM, Dezember 2009, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/Glasfaserausbaustrategie_Schweiz_2009_12_11.pdf
- Jay, S., Neumann, K.-H., Plückebaum, T. (2011): Implikationen eines flächendeckenden Glasfaserausbaus und sein Subventionsbedarf, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 359, Oktober 2011, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_359.pdf
- Jay, S., Neumann, K.-H., Vogelsang, I., et al. (2011): Architectures and competitive models in fibre networks, in: Vodafone, The Policy Paper Series, Nummer 13, June 2011, S. 3 ff.
- Jay, S.; Plückebaum, T.; Ilic, D.; Stamm, P. (2013): Migrationsoptionen für Breitbandkabelnetze und ihr Investitionsbedarf, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 380, Bad Honnef, September 2013, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_380.pdf
- Kroon, P.; Plückebaum, T.; Sanchez Gracia, J.; Sabeva, D.; Zoz, K. (2017): Study into current and future technological access options to all fixed telecommunications infrastructures in the Netherlands, den Haag, 21. June 2017, <https://www.acm.nl/nl/publicaties/publicatie/17463/Onderzoek-toegang-tot-vaste--telecommunicatienetwerken/>

- Kulenkampff G., Ockenfels M., Zoz K., Zuloaga G. (2020): Kosten von Breitband-Zugangsnetzen, Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up Modellierung und statistische Analyse, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 473, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_473.pdf
- Nett, L., Jay, S. (2014): Entwicklung dynamischer Marktszenarien und Wettbewerbskonstellationen zwischen Glasfasernetzen, Kupfernetzen und Kabelnetzen in Deutschland, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 388, September 2014, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_388.pdf
- Neumann, K.-H. (2013): Der dynamische Investitionswettbewerb als Leitbild der Entwicklung des Telekommunikationsmarktes, Studie für den BREKO, November 2013, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/WIK-Studie-BREKO-2013.pdf
- Neumann, K.-H.; Ockenfels, M.; Plückebaum, T. (2017); Modellierung der Kosten eines flächendeckenden Hochbreitbandnetzes in der Schweiz, Bad Honnef, 5. Oktober 2017, <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesgesetze/fmg-revision-2017.html>
- Neumann, K.-H.; Plückebaum, T.; Schäfer, S.; Eltges, F. (2020): Copper switch-off, fibre Take-up and ULL tariffs in France, Study on behalf of Iliad, Bad Honnef, 09. April 2020, https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2020/Copper_switch_off_20200417_final_final_clean.pdf
- Neumann, K.-H.; Plückebaum, T.; Strube Martins, S.; Schwarz-Schilling, C. (2021); Übergang von Kupfer aus Glasfasernetze: Interessen, Spannungsfelder und mögliche Schnittstellen, Studie zur Erörterung im Gigabitforum der BNetzA, Bad Honnef, Oktober 2021, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/Gigabitforum/WIK-Studie_Uebergang_Kupfer_Glasfaser.pdf?blob=publicationFile&v=2
- Obermann, K. (2020): Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien, Technische Hochschule Mittelhessen, 3. März 2020, https://www.brekoverband.de/site/assets/files/4853/gutachten_nachhaltigkeitsvergleich_ftth_fttc.pdf
- Ockenfels, M.; Eltges, F.; Plückebaum, T.; Godlovitch, I. (2022): Investment and funding needs for the Digital Decade targets, Study for EC, BCO Network, Bad Honnef, November 2022
- Plückebaum, T.; Jay, S.; Neumann, K.-H. (2014): Benefits and regulatory challenges of VDSL vectoring (and VULA), Florence School of Regulation, Communications Media 2014 Scientific Seminar, March 28 – 29, 2014, Florence, EUI Working Papers RSCAS 2014/ 69, <http://fsr.eui.eu/Publications/WORKINGPAPERS/ComsnMedia/2014/WP201469.aspx>
- Plückebaum, T.; Godlovitch, I. (2018); Assessment of the technicalities of VULA products in the context of a state aid investigation, Expert opinion, Version 2, EC, Brussels, March 2018, ISBN 978-92-79-79903-7, <http://ec.europa.eu/competition/publications/reports/kd0418126enn.pdf>
- Plückebaum, T., Eltges, F., Ockenfels, M. (2019); Potentiell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS, Studie im Auftrag der BNetzA, Bad Honnef, 4. Februar 2019, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK1-GZ/2019/BK1-19-0001/BK1-19-0001_WIK-Kabelgutachten_BA.pdf?blob=publicationFile&v=2

- Plückebaum, T.; Ockenfels, M. (2020): Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, WIK Diskussionsbeiträge Nr. 457, Bad Honnef, Februar 2020, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_457.pdf
- Plückebaum, T.; Wernick, C. (2021): Die Rolle von HAPS für die Breitbandversorgung im ländlichen Raum, Bad Honnef, Mai 2021, https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Kurzstudie_HAPS_deutsch.pdf
- Plückebaum, T. (2022): High Altitude Platform Systems, ITG Fachbericht 306, Breitbandversorgung in Deutschland, 16. ITG Fachkonferenz, 7.-8. Juni 2022, Berlin
- Schäfer, S.; Elbanna, A.; Neu, W.; Plückebaum, T. (2020): Mögliche Einsparungspotentiale beim Ausbau von 5G durch Infrastructure Sharing, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 472, Bad Honnef, Dezember 2020, https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_472.pdf
- Stronzik M., Zuloaga G. (2020): Empirische Untersuchung der FTTB/H-Ausbauaktivität im europäischen Vergleich, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 465, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_465.pdf
- Strube Martins, Wernick, Plückebaum, Henseler-Unger (2017): Die Privatkundennachfrage nach hochbitratigem Breitbandinternet im Jahr 2025, Bad Honnef, März 2017, https://www.wik.org/fileadmin/files/migrated/news_files/Die_Privatkundennachfrage_nach_hochbitratigem_Breitbandinternet_im_Jahr_2025_FINAL.pdf
- Wissner, M.; Elbanna, A.; Sörries, B.; Plückebaum, T. (2021): Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 478, Bad Honnef, Dezember 2021, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_478.pdf
- Zoz, K.; Zuloaga, G.; Kulenkampff, G.; Plückebaum, T.; Ockenfels, M. (2021): Costs of Very High Capacity Networks and Geographic Heterogeneity – a statistical assessment of Germany, WIK Working Paper No 4, Bad Honnef, Dezember 2021, https://www.wik.org/veroeffentlichungen/wik-working-papers/detailansicht-wik-working-papers?tx_ttnews%5BbackPid%5D=85&tx_ttnews%5Bttnews%5D=2583&cHash=487339546add7ca5b5b7e153718ae563

ISSN 1865-8997