



Breitbandtechnologien und Aus- bauszenarien

Überblick über die Technologien

Breitbandtechnologien und Ausbauszenarien

Übersicht

Abbildungsverzeichnis	2
I. Einleitung	5
II. Begriffserklärungen	7
III. Technologievarianten	9
III.1 DSL – Digital Subscriber Line	9
III.2 HFC – Hybrid Fibre Coax	10
III.3 LWL - Lichtwellenleiter	11
III.4 Funktechnische Systeme	13
III.5 Fazit.....	17
IV. Offener Netzzugang – Open Access	19
V. Netzmigration.....	21
Anhang 2 – HFC – Hybrid Fibre Coax	33
Anhang 3 – LWL – Lichtwellenleiter	41
Anhang 4 – Funktechnische Systeme	48
Anhang 5 – Offener Netzzugang - Open Access.....	71
Literaturverzeichnis	78

Stand: 31. Januar 2023

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Begriffserklärung.....	7
Abbildung 2: Symbolische Darstellung der verschiedenen Netzebene [2].....	8
Abbildung 3: Strukturelle Gegenüberstellung der verschiedenen Breitbandtechnologien [2].....	9
Abbildung 4: Übersicht über kabelgebundene und funkbasierte Übertragungstechnologien.....	17
Abbildung 5: Systemvergleich kabelgebundener Übertragungstechnologien hinsichtlich Datenrate, Latenz und Zuverlässigkeit.....	18
Abbildung 6: Darstellung physikalischer Migrationspfade.....	22
Abbildung 7: Schematische Darstellung heutiger Access-Netze und zukünftiger NGA-Netze in einem vollständigen Next Generation Network.....	25
Abbildung 8: Struktur des Kupfer-2-Draht-Netzes mit xDSL-Erweiterungen [2].....	26
Abbildung 9: Symbolische Darstellung xDSL-Spektrum bis zu VDSL2 Annex 12, [9]	28
Abbildung 10: Reichweitenabhängigkeit der maximalen Datenrate der unterschiedlichen DSL-Varianten, [4], [5]	29
Abbildung 11: Reichweitenabhängige Datenrate von VDSL2 Vectoring im Vergleich, [10], [11], [12].....	30
Abbildung 12: Klassische Struktur des Breitbandverteilsnetzes [3].....	33
Abbildung 13: Idealer Ausbau bei rechtwinkliger Straßenführung im Anschlussbereich [13]	34
Abbildung 14: Ursprüngliche Frequenzbelegung des BVN [3].....	35
Abbildung 15: Grundsätzliche Aufrüstung des BVN mit optischen Aufschaltpunkten	36
Abbildung 16: Beispielhafte Struktur eines HFC-Netzes [17].....	37
Abbildung 17: HFC-Netzstruktur bei Verkleinerung der Clustergröße [17]	38
Abbildung 18: Aufbau eines Lichtwellenleiters [18].....	41
Abbildung 19: Multimodefaser mit Stufenindex-Profil [18]	41

Abbildung 20: Multimodefaser mit Gradientenindex-Profil [18].....	42
Abbildung 21: Singlemodefaser, [16].....	42
Abbildung 22: Schematische Darstellung einer GPON Strecke, [21].....	43
Abbildung 23: Übertragung von Informationen über GPON [18], [21].....	44
Abbildung 24: Netzstruktur eines optischen Punkt-zu-Punktnetzes [22].....	45
Abbildung 25: Formel zur Berechnung der Freiraumdämpfung [3], [23]	48
Abbildung 26: Qualitative Dämpfungseigenschaften unterschiedlicher Materialien [24]	49
Abbildung 27: Formel zur Berechnung des thermischen Rauschens am Empfängereingang [23], [25]	49
Abbildung 28: Formel zur Berechnung des Gesamtrauschens unter Berücksichtigung der Empfängerrauschzahl z [23], [25].....	49
Abbildung 29: Darstellung des Signalpegels unter Berücksichtigung der Freiraumdämpfung [25]	50
Abbildung 30: Darstellung des thermischen Rauschens und des Empfängerrauschens sowie des Störabstandes [25].....	50
Abbildung 31: Graphische Ermittlung der maximalen Reichweite eines Funksystems [25]	51
Abbildung 32: Die Abbildung zeigt die grundsätzliche Zellstruktur aktueller Mobilfunknetze am Beispiel von GSM, [26], [27]	53
Abbildung 33: Tabelle der Frequenzuteilung im Mobilfunk bei 900 MHz und 1800 MHz [28], [29].....	53
Abbildung 34: Tabelle der weiteren Frequenzuteilungen im Mobilfunk [28], [29]....	54
Abbildung 35: Die Tabellen zeigen die Vor- und Nachteile der Frequenzbereiche für WLAN-Netze gegenüber [23].....	56
Abbildung 36: WLAN-Standards, Betriebsfrequenzbereich und der jeweilige Bruttodatenraten [23], [31], [32].....	56
Abbildung 37: Darstellung einer Richtfunkverbindung [33]	57

Abbildung 38: Formel zur Berechnung der kleinen Halbachse des Fresnel-Ellipsoiden [23]	58
Abbildung 39: Footprint eines Satelliten zur Versorgung von Nordafrika und Zentraleuropa (Quelle: SAT7UK).....	61
Abbildung 40: Geostationärer Satellit (Quelle: www.easy-wetter.de)	62
Abbildung 41: 1-Wege-Satellitenkommunikation für Internetzugang (Quelle: Wikipedia)	63
Abbildung 42: DVB-RCS-System für die Internet-Anbindung (Quelle: SES S.A.).....	64
Abbildung 43: Aufteilung des Footprint in einzelne Beams bei geostationären Satelliten rot eingezeichnet ist der Abdeckungsbereich (Quelle: Eutelsat).....	65
Abbildung 44: Vergleich von Spotbeam-Satelliten mit klassischen Direkt-Empfang-Satelliten, Quelle: Telenorsat.....	66
Abbildung 45: Satelliten-Konstellation des Starlink-Systems, Quelle: SpaceX.....	68
Abbildung 46: Starlink-Antennensystem, Quelle: Tesla Satellite	69
Abbildung 47: Open Access Modell.....	73
Abbildung 48: Vorleistungsprodukte der Telekom Deutschland.	74
Abbildung 51: Zugangsvarianten und Kooperationsmodelle (Quelle VATM).	77

I. Einleitung

Die Zielsetzung der Gigabitstrategie des Bundes beinhaltet bis 2025 mindestens 50 Prozent der Haushalte mit Glasfaser zu versorgen und bis 2030 sollen flächendeckend Glasfaseranschlüsse „bis ins Haus“ zur Verfügung stehen. Eine flächendeckende Glasfaserversorgung ist auch das Ziel der Landesregierung NRW. Mit der erstmaligen Formulierung eines Infrastrukturziels stehen Politik und Wirtschaft vor großen Herausforderungen: Es müssen enorme Investitionen in den Ausbau von Glasfasernetzen getätigt werden.

Die Ziele der Gigabitstrategie [1] stehen im Einklang mit den Entwicklungen im Breitbandmarkt und definieren kurzfristig „Etappenziele“ und langfristig ein Infrastrukturziel. Zur Erreichung dieser Ziele stehen unterschiedliche Technologien zur Verfügung. Dieses Papier soll grundlegende Informationen zu den wesentlichen Technologien sowie zur Migration zur Glasfaserinfrastruktur geben.

Der Begriff „Breitband“ ist weder international noch national klar definiert. Überwiegend werden in diesem Zusammenhang Datenraten, d. h. die Anzahl der von A nach B übertragbaren (brutto)-Daten pro Sekunde z. B. in Megabit/s (Mbit/s) im Sinne einer „Übertragungsgeschwindigkeit“ genannt.

Daraus folgt, dass unter „Breitband-Ausbau“ eine technologische Plattform verstanden wird, die Daten mit einer Datenrate transportieren kann. In der öffentlichen Diskussion wird sich im Allgemeinen auf den Transport in Kundenrichtung (sog. Down-Stream (DS)) beschränkt. Dieses ist für die Bewertung von Technologien allerdings nicht hinreichend und vor allem im Hinblick auf eine Entscheidung für oder gegen eine Ausbau-Technologie eine zu starke Vereinfachung.

Ohne Berücksichtigung einer entsprechenden Tarifierung aus Endkundensicht zeichnen folgende wesentlichen Merkmale den zukunftsgerichteten Breitband-Ausbau hinsichtlich der Infrastruktur aus, u. a.:

- Bereitstellung der Transportdienstleistung nach Wunsch des Kunden, d. h. der Kunde kann entscheiden, welche Dienstleistung z. B. TV, Telefon, Internetzugriff er in welcher Qualitätsausprägung in Anspruch nehmen möchte,
- Möglichkeit einer bezüglich der Datenrate symmetrischen Transportdienstleistung im Up- und Downstream, d. h. sofern vom Kunden gefordert, kann die Infrastruktur dieses bereitstellen,
- Anbieteroffenheit, d. h. der Kunde kann entscheiden, von wem er eine Dienstleistung auf demselben Netz in Anspruch nehmen möchte (vergleichbar zur Wahl eines Energieanbieters), ohne dass damit ein physikalischer Netzwechsel notwendig wird,
- Möglichst geringer Energieverbrauch für die Bereitstellung,
- Hohe Servicequalität insbesondere im Hinblick auf industrielle Endkunden.

Aus der Kundenperspektive wird derzeit nach der Übertragungsgeschwindigkeit, den Dienstmerkmalen und den Preisen bzw. Entgelten unterschieden. Damit ein Kunde einen Dienst wie z. B. Telefonie, TV-Versorgung oder Internet-Zugang nutzen kann, muss allerdings eine komplexe Infrastruktur existieren und betrieben werden sowie ein Zusammenspiel unterschiedlicher Technologien erfolgen.

Sind aus Kundensicht verschiedene Anbieter vorhanden, so ist es schwierig, Vor- und Nachteile eines Angebotes einzuordnen und in Zusammenhang mit den eigenen Anforderungen zu bringen. Übergeordnete Aspekte wie z. B. die Durchlaufzeit (Verzögerungszeit) durch die Netze oder deren Energieverbrauch kann und wird vom Endkunden in der Regel nicht berücksichtigt. Jedoch müssen gerade diese Fragen beim weiteren Ausbau der Netze verstärkt in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt werden, um einen zukunftssicheren Ausbau zu gewährleisten.

Nachfolgend werden die wesentlichen Technologieplattformen für eine Internet-Versorgung erläutert. Dabei steht dieser Begriff im Folgenden für eine universelle Plattform, die in der Lage ist, die als Triple-Play bezeichnete Dienstvielfalt (TV, Telefon, Internet-Zugang) zu transportieren.

II. Begriffserklärungen

Die wesentlichen, in diesem Dokument verwendeten Begriffe werden in den folgenden Tabellen vorab kurz erläutert.

Begriff	Erläuterung
Kernnetz (Backbone)	Das Kernnetz (Backbone) besteht aus den globalen, nationalen und überregionalen Vermittlungsstellen. Sie sind mit Glasfaser und Richtfunk verbunden. Die Datenraten beginnen mit 100 Mbit/s bis über 100 Gbit/s pro Strecke. Auf diesen Verbindungsstrecken gibt es in der Regel kaum Engpässe.
Regional-Netz	Das Regional-Netz liegt zwischen dem Kernnetz und den Zugangsnetzen. Es dient dazu die einzelnen Zugangsnetze in einer Region (z. B. Kommune) an das Kernnetz anzuschließen. Sie werden benötigt, um die geforderten Kapazitäten in die Siedlungs- und Gewerbegebiete zu bringen. Die Regional-Netze sind aktuell nicht ausreichend ausgebaut.
Zugangsnetz (Last Mile)	Das Zugangsnetz (Access-Netz, Anschlussnetz, letzte Meile) umfasst die "letzte Meile" zum Nutzer. Für dieses Netz gibt es kabelgebundene, optische und drahtlose Netzarchitekturen. Die beiden Hauptnetztechnologien in Deutschland sind das Telefonnetz und das Kabelfernsehnetz (HFC). Die Zugangsnetze stellen sehr häufig einen Engpass dar.
Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL)	Als Teilnehmer-Anschluss-Leitung (TAL) wird die anschlussbezogene Kupferdoppelader zwischen der Ortsvermittlungs-Stelle (OVSt) und dem Teilnehmer (TAE) im Telefonnetz bezeichnet. Sie ist reguliert und entbündelt und kann von alternativen TAL-Betreibern genutzt werden. Die TAL ist teilnehmernah i. d. R. durch einen Kabelverzweiger (KVz) unterbrochen, zu dem hochadrigen Hauptkabel hinführen und von dem die einzelnen Hausanschlüsse wegführen.
Digitale Subscriber Line (DSL)	DSL ist eine Zugangstechnologie auf Basis des Kupfer-2-Draht-Netzes (Telefonnetz). Es wurde Ende der 1990er Jahre eingeführt und seither beständig weiterentwickelt. Heute sind Datenraten bis zu 100 Mbit/s im Nahbereich möglich.
Fibre to the Cabinet (FTTC)	Hybride Strukturen nutzen optische Abschnitte auf der Teilnehmeranschlussleitung bis zu einem Outdoor-DSLAM (z. B. FTTC - Fibre to the Cabinet (curb)). Hier erfolgt eine opto-elektrische Umsetzung. Der Anschluss der Teilnehmer erfolgt dann auf den letzten Metern über die Kupferdoppelader. Bei FTTC handelt es sich stets um verschiedene DSL-Varianten.
Vectoring, G.fast	Bei Vectoring bzw. G.fast handelt es sich um die aktuellsten Entwicklungsvarianten von DSL, die in Deutschland zum Einsatz kommen. Dabei werden die auf den Kupferkabeln auftretenden Störungen durch intelligente Verfahren der Signalverarbeitung reduziert, um die maximale Datenrate weiter zu erhöhen. Die Signalreichweite ist auf wenige 100 m begrenzt.
Hybrid Fibre Coax-Netze (HFC-Netze)	Der kundenseitige Zugang erfolgt über das in den 80iger Jahren gebaute Kupfer-Koaxial-Netz des Kabel-TV. Die zunächst nur für Verteilzwecke konzipierte Struktur, wurde durch Einsatz neuer Techniken und Teil-Überbauung mit Glasfaserkabeln rückkanalfähig gemacht. Eine wesentliche Größe ist die Cluster-Größe, d. h. die von einem Glasfaserzugang versorgte Anzahl von Haushalten, da sich in diesem Cluster die zugeführte Gesamtdatenmenge auf diese aufteilt. HFC-Netze können auch größere Leitungslängen überbrücken.
Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS)	Bei DOCSIS handelt es sich um den Übertragungsstandard für HFC-Netze. Der aktuellste Standard ist DOCSIS 4.0, der Datenraten bis zu 10 GBit/s im Downstream und 6 GBit/s im Upstream ermöglichen sollen. Eine Einführung von DOCSIS 4.0 ist derzeit noch nicht abzusehen. Aktuell kommen DOCSIS 3.0 und DOCSIS 3.1 zum Einsatz. Hier werden momentan Datenraten von bis zu 1 GBit/s im Downstream und 50 Mbit/s im Upstream realisiert.
Drahtlose Zugangsnetze	Es gibt unterschiedliche funktechnische Zugangstechnologien zum Teilnehmer, wie WiMAX, Satellitenkommunikation (skyDSL), Richtfunk, UMTS, LTE. Zu unterscheiden sind Systeme für den Mobilfunk (z. B. UMTS, LTE), von denjenigen der Individualverbindung (Richtfunk) sowie Systemen des Rundfunks (Satellit, WLAN). Mobilfunksysteme sind ergänzende Systeme für die mobile Anbindung. Sie werden die kabelgebundenen Zugangsnetze nicht ersetzen können.
Optische Zugangsnetze	Optische Zugangsnetze bestehen in der gesamten Strecke zum Teilnehmer aus Glasfaser. Unterschieden werden aktive (AON) und passive Netze (PON); diese reichen bis in das Gebäude (FTTB) bzw. bis in die Wohnung (FTTH). Die optischen Zugangsnetze bieten auch langfristig die höchsten Kapazitäten, z. B. hinsichtlich der maximalen Datenraten in Up- und Downstream, aber z. B. auch der Variabilität, der Verzögerungszeiten und ihrer Erweiterbarkeit.
Next Generation Access (NGA)	Der Begriff Next Generation Access ist, ähnlich wie der Breitbandbegriff, nicht standardisiert und wird daher von verschiedenen Parteien unterschiedlich eingesetzt. In diesem Papier werden ausschließlich FTTB/H-Infrastrukturen als NGA-Netze bezeichnet.
Open Access	Open Access bezeichnet den offenen, transparenten und für alle Diensteanbieter gleichen Zugang zur Netzinfrastruktur und/oder Transportdienstleistung. Derzeit ist der Open Access Begriff nicht einheitlich definiert. So wird er z. B. im Kontext der TAL als physikalischer Zugang zur Infrastruktur verstanden. Im Kontext von DOCSIS oder Vectoring als logischer Zugang zu einer Transportdienstleistung der Infrastrukturbetreiber. In diesem Papier wird unter Open Access der direkte Zugang zur Infrastruktur oder eines selbst zu verwaltenden Transportweges (z. B. eigene Wellenlänge) verstanden.

Abbildung 1 Begriffserklärung

Zur Veranschaulichung sind die verschiedenen Netzebenen in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

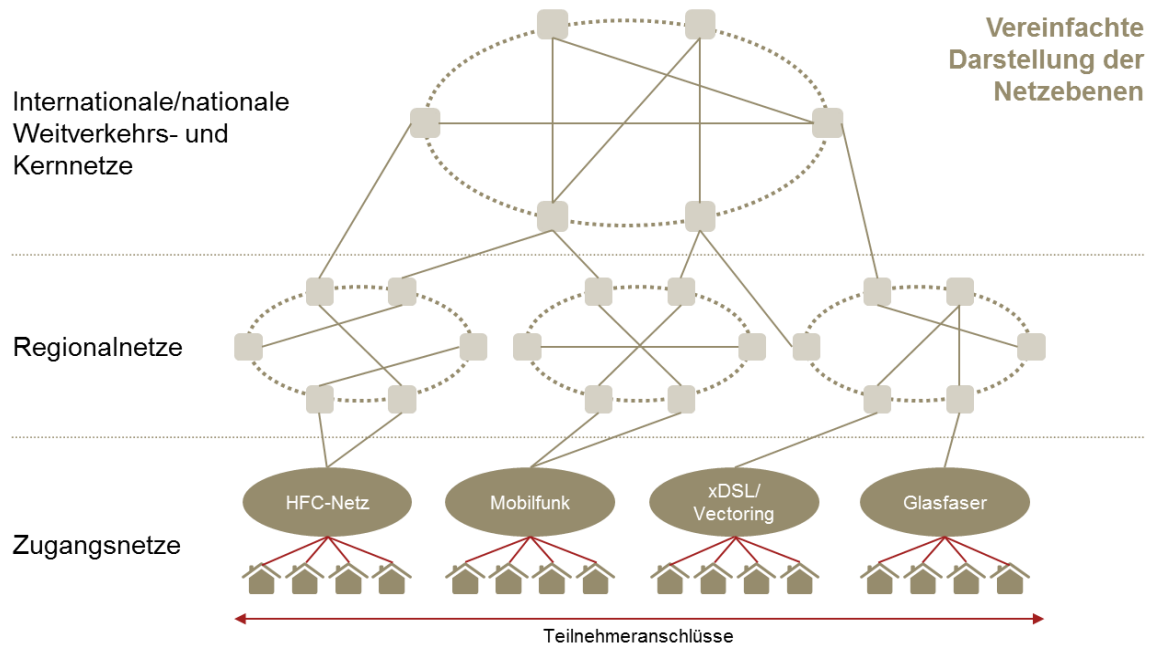


Abbildung 2: Symbolische Darstellung der verschiedenen Netzebene [2]

III. Technologievarianten

Die Internetzugänge in Deutschland werden über verschiedene Infrastrukturen realisiert. Nachfolgend werden die wichtigsten Technologien eingehender beschrieben und deren Vor- und Nachteile kurz dargestellt.

Die dargestellten Technologien sind:

1. DSL – Digital Subscriber Line
2. HFC – Hybrid Fibre Coax
3. LWL – Lichtwellenleiter
4. Funksysteme

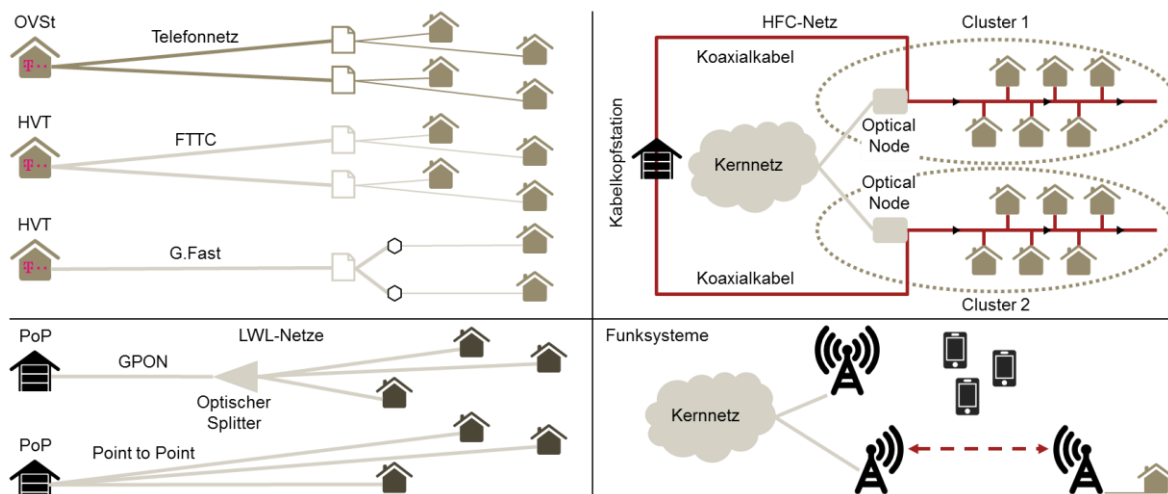


Abbildung 3: Strukturelle Gegenüberstellung der verschiedenen Breitbandtechnologien [2]

III.1 DSL – Digital Subscriber Line

DSL, oder genauer Digital Subscriber Line, war die erste breitbandige Zugangstechnologie für den Endkundenmarkt in Deutschland und wurde Ende der 1990er Jahre von der Deutschen Telekom eingeführt. DSL nutzt das Kupfer-2-Draht-Netz (auch Telefonnetz genannt) zur Anbindung der Kunden an das Internet.

Die zwischen Ortsvermittlungsstelle (OVSt) und Teilnehmeranschluss liegende Verbindung wird als Teilnehmeranschlussleitung (TAL) bezeichnet, die i. a. in der Nähe der Hausanschlüsse durch einen Kabelverzweiger (KVZ) unterteilt ist.

Die Nutzung des Kupfer-2-Draht-Netzes war ein erster Schritt, da das Telefonnetz flächendeckend in Deutschland ausgebaut ist. Allerdings ist die Signalreichweite bezogen auf die Leitungslänge der TAL bei Nutzung einer DSL-Übertragung geringer als bei einem Telefonsignal. Durch diesen Reichweitenunterschied entstanden die sogenannten weißen Flecken, also Anschlussbereiche, die nicht mit DSL versorgt werden konnten.

In den vergangenen Jahren wurde die DSL-Technologie beständig weiterentwickelt. Insbesondere wurde die maximal erzielbare Datenrate immer weiter erhöht, womit allerdings durch steigende Dämpfungswerte, die überbrückbaren Leitungslängen beständig kürzer werden. Um die zu nutzende 2-Draht-Leitungslänge zu verkürzen, wurden die DSL-Aufschaltpunkte aus den OVSt in die Kabelverzweiger verlegt. Diese Outdoor-DSLAMs werden an die OVSt mittels einer Glasfaser (in einigen Fällen alternativ per Richtfunk) angebunden. Dieser Netzausbau wird als FTTC – fibre to the cabinet / curb bezeichnet.

Die aktuelle Entwicklungsstufe, ist die sogenannte Vectoring-Technologie auf Basis eines FTTC-Ausbaus. Mithilfe einer verbesserten Störungssignalunterdrückung können mit Vectoring Datenraten von bis zu 250 MBit/s auf kurzen Strecken erreicht werden. Eine Einführung in Regionen mit einer geringeren Siedlungsdichte führt daher zu einer deutlichen Erhöhung der aktiven, mit Energie zu versorgenden Gerätetechnik in Form von zusätzlichen Outdoor-DSLAMs.

DSL ist in realen Netzen nicht gigabitfähig.

Weiterführende Informationen finden Sie **hier**.

III.2 HFC – Hybrid Fibre Coax

Die Kabelfernsehnetze wurden in den 1980er Jahren in Teilgebieten Deutschlands aufgebaut, jedoch nicht flächendeckend. Diese dienen und dienen im Wesentlichen zur Versorgung der Privatkunden, daher finden sich diese Netze kaum in reinen Gewerbegebieten. Eine geografische Ausdehnung, d. h. eine Erschließung weiterer Wohn- oder Gewerbegebiete fand in den letzten Jahren nur selten statt. Man konzentrierte sich vor allem auf die Verbesserung bzw. Erweiterung der Angebote im Bestandsgebiet.

Bei den Hybrid Fibre Coax Netzen handelt es sich um diese Kabelfernsehnetze, die mittels überlagerter Glasfaserverbindungen rückkanalfähig ausgebaut wurden. Ursprünglich waren diese Kabelfernsehnetze nur als reine Rundfunkverteilnetze konzipiert und konnten Informationen (Fernseh- und Radioprogramme) nur zu den Nutzern transportieren. Erst nach der Privatisierung derjenigen Netzebene, die bis zum Endkunden reicht, in den 90-iger-Jahre, begannen die neuen Eigner dieser Infrastruktur ab den 2000er Jahren die einzelnen Kabelnetze mittels Glasfaserverbindungen und neuen Verstärkern so aufzurüsten, dass auch Daten von den Nutzern zurücktransportiert werden konnten (Aufbau der HFC-Netze). Damit wurden die Verteilnetze in Kommunikationsnetze umgebaut und es konnten Internetdienste bzw. Triple-Play-Dienste (Telefon, TV und Internet) angeboten werden.

In den Regionen, in denen ein derartig aufgerüstetes Kabelfernsehnetz (HFC-Netz) besteht, können bereits heute Datenraten von bis zu 400 MBit/s im Downstream erzielt werden. In den Bereichen, in denen der Standard DOCSIS 3.1 bereits eingeführt wurde sind bis zu 1 GBit/s im Downstream über HFC-Netze möglich. Einschränkungen

gibt es im Bereich des Upstreams. Hier sind derzeit i. d. R. nicht mehr als 50 Mbit/s möglich. Für symmetrische Anbindungen ist das System jedoch primär nicht ausgelegt.

Es ist zudem zu beachten, dass sich alle Nutzer eines Anschlussgebietes (Cluster) die Datenrate sowohl im Upstream als auch im Downstream teilen, s. Abb. 1. Häufig wird deshalb das HFC-Netz als *shared medium* bezeichnet. Daher verkleinern die Kabelnetz-Betreiber im Rahmen ihrer Ausbauvorhaben Zug um Zug diese Cluster, so dass weniger Nutzer in einem Cluster von einem Glasfaserübergabepunkt zu versorgen sind.

Die HFC-Netze sind aufgrund ihrer hybriden Struktur vergleichsweise energieintensiv. So muss sowohl das klassische Kabel-TV-Netz mit seinen vielen Verstärkern als auch die übergebaute Glasfaserinfrastruktur der Cluster mit Energie versorgt werden. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Verstärker in den Clustern auch Signale in Rückrichtung übertragen müssen, was bei einer reinen TV-Nutzung nicht der Fall ist. Weiterhin kommen rückkanalfähige Verstärker an den Hausanschlüssen hinzu, die in der normalen TV-Nutzung nicht notwendig sind, d. h. auch beim Endkunden sind gegebenenfalls Eingriffe in die Hausverteilung erforderlich, um diese für Kommunikationsdienstleistungen zu ertüchtigen.

HFC-Netze sind technologisch in der Lage Datenraten von 1 GBit/s zu ermöglichen. Allerdings teilen sich alle Teilnehmer eines Anschlussbereiches diese Maximaldatenrate und die Nutzbarkeit der Technologie ist neben technischen Restriktionen auch von regulatorischen Fragen abhängig. Die HFC-Netze sind in Deutschland daher als bedingt gigabitfähig anzusehen.

*Weiterführende Informationen finden Sie **hier**.*

III.3 LWL - Lichtwellenleiter

Die Glasfaser (Lichtwellenleiter – LWL) als Übertragungsmedium erlaubt aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften sowohl die höchsten Datenraten als auch die größten Übertragungstrecken ohne Verstärkung. Sie ist damit besonders gut geeignet, existierende Engpässe in den Zugangsnetzen und den Regional-Netzen auf lange Sicht zu beheben. Allerdings bedarf es eines konsequenten und zielgerichteten Einsatzes. Dies bedeutet, dass das gesamte Zugangsnetz glasfaserbasiert sein muss – Fibre to the building (FTTB). Solange Teilstrecken zwischen dem zentralen Einspeisepunkt (Point of Presence – PoP) und dem Hausanschluss in einer Kupfer- oder Funktechnologie (Ausnahme Carrier Grade Richtfunk) implementiert sind, können die Vorteile der Glasfaser nicht vollumfänglich ausgespielt werden.

Zur Realisierung von FTTB-Netzen bzw. zur Erschließung der geografischen Bereiche stehen im Wesentlichen zwei Glasfasertechnologien bzw. Netztopologien zur Verfügung, s. *Abbildung 3*:

- GPON – Gigabit Passive Optische Netze
- Point to Point - Netze

Bei *GPON* handelt es sich um durchgängig glasfaserbasierte Zugangsnetze, welche zwischen Nutzer und PoP über rein passive Komponenten verfügen. Bei GPON kommt eine optische Splitter-Technik zum Einsatz: Dabei wird das optische Signal, welches auf einer Glasfaser zum Splitter geführt wird, mittels eines optischen Splitters auf mehrere Kundenanschlussleitungen aufgeteilt. Typische Split-Faktoren liegen bei 1:32 – 1:64. GPON hat den Vorteil, dass vom PoP eine geringere Anzahl an Glasfasern in Richtung der Nutzer abgehen und im PoP eine deutlich geringere Faseranzahl zu verwalten ist. Erst am Splitter wird Glasfaseranzahl an die tatsächliche Anschlussanzahl angepasst. Dieses ist zum Beispiel in stark verdichteten Städten von Vorteil, da i. d. R. kaum noch Platz zum Verlegen neuer Kabel in den Gehwegen besteht. Von Nachteil ist, dass alle an einen Splitter angeschlossenen Kunden das Gesamtsignal erhalten und die für Sie jeweils vorgesehenen Daten erst noch „herausfiltern“ müssen. Dadurch teilen sich auch die jeweils aktiven Nutzer an einem Splitter die maximal verfügbare Datenrate in diesem Netzsegment.

Die eingesetzte Splitter-Technik bedingt weiterhin, eine möglichst einheitliche Glasfaser-Leitungslänge aller Anschlüsse an einem Splitter, was u.a. auf die minimal benötigte Signalleistung am Empfänger beim Kunden zurückzuführen ist. So muss das Gesamtsignal im PoP mit so großer Leistung auf die Glasfaser gegeben werden, dass es am weitentferntesten Anschluss noch mit der erforderlichen Empfangsleistung ankommt. Ist dies nicht der Fall, ist eine Datenübertragung dorthin nicht möglich. Ist der Unterschied in der Leitungslänge zwischen dem nächsten und dem weitentferntesten Anschluss an einem Splitter zu groß, ist die Signalleistung am Empfänger des nächstgelegenen Anschlusses jedoch viel zu stark. Im Extremfall kann es sogar zu einer Zerstörung des Empfängers führen.

Daher ist die GPON-Technologie in ländlich strukturierten Regionen mit seinen sehr unterschiedlichen Leitungslängen je Anschluss eher ungeeignet. In hochverdichteten Ballungsräumen kann sie jedoch Vorteile bieten.

Point to Point-Netze sind – ähnlich wie die GPON-Netze – zwischen PoP und Hausanschluss rein passiv, verfügen jedoch nicht über Splitter. Daher bedarf es mindestens einer dedizierten Glasfaser vom PoP bis zum Teilnehmeranschluss. Jeder Anschluss erhält nur die für ihn bestimmten Daten und es steht ihm die volle (ggf. individuell konfigurierte) Datenrate zur Verfügung. Auch bestehen keine Restriktionen hinsichtlich unterschiedlicher Anschlusslängen. Dies macht Point to Point Netze insbesondere für die Versorgung ländlich strukturierten Regionen interessant.

Für beide Technologien gilt aus heutiger Sicht, dass sie die leistungsfähigste Infrastruktur mit der höchsten Flexibilität in der Anwendung darstellen. Auch können FTTB-

Netze deutlich höhere Entfernungen (>20 km) überbrücken, was insbesondere in halbstädtischen und dünnbesiedelten Gebieten eine vereinfachte Erschließung der Fläche erlaubt. Zudem ist der Energiebedarf aufgrund der vergleichsweise wenigen aktiven Komponenten und den großen Verdichtungszahlen (insbesondere aufgrund der großen Leitungslängen) relativ gering.

Das Glasfasernetz kann entweder als „Fiber-to-the-Building“ (FttB) bis zum Hausanschluss oder als „Fiber-to-the-Home“ (FttH) bis in die Wohnungen geführt werden. Für Kommunen und Kreise kommt primär der Ausbau bis zum Hausanschluss (FttB) in Betracht. Im Bereich der Eigenheime kann FttB und FttH gleichgesetzt werden.

FTTB-Netze sind, wenn sie konsequent und ihre Technologievorteile ausnutzend aufgebaut werden, deutlich energieeffizienter und betriebssicherer als die DSL-Varianten oder die HFC-Netze sein. Dieses liegt insbesondere an der weitaus geringeren Anzahl an aktiven Komponenten, als auch den hohen Verdichtungen der Anschlüsse auf wenige Konzentrationspunkte (PoP).

LWL-Netze, ob GPON oder PtP, sind als absolut gigabitfähig einzustufen.

*Weiterführende Informationen finden Sie **hier**.*

III.4 Funktechnische Systeme

Funktechnische Systeme zur Internet-Anbindung der Endkunden gibt es in großer Vielfalt auf Basis unterschiedlicher Technologien und für verschiedene Anwendungsszenarien. Sie sind heute eine wichtige Infrastruktur zur Versorgung sowohl stationärer als auch mobiler Endgeräte. In Abhängigkeit ihres Einsatzgebietes gibt es sehr viele unterschiedliche Übertragungstechnologien und Gesamtsysteme.

Im Kontext der Breitbandversorgung lassen sich jedoch vier Obergruppen bilden:

- Mobilfunksysteme
- Funksysteme für lokale Netzwerke
- Richtfunksysteme
- Hybridsysteme
- Satellitensysteme

Mobilfunksysteme dienen in erster Linie der Versorgung mobiler Endgeräte. Deren Anzahl ist in den letzten Jahren sprunghaft mit der Einführung der Tablet-Computer und des Smartphones gestiegen, so dass immer höhere Anforderungen an die Versorgungsqualität gestellt werden. Mitte der 90er Jahre begann mit der Einführung des GSM-Systems die „Mobilisierung“ der Telefonie. Inzwischen ist die Telefonie-Anwendung hinsichtlich des Nutzerverhaltens durch die Datenanwendungen bei der mobilen Nutzung verdrängt worden.

Mobilfunksysteme haben einen zellularen Netzaufbau. Die Zellengröße beschreibt i. a. den Versorgungsbereich einer Basisstation. Ein Grund für die Zellstruktur ist die Kapazitäts- bzw. Lastplanung. Die Ressourcen, z. B. die verfügbare Datenrate oder

die Anzahl versorgbarer Teilnehmer, sind in den (Mobil-)Funksystemen generell begrenzt. Eine Aufteilung des Netzes in einzelne Zellen vervielfacht die Kapazitäten, da diese in jeder Zelle wieder neu zur Verfügung stehen. Allerdings müssen alle Basisstationen an das Kernnetz angebunden werden, um den Verkehr ab- bzw. hinführen zu können. Dieses erfolgt über Glasfaser- oder Richtfunkstrecken.

Gerade die Kapazitätsbegrenzung der Funksysteme im Allgemeinen und der Mobilfunksysteme im Speziellen sind im Hinblick auf die Breitbandversorgung zu betrachten. Die Ressourcenzuteilung für den einzelnen Nutzer erfolgt dabei auf Basis der Übertragungsbedingungen, die durch den jeweiligen Standort des Endgeräts bestimmt werden. Faktoren sind dabei u. a.:

- die Entfernung vom Teilnehmer zur Basisstation,
- befindet sich der Teilnehmer innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes,
- ist der Teilnehmer in Bewegung.

Aufgrund der Ressourcenzuteilung stehen den Nutzern zu unterschiedlichen Zeiten und an unterschiedlichen Standorten z. B. verschiedene Datenraten zur Verfügung. Aufgrund der stetig wachsenden Anzahl sowie der zunehmenden Nutzung von Applikationen auf mobilen Endgeräten, werden Kapazitätserhöhungen im Mobilnetz absorbiert, so dass das Mobilfunknetz nicht als Substitut für ein leistungsfähiges Festnetz betrachtet werden kann. Darüber hinaus steigt mit der Reduzierung der Zellgröße und der Erhöhung der Kapazität in den einzelnen Funkzellen der Energieverbrauch des Netzes.

Funksysteme für lokale Netzwerke dienen u. a. der Hausautomation¹ oder der Multimedia-Vernetzung. Die Anwendungen unterliegen sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Daher wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Systeme für lokale Funknetze entwickelt, die auf die jeweiligen Erfordernisse zugeschnitten sind. Sie vernetzen Computer, Notebooks, Tablets, Smartphones etc. über kurze Entfernungen. Dabei wird entweder über einen Access-Point eine Art Funknetz aufgebaut, in dem sich die Geräte anmelden müssen. Oder aber ein Endgerät kann ein ad hoc-Netzwerk aufbauen, in dem in der Regel zwei Geräte direkt miteinander kommunizieren.

Anders als die zuvor beschriebenen Mobilfunksysteme, arbeiten die WLAN-Systeme in allgemein freigegebenen Frequenzbereichen von 2,4 GHz und 5 GHz (ISM-Bänder - Industrial Science Medical). Somit muss der Aufbau und Betrieb eines WLAN-Netzes *nicht* durch die Bundesnetzagentur genehmigt werden. Ohne diese allgemeine Nutzungserlaubnis wäre eine realistische Nutzung nicht möglich. Die Genehmigungsfreiheit hat jedoch den Nachteil, dass auch viele andere Systeme diese Frequenzbereiche nutzen. Das Störpotential ist daher grundsätzlich sehr hoch. Die Reichweite der

¹ Unter dem Begriff Hausautomation werden Komfort- und Sicherheitsfunktionen wie z.B. Heizungs-, Rolladensteuerung, Licht- und Energie-Management verstanden. Häufig auch als Smart-Home bezeichnet, schließt die Hausautomation demgegenüber die Multimedia-Vernetzung aus.

WLAN-Systeme ist im Freiraum auf einige 100 Meter begrenzt und kann deutlich unter 100 Meter innerhalb des Hauses liegen.

Wird über ein WLAN-Netz eine Internetverbindung bereitgestellt, so muss diese über den privaten oder den Breitbandanschluss eines Unternehmens dem Access-Point zugeführt werden. Damit belasten die WLAN-Geräte auch immer den Festnetzbreitbandanschluss, sofern eine Internetanbindung besteht. Alle Dienste, die im WLAN eine Verbindung nach außen benötigen, belasten den Festnetzanschluss. Dieses gilt auch z. B. für darüber geführte Telefonie (Voice over IP).

Freie WLAN-Netze wie „Freifunk“ werden häufig in Städten angeboten. Freie WLAN-Netze sind jedoch kein geeignetes Mittel, um die grundsätzliche Breitbandversorgung zu verbessern.

Richtfunkssysteme sind i. a. hochbitratige Übertragungswege, die symmetrische Verbindungen herstellen können und daher als Ersatz für leitungsgebundene Verbindungen zu betrachten sind. Diese Systeme sind seit Jahrzehnten international sehr zuverlässig im Einsatz und im Bereich des Kernnetzes Alternativen zu Glasfaserverbindungen, insbesondere als Zuführungsstrecken. Es werden Punkt-zu-Punkt- und Punkt-zu-Multipunkt-Systeme unterschieden.

Professionelle Systeme für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen arbeiten in verschiedenen Frequenzbereichen²; diese bedürfen für einen Betrieb einer Einzelzuteilung durch die Bundesnetzagentur, wodurch eine möglichst störungsfreie und effiziente Nutzung der dem Richtfunk zugewiesenen Frequenzen gewährleistet werden soll.

Neben den Punkt-zu-Punkt-Systemen gibt es auch Punkt-zu-Multipunkt-Systeme. Hier werden die elektro-magnetischen Wellen nicht so stark wie bei den Punkt-zu-Punkt-Verbindungen gebündelt. Dadurch können mehrere Teilnehmerstationen von einem festen Punkt aus erreicht werden, die im Strahl des Senders liegen. Für Punkt-zu-Multipunkt-Systeme stehen Frequenzen in den Bereichen 26 GHz und 28 GHz zur Verfügung.

Richtfunkssysteme sind kostengünstige und effiziente Mittel, um hohe Datenraten mit sehr hohen Verfügbarkeiten über große Strecken zu realisieren. Sie können daher ein wichtiger Baustein zur Verbesserung der Breitbandversorgung in ländlichen Räumen sein. Von besonderem Vorteil sind die schnelle Realisierbarkeit und die rückstandslose Rückbaubarkeit.

Neben den reinen auf funktechnische Verbindung setzenden Internet-Anbindungen (Richtfunk, WLAN, Mobilfunk) werden im Markt *Hybrid-Systeme* angeboten. Dabei handelt es sich um Festnetzanschlüsse, die durch funktechnische Lösungen (häufig auf Basis der Mobilfunknetze) unterstützt werden, um dem Kunden eine höhere Datenrate bereitstellen zu können. Dieses gilt für Regionen, die nicht oder nicht hinreichend über kabelgebundene Systeme versorgt werden und deren kabelgebundener

² 4 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 13 GHz, 15 GHz, 18 GHz, 23 GHz, 26 GHz, 28 GHz, 32 GHz, 38 GHz, 42 GHz, 52 GHz und 71-76/81-86 GHz.

Ausbau aus Sicht der Netzbetreiber nicht lohnt. Dazu werden die aufgerüsteten Outdoor-DSLAMs (im Falle von 2-Draht-Verbindungen über DSL) oder fibre nodes (Kabel-TV/HFC-Netze) mit zusätzlichen funktechnischen Einrichtungen versehen. Sowohl netz-, als auch teilnehmerseitig erfolgt eine dynamische Verkehrsaufteilung.

Abschließend sind Satellitensysteme zur digitalen Datenkommunikation zu erwähnen. Die Kommunikationsverbindung wird dabei vom Endkunden zum Satelliten und vom Satelliten zur Erdbasisstation und abschließend ins Internet aufgebaut. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Entfernung zwischen Satelliten und Endkunden bzw. Basisstation erhebliche Signallaufzeiten entstehen. Diese Systeme sind daher für Echtzeitanwendungen, wie z. B. die Telefonie oder Videokonferenzen nicht geeignet. Die einfache Datenübertragung ist hingegen unproblematisch. Um die Signallaufzeit zu verkürzen, wurden Satellitensysteme in deutlich niedrigeren Atmosphärenschichten entwickelt – Starlink ist hier als Beispiel zu nennen. Allerdings sind solche Systeme sehr teuer zu betreiben. Zunächst ist eine Vielzahl an Satelliten notwendig – Starlink betreibt aktuell über 3.000 Satelliten. Hinzu kommt, dass aufgrund der niedrigen Umlaufbahn eine starke Reibung der Erdatmosphäre an den einzelnen Satelliten entsteht und diese dadurch eine deutlich kürzere Lebensdauer aufweisen und kontinuierlich ersetzt werden müssen.

Als zeitlich befristete Übergangslösungen während des Breitbandausbaus sind sie jedoch geeignet.

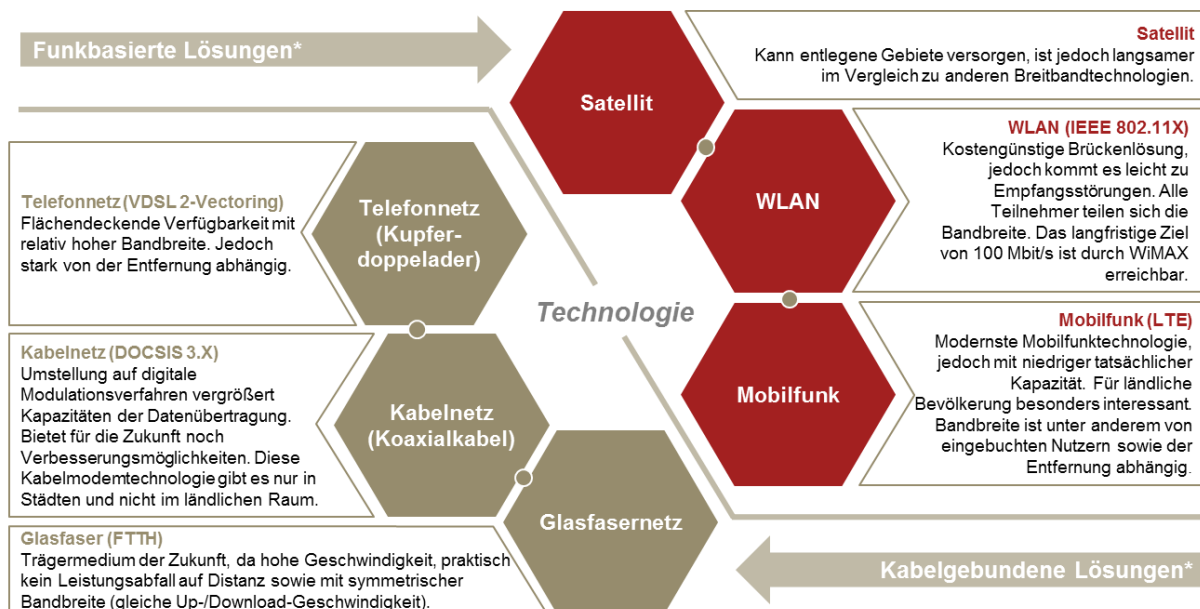
Alle Funkssysteme sind im Hinblick auf den Endkundenanschluss jedoch nicht als gigabitfähig einzustufen.

*Weiterführende Informationen finden Sie **hier**.*

III.5 Fazit

Alle beschriebenen Technologien können einen sinnvollen Beitrag zur Verbesserung der Breitbandversorgung leisten. Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften sind funkbasierte Technologien trotz enormer Verbesserung ihrer Leistungsfähigkeit jedoch lediglich als Ergänzung zu den leitungsgebundenen Technologien zu sehen. Sowohl die auf Basis der DSL-Technologie vorgestellten technologischen Weiterentwicklungen (Super-)Vectoring und G.Fast als auch der Standard DOCSIS 3.1 bei den HFC-Netzen können die langfristigen Ziele der Gigabitstrategie sowie die zentralen Kriterien, wie symmetrische Bandbreiten, Latenz und Zuverlässigkeit hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit nicht vollumfänglich erfüllen. Daher sind diese Technologien als Brückentechnologien einzustufen.

Die folgende Grafik gibt einen vereinfachten Überblick über die beschriebenen Technologien:



*Aktuell schnellste Variante bzw. Methode jeweils in Klammer; Quelle: PwC-Analyse

Abbildung 4: Übersicht über kabelgebundene und funkbasierte Übertragungstechnologien

Die potenziellen Down- und Uploadgeschwindigkeiten der wesentlichen leitungsgebundenen Technologien sind in der folgenden Übersicht dargestellt:

Infrastruktur	Technologie	Beschreibung	Potentieller Download [Mbit/s]	Potentieller Upload [Mbit/s]	gigabitfähige Netze
Reine Glasfaser	FTTB/H	<ul style="list-style-type: none"> Glasfaser bis zum Haus/Wohnung höchste Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit Technologien: PON vs. GPON 	>1.000	>1.000	
HFC/ Koaxial Kabelnetze	DOCSIS 3.1	<ul style="list-style-type: none"> Shared Medium: abhängig von Beschaltung DOCSIS 3.1 ist gigabitfähig 	>1.000*	>1.000*	
	DOCSIS 3.0	<ul style="list-style-type: none"> DOCSIS 3.0 ist derzeit verbreitet 	bis 400	bis 20	
Kupfer-basierte Netze	FTTC (Super-vectoring)	<ul style="list-style-type: none"> techn. Aufrüstung von FTTC(VDSL)-Netzen im Idealfall Bandbreiten bis 250 Mbit/s 	bis 250	bis 40	
	FTTC (VDSL)	<ul style="list-style-type: none"> Glasfaser bis zum Kabelverzweiger Leistung fällt bei hohen Distanzen zum Kunden stark ab 	bis 50	bis 10	
	ADSL	<ul style="list-style-type: none"> Glasfaser bis zum Hauptverteiler durch niedrige Leistungsfähigkeit für geförderten Ausbau irrelevant 	bis 16	bis 2	

*Quelle: <https://www.cablelabs.com/full-duplex-docsis/>; technisch mögliche Bandbreiten, Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Beschaltung des Clusters ggf. niedriger

Abbildung 5: Systemvergleich kabelgebundener Übertragungstechnologien hinsichtlich Datenrate, Latenz und Zuverlässigkeit

Unstrittige Einschätzung der Marktexperten ist, dass die Glasfaser das Trägermedium der Zukunft ist.

IV. Offener Netzzugang – Open Access

Der offene Netzzugang – auch Open Access genannt – ist heute bereits ein wichtiger technologischer und wettbewerblicher Aspekt der breitbandigen Internetversorgung. Allerdings wird der offene Netzzugang im Hinblick auf die angestrebten FTTB/H-Netze noch stärker an Bedeutung gewinnen. Was aber ist der *offene Netzzugang*? Ähnlich dem Breitbandbegriff gibt es keine einheitliche Definition. Grundlegend kann gesagt werden, dass alle Diensteanbieter den Zugang zur Netzinfrastruktur und/oder Transportdienstleistung zu gleichen Konditionen erhalten sollen.

Die Umsetzung dieses Grundgedankens ist jedoch an *technologische* und *organisatorisch rechtliche* als auch *zielbasierte Randbedingungen* geknüpft.

Technologisch können nicht auf allen Netzen die gleichen Zugänge ermöglicht werden. Der physikalische Zugang, also die Miete bzw. exklusive Nutzung einer Teilnehmeranschlussleitung (TAL) oder anderer Streckenabschnitte, ist immer dann interessant, wenn der Diensteanbieter auch Netzbetreiber ist und ein durchgehendes Netzmanagement gewährleisten möchte/muss. Dies kann z. B. für zeitkritische oder sicherheitsrelevante Anwendungen zwingend notwendig sein.

In 2-Draht-Netzen zum Beispiel, ist der physikalische Zugang über die Miete einzelner TAL möglich, in Kabel-TV-Netzen (DOCSIS) jedoch nicht – hier bestehen keine einzelnen Teilnehmeranschlussleitungen, sondern alle Teilnehmer eines Anschlussbereiches eines Kabel-TV-Netzes sind über dieselbe Leitung angeschlossen. Ähnliches gilt für GPON-Netze, auch hier sind mehrere Teilnehmer zumindest teilweise über die gleiche Anschlussleitung (bis zum Splitter) angeschlossen. Bei Glasfaseranschlussnetzen wäre jedoch ein Zugang mittels eigener Wellenlänge für die Diensteanbieter denkbar – und käme damit dem physikalischen Zugang sehr nahe.

Auch wenn die verbaute physikalische Infrastruktur einen physikalischen Zugang ermöglicht, können darauf eingesetzte Übertragungsverfahren dies wiederum verhindern. Bei DSL-Vectoring-Systemen im 2-Draht-Netz ist dies beispielsweise der Fall.

In allen Systemen bei denen ein physikalischer Zugang nicht möglich ist, kann jedoch ein Zugang auf Basis der Transportdienstleistung des jeweiligen Infrastrukturbetreibers erfolgen. Dabei werden die zu transportierenden Daten an den jeweiligen Netzbetreiber übergeben und dieser überträgt sie bis zum Ziel (z. B. den Endkunden). Hierbei hat der Diensteanbieter jedoch keinen direkten Zugriff auf die Infrastruktur und kann die Übertragung auch nicht an seine Bedürfnisse anpassen. Bei Diensten mit hohen Qualitätsanforderungen kann dies sehr problematisch sein oder die Bereitstellung einer Dienstleistung verhindern. Der Zugang auf die Transportdienstleistung kann wiederum auf verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen der technischen Kommunikation erfolgen.

Welche Form des Netzzugangs gewährt wird, ist allerdings nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorisch regulatorische Fragestellung. Im derzeitigen Infra-

strukturwettbewerb ist der Zugang bzw. der Besitz von Infrastruktur ein starker Wettbewerbsfaktor. Es ist daher auch eine unternehmensstrategische Entscheidung, ob und wie Wettbewerbern ein Zugang zur eigenen Infrastruktur gewährt werden soll.

Daher wurden im Zuge der Privatisierung auch regulatorische Maßnahmen ergriffen, die einem Netzbetreiber mit marktbeherrschender Stellung technische und finanzielle Vorgaben für Gewährung des Netzzugangs machen. Ob diese Regelungen auch für die zukünftigen FTTB/H-Netze weiterhin sinnvoll sind, ist zu prüfen.

Die unterschiedlichen Arten des Netzzugangs sind auch vor der Vision, wie zukünftig Kommunikationsnetze betrieben und der Wettbewerb auf ihnen erfolgen soll zu betrachten:

- Soll es weiterhin einen Infrastrukturwettbewerb geben, der den physikalischen Zugang in den Mittelpunkt stellt und somit die Integration von Fremdinfrasturktur in das eigene Netz ermöglicht allerdings auch langsam und kostenintensiv ist und einen Flickenteppich an unterschiedlichen Lösungen befördert.
- Soll eine große Plattform mit vielfältigen Handlungs- und Angebotsoptionen entstehen, die schnell auf Änderungen reagieren kann?

Hier wären Zugänge zur Transportdienstleistung sinnvoll. Dafür müssten sich die Beteiligten jedoch auf gemeinsame Standards einigen, so dass die Übertragungsparameter einheitlich und die notwendigen Qualitäten der Übertragung für die verschiedenen Dienste sichergestellt sind.

Grundsätzlich ist es möglich auf unterschiedlichen Ebenen einen Netzzugang zu gewährleisten, der jeweils mit unterschiedlichen Entgelten belegt ist und den Anbietern von Telekommunikationsdienstleistung unterschiedliche Handlungs- und Angebotsoptionen eröffnet.

Aufgrund der sehr hohen Kapazität der zukünftigen FTTB/H-Netze könnten alle Angebote auf *einem* Netz kumuliert werden, was die Ausnutzung der Netze erhöht, deren Betriebskosten und die Kosten für deren Ausbau signifikant reduziert, da lediglich ein Netz gebaut und unterhalten werden muss. Gerade in ländlichen Regionen wird es keinen Wettbewerb zwischen verschiedenen Glasfasernetzen geben. Auf diese Weise entfällt zwar der Infrastrukturwettbewerb, Beispiele aus dem Bereich der Energie- oder Wasserversorgung zeigen jedoch, dass auch ohne diesen ein Wettbewerb zum Nutzen des Endkunden entstehen kann.

Es ist daher von besonderer Bedeutung, dass der offene Netzzugang in seinen *Zielen* und in seiner *Umsetzung* einheitlich definiert wird. Gerade für die neuen FTTB/H-Netze ist dies unerlässlich.

Weiterführende Informationen finden Sie **hier**.

V. Netzmigration

Betrachtet man die Entwicklung des Netzausbaus im Festnetzbereich, so wird deutlich, dass alle Anbieter bzw. alle in Infrastruktur investierende Eigner von Telekommunikationsnetzen die Glasfaserstrecken immer weiter bis zum Kunden heranzuführen. Dieses führt in der Konsequenz zu einem NGA (Next Generation Access) -Netz auf Basis eines Glasfaseranschlusses im Haus (FTTB) oder sogar der Wohnung (FTTH). Nur ein derartiges Netz wird die Herausforderungen der Zukunft im Bereich der Kommunikationstechnik flexibel und gleichzeitig effizient erfüllen können. Diese Netze stehen im Einklang mit dem langfristig definierten Infrastrukturziel der Gigabitstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen.

Im Zuge der Netzmigration sollte unterschieden werden zwischen der *physikalischen* und *organisatorischen* Notwendigkeit der Migration. Im Einzelnen kann dieses wie folgt umgesetzt werden:

- Durch eine Migration der physikalischen Infrastruktur,
- Die Migration des Netzbetriebs,
- Die Migration der Anwendungen,
- Die Migration der Dienstleistungsanbieter,
- Die Migration der nachfragenden Kunden.

Im Falle der *Migration der physikalischen Infrastruktur* folgen die etablierten Eigner der Kabel-TV- und 2-Draht-Netze den eigenen, bestehenden Netzstrukturen bzw. Netztopologien, teilweise nutzen sie sogar die bestehenden Erschließungswege, da dadurch bestehende Netzabschnitte, Leerrohre und Liegenschaften (Gebäude, KVz, Verstärkerpunkte) möglichst lange und wiederkehrend genutzt werden können. Es wird somit ein eher evolutionärer Weg beschritten, der durch Ertüchtigungsstufen (z. B. DSL → VDSL → Vectoring → G.-Fast → FTTB) beschrieben wird und aus Sicht dieser Unternehmen betriebswirtschaftlich nachvollziehbar ist. Aus diesem Festhalten an der ursprünglichen Netztopologie – insbesondere in Teilnehmernähe, d. h. auf der last mile – ergeben sich zwangsläufig Netzstrukturen nach dem GPON-Prinzip, die insbesondere in verdichteten Besiedlungsräumen Vorteile bei den Investitionskosten aufweisen. Wie erläutert, können bei dieser Netzstruktur allerdings die Vorteile der Glasfaserübertragungstechnik nicht vollumfänglich genutzt werden.

Die folgende Grafik stellt die Migration der HFC- und FTTC-Netze schematisch dar.

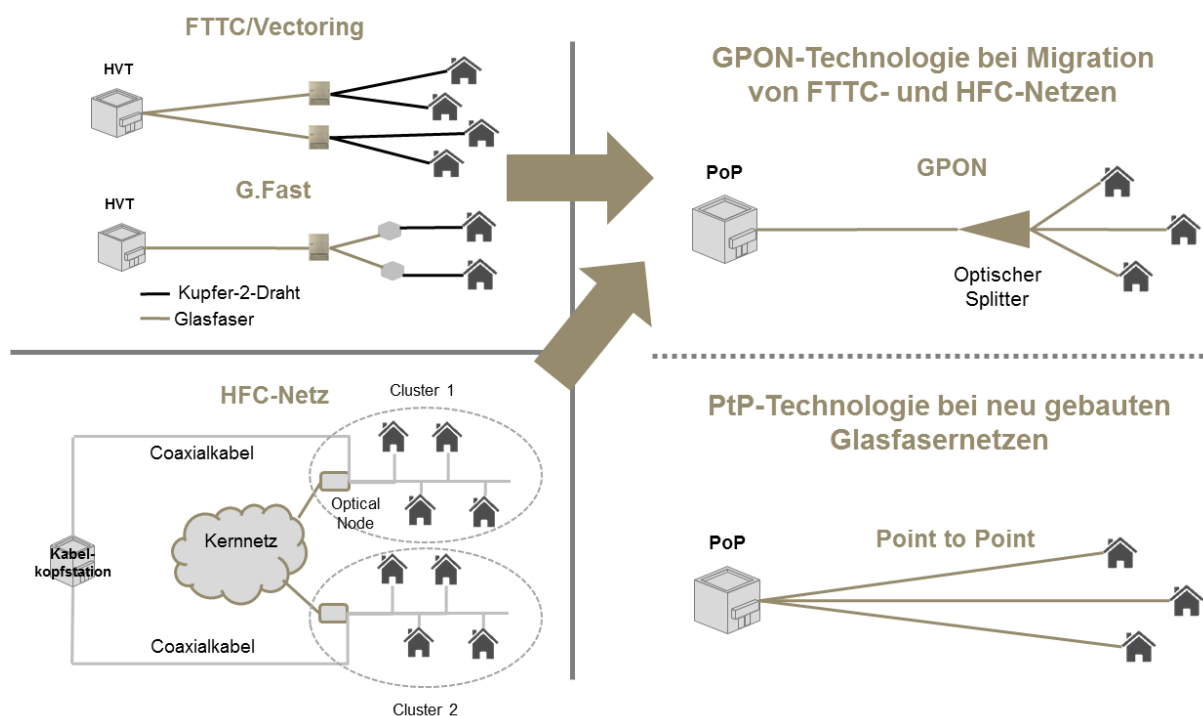


Abbildung 6: Darstellung physikalischer Migrationspfade

Neue Anbieter, die eine eigene Infrastruktur aufbauen, können aufgrund der fehlenden „Altlasten“ vorhandener Technikstandorte und Leitungswege nach neuesten Erkenntnissen und unter voller Berücksichtigung der technischen Leistungsfähigkeit der Glasfaserübertragungstechnik die Versorgung eines Gebietes unabhängig von vorhergehenden Investitionen optimal und effizient planen. Dadurch entstehen moderne Infrastrukturen mit hoher Flexibilität auf der Basis von PtP-Glasfasernetzwerken. Hierzu wird die komplette teilnehmernahe Infrastruktur im Versorgungsgebiet neu aufgebaut, ohne Nutzung bestehender Liegenschaften. Dieses erfolgt derzeit insbesondere in regionalen Bereichen z. B. durch Infrastrukturinvestoren, Stadtwerke, Genossenschaften oder Zweckverbände. Diese Anbieter finden sich bevorzugt in halbstädtischen und ländlichen Räumen.

GPON- und PtP-Strukturen sind zukunftssichere physikalische Plattformen und lassen sich miteinander kombinieren, d. h. GPON-Netze können als Zuführung für PtP-Netze dienen, umgekehrt könnten PtP-Netze vom PoP aus als GPON-Struktur betrieben werden. Generell ist dafür allerdings der Zugang zu den jeweiligen Netzinfrastrukturen diskriminierungsfrei zu regeln (Open Access). Dann kann ein volkswirtschaftlich wenig sinnvoller Doppelausbau in den Regionen im Sinne eines Glasfaser-Infrastrukturwettbewerbs vermieden werden.

Die *Öffnung des Netzbetriebs* für Dritte setzt auf die Bereitschaft aller Anbieter, dem Open Access Gedanken auch auf dieser Ebene der Wertschöpfungskette zu folgen. Der Netzbetrieb kann dann durch Unternehmen erbracht werden, die selbst keinen Endkundenbezug und auch keine eigene (Leitungs-)Infrastruktur besitzen. Dieses ist im Hinblick auf die Neutralität der Angebote an die Anbieter von Dienstleistungen sogar vorteilhaft. Beispiele für diese Organisationsform gibt es u. a. in Schweden oder den

Niederlanden. Die etablierten Netzbetreiber mit vertikal integrierter Wertschöpfungskette sind aufgrund der vollständigen Integration (vom Netz bis zum Angebot an den Endkunden) ihres Angebots hinsichtlich der Umsetzung zurückhaltend, da deren Geschäftsprozesse auf die gesamte Wertschöpfungskette ausgerichtet und nicht ohne weiteres – weder in der Organisation noch in der Kalkulation der Angebote – aufgebrochen werden können. Die Nutzung von Fremddienstleistungen innerhalb ihres Angebotsportfolios ist derzeit i. a. nicht vorgesehen. Technisch und organisatorisch ergeben sich durchaus Herausforderungen im Hinblick auf die Einhaltung der Service-Qualität und das durchgängige Management der Angebote für die Kunden. Die kleineren und neu in den Markt eintretenden Anbieter sind das Prinzip der aufgebrochenen Wertschöpfungsketten gewohnt und bauen ihre Geschäftsprozesse oft recht weitgehend auf der Nutzung von Fremddienstleistungen auf.

Im Hinblick auf ein NGA-Netz ist diese Fragestellung, die häufig als *Wholebuy-Fähigkeit* bezeichnet wird, insbesondere bei den etablierten Netzbetreibern zu lösen, da dann der Betrieb eines Netzes mit einer Vielzahl von Anbietern an Dienstleistungen möglich wird. Dieses würde die Investitionsbereitschaft in Netzinfrastrukturen durch Dritte, ggf. sogar telekommunikationsferne Unternehmen fördern, sofern die Nutzung der neuen Infrastruktur und damit auch die Einnahmen sichergestellt werden können.

Die *Weiterentwicklung der Anwendungen* hängt wesentlich von der voran beschriebenen Migrationsbereitschaft aller Anbieter auf eine offene Infrastruktur ab. Den geschäftlichen oder privaten Endkunden interessieren in erster Linie die Qualität, die Vielfalt und die Kosten eines von ihm gewählten Dienstleistungsangebotes wie z. B. Telefonie, TV-Angebot und Internet-Zugriff. Die dafür eingesetzte Infrastruktur ist ihm primär nicht so wichtig, ggf. sogar gar nicht bekannt. Derzeit ist mit einer Inanspruchnahme spezieller Dienstangebote wie z. B. T-Entertain oder 3playcomfort 120 ein Wechsel der Infrastruktur verbunden. In Fällen anderer regionaler Infrastrukturanbieter können diese Angebote ganz entfallen oder werden durch ähnliche Angebote ersetzt. Technisch ist dieses nicht begründbar und wird vermeidbar, sofern man die Restriktionen der jeweiligen Infrastruktur außer Acht lässt.

Bei einem NGA-Netz (FTTB/H) sind technisch keinerlei Restriktionen vorhanden, unterschiedliche Dienstangebote parallel anzubieten. Aus Nutzersicht kann ein Marktplatz der Anwendungen entstehen, aus denen er frei auswählen kann, d. h. es entsteht in offenen Netzen potentiell ein intensiverer Dienstleistungswettbewerb, da die Abhängigkeit von Dienstangebot und Netzinfrastruktur aufgelöst wird. So kann der Endkunde dann z. B. das Telefonie-Angebot der Stadtwerke mit dem Entertainment-Angebot eines etablierten Festnetzanbieters und dem Internetangebot eines Kabelnetzbetreibers buchen. Ferner wäre die Markteintrittsschwelle für neue Anbieter mit ggf. speziellen Angeboten für Industrie und Privatkunden niedriger.

Die *Entwicklung neuer Dienstleistungsanbieter* bedarf der o. g. Bereitschaft, die Dienstleistungen ihres Unternehmens auf der universellen Infrastruktur des NGA-Netzes (FTTB) anzubieten. Sofern kein gesetzlich vorgegebener „Zwangsumstieg“ vorliegt, der die bestehenden Unternehmen im Falle eines neu aufgebauten FTTB-Netzes

innerhalb einer vorzugebenden Frist zwingt, ihr Angebot auf das neue Netz zu migrieren bzw. ihr altes Netz abzuschalten, handelt es sich um eine freiwillige Maßnahme, die aus Sicht der Anbieter bei einer ersten Betrachtung unattraktiv ist:

- Da bestehende Prozesse aufgegeben werden bzw. durch neue interne Strukturen ersetzt werden müssen, fallen Kosten an, die zunächst nicht am Markt refinanzierbar erscheinen.
- Andererseits kann jeder Anbieter von dem höherwertigen Netzausbau und dessen Leistungsfähigkeit profitieren, indem er den angeschlossenen Endkunden attraktivere Angebote anbieten kann und zudem Kosten für den Betrieb eines eigenen Netzes reduziert oder einspart.

Das *Beschaffungs- und Nutzungsverhalten der nachfragenden Kunden* ist eine wesentliche Schwierigkeit im Rahmen des Breitbandausbaus. Aufgrund der im Markt bestehenden Erfahrung der Kunden hinsichtlich des einfachen Wechsels von Anbietern z. B. im Strombereich ist es kaum nachvollziehbar, dass für eine bessere Versorgungsqualität (z. B. höhere Datenrate) oder ein anderes Dienstangebot auch die Infrastruktur zu wechseln ist. Viele Kunden sind hinsichtlich der Kundenbetreuung mit den etablierten Anbietern zufrieden, würden jedoch gerne weitere Dienstleistungen oder z. B. eine Verbesserung der Übertragungsqualität in Anspruch nehmen. Diese weitgehende Kopplung von Infrastruktur und Dienst-Angebot verhindert bzw. erschwert einen hochwertigen und nachhaltigen Ausbau, da neue Anbieter, die NGA-Infrastruktur aufbauen d. h. investieren wollen, die Kunden einerseits zum kompletten Wechsel (Netzbetreiber und Infrastruktur) bewegen und andererseits auch ein vollständiges Dienstportfolio beim Markteintritt anbieten müssen. Die Refinanzierung der Infrastrukturinvestitionen ist daher direkt abhängig von der erfolgreichen Vermarktung der eigenen Dienstangebote, anstelle – im Sinne des Open Access Gedanken – durch Mieteinnahmen von anderen, die die neu erstellte Infrastruktur mit einem bereits am Markt etablierten Dienstangebot mitnutzen. Es ist andererseits wesentlich für eine erfolgreiche und stetige Entwicklung eines NGA-Netzes hin zur Flächendeckung, dass ein derartiges Netz unmittelbar mit der Errichtung auch hinreichend genutzt wird.

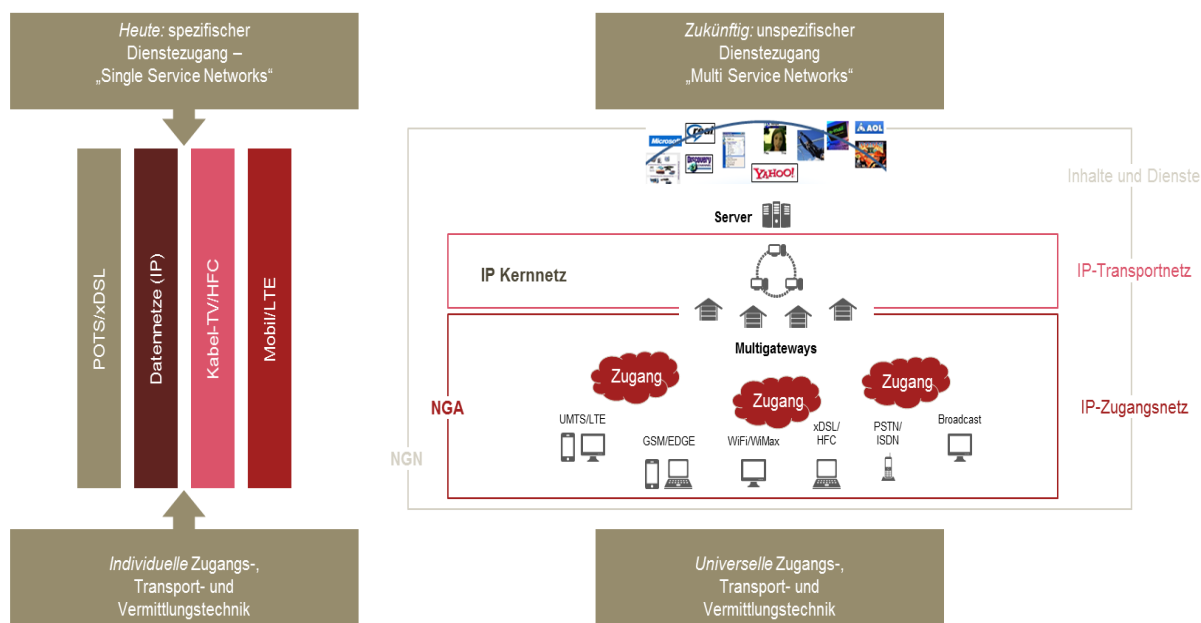
In diesem Zusammenhang wird häufig ein „Anschluss- und Benutzerzwang“ vergleichbar zum Abwasser- oder Stromnetz gefordert. Diesbezüglich wären allerdings weitreichende, gesetzliche Änderungen erforderlich, die auf Widerstand der etablierten Eigner stoßen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Netzmigration zu einem NGA-Netz eine Vielzahl von unterschiedlichen Fragestellungen aufwirft, die im Wesentlichen nicht-technischer Natur sind:

- Für Eigner von Netzen mit evolutionärer Entwicklung vorhandener Infrastrukturen (2-Draht- oder HFC-Netze) fehlt häufig die Motivation bzw. die betriebswirtschaftliche Grundlage bei gleichzeitig hoher Flächenpräsenz und großen Kundenzämmen, um einen derartigen Umstiegsprozess engagiert anzugehen.
- Es entstehen relativ hohe Aufwendungen und trotzdem ist eine Abwanderung von Kunden zu befürchten.

- Neu in den Markt eintretende Unternehmen haben den Vorteil fehlender Altlasten und können die Infrastruktur optimal und unter Nutzung eines offenen Netzzugangs planen.
- Häufig ist ein Akzeptanzproblem am Markt aufgrund eines mangelnden Bekanntheitsgrades zu beobachten und bis auf Neubaugebiete muss jeder neue Kunde von einem anderen Netzbetreiber abgeworben werden.

Letztlich hat die Netze-Migration die in der nachfolgenden Grafik dargestellte Veränderung zum Ziel: den Übergang vom spezifischen Dienstzugang (über spezifische Infrastrukturen wie z. B. HFC) zum unspezifischen Dienstzugang über eine universelle Festnetz- bzw. Mobile-Infrastruktur.



Quelle: ETSI

Abbildung 7: Schematische Darstellung heutiger Access-Netze und zukünftiger NGA-Netze in einem vollständigen Next Generation Network

Anhang 1 – DSL – Digital Subscriber Line

Die kabelgebundenen Übertragungssysteme stellen heute die grundlegende Infrastruktur der Telekommunikation weltweit dar. In Deutschland ist seit dem Aufbau des Telefonnetzes insbesondere das 2-Draht-Netz flächendeckend ausgebaut.



Abbildung 8: Struktur des Kupfer-2-Draht-Netzes mit xDSL-Erweiterungen [2]

- klassische Telefonnetzstruktur für analoge Telefonie, ISDN und in Teilen DSL (1 Generation)
- Netzinfrastruktur mit aktivem DSLAM im KVz – fibre to the Cabinet (FtC) mit Energiespeisung durch den Netzbetreiber
- Netzinfrastruktur mit aktiver Technik im APL (Abschlusspunkt der Linientechnik) – G.Fast-System i. a. mit Energiespeisung auch durch den Kunden.

In Teilnehmernähe besteht das 2-Draht-Netz aus der Ortsvermittlungsstelle (OVSt) und den Netzanschlüssen auf Nutzerseite (s. Abbildung 8). Die dazwischenliegende Kupferleitung wird als Teilnehmeranschlussleitung (TAL) bezeichnet. Die TAL wird durch in der Nähe der Hausanschlüsse liegende Kabelverzweiger (KVz) unterteilt. Die KVz dienen zur Verbindung der hochadrigen Hauptkabel (ca. 200 – 1000 Doppeladern), die von der Ortsvermittlungsstelle bis zum KVz geführt werden, mit den einzelnen Hausanschlusskabeln mit niedriger Adernzahl (z. B. 4-32 Doppeladern). Die Kabelverzweiger sind i. a. passiv, d. h. hier sind üblicherweise keine mit Energie zu versorgende Baugruppen untergebracht und es existiert auch keine Energieversorgung [3].

Das Telefonnetz auf Basis der 2-Draht-Leitung (auch Kupferdoppelader genannt) wurde über einen Zeitraum von ca. 150 Jahren auf- und, international wie national, immer weiter ausgebaut. Es ist weder vom Kabeldurchmesser (z. B. 0,35; 0,4; 0,5; 0,6 mm) noch von anderen technischen Gegebenheiten (z. B. Isolationsmaterial, Schlaglänge usw.) ein homogenes Netz. Das Alter der Kabel differiert auch in Deutschland erheblich; so sind teilweise noch Kabel aus den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts

im Gebrauch. In Deutschland existiert diesbezüglich eine flächendeckende Infrastruktur, die insbesondere nach dem zweiten Weltkrieg durch die Deutsche Bundespost weiter aufgebaut wurde.³

Mit der Privatisierung der Deutschen Bundespost wurde Zug um Zug dieses seinerzeit voll ausgebaute Netz an die Deutsche Telekom AG übergeben, so dass auch heute die DTAG der Eigner der überwiegenden Anzahl der 2-Draht-Anschlüsse ist, auch wenn diese Infrastruktur häufig durch Wettbewerber benutzt wird. Die Nutzung dieser Netzabschnitte durch Mitbewerber unterliegt überwiegend der Regulierung, d. h. für die Nutzung dieser Infrastruktur haben die Nutzer ein jeweiliges (durch die Bundesnetzagentur festgelegtes) Entgelt an die DTAG zu zahlen.

Zu beachten ist also, dass das 2-Draht-Netz einer ständigen Nutzungsänderung unterliegt. Wurde es zunächst für die *analoge Telefonie* konzipiert, auf- und ausgebaut sowie kontinuierlich optimiert, änderte sich die Nutzung mit Einführung des ISDN ab 1982 zunächst zugunsten *digitaler Übertragungstechniken*. Der Aufbau des ISDN war 1998 weitgehend abgeschlossen.

Dadurch stiegen die Anforderungen an diese Infrastruktur hinsichtlich der zu übertragenden Signalbandbreite⁴ und der erlaubten Signaldämpfungen⁵ kontinuierlich. So lag z. B. die ausgenutzte Bandbreite bei ISDN bei ca. 160 kHz, bei ADSL2 (Asymmetrical Digital Subscriber Line 2) schon bei 1,1 MHz und wurde mit ADSL2plus auf 2,2 MHz verdoppelt [6], [7]. Mit der Einführung von VDSL2 (Very High Data Rate Subscriber Line 2) wurde die genutzte Bandbreite sogar auf ca. 30 MHz erhöht [8].

Ein wesentlicher Grund für diese technologische Entwicklung war das Ziel, die maximalen Datenraten zu steigern, da diese immer stärker durch die Kunden nachgefragt wurde, andererseits auch als Marketingargument genutzt wurde. Dabei sind jedoch zwei Aspekte besonders zu beachten:

1. die Asymmetrie der Datenratenverbindung bezüglich der Datenrate,
2. die Reichweitenbegrenzung aufgrund der physikalischen Eigenschaften der vorhandenen 2-Draht-Leitungen.

In Deutschland werden im Massenmarkt lediglich asymmetrische DSL-Varianten und Produkte eingesetzt. Asymmetrisch bedeutet dabei, dass die Datenrate in Kundenrichtung (Down-Stream) (deutlich) größer ist als die Datenrate des Up-Stream (in Richtung des Netzes). Das Übertragen einer Datei aus dem Internet zum Nutzer erfolgt somit schneller als die Übertragung vom Nutzer in das Internet.

Diese Asymmetrie war zunächst technologisch begründet, so waren in den DSL-Standards ADSL bis ADSL2plus nur Frequenzprofile mit einer kleineren Bandbreite für den Up-Stream als für den Down-Stream spezifiziert (*s. Abbildungen 9 & 10*).

³ Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die verlegten Kabel nie für die unten näher beschriebenen Übertragungsverfahren und damit den höheren Anforderungen gedacht waren bzw. dafür konzipiert wurden.

⁴ Die Bandbreite bezeichnet die von einem Signal belegten Frequenzen: $B = f_{go} - f_{gu}$.

⁵ Die Dämpfung beschreibt insgesamt die Verluste, die im Wesentlichen durch die Leitungslänge und deren Querschnitt bedingt ist.

Erst mit der Einführung von VDSL konnten auch symmetrische Anschlüsse realisiert werden. Diese werden für den Massenmarkt in Deutschland jedoch nicht angeboten, so dass festzuhalten ist, dass ein typischer DSL-Anschluss in Deutschland eine geringere Up-Stream-Datenrate als Down-Stream-Datenrate aufweist. Das Verhältnis von Up- zu Down-Stream liegt ungefähr bei 1:10 bis 1:15.

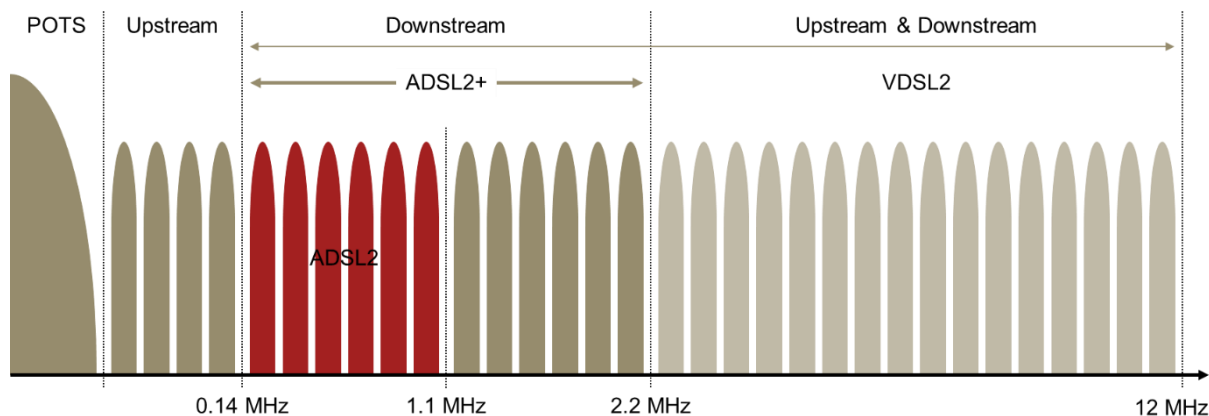


Abbildung 9: Symbolische Darstellung xDSL-Spektrum bis zu VDSL2 Annex 12, [9]

Weiterhin ist die *Reichweitenbegrenzung* aller DSL-Varianten zu beachten: War die Reichweite bei Einführung von ISDN in Nachfolge der analogen Telefonie bereits bei der Einführung bzw. der Entwicklung auf ca. 6 km ausgelegt, um ohne signifikante Veränderung der vorhandenen Kabelinfrastruktur den Umstieg von analogem Telefon (POTS-Plain Old Telefon System) auf ISDN durchführen zu können, ist die Signalreichweite der DSL-Varianten erheblich geringer spezifiziert, als diejenige der analogen oder ISDN-Telefonie. Dadurch kann nicht jeder Telefonanschluss ohne Änderungen an der Netzstruktur mit DSL versorgt werden. Dieses führte zur Entstehung der „weißen Flecken“, d. h. Regionen, in denen ohne Netzveränderungen keine befriedigende DSL-Versorgung erfolgen kann [3] [9].

Allerdings ist nicht nur die maximale Signalreichweite begrenzt. Die Signalreichweite ist auch in Abhängigkeit von der zu übertragenden Datenrate begrenzt. Vereinfacht gesagt: Je höher die Datenrate, desto niedriger die Signalreichweite (s. *Abbildung 10*). Um die Datenrate zu erhöhen, mussten bei der Weiterentwicklung der DSL-Varianten (s. o.) die genutzten Bandbreiten und damit die – auf den bestehenden Kabeln - genutzten Frequenzbereiche immer weiter gesteigert werden (vgl. *Abbildung 9*); allerdings erhöhten sich dadurch auch die die Leitungsverluste⁶.

⁶ Die spezifischen Leitungsverluste werden bei hochfrequenten elektrischen Signalen u.a. durch den Skin-Effekt beeinflusst. Dieser führt dazu, dass nicht mehr der gesamte Leitungsquerschnitt des Kupferkabels durchflossen wird. Dadurch erhöhen sich die Leitungsverluste mit steigender Signalfrequenz [3].

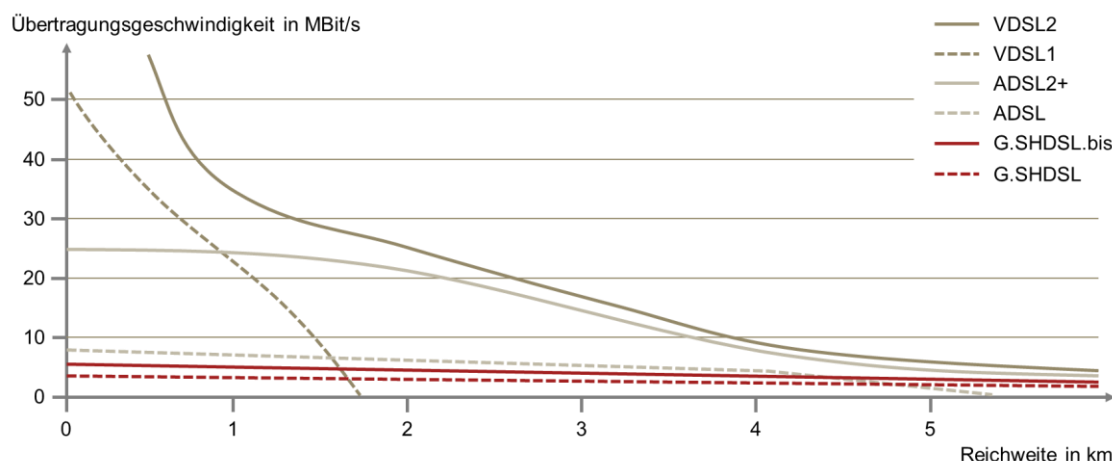


Abbildung 10: Reichweitenabhängigkeit der maximalen Datenrate der unterschiedlichen DSL-Varianten, [4], [5]

Mit Einführung der ADSL2 und der VDSL-Technik, wurden die Reichweitenbegrenzungen so groß, dass ein großflächiger Betrieb unmittelbar auf der alten Netzstruktur, d. h. von den Ortsvermittlungsstellen aus, nicht mehr sinnvoll möglich war. Es bedurfte daher der Anpassung der Netzstruktur, um so die Kupferleitungslänge der TAL (OVST-Teilnehmer) signifikant zu reduzieren. Hierzu verlagerte man die aktive Technik, den sogenannten DSLAM (Digitalen Anschlussleitungsmultiplexer), von der Ortsvermittlungsstelle (OVSt) in den Kabelverzweiger (KVz), d. h. in Kundenrichtung. Zusätzlich musste die Strecke zwischen Ortsvermittlungsstelle und Outdoor-DSLAM (DSLAM im KVz) mit einer Glasfaseranbindung realisiert werden. Diese Netzstruktur wird *Fibre to the Curb* oder auch *Fibre to the Cabinet* (FttC) genannt (s. Abbildung 8)⁷.

Neben der physikalischen Dämpfung, die u. a. vom jeweilig verbauten, durchaus unterschiedlichem Kabeldurchmesser der 2-Draht-Leitung abhängt, ergeben sich weitere Störeffekte, die insbesondere auf die mangelnde bzw. nicht vorhandene Abschirmung der Kabel zurückzuführen sind: Ein Beispiel hierfür ist das Übersprechen (Crosstalk)⁸, dass die Reichweite frequenzabhängig begrenzt. Die gegenseitige Störung der DSL-Signale innerhalb eines Kabelbündels durch das Übersprechen führt zudem dazu, dass nicht jede Kupferdoppelader z. B. in einem Hauptkabel mit einem DSL-Signal beschaltet werden kann, da die Störungen untereinander sonst zu groß werden. Die Anschlussdichte pro Kabel ist daher begrenzt und kann dazu führen, dass nicht jeder Anschluss eines Kabelbündels mit DSL versorgt werden kann. Insbesondere bei Nutzung der Kabelstrecken durch verschiedene Betreiber im Rahmen der TAL-Anmietung können auf benachbarten 2-Draht-Strecken verschiedene DSL-Techniken eingesetzt werden. So kann es zu einer Ausweitung der Störungen und insgesamt sogar zu einer Verschlechterung der Versorgung kommen.

⁷ Neben der Anbindung des Outdoor-DSLAM mittels Glasfaserstrecke ist auch eine Anbindung über Richtfunkstrecken möglich.

⁸ Als Übersprechen bezeichnet man die gegenseitige Beeinflussung parallel verlaufender Doppeladern auf denen elektrische Signale übertragen werden. Zur Verringerung der Einflüsse des Nebensprechens, werden die Doppeladern ineinander verdreht. Bei hochfrequenten Signalen erfolgt dieses Überkoppeln häufiger, als z.B. bei niederfrequenten Telefonsprachsignalen, [3].

Um die Effekte des Übersprechens sowie externer Störungen zu minimieren und damit die Signalreichweite bzw. die Datenrate zu erhöhen, wurde die Vectoring-Technologie entwickelt. Dabei werden die gegenseitigen Störungen eines Kabelbündels vorausberechnet bzw. streckenspezifisch gemessen und die einzelnen DSL-Signale so vor der Übertragung beeinflusst, dass sich die Störungen im Idealfall gegenseitig aufheben.

Dieses funktioniert bei der hier betrachteten Vectoring-Technik nur mit einem erheblichen Aufwand an neuer bzw. zusätzlicher Signalverarbeitung, was erstens die Energieeffizienz der Systeme reduziert und zweitens eine (physikalische) Entbündelung der Teilnehmeranschlussleitung nicht mehr oder nur unter weitgehender Aufgabe der Vorteile dieses Verfahrens zulässt: Es muss für einen optimalen Einsatz der Vectoring-Technik die Gesamtstörsituation auf dem entsprechenden Kabelabschnitt dem Betreiber bekannt sein, damit das System einwandfrei arbeiten kann. Sofern jedoch alternative Anbieter ihre eigene Technik auf diesem Leitungsabschnitt im Rahmen einer Anmietung der TAL einsetzen, können die Vorteile von Vectoring nicht vollständig ausgespielt werden. Eine Folge ist, dass der bisher vorhandene Wettbewerb auf der Basis der physikalischen Nutzung der 2-Draht-Leitung nicht mehr in der bekannten Form möglich ist, sondern die Wettbewerber auf die Nutzung von Vorleistungsprodukten der Vectoring-Betreiber angewiesen sind (z. B. Bit-Stream-Access).

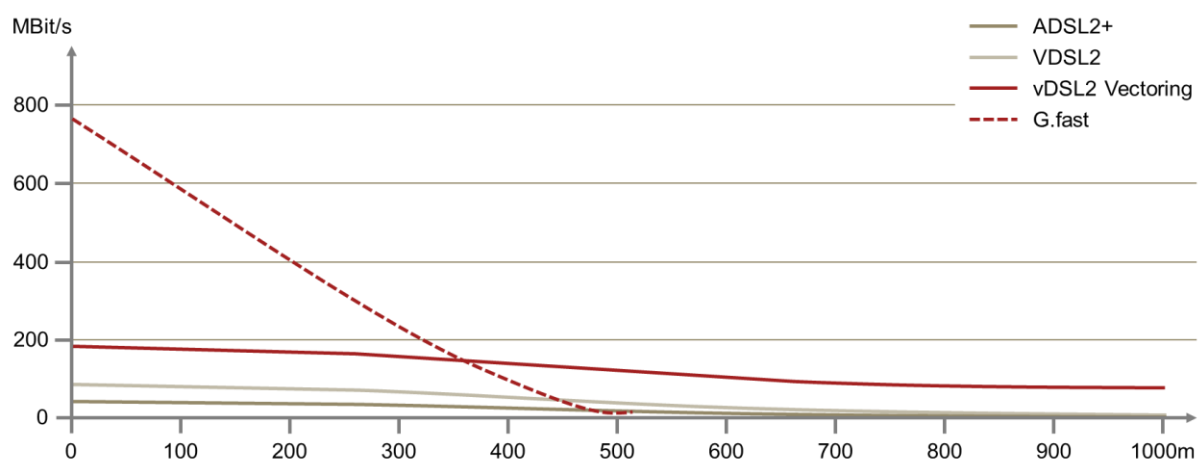


Abbildung 11: Reichweitenabhängige Datenrate von VDSL2 Vectoring im Vergleich, [10], [11], [12]

Unbestritten ist jedoch, dass die Vectoring-Technologie – bei entsprechenden Randbedingungen für deren Einsatz (s. o.) – auf Basis von VDSL2 nochmals eine deutliche Datenratensteigerung zur Folge hat (s. *Abbildung 11*). Datenraten von bis zu 250 MBit/s sind realistisch erreichbar, eine Erweiterung auf 400 Mbit/s und mehr ist technisch möglich. Allerdings werden die überbrückbaren Leitungslängen der teilnehmerseitigen Kupferdoppelader zunehmend kürzer. Bei Kupferlängen von über ca. 600 Meter wird der „Vectoring-Effekt“ weitgehend aufgehoben. Daher muss die aktive Technologie, die auf den letzten Metern das Vectoring-Signal erzeugt, nochmals dichter an den Kunden herangebracht werden.

Eine flächendeckende Erschließung bzw. Einführung führt also in Regionen mit einer geringeren Siedlungsdichte zu einer deutlichen Erhöhung der aktiven, mit Energie zu

versorgenden Gerätetechnik. Darüber hinaus ist festzustellen, dass in dünn besiedelten Regionen kein sinnvoller Ausbau mit Vectoring möglich ist, da die Verdichtung der Teilnehmer an einem Anschlusspunkt aufgrund der Entfernungen der Teilnehmer nicht mehr wirtschaftlich möglich ist, d. h. die Anzahl der erforderlichen Vectoring-Anschlusspunkte in der Region steigt überproportional.

Die Weiterentwicklung von Vectoring mit Technologien, wie z. B. G.fast, ermöglichen nochmals höhere Übertragungsgeschwindigkeiten auf der 2-Draht-Leitung bis zu 1000 Mbit/s, allerdings nur für noch kürzere Distanzen bis ca. 200 Meter Kupferleitung. Um G.fast in der Fläche einsetzen zu können, sind also die aktiven Netzkomponenten noch weiter in Richtung des Kunden zu verschieben, was einerseits die Anzahl der aktiven Komponenten erhöht, andererseits einen erheblichen Eingriff in die Netzinfrastruktur zur Folge hätte und auch wirtschaftlich kaum vertretbar ist.

Eine sehr sinnvolle Möglichkeit zur Nutzung von G.fast kann ggf. die Inhouse-Verteilung in Mehrfamilienhäusern, wenn der Glasfaser-Hausanschluss im Keller endet (FttB). Auf diese Weise können die bereits bestehenden Kabelwege im Hause genutzt werden und den einzelnen Wohnungen ohne erheblichen Eingriff in die Bausubstanz qualitativ hochwertige Verbindungen zugeführt werden.

Grundlegend ist zur xDSL-Technologie anzumerken, dass der Energiebedarf mit jeder Entwicklungsstufe ansteigt. Dieses ist insbesondere auf die Längenabhängigkeit und die höheren, gegenseitigen Störeinflüsse im Kabel durch die Einbeziehung höherer Bandbreiten für die Bereitstellung hoher Datenraten zurückzuführen. Durch diese Längenabhängigkeit müssen die Aufschaltpunkte immer näher an den Nutzer herangeführt werden. Damit vervielfacht sich die Anzahl der aktiven und damit mit Energie zu versorgenden Komponenten im Zugangsnetz. Mit der Erhöhung der aktiven Komponenten steigt zudem das Ausfallrisiko der Breitbandverbindungen, wodurch auch die Aufwendungen für Wartung und Reparatur zunehmen.

Abschließend ist anzumerken, dass zwischenzeitlich die Telekom den Betrieb des klassischen analogen (POTS – Plain Old Telephone Service) und ISDN-Telefoniedienstes eingestellt hat. Dadurch kann der gesamte Frequenzbereich für die DSL-Übertragung genutzt werden. Besondere Reichweiten- oder Datenratensteigerungen konnten aber auch dadurch nicht erzielt werden. Der Vorteil liegt für die Telekom hier vielmehr in der Zusammenführung der Dienste auf eine Übertragungstechnologie und ermöglicht die Nutzung von Einsparpotentialen.

Übersicht – DSL-Verfahren:

Merkmale:

- Nutzung des bestehenden 2-Draht-Telefonnetzes,
- Physikalische Basis: Kupfer-Doppelader (2-Draht-Leitung) unterschiedlichen Durchmessers,
- Einsatz entweder direkt vom Hauptverteiler oder über zwischengeschaltete, neu zu errichtende Kabelverzweiger (Outdoor-DSLAM),
- Maximale Leitungslänge: < 6 km (Telefonnetz) mit reduzierter Datenrate.

Vorteile:

- Aufgrund der physikalischen Kompatibilität zur kupferbasierten Ortsnetz-Infrastruktur der TAL können bestehende Telefonleitungen genutzt werden.
- Es ist möglich, zum Endkunden Energie zu übertragen, um dort Endgeräte zu betreiben, wie z. B. bei der analogen Telefonie oder bei ISDN (wird allerdings im Bereich xDSL nicht genutzt).
- Vergleichsweise geringe Investitionskosten erforderlich, sofern aus der OVSt betrieben, da aktive Endgeräte nur in der OVSt und beim Teilnehmer erforderlich sind.

Nachteile:

- Abnahme der erreichbaren Übertragungsrate mit steigender Entfernung zwischen dem Hauptverteiler und dem Teilnehmer,
- Verzerrungen, Reflexionen, Fremdeinstrahlungen sowie Nebensprecheffekte reduzieren bzw. verhindern die Überbrückung größerer Entfernungen bei hohen Datenraten,
- Lange Leitungswege zum Teilnehmeranschluss reduzieren die verfügbare Bandbreite
- Erheblicher Bedarf an aktiven Komponenten (Outdoor-DSLAM) in der Fläche,
- Hoher Energiebedarf und durch viele aktive Komponenten relativ störanfällig,
- In dünn besiedelten Gebieten aufgrund niedriger Anschlusszahlen pro Kabelverzweiger kaum wirtschaftlich zu betreiben

Migration:

Die konsequente Einführung der DSL-Technologien orientiert sich geografisch überwiegend an den Leitungswegen des bestehenden Telefonnetzes. Die KVz-Struktur wird durch eine weitgehend ortsgleiche Outdoor-DSLAM-Struktur ersetzt. Dieses führt zu FTTB-Netzen in GPON-Architektur.

Anhang 2 – HFC – Hybrid Fibre Coax

Kabel-TV-Netze sind international eingeführte Infrastrukturen und wurden insbesondere in den 1980er Jahren in Deutschland aufgebaut. Ein wesentlicher Grund waren die begrenzten Frequenzressourcen des terrestrischen Rundfunks zur Zeit der Zulassung der privaten Rundfunkanbieter (z. B. RTL, Pro7); eine terrestrische Verbreitung des Angebotes war technisch nicht umsetzbar und der Satellitendirekt Empfang noch nicht preiswert verfügbar.

Das Breitbandverteilsnetz (BVN), auch Kabel-TV-Netz genannt, basiert in weiten Teilen auf einer Koaxialkabel-Infrastruktur in Baumstruktur. Es wird in vier Netzebenen gegliedert und wurde seinerzeit durch die Deutsche Bundespost spezifiziert und aufgebaut. Die Netzebenen 1 und 2 dienen im Wesentlichen der Zusammenführung und der Zuführung der Programme in die verschiedenen Regionen. Mit der von der EU-Kommission Ende der 90iger Jahre vorgegebenen Trennung von Telekommunikationsnetzen (2-Draht-Leitungen) und Kabel-TV-Netz in einer Verantwortung, wie seinerzeit bei der Deutschen Bundespost bzw. der Deutschen Bundespost Telekom, wurde die Netzebene 3 privatisiert, d. h. an Dritte veräußert und befindet sich heute in der Hand privater Anbieter, wie z. B. Kabel-Deutschland und Vodafone.

Die ursprüngliche Netzebene 3 beginnt bei der benutzerseitigen Breitbandkabelverstärkerstelle (bBKVrSt) und endet am Übergabepunkt (ÜP) beim Endkunden (s. *Abbildung 12*). Dazwischen verlaufen die sogenannten A-, B- und C-Kabellinien. Die A-Kabellinien sind dabei für die Überbrückung großer Entfernungen angelegt (s. *Abbildung 13*). Von ihnen gehen die B-Kabellinien ab und erschließen die Fläche. Die C-Kabellinien gehen wiederum von den B-Kabellinien aus und enden am Übergabepunkt. In allen Kabellinien wurden Verstärker verbaut. Insgesamt sollten nicht mehr als 23 Verstärker zwischen bBKVrSt und ÜP in Reihe geschaltet werden. Das gesamte Netz wurde durchspezifiziert, dies betraf insbesondere die erlaubten Dämpfungen sowie die Qualität der eingesetzten Kabel und Verstärker (BVN-Bezugskette) [3], [9].

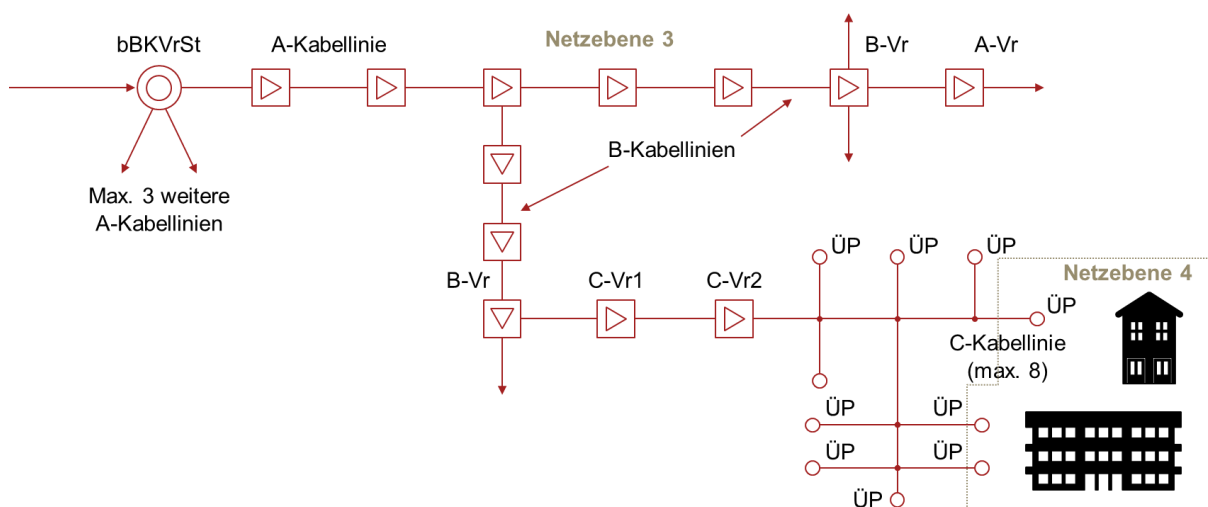


Abbildung 12: Klassische Struktur des Breitbandverteilsnetzes [3]

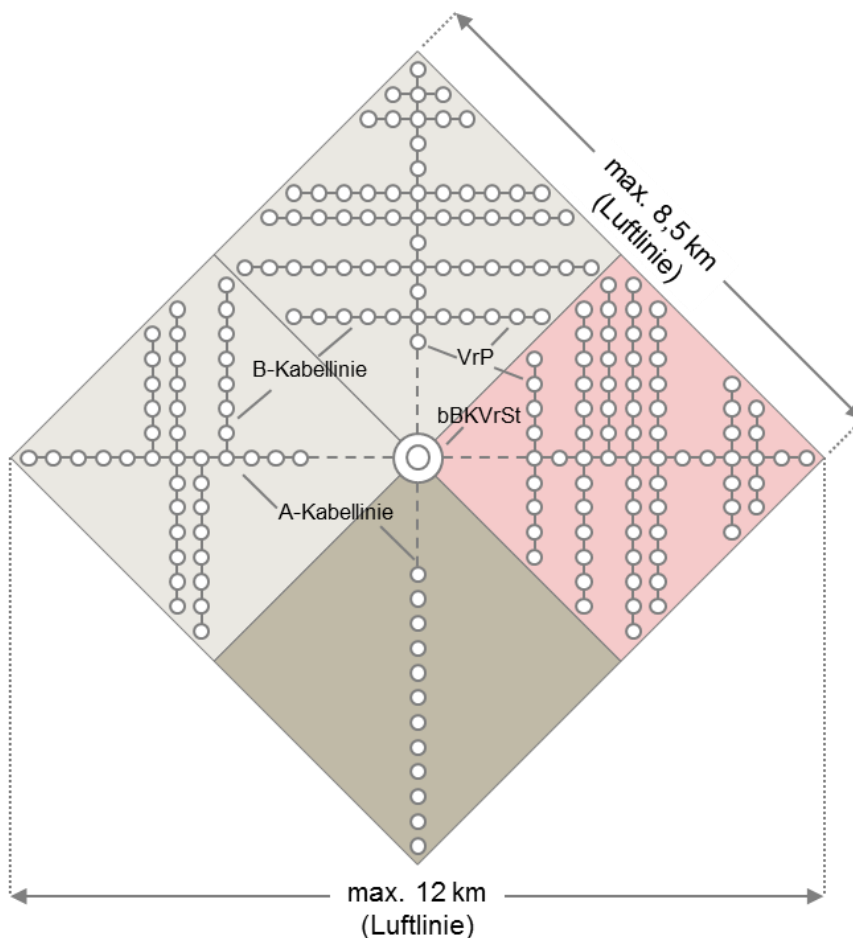


Abbildung 13: Idealer Ausbau bei rechteckiger Straßenführung im Anschlussbereich [13]

Ab dem Übergabepunkt beginnt die Netzebene 4, welches typischer Weise im Besitz der einzelnen Liegenschaftseigentümer ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass die Zuständigkeit und Kontrolle der BVN-Netzbetreiber ebenfalls am Übergabepunkt endet. Weiterhin ist zu beachten, dass an einem Übergabepunkt unterschiedlich viele Nutzer versorgt werden können. Ist im ländlichen Raum ein ÜP meist mit einem Einfamilienhaus gleichzusetzen und eine Verteilung erfolgt innerhalb des Hauses, sind die ÜP in Ballungsräumen sehr häufig in Mehrparteienhäuser von Wohnungsbaugesellschaften gelegen, so dass in Netzebene 4 teilweise mehrere Hundert Teilnehmer versorgt werden. Auf Ebene der Anschlussbereiche kommen so meist 10.000 bis 15.000 Wohneinheiten im BVN zusammen. Insgesamt sind bundesweit in etwa 22,1 Mio. Haushalte erreichbar, von den ca. 17 Millionen Teilnehmer angeschlossen sind. Es kann also nicht von einem flächendeckenden BVN gesprochen werden.

Neben der Topologie und dem physikalischen Aufbau, ist auch die Übertragungstechnik zu beachten. Ursprünglich wurde das BVN zunächst als analoges Verteilnetz bis 450 MHz, später bis 862 MHz konzipiert und realisiert. Es *verteilt* also Signale von der bBKVrSt zum Nutzer. Einen Rückkanal besteht erstmal nicht, wurde jedoch im unteren Frequenzbereich (s. *Abbildung 12* und *Abbildung 13*) bereits vorgesehen.

Belegt wurde der Frequenzbereich mit analogen Fernseh- und Radioprogrammen. Hierzu wurde die zur Verfügung stehende Bandbreite unterteilt, so dass jedem Sender,

ein bestimmter Frequenzbereich zur Verfügung steht. Damit konnten über das BVN eine große Anzahl an analogen Radio- und Fernsehprogramme effizient und mit hoher Qualität zum Nutzer transportiert werden.

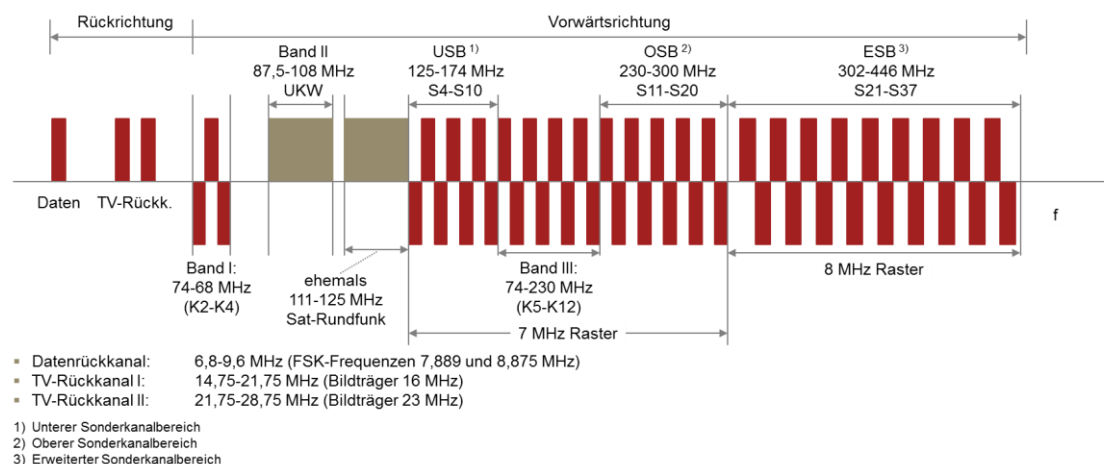


Abbildung 14: Ursprüngliche Frequenzbelegung des BVN [3]

Mit der Entwicklung der digitalen Übertragungsverfahren DVB-C (Digital Video Broadcasting – Cable) bzw. DVB-C2 erfolgte eine verbesserte Nutzung der vorhandenen Frequenzkanäle: Können mittels der analogen Übertragungsverfahren im BVN pro Frequenzkanal nur ein Fernseh- oder Radioprogramm übertragen werden, ermöglichen die digitalen Übertragungsverfahren die gleichzeitige Übertragung mehrerer Programme auf einem Frequenzkanal.

Inzwischen wurde die analoge Übertragung von Radio und Fernsehprogrammen eingestellt. Somit werden nur noch digitale Übertragungsverfahren in den Kabelnetzen eingesetzt.

Durch die zunächst Teil- und spätere Voll-Digitalisierung der Übertragung im BVN wurden freie Kapazitäten geschaffen, um neben der *Verteilung* von Radio- und Fernsehprogrammen auch eine Nutzung des BVN zur bidirektionalen Datenübertragung zu ermöglichen. Um entsprechende Dienste, wie Internet-Zugang und Telefonie anbieten zu können und damit Triple-Play-Angebote machen zu können, waren mehrere mit erheblichen Investitionen verbundene Netzveränderungen erforderlich, u. a.:

- Die überregionale Anbindung der vielen regionalen Einspeisepunkte (bBKVrSt) durch Glasfaserstrecken, um überhaupt ein Netz zu bilden.
- Die Realisierung des Rückkanals, sowohl in Netzebene 3 (und 4) als auch im Bereich der Zuführung.

Für die bidirektionale Datenübertragung auf dem CATV-Netz wurde der DOCSIS-Standard (Data Over Cable Service Interface Specification) entwickelt. Aktuell wird die Version DOCSIS 3.1 in weiten Teilen der CATV-Netzen eingesetzt [14]. Im März 2020 wurde die neueste Version DOCSIS 4.0 vorgestellt [15] – es wird jedoch erwartet, dass eine Einführung in Deutschland nicht vor 2030 erfolgen wird [16].

Aufbauend und in Teilen kompatibel zu DVB erlaubt dieses System die Datenübertragung auf Basis der bestehenden Frequenzrasterung oder einer zukünftig neu festzulegenden Frequenzbelegung des BVN. Damit sind Datenraten bis zu mehreren GBit/s in Kundenrichtung technisch möglich.

Allerdings reichte es nicht aus, nur eine neue Übertragungstechnologie zu entwickeln. Das BVN war als Verteilnetz in Baumstruktur konzipiert und damit nicht zur Zweiwegekommunikation ausgelegt: Betrachtet man den Rückweg, so ergibt sich bei einer Dateneinspeisung aus Kundenrichtung eine erhebliche Verkehrsbündelung, die nicht mehr transportiert werden könnte. Es bedurfte daher auch Anpassungen an der physikalischen Infrastruktur in Netzebene 3.

Um eine hochqualitative Datenkommunikation in der Netzebene 3 realisieren zu können, muss der Datenverkehr geeignet zu- und wieder abgeführt werden. Dies geschieht an optischen Übergabepunkten (*optical node*, *fibre node* oder *optical hub* genannt, s. *Abbildung 15* und *Abbildung 16*) in den A- und B-Kabellinien. Diese optischen Übergabepunkte sind mittels Glasfaserverbindungen an die Internetinfrastruktur angebunden.

Die Einrichtung der optischen Übergabepunkte reicht jedoch alleine nicht aus. Von dort aus können nun Daten (bidirektional) bis zum Nutzer mittels DOCSIS übertragen werden, aber die ursprünglich verbauten Verstärker ließen nur teilweise eine Übertragung in Hinrichtung zu. Daher sind diese durch rückkanalfähige HFC-Verstärker (Hybrid Fibre Coax) zu ersetzen. Damit sind die technologischen Grundlagen für eine Zweiwege-Datenkommunikation im BVN bis zum Übergabepunkt gegeben. Aufgrund der hybriden Struktur aus Koaxial- und Glasfaserkabeln wird diese Infrastruktur nun als Hybrid Fibre Coax Netz (HFC-Netz) bezeichnet.

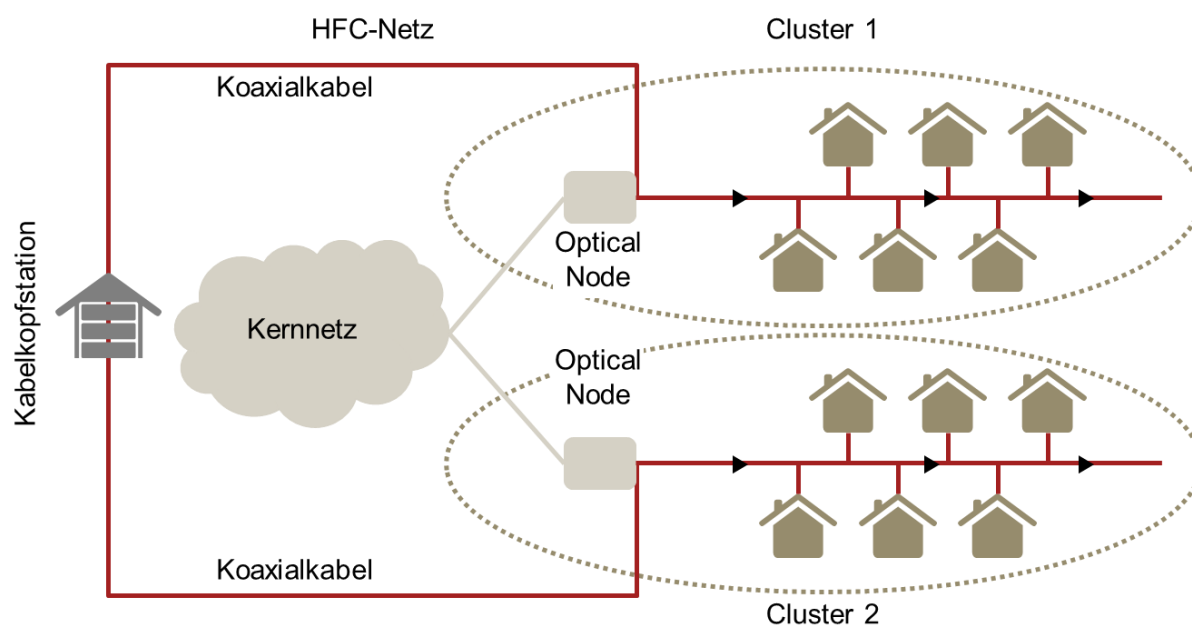


Abbildung 15: Grundsätzliche Aufrüstung des BVN mit optischen Aufschaltpunkten

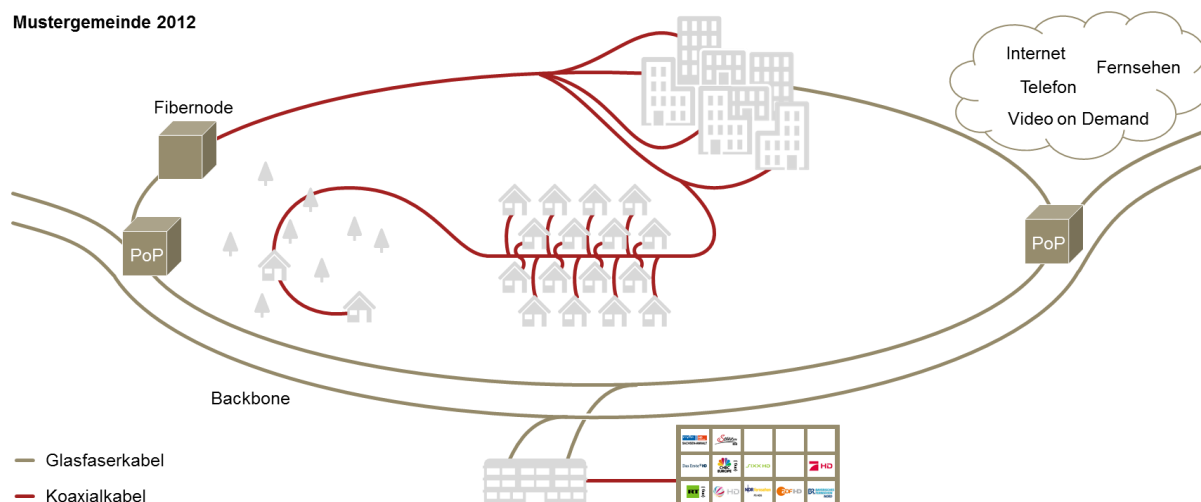


Abbildung 16: Beispielhafte Struktur eines HFC-Netzes [17]

Zu beachten ist bei den HFC-Netzen, dass aufgrund der Baumstruktur keine dedizierten Leitungen zu den einzelnen Übergabepunkten führen. Daher teilen sich alle einem Fibre Node nachgeordneten Nutzer die dort maximal zur Verfügung stehende Datenrate. Dieser Anschlussbereich, der von einer Fibre Node versorgt wird, wird Cluster genannt (s. *Abbildung 16*) Es ist daher wesentlich für die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Anschlusses, wie viele weitere Anschlüsse im Cluster aktiv sind: Je größer die Anschlusszahl je Cluster, umso geringer wird im Mittel die verfügbare Datenrate am Einzelanschluss. Ein wesentliches Mittel zur Steigerung der Ressourcen des Einzelanschlusses ist daher die Verkleinerung der Cluster (*siehe Abbildung 17*). Gerade diese Verkleinerung der Clustergröße ist derzeit eine wesentliche Investition der BVN-Betreiber, da dadurch höherwertige Dienstleistungen angeboten werden können.

Die sukzessive Verkleinerung der Cluster führt die Fibre Nodes (und damit die Glasfaser) immer näher an den einzelnen Nutzer heran. Ab einem bestimmten Punkt wird eine Ertüchtigung der dann nur noch geringen Koaxial-Infrastruktur nicht mehr kosteneffizient sein. Ähnlich wie beim Ausbau der DSL-Infrastruktur wird die Clusterverkleinerung beim Ausbau des BVN langfristig zu einer Fibre to the Building (FTTB) Infrastruktur führen.

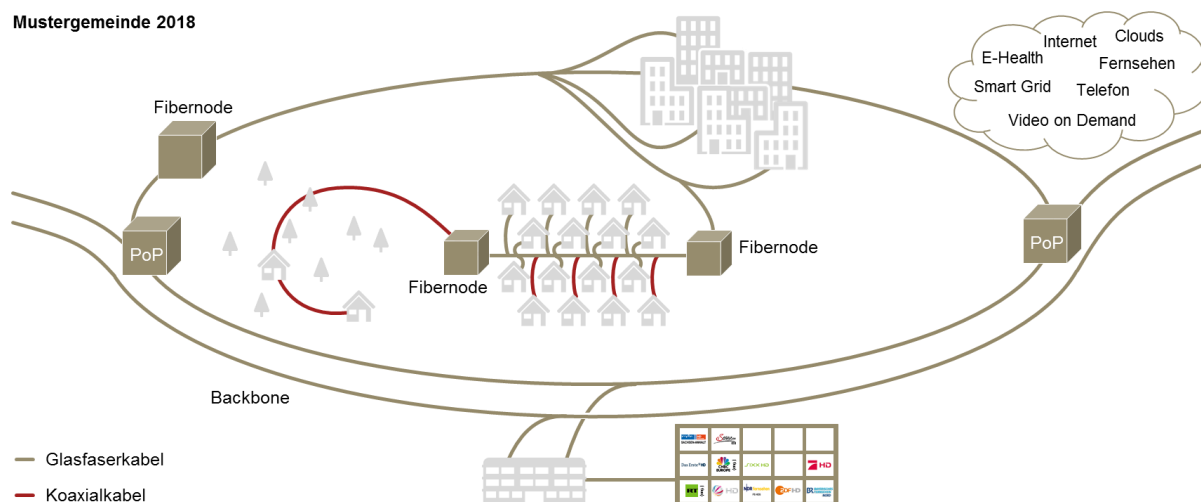


Abbildung 17: HFC-Netzstruktur bei Verkleinerung der Clustergröße [17]

Neben der Clusterverkleinerung wurde zur Ressourcenerhöhung auch die Übertragungstechnologie für die verbleibenden Koaxialkabelstrecke weiterentwickelt. Mit DOCSIS 3.0 wurde eine Technologie eingeführt, die mittels Kanalbündelung Datenraten bis zu 320 MBit/s im Downstream und 216 MBit/s im Upstream pro Cluster ermöglicht.

Der Standard DOCSIS 3.1 wurde 2013 veröffentlicht und ermöglicht Datenraten bis zu 10 GBit/s im Down- und 1 GBit/s im Upstream. Dazu wurde die OFDM-Übertragung (Orthogonal Frequency-Division Multiplex) eingeführt. Gleichzeitig wurde die klassische Kanalarasterung der CATV-Netz im DOCSIS 3.1 aufgegeben. Dadurch können deutlich größere Frequenzbereiche für die Datenübertragung genutzt werden.

Allerdings sind diese Datenraten nur unter optimalen Bedingungen erreichbar. Hierfür wären erhebliche Änderungen an den eingesetzten Komponenten, eine Erhöhung des genutzten Frequenzbereiches von 864 MHz auf 1,8 GHz – was wiederum zusätzliche Anforderungen an die Komponenten stellt – sowie Anpassungen der Frequenzbelegung notwendig. DOCSIS 3.1 ist zwar in Deutschland inzwischen eingeführt, ermöglicht im praktischen Betrieb jedoch nicht die laut Standard möglichen Datenraten. Derzeit werden bis zu 1 GBit/s im Downstream und 50 MBit/s im Upstream von den Netzbetreibern angeboten.

Die bisherigen DOCSIS-Versionen ermöglichten die Übertragung von Up- und Downstream in separaten Frequenzbereichen (Frequency-division duplex – FDD). DOCSIS 4.0 führt nun zusätzlich das sogenannte Full-Duplex DOCSIS (FDX) ein, welches die simultane Übertragung von Up- und Downstream im gleichen Frequenzbereich ermöglichen soll. Ziel ist eine deutlich höhere Upstream-Datenraten. Allerdings ist dieses Verfahren sehr kompliziert und bedarf einer hohen Rechenleistung, um die gegenseitigen Störungen auszugleichen, die eine Übertragung in den gleichen oder sehr nah beieinanderliegenden Frequenzbereichen erzeugen. Des Weiteren basiert

FDX auf der N+0 Architektur, welche nach der FibreNode keine elektrischen Verstärker mehr vorsieht. Damit sind kleine Cluster mit kurzen Kabellängen notwendig. Dies würde weitere Anpassungen der Netzebene 3 notwendig machen.

Da sowohl FDD als auch FDX im DOCSIS 4.0 Standard zur Verfügung stehen, muss sich zeigen, für welchen Weg sich die Netzbetreiber bei einer Einführung von DOCSIS 4.0 entscheiden werden.

Wie DOCSIS 3.1 setzt auch die Version 4.0 auf eine Erweiterung des genutzten Frequenzbereiches. Neben der bekannten Erweiterung auf bis zu 1,8 GHz werden aktuell auch Erweiterungen auf 3 GHz oder sogar 6,4 GHz diskutiert. Ob und wie eine Nutzung des erweiterten Frequenzbereiches praktisch möglich ist, ist zu hinterfragen. Die in Deutschland gebauten Kabelfernsehtetze sind ursprünglich für deutlich niedrigere Frequenzbereiche (864 MHz) ausgelegt. Ob die verbauten Komponenten also eine Nutzung bis zu 6,4 GHz überhaupt ermöglichen, ist fraglich.

Der praktische Nutzen von DOCSIS 4.0 wird sicher eine Erhöhung der Upstream-Datenrate sein. Ob die Datenraten von bis zu 10 GBit/s im Downstream und 6 GBit/s im Upstream in realen Netzen erreicht werden können, muss die Zukunft zeigen.

Neben den technischen Möglichkeiten, die alle DOCSIS Versionen für die Datenübertragung bieten, ist stets auch die Übertragung von Rundfunkkanälen zu beachten. Aktuell sind erheblich mehr Rundfunkkunden an ein Kabelnetz angeschlossen als Internetkunden. Damit ist ein entsprechendes wirtschaftliches Interesse der Netzbetreiber an der Rundfunkübertragung verbunden. Des Weiteren sind die in Deutschland bestehenden regulatorischen Vorgaben zur Verbreitung von Rundfunkinhalten zu beachten. Kapazitäten, die für die Übertragung von Rundfunkinhalten genutzt werden, können nicht einfach nach Wunsch der Netzbetreiber für andere Zwecke – z. B. der digitalen Datenübertragung – genutzt werden.

Übersicht – HFC-System:

Merkmale:

- Nutzung des bestehenden Kabel-TV-Netz (BVN),
- Physikalisches Medium: Koaxialkabel mit überregionaler Zuführung auf Basis von Glasfaserstrecken,
- Glasfaseranbindung vom Backbone bis zu den lokalen Verstärkerpunkten,
- Neue Kabelnetze werden eher in Glasfaser-Technologie gebaut als mit Koaxialkabeln.

Vorteile:

- Planung und Realisierung als breitbandiges Verteilnetz für die Rundfunkverteilung,
- Hochwertige physikalische Koaxialkabelinfrastruktur,
- Gleichbleibende Versorgungsqualität im Versorgungsgebiet,
- Hohe Datenraten bis über 1 Gbit/s standardisiert,
- Auch symmetrische Anbindungen sollen mit DOCSIS 4.0 möglich werden.

Nachteile:

- Nicht alle Regionen sind erschlossen, nicht alle Gebäude in erschlossenen Regionen verfügen über einen Hausanschluss (*homes passed vs. homes connected*),
- Häufig kein direktes Endkundenvertragsverhältnis, da Netzebene 4 (Hausverteilung) generell nicht in Händen der Anbieter auf Netzebene 3,
- Relativ hohe Betriebskosten durch hohe Anzahl aktiver Komponenten,
- Die Reduktion der Clustergröße erhöht die Anzahl der Fibre Nodes und erzeugt erhebliche Kosten durch deren Anbindung an das Glasfasernetz,
- Realisierte Upstream-Datenraten im Vergleich zum Downstream relativ gering (Verhältnis ca. 1:20).

Migration:

Die konsequente Reduzierung der Clustergröße erfordert die Weiterführung der Glasfaser in die von einem Cluster zu versorgende Region. Damit orientiert sich der Ausbau an den klassischen Leitungswegen des BVN. Bestehende Verstärkerpunkte werden durch Fibre Nodes ersetzt. Dieses führt zu FTTB-Netzen in GPON-Architektur.

Anhang 3 – LWL – Lichtwellenleiter

Lichtwellenleiter (LWL) sind optische Übertragungskabel, die Licht von einem Ende des Kabels zum anderen leiten können. In der Technik werden Lichtwellenleiter unterschieden in diejenigen z. B. für Beleuchtungszwecke und derartige, die für die nachrichtentechnische Übertragung eingesetzt werden können. Während für Beleuchtungszwecke überwiegend Kunststofffasern eingesetzt werden, erfolgt die Nachrichtenübertragung über Glasfaserstrecken. Deren Entwicklung für die Übertragungstechnik begann in den 60iger Jahren und ist bis heute nicht abgeschlossen [3].

Aufgrund ihrer heutigen physikalischen Eigenschaften sind ferner große Entfernungen ohne elektrische Verstärker überbrückbar, ohne dass sich dies negativ auf die Bandbreite auswirkt. In einer einzigen Glasfaser liegt diese bei ca. 60 THz. Derartige Bandbreiten sind mit anderen Kabelmedien nicht möglich. Diese Eigenschaften machen die Glasfaser zum Übertragungsmedium Nr. 1 in der Gegenwart und Zukunft [18].

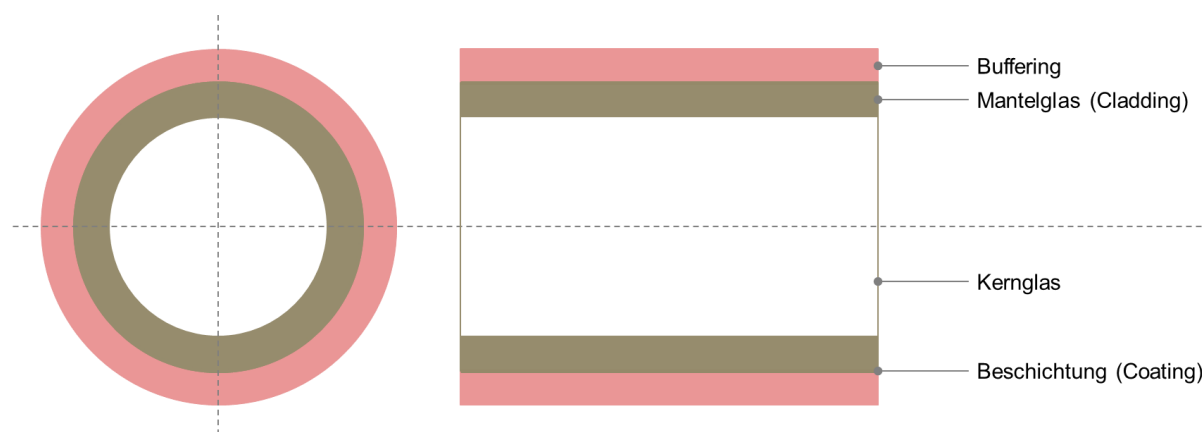


Abbildung 18: Aufbau eines Lichtwellenleiters [18]

Lichtwellenleiter (LWL) werden aus unterschiedlichen Materialien hergestellt. In der Nachrichtentechnik werden typischerweise Glasfasern eingesetzt. Sie bestehen im Inneren aus einem Kernglas und werden außen von einem Mantelglas mit geringerem Brechungsindex umgeben. Durch diese Unterschiede des Brechungsindex am Übergang zwischen den Glasschichten tritt eine Totalreflexion auf, so dass die Lichtsignale in der Faser geführt werden.

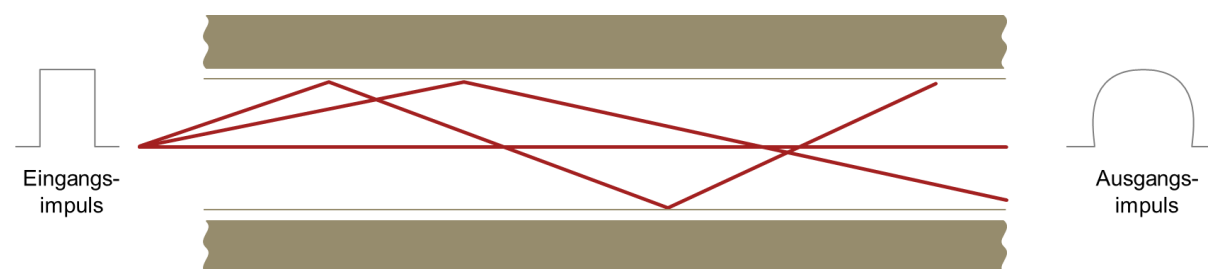


Abbildung 19: Multimodefaser mit Stufenindex-Profil [18]

Auf der äußersten Glasschicht wird eine Schutzbeschichtung (coating) aufgebracht. Erst durch diese Beschichtung wird die Faser mechanisch beanspruchbar. Danach wird noch eine Schutzhülle aufgebracht, die gegen Feuchtigkeit und weitere mechanische Belastungen schützt. Der Übergang zwischen Kernglas und Mantelglas und damit die Veränderung des Brechungsindex kann unterschiedlich realisiert werden. Dadurch entstehen verschiedene Fasertypen, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

In *Multimodefasern mit Stufenprofil* (s. *Abbildung 19*) verändert sich der Brechungsindex über den Durchmesser in gestuften Schritten – daher die Bezeichnung Stufenindexprofil. Das Signal wird am Übergang zwischen Kern und Mantel hart reflektiert. Allerdings wird das Signal dadurch verschliffen. Weiterhin werden durch diesen Fasertyp mehrere Lichtwellen (multimode) gleichzeitig übertragen. Sie werden für kürzere Distanzen z. B. als Patchkabel verwendet.

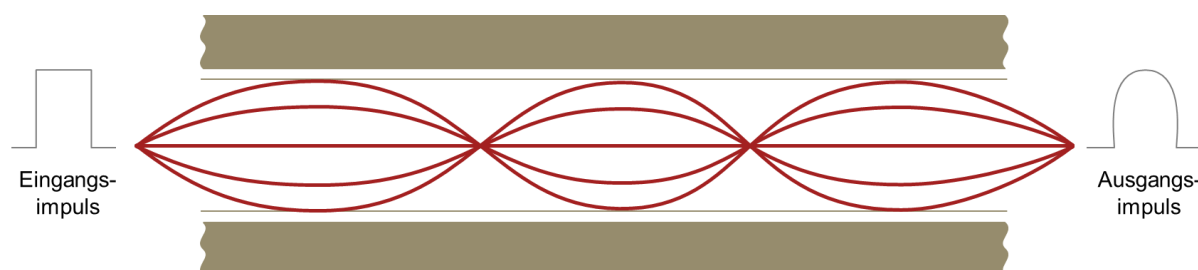


Abbildung 20: Multimodefaser mit Gradientenindex-Profil [18]

In *Multimodefasern mit Gradientenindex-Profil* (s. *Abbildung 20*) verändert sich der Brechungsindex über den Durchmesser kontinuierlich, wodurch die Reflexion weicher erfolgt. Das Ausgangssignal wird zwar auch verschliffen, allerdings nicht so stark, wie bei der Stufenindexfaser. Auch bei diesem Fasertyp werden mehrere Lichtwellen (multimode) gleichzeitig übertragen. Sie werden häufig in der Gebäudetechnik zu den Verbindungen von Gebäuden oder Etagen eingesetzt.



Abbildung 21: Singlemodefaser, [16]

Singlemodefasern oder *Monomodefasern* übertragen nur eine Lichtwelle, welches geradlinig durch den Lichtwellenleiter geleitet wird. Dies liegt an dem deutlich geringeren Kerndurchmesser, der eine Ausbreitung weiterer Moden nicht erlaubt. Dieser Fasertyp wird in der Weitverkehrstechnik eingesetzt und ist derjenige, der beim Breitbandausbau Verwendung findet – sowohl bei der Anbindung von Multifunktionsgehäusen der

DSL-Technik als auch bei der Verbindung vom Kernnetz zu den Aufschaltewerten der optical nodes im HFC-Netz.

Im Breitbandausbau wird zwischen den Varianten FTTB (fibre to the building) und FTTH (fibre to the home) unterschieden. Beide Varianten führen die Glasfaser bis in das Haus des Endkunden. Sofern es sich um Einfamilienhäuser handelt, ist FTTB und FTTH gleichzusetzen. Im Falle von Mehrfamilienhäusern beschreibt FTTB den Endpunkt der Glasfaserstrecke (optischer Netzabschluss) im Haus und eine Verteilung z. B. über (bestehende) 2-Draht-Technologie oder CATV-Netze im Haus selbst. Hierfür gibt es verschiedene marktgängige Varianten. Bei FTTH führt die Glasfaser bis in die einzelne Wohnung und erst dort befindet sich ein optischer Netzabschluss.

Auch der Aufbau von FTTB/H-Netzen erfolgt in Singlemode-Technik, da dadurch erheblich höhere Entfernungen überbrückbar sind. Im Zusammenhang mit der Erschließung der Fläche werden als *Netzstruktur* bzw. *Netztopologie* zwei Varianten unterschieden:

- GPON – Gigabit Passive Optical Network [19], [18].
- PtP – Point-to-Point-Netze [20], [18].

GPON - Gigabit Passive Optical Network ist ein glasfaserbasiertes Kommunikationssystem, welches von der ITU standardisiert wurde (siehe ITU G.984). Es ist im Feld, d. h. im zu versorgenden geografischen Bereich vollständig passiv und benötigt dort damit keine aktiven Komponenten. Die einzelnen Teilnehmeranschlüsse werden an sogenannten optischen Splitttern – vergleichbar zu den KVz im 2-Draht-Bereich – gebündelt und gemeinsam zum Point of Presence (PoP) bzw. dem Central Office (CO), d. h. dem Einspeisepunkt geführt. An einem Splitter sind typischerweise 32 oder 64 Nutzer angeschlossen, die sich eine Bandbreite von 2,48 GBit/s im Downstream und 1,24 GBit/s im Upstream teilen. In Abbildung 22 ist der generelle Aufbau eines GPON dargestellt.

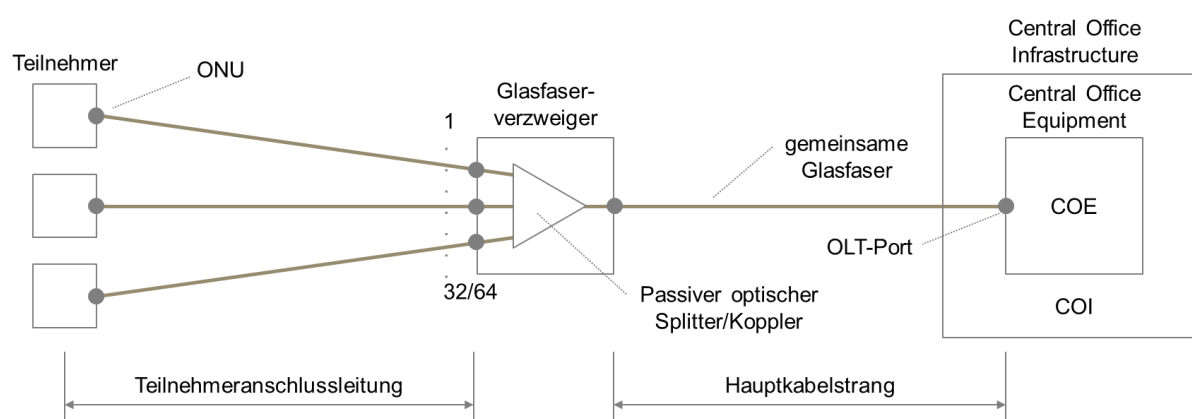


Abbildung 22: Schematische Darstellung einer GPON Strecke, [21]

Die Netzarchitektur von GPON orientiert sich sehr stark an der sternförmigen Struktur des Kupfer-Zweidrahtnetzes. Daher werden auch viele der Liegenschaften durch GPON mitbenutzt. So wird in der Vermittlungsstelle der OLT (Optical Line Terminator) untergebracht. Von dort führen Glasfaserkabel zu den Splitttern (häufig an Standorten

der bisherigen KVz). Der Splitter ist ein rein passives Bauteil und benötigt daher keine Energieversorgung. Hier erfolgt die Splittung des Signals auf die 32 bzw. 64 Kundenfasern, die dann häufig eine vergleichbare Faserlänge aufweisen, was für ein GPON-System technisch von Vorteil ist.

In den Splittern erfolgt keine inhaltliche Aufteilung nach Empfänger. Vielmehr wird jedem Nutzer das Gesamtsignal zugeleitet. Auf der Kundenseite endet die Glasfaser in der sogenannten ONU (Optical Network Unit) und wird durch den ONT (Optical Network Terminator) abgeschlossen. Typischerweise sind die ONU und der ONT in einem Gerät integriert (z. B. optische „Fritzbox“). Hier erfolgt i. a. die Umwandlung in die für die Hausverteilung erforderlichen Einzelsignale, wie Ethernet-Anschluss, Telefonie und TV-Verteilung.

Die überbrückbare Strecke zwischen den Kunden und der Vermittlungsstelle bzw. dem PoP kann deutlich über zehn Kilometer betragen. Ein Einsatz von GPON ist daher auch in ländlichen Regionen möglich. Insbesondere in hoch verdichteten Ballungsräumen ist die GPON-Netzstruktur von Vorteil: Im CO müssen erheblich weniger Fasern (entsprechend dem mittleren Split-Faktor der optischen Splitter) beschaltet, als letztlich Kunden versorgt werden. Dieses hat bauliche Vorteile, allerdings auch den Nachteil, dass nicht jedem Kunden eine eigene physikalische Faserstrecke zwischen dem CO und seinem Hausanschluss zugewiesen werden kann.

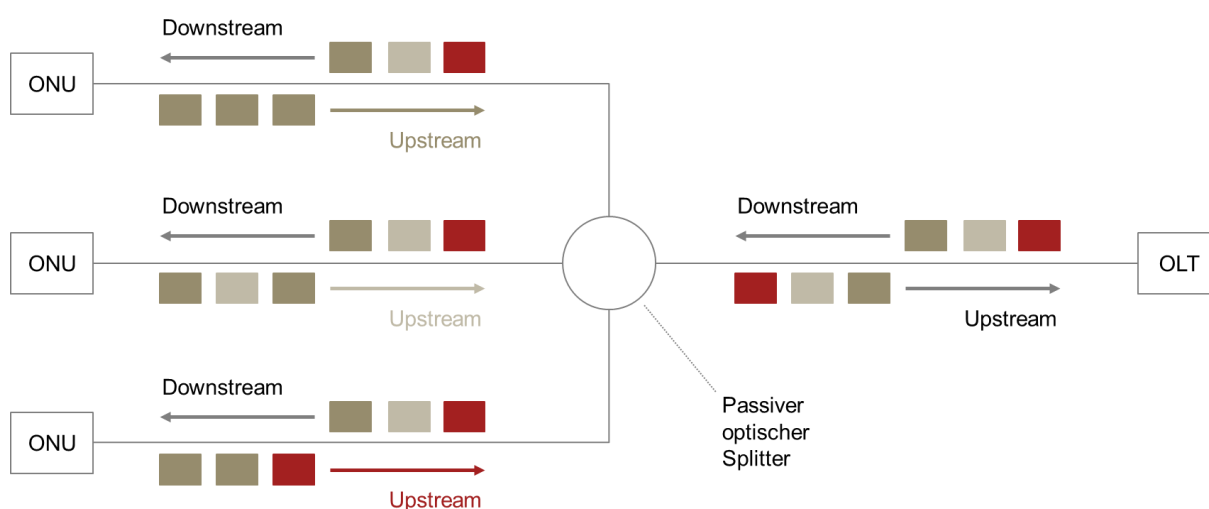


Abbildung 23: Übertragung von Informationen über GPON [18], [21]

Da der Datenverkehr an den Splittern an alle angeschlossenen Nutzer geleitet wird (s. *Abbildung 22 und Abbildung 23*), müssen ferner Maßnahmen zur Abhörsicherheit und der Verkehrsaufteilung getroffen werden. Hierzu werden die Downstream-Signale der einzelnen Nutzer verschlüsselt. Somit kann zwar jeder Nutzer die Signale der anderen an einen Splitter angeschlossenen Nutzer empfangen. Aber er kann nur das für ihn vorgesehene Signal entschlüsseln. In Up-Stream-Richtung ist keine Verschlüsselung notwendig, da die Nutzersignale am Splitter nur in Richtung der Vermittlungsstelle weitergeleitet werden.

Damit sowohl die Downstream- als auch die Up-Stream-Signale über dieselbe Faser übertragen werden können, nutzen Down- und Up-Stream separate Wellenlängen. Typischerweise nutzt der Downstream eine Wellenlänge von 1490 nm und der Upstream eine Wellenlänge von 1310 nm.

Sollten ausreichend Fasern zur Verfügung stehen, so dass der Down- und der Up-Stream auf getrennten Fasern übertragen werden können, wird auf beiden Fasern i. a. die gleiche Wellenlänge von 1310 nm eingesetzt.

Optische *Punkt-zu-Punkt-Netze*, kurz PtP-Netze, sind sternförmige Kommunikationsnetze, in denen jeder Anschluss eines Teilnehmers von der Vermittlungsstelle (Central Office) aus über mindestens eine eigene Glasfaser angeschlossen wird. Diese verlaufen in Hauptkabelsträngen in Richtung der Kunden und werden z. B. in einem optischen Kabelverzweiger mit den einzelnen Hausanschlussleitungen verbunden. Die Glasfaserkabel enden auf Kundenseite – wie bei GPON auch – in der ONU (Optical Network Unit). Das System beruht auf der typischen Netzstruktur eines modernen Computernetzwerkes und in vielen Fällen werden auch ähnliche Komponenten verbaut.

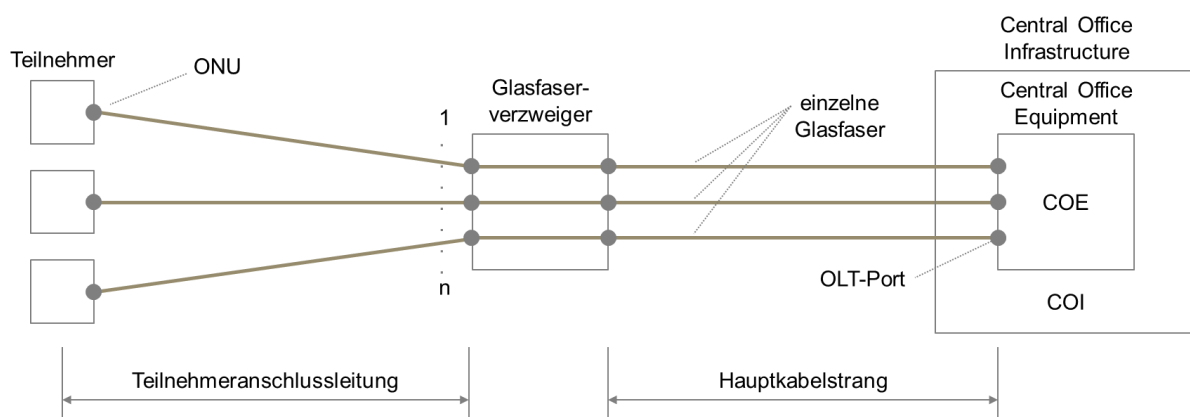


Abbildung 24: Netzstruktur eines optischen Punkt-zu-Punkt-Netzwerkes [22]

Die Netzstruktur ist sehr einfach gehalten und kann daher leicht dokumentiert, verwaltet und betrieben werden. *Abbildung 24* zeigt den prinzipiellen Netzaufbau. Wie bei GPON werden im Idealfall keine aktiven Komponenten in der Fläche verbaut, d. h. die Netzinfrastruktur ist passiv. Auch können Netzerweiterungen relativ einfach durch optische Switches an den Netzgrenzen realisiert werden.

Ein weiterer Vorteil einer PtP-Infrastruktur ist die Möglichkeit die einzelnen Fasern (physikalisch) zu entbündeln. Damit kann in einem PtP-Netz regulatorisch sehr ähnlich verfahren werden, wie aktuell im 2-Draht-Telefonnetz.

Ein wesentlicher Vorteil ist die einfache Anpassung an neue technologische Entwicklungen der Übertragungstechnik: Werden neue Übertragungsverfahren oder bessere Gerätetechnik entwickelt, so müssen lediglich die Geräte im Central Office und beim Kunden getauscht werden. Damit ist auf Jahrzehnte hinaus eine Skalierbarkeit der Leitungsfähigkeit der passiven Infrastruktur gegeben. Wegen der durchlaufenden Fa-

sern zwischen Teilnehmer und CO steigt die Faseranzahl und es müssen im PoP mindestens genauso viele Faser verwaltet bzw. beschaltet werden, wie Kunden im Versorgungsgebiet vorhanden sind. Daher kann die Anzahl der im CO auflaufenden Einzelfasern schnell einige tausend Anschlussleitungen betragen.

Im Markt ist zu beobachten, dass aufgrund der einfacheren Struktur der PtP-Netze diese vor allem von neu in den Markt eintretenden Infrastrukturanbietern, häufig in eher halbstädtischen bzw. ländlichen Räumen aufgebaut werden. Ein besonderer Vorteil eines PtP-Netzes ist, neben der hohen Flexibilität in der Anwendung, dass auch Strecken sehr unterschiedlicher (Faser-)Länge, wie sie speziell in ländlichen Räumen bei der Erschließung von Außenbereichen auftreten, problemlos gemeinsam betrieben werden können.

Übersicht – FTTB/FTTH-Netze

Merkmale:

- Übertragung über Lichtwellenleiter
- Physikalisches Medium: Durchgehende Glasfaserverbindungen (Singlemode) vom PoP (Point of Presence) bis zum Haus des Endkunden bzw. in dessen Wohnung
- Aufbau in einer GPON- oder PtP-Struktur
- Übertragung im Haus über Glasfaser bis zur Wohnung (FTTH) oder über bestehende 2-Draht- oder Koaxial-Netze (FTTB)

Vorteile:

- Keine aktiven bzw. elektrischen Komponenten im Versorgungsgebiet
- Hohe Reichweiten von > 50 km
- Gleichbleibende Versorgungsqualität im Versorgungsgebiet
- Keine Empfindlichkeit hinsichtlich elektromagnetischer Störungen
- Hohe Datenraten bis über 100 Gbit/s standardisiert
- Typischerweise symmetrische Anbindungen
- Hohe Flexibilität in der Anwendung aufgrund getrennter Fasern oder bei Nutzung unterschiedlicher Wellenlängen
- Skalierbar und anpassbar an technologische Entwicklungen

Nachteile:

- Neuaufbau des Netzes bis zum Kunden erforderlich, daher hohe Tiefbaukosten
- Keine unmittelbare Übertragung von Energie für den Teilnehmeranschluss möglich
- Im Falle von GPON keine Entbündelungsmöglichkeit auf der Ebene der Faser
- Im Falle von GPON in Nachfolge von 2-Draht- und Koaxialkabelnetzen werden die Vorteile der hohen überbrückbaren Reichweiten nur bedingt genutzt
- Im Fall von PtP sehr hohe Faserzahl bei PoPs in verdichteten Siedlungsgebieten im CO zu beschalten

Hinweis:

Der Aufbau von Glasfasernetzen bis zum Endkunden (PtP oder GPON) führt im Festnetzbereich zu einem natürlichen Monopol, da derartige Netze in der Lage sind, jede Kommunikationsanwendung zu transportieren. Es ist daher nicht sinnvoll, diese Netze in Konkurrenz aufzubauen, sondern *ein* Netz als Open Access System zu betreiben und jedem Anbieter von Telekommunikationsdienstleistungen einen diskriminierungsfreien Zugang zu festzulegenden Entgelten zu ermöglichen.

Anhang 4 – Funktechnische Systeme

Bodengebunde Systeme

Funksysteme nutzen elektromagnetische Wellen zur Übertragung von Informationen durch den freien Raum. Im Funkübertragungssystem wird ein Signal mit einer bestimmten Frequenz erzeugt (Trägerfrequenz), auf die die Nutzinformation aufgeprägt wird – dieser Vorgang wird auch Modulation genannt. Anschließend wird dieses Signal verstärkt und an die Antenne geleitet, von der es als elektromagnetische Welle abgestrahlt wird. Auf der Empfängerseite wird der Prozess in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen und so die Nutzinformationen durch Demodulation zurückgewonnen.

Wichtig ist zu beachten, dass erst ab einer Frequenz von ca. 16 kHz eine elektromagnetische Welle von der Antenne in den freien Raum abgestrahlt wird. Liegt die Frequenz des Sendesignals darunter, findet keine Funkübertragung statt. Es besteht also eine Frequenzuntergrenze, die nicht unterschritten werden kann.

Wird eine elektromagnetische Welle von der Antenne in den freien Raum abgestrahlt, nimmt ihre Leistung mit zunehmender Entfernung vom Sender ab – das Signal wird gedämpft. Dieser Effekt wird Freiraumdämpfung F genannt.

$$F [dB] = 20 \log_{10}(r) + 20 \log_{10}(f) - 147,55$$

r = Entfernung in Meter

f = Signalfrequenz in Hertz

Abbildung 25: Formel zur Berechnung der Freiraumdämpfung [3], [23]

Wie die Gleichung in *Abbildung 25* zeigt, nimmt die Dämpfung mit steigender Entfernung zu. Die Gleichung zeigt weiterhin, dass die Freiraumdämpfung auch von der Frequenz des Sendesignals abhängig ist. Ähnlich wie bei der Entfernung, nimmt die Freiraumdämpfung mit steigender Frequenz zu.

Aber nicht nur die Freiraumdämpfung spielt bei der Funkübertragung eine Rolle. Auch Signaldämpfungen durch Strukturen, wie Häuser und Vegetation, oder durch Regen, Nebel und andere Materialien sind zu berücksichtigen (s. *Tabelle in Abbildung 26*).

Material	Dämpfung	Beispiele
Holz	gering	Möbel, Decken, Zwischenwände
Gips	gering	Zwischenwände ohne Metallgitter
Glas	gering	Fensterscheiben
Wasser	mittel	Mensch, feuchte Materialien, Aquarium
Mauersteine	mittel	Wände, Decken
Beton	hoch	massive Wände, stahlarmierte Betonwände
Gips	hoch	Zwischenwände mit Metallgitter
Metall	sehr hoch	Aufzugsschacht, Brandschutztüren, Stahlbetonkonstruktionen

Abbildung 26: Qualitative Dämpfungseigenschaften unterschiedlicher Materialien [24]

Neben den Dämpfungsfaktoren, die die Signalleistung reduzieren, wirken Rauschen und Interferenzen besonders als kritische Größen. Als Rauschen, genauer als thermisches Rauschen, bezeichnet man die ständige Bewegung der Atome und Moleküle oberhalb des absoluten Temperaturnullpunktes. Diese Bewegung wird auch als Brownsche Molekularbewegung bezeichnet. Das thermische Rauschen am Empfängereingang berechnet sich nach folgender Formel.

$$\begin{aligned}
 N_T &= k * T * Bk \\
 &= 1,38 * 10^{-23} \text{ J/K} ; \text{ Boltzmann Konstante } T \\
 &= \text{Temperatur in Kelvin } B \\
 &= \text{Bandbreite des Empfängers in Hertz}
 \end{aligned}$$

Abbildung 27: Formel zur Berechnung des thermischen Rauschens am Empfängereingang [23], [25]

Neben dem thermischen Rauschen, welches an der Empfangsantenne mit empfangen wird, rauscht der Empfangsverstärker selbst auch. Dieses Rauschen wird Empfänger-rauschzahl z genannt und erhöht als Faktor das Gesamtrauschen.

$$N_G = z * k * T * B$$

Abbildung 28: Formel zur Berechnung des Gesamtrauschens unter Berücksichtigung der Empfänger-rauschzahl z [23], [25]

Typische Werte für z liegen zwischen 4 und 40, wobei Werte <10 sehr rauscharme Verstärker beschreiben. Insgesamt ist das Rauschen insbesondere von der Temperatur T und der Bandbreite B abhängig. Zur Verminderung des Rauschens kann also die Bandbreite begrenzt und ggf. die Empfängertemperatur gesenkt werden.

Neben dem dargestellten Rauschen wirken alle weiteren Signale im Frequenzbereich des Nutzsignals und des Übertragungssignals als Störungen. Die Summe der Störungen wird als Noise N bezeichnet.

Um das eigentliche Nutzsignal am Empfänger sicher detektieren zu können, muss die Signalleistung größer als das Noise sein. Dieser Abstand wird als Störabstand bezeichnet (S/N-Ratio – Signal to Noise Ratio). Wird dieser zu gering, können Fehler bei der Übertragung entstehen oder die Verbindung vollkommen unmöglich werden. Somit kann ein minimaler Störabstand für das eingesetzte Funksystem bestimmt werden. Berücksichtigt man weiterhin die eingesetzte bzw. die (gesetzlich) erlaubte Sendeleistung, leitet sich aus dem Störabstand, dem Rauschen sowie der Bandbreite eine maximale Reichweite für das Funksystem ab. Die Ermittlung der maximalen Reichweite eines Funksystems wird in *Abbildung 29*, *Abbildung 30* und *Abbildung 31* exemplarisch dargestellt.

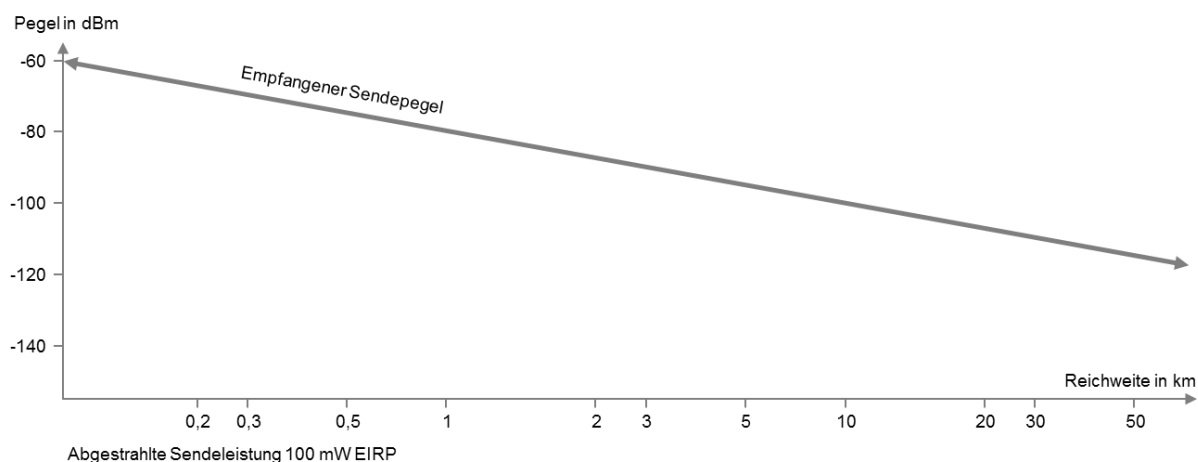


Abbildung 29: Darstellung des Signalpegels unter Berücksichtigung der Freiraumdämpfung [25]

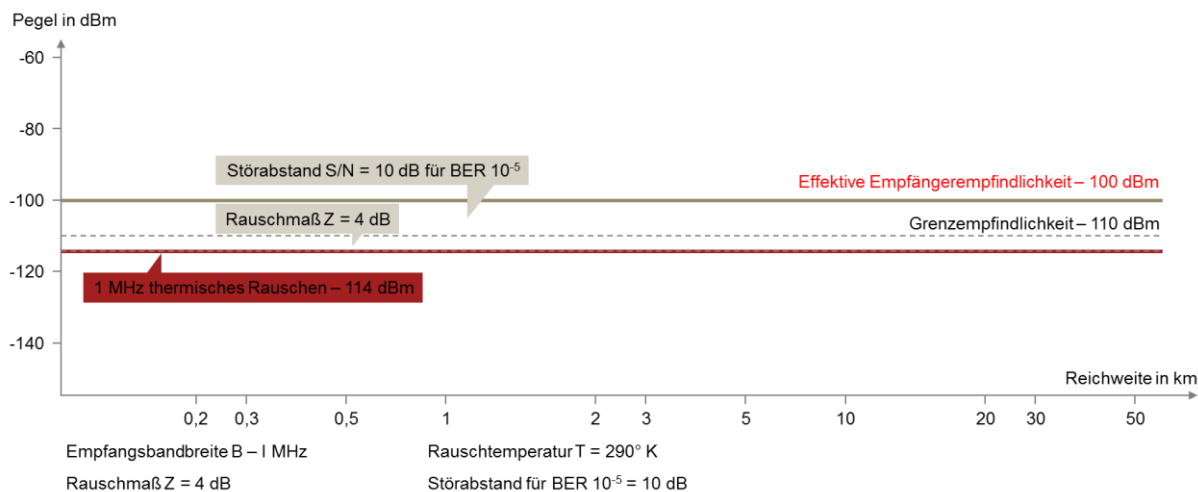


Abbildung 30: Darstellung des thermischen Rauschens und des Empfängerrauschens sowie des Störabstandes [25]

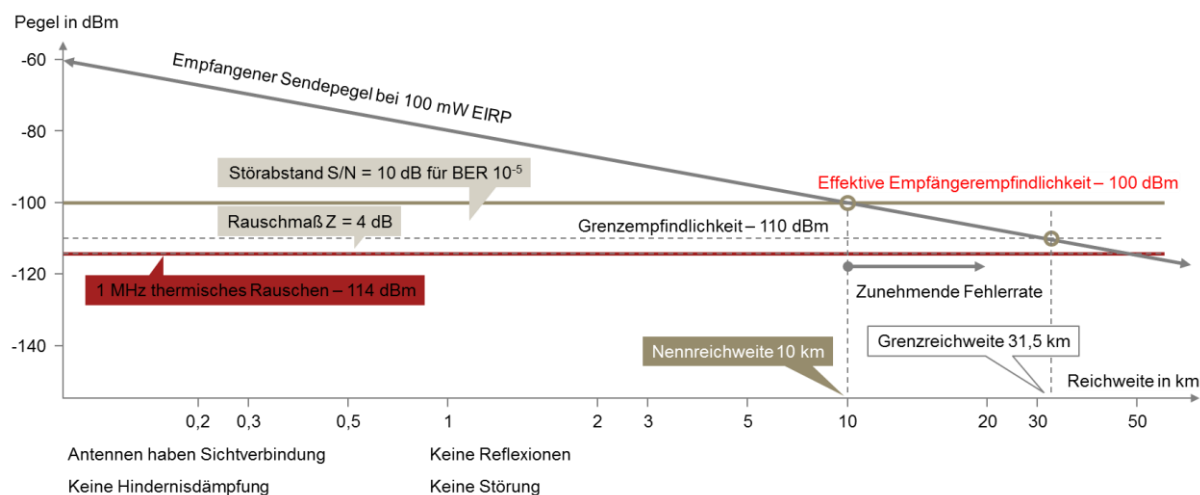


Abbildung 31: Graphische Ermittlung der maximalen Reichweite eines Funksystems [25]

Diese Grundsätze gelten für *alle* Funksysteme und definieren ihre physikalischen Grenzen. Mit der Entwicklung digitaler Übertragungssysteme entstanden Methoden, die die Robustheit der Funkübertragung gegenüber Störungen deutlich erhöhen können. Dazu werden die Nutzdaten mit Zusatzinformationen (Fehlerschutzdaten) versehen, so dass z. B. der Störabstand geringer ausfallen kann als ohne die Zusatzinformationen. Andere Methoden erlauben aufgrund der Zusatzinformationen die Rekonstruktion fehlerhafter Übertragungen. Die Anpassung dieser Schutzmethoden erfolgt bei modernen Funksystemen in der Regel dynamisch auf Basis sogenannter Kanalschätzungen: Dabei werden die Übertragungsbedingungen am Sender und Empfänger gemessen. Sind die Übertragungsbedingungen gut, müssen nur sehr wenige Zusatzinformationen zusätzlich zu den Nutzdaten übertragen werden. Sind die Übertragungsbedingungen hingegen schlecht, müssen deutlich mehr Zusatzinformationen in die Übertragung eingebaut werden – sogar so viele, dass die Zusatzinformationen die Mehrheit der insgesamt übertragenen Daten ausmachen können. Daher unterscheidet man bei Funksystemen Brutto- und Nettodatenrate. Die Bruttodatenrate stellt die Datenrate des Funkkanals dar und umfasst alle übertragenen Daten – also Nutzdaten + Zusatzinformationen. Die Nettodatenrate ist geringer als die Bruttodatenrate und berücksichtigt ausschließlich die Nutzdaten. Gemessen werden die Datenraten in Bit pro Sekunde (Bit/s).

Funksysteme sind heute eine wichtige Infrastruktur zur Versorgung sowohl stationärer als auch mobiler Endgeräte. In Abhängigkeit ihres Einsatzgebietes gibt es sehr viele unterschiedliche Übertragungstechnologien und Gesamtsysteme.

Im Kontext der Breitbandversorgung lassen sich jedoch vier Obergruppen bilden:

- Mobilfunksysteme
- Funksysteme für lokale Netzwerke
- Richtfunksysteme
- Hybridsysteme

Auf diese Systemgruppen wird im Verlauf des Textes näher eingegangen.

Mobilfunksysteme sind keine Erfindung der 1990er Jahre, vielmehr bestehen diese Technologien bereits seit den 1950er Jahren. Allerdings waren die Systeme für die reine Telefonie ausgelegt und für den Massenmarkt ungeeignet. So waren sie gar nicht in der Lage eine große Anzahl an Teilnehmern zu verwalten (im A-Netz ca. 10.000 Teilnehmer) und die Endgerätechnik war sehr groß und teuer. Mit den Weiterentwicklungen, B-Netz und C-Netz, wurden die maximalen Teilnehmerzahlen sukzessive gesteigert. So konnten im C-Netz im Endausbau ca. 800.000 Teilnehmer versorgt werden. Allerdings handelte es sich bei all diesen Netzen um analoge Netze. Erst mit der Entwicklung von GSM (Global System for Mobile Communications) stand in Deutschland ab 1992 ein vollständig digitales Mobilfunksystem zur Verfügung. Ziel der GSM-Entwicklung war insbesondere die Schaffung eines europaweit einheitlichen Mobilfunknetzes, welches eine grenzüberschreitende Mobilität ermöglicht. Ferner sollte es mit den bestehenden ISDN und analogen Telefonnetzen kompatible Sprachdienste angeboten werden. [26]

Mit der Einführung von GSM wurde der Mobilfunkmarkt in Deutschland zum Massenmarkt. Die Endgeräte wurden deutlich handlicher und preiswerter. Auch die Tarifmodelle wurden so gestaltet, dass eine große Zahl an Teilnehmern erreicht werden konnten. Allerdings waren zu Beginn keine Datendienste implementiert. Dies erfolgte erst mit den Weiterentwicklungen HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service) und EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution).

Die nächsten Schritte waren die Entwicklung gänzlich neuer Standards, die von vorneherein sowohl die Bedienung der Telefonie als auch insbesondere der Datenübertragung zum Ziel hatten. Das Ergebnis war der UMTS-Standard (Universal Mobile Telecommunications System), welcher 2004 in Deutschland eingeführt wurde. Der Einführung war die Versteigerung der Frequenzen an die Netzbetreiber im Jahr 2000 vorausgegangen, die mit knapp 100 Milliarden DM einen Rekorderlös darstellte.

Mit den Weiterentwicklungen HSPA und HSPA+ wurde zudem die Datenübertragungsratenrate immer weiter gesteigert. In Deutschland sind mit HSPA+ derzeit theoretisch bis zu 42 MBit/s möglich.

Allerdings zeigte sich relativ schnell, dass auch diese Datenraten für die entstehenden Nutzungsprofile und Anwendungen nicht mehr ausreichen würden. Daher wurde die nächste Evolutionsstufe entwickelt: LTE (Long Term Evolution). Eine wesentliche Änderung von LTE gegenüber UMTS und GSM stellt die Implementation der Datenübertragung als *primären* Dienst dar. Die Datenübertragung steht im Vordergrund und die Telefonie wird mittels einer IP-Telefonielösung umgesetzt.

Mit LTE ist das Ende der Entwicklung der Mobilfunksysteme nicht erreicht, vielmehr steht mit LTE Advanced bereits die nächste Mobilfunkgeneration bereit.

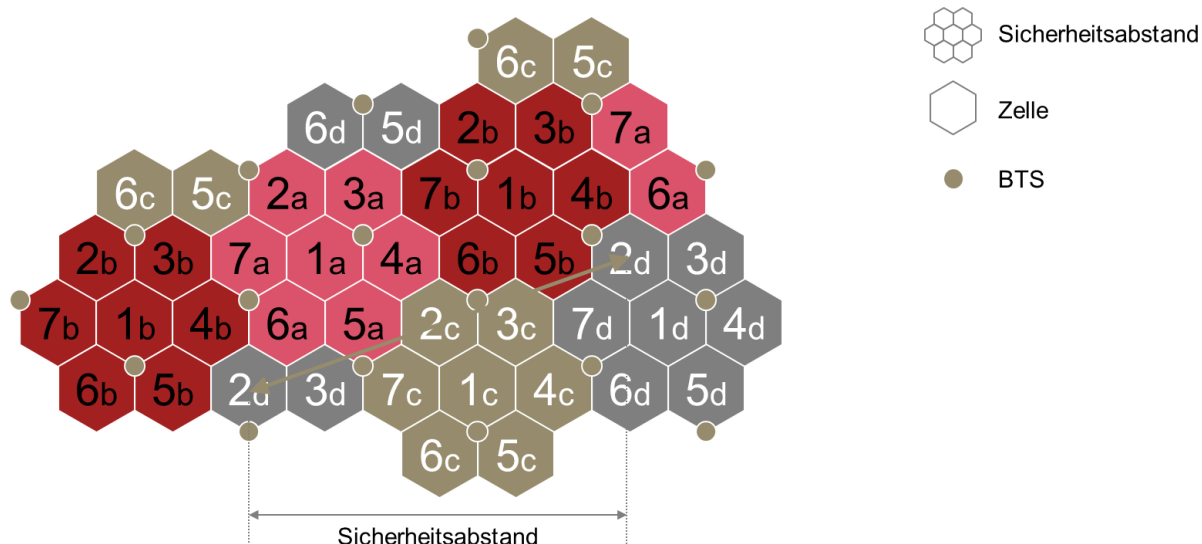


Abbildung 32: Die Abbildung zeigt die grundsätzliche Zellstruktur aktueller Mobilfunknetze am Beispiel von GSM, [26], [27]

Aus technologischer Sicht handelt es sich bei GSM, UMTS und LTE um zellbasierte Netze. Dies bedeutet, dass eine Netzinfrastruktur mit (sehr) vielen einzelnen Funkzellen aufgebaut und betrieben werden muss (s. *Abbildung 32*). Jede dieser Funkzellen wird jeweils von einer eigenen Basisstation versorgt. Die Zellstruktur ist dabei aus verschiedenen Gründen notwendig:

- Die Funkreichweiten sind aus physikalischen Gründen begrenzt, d. h. sie werden in bestimmten Abständen Basisstationen positioniert, um eine möglichst ideale Flächenabdeckung zu erzielen.
- Ein weiterer Aspekt ist die Vermeidung gegenseitiger Störungen. So stören sich Funkübertragungen im gleichen Frequenzbereich gegenseitig. Daher werden den einzelnen Netzbetreibern genau begrenzte und voneinander verschiedene Frequenzbereiche für ihre Mobilfunknetze von der Bundesnetzagentur zugewiesen (s. *Abbildung 33* und *Abbildung 34*).

Frequenzen um 900 und 1800 MHz					
Frequenzbereich	Zuteilungsinhaber	Spektrum für GSM Zuteilung bis Ende 2016	Spektrum technologieneutral ab 2017	Spektrum technologieneutral Zuteilung bis Ende 2025	Nutzbares Spektrum 2017 bis 2025
900 MHz	Telekom	2 x 12,4 MHz (GSM)	2 x 15 MHz	-	-
	Vodafone	2 x 12,4 MHz (GSM)	2 x 10 MHz		
	Telefónica	2 x 10 MHz (GSM)	2 x 10 MHz		
1800 MHz	Telekom	2 x 5 MHz (GSM)	2 x 15 MHz	2 x 15 MHz (LTE)	2 x 30 MHz
	Vodafone	2 x 5,4 MHz (GSM)	2 x 25 MHz	-	2 x 25 MHz
	Telefónica	2 x 34,8 MHz (GSM)	2 x 10 MHz	2 x 10 MHz (LTE)	2 x 20 MHz

Abbildung 33: Tabelle der Frequenzuteilung im Mobilfunk bei 900 MHz und 1800 MHz [28], [29]

Alle weiteren Mobilfunk-Frequenzen				
Frequenzbereich	Zuteilungsinhaber	Spektrum technologieneutral Zuteilung bis Ende 2020	Spektrum technologieneutral Zuteilung bis Ende 2025	Spektrum technologieneutral Zuteilung bis Ende 2033
700 MHz	Telekom	-	-	2 x 10 MHz
	Vodafone	-	-	2 x 10 MHz
	Telefónica	-	-	2 x 10 MHz
800 MHz	Telekom	-	2 x 10 MHz (LTE)	-
	Vodafone	-	2 x 10 MHz (LTE)	-
	Telefónica	-	2 x 10 MHz (LTE)	-
1500 MHz	Telekom	-	-	1 x 20 MHz
	Vodafone	-	-	1 x 20 MHz
	Telefónica	-	-	-
2000 MHz	Telekom	2 x 9,9 MHz (UMTS)	1 x 5 MHz (ungenutzt)	-
	Vodafone	2 x 9,9 MHz (UMTS)	2 x 4,95 MHz (UMTS)	-
	Telefónica	2 x 19,8 MHz (UMTS)	1 x 5 MHz (ungenutzt)	-
			2 x 14,85 MHz (UMTS)	-
2600 MHz	Telekom	-	1 x 5 MHz (ungenutzt)	-
	Vodafone	-	1 x 14,2 MHz (ungenutzt)	-
	Telefónica	-	2 x 20 MHz (LTE)	-
			1 x 5 MHz (ungenutzt)	-
			2 x 20 MHz (LTE)	-
			1 x 25 MHz (ungenutzt)	-
3500 MHz	Telekom	-	2 x 30 MHz (LTE)	-
	Vodafone	-	1 x 20 MHz (ungenutzt)	-
	Telefónica	2 x 30 MHz (ungenutzt) (bis Ende 2021)	-	-

Abbildung 34: Tabelle der weiteren Frequenzzuteilungen im Mobilfunk [28], [29]

Der einzelne Frequenzbereich eines Netzbetreibers wird wiederum in kleinere Teilbereiche (häufig als Kanäle bezeichnet) gegliedert. Diese Kanäle werden den einzelnen Zellen so zugeordnet, dass sich die gleichen Kanäle nicht in direkten Nachbarzellen wiederholen (vgl. Abbildung 32). Dadurch wird die Störwahrscheinlichkeit stark reduziert.

Ein weiterer Grund für die Zellstruktur ist die Kapazitäts- bzw. Lastplanung. Die Ressourcen, z. B. die verfügbare Datenrate oder die Anzahl versorgbaren Teilnehmer, sind in den (Mobil-)Funksystemen begrenzt. Eine Aufteilung des Netzes in einzelne Zellen vervielfacht die Kapazitäten, da diese in jeder Zelle wieder neu zur Verfügung stehen.

Gerade die Kapazitätsbegrenzung der Funksysteme im Allgemeinen und der Mobilfunksysteme im Speziellen sind im Hinblick auf die Breitbandversorgung zu betrachten. So ist die Gesamtkapazität in einer Mobilfunkzelle begrenzt, unabhängig um welchen Standard es sich handelt. Ferner müssen sich alle Teilnehmer einer Mobilfunkzelle diese Ressourcen untereinander teilen. Die Ressourcenzuteilung für den einzelnen Nutzer erfolgt dabei auf Basis der Übertragungsbedingungen, die durch den jeweiligen Standort des Endgeräts bestimmt werden. Faktoren sind dabei u. a.:

- Entfernung vom Teilnehmer zur Basisstation
- Standort des Teilnehmers innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes
- Bewegung des Teilnehmers.

Neben den technologisch-physikalischen Bedingungen, können auch tarifliche Bedingungen die Ressourcenzuteilung beeinflussen. Aufgrund der Ressourcenzuteilung stehen den Nutzern zu unterschiedlichen Zeiten und an unterschiedlichen Standorten z. B. verschiedene Datenraten zur Verfügung.

Die dargestellten Aspekte der Mobilfunksysteme sowie die große Anzahl an Teilnehmern – im 2. Quartal 2016 waren in Deutschland mehr als 112 Millionen Mobilfunkanschlüsse registriert [30] – begrenzen die Leistungsfähigkeit der Mobilfunknetze auf die Versorgung von mobilen Endgeräten. Eine zusätzliche Versorgung von stationären Endgeräten in Form eines Substitutes kabelgebundener Breitbandanschlüsse können

und werden die Mobilfunksysteme in Deutschland nicht leisten können – im Gegenteil: Die Versorgung der Basisstationen erfordern den Aufbau leistungsfähiger Glasfaserinfrastrukturen vom Kernnetz bis zu den Basisstationen, um alleine das im mobilen Bereich aufkommende Verkehrsvolumen bewältigen zu können. Ferner ist der energetische Aufwand für die Bereitstellung der Mobilfunkversorgung aufgrund der Vielzahl von Basisstationen hoch.

Funksysteme für lokale Netzwerke decken ein weites Anwendungsspektrum ab. Sie dienen u. a.:

- der Hausautomation – „smart home“,
- der schnurlosen Telefonie,
- der Multimedia-Vernetzung,
- der Vernetzung von z. B. Computern, Tablets, Smartphones.

Diese Anwendungen unterliegen sehr unterschiedlichen Randbedingungen. Daher wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Systeme für lokale Funknetze entwickelt, die auf die jeweiligen Erfordernisse zugeschnitten sind. So dienen Funknetze nach den verschiedenen WLAN-Standards (Wireless Local Area Network) häufig dem „Kabelersatz“ in privaten Haushalten, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen. Sie vernetzen Computer, Notebooks, Tablets, Smartphones etc. über kurze Entfernungen. Dabei wird entweder über einen Access-Point eine Art Funknetz aufgebaut, in dem sich die Geräte anmelden müssen, oder aber ein Endgerät kann ein Adhoc-Netzwerk aufbauen, in dem in der Regel zwei Geräte direkt miteinander kommunizieren.

Anders als die zuvor beschriebenen Mobilfunksysteme, arbeiten die WLAN-Systeme in allgemein freigegebenen Frequenzbereichen von 2,4 GHz und 5 GHz (ISM-Bänder - Industrial Science Medical). Somit muss der Aufbau und Betrieb eines WLAN-Netzes *nicht* durch die Bundesnetzagentur genehmigt werden. Ohne diese allgemeine Nutzungserlaubnis, wäre eine realistische Nutzung nicht möglich. Die Genehmigungsfreiheit hat jedoch den Nachteil, dass auch viele andere Systeme diese Frequenzbereiche nutzen. Das Störpotential ist daher grundsätzlich sehr hoch. Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile der beiden verwendeten Frequenzbereiche dargestellt:

	Vorteile	Nachteile
2,4 GHz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringere Materialdämpfung, daher höhere Reichweite ▪ Gebührenfreies ISM-Band, keine Einzelgenehmigungen durch BNetzA ▪ Keine aufwändigen Funktionen zum dynamischen Spektrumsmanagement nötig ▪ Heute hohe Verbreitung, daher kostengünstige Gerätetechnik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Verbreitung daher Störungen durch viele Endgeräte und Netze ▪ Frequenzband wird von anderen Systemen genutzt, daher Störungen wahrscheinlich ▪ Störungsfreier Betrieb von max. 4 WLAN-Netzen in Reichweite möglich
5 GHz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Datenraten möglich ▪ Weniger stark genutztes Frequenzband, daher störungsarmer Betrieb möglich ▪ 19 Kanäle, die sich nicht gegenseitig stören ▪ Höhere Reichweite möglich, da viel höhere Sendeleistungen erlaubt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stark regulierter Frequenzbereich ▪ Aufwendiges Frequenz-Management notwendig ▪ Ad-hoc-Netze werden meist nicht unterstützt ▪ Materialdämpfung höher als bei 2,4 GHz

Abbildung 35: Die Tabellen zeigen die Vor- und Nachteile der Frequenzbereiche für WLAN-Netze gegenüber [23]

Standardisiert wurden diese Systeme durch das IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) in der Reihe 802.11: Inzwischen sind sehr viele WLAN-Systeme und Erweiterungen entstanden. Diese werden durch Buchstabenzusätze nach der Standardnummer 802.11 gekennzeichnet (vgl. Tabelle in Abbildung 36).

Mit Ausnahme des 802.11ad Standards arbeiten alle in den bereits beschriebenen 2,4 GHz und 5 GHz Bereichen. Die Datenraten liegen heute im Consumer-Segment typischerweise zwischen 54 MBit/s und 300 MBit/s. Zu beachten ist dabei, dass es sich um Brutto-Datenraten unter optimalen Bedingungen handelt. In der Praxis liegen die Datenraten deutlich darunter. Dies ist den vielen (gegenseitigen) Störungen und den typischerweise schlechten Ausbreitungsbedingungen in den Gebäuden geschuldet.

Standard	Von	Frequenzen	Streams	Datenrate (brutto)	Datenrate (typisch)	Datenrate (Praxis)	
IEEE 802.11	1997	2,4 GHz	1	2 MBit/s	2 MBit/s	0,5-1 MBit/s	
IEEE 802.11b	1999	2,4 GHz	1	11 MBit/s	11 MBit/s	1-5 MBit/s	
IEEE 802.11a/h/j	1999	5 GHz	1	54 MBit/s	54 MBit/s	bis 32 MBit/s	
IEEE 802.11g	2002	2,4 GHz	1	54 MBit/s	54 MBit/s	2-16 MBit/s	
IEEE 802.11n	2006	2,4 GHz	1	150 MBit/s	72 MBit/s	bis 50 MBit/s	
			2	300 MBit/s	144 MBit/s	bis 100 MBit/s	
			3	450 MBit/s	216 MBit/s	bis 150 MBit/s	
			4	600 MBit/s	288 MBit/s	bis 200 MBit/s	
		5 GHz	1	150 MBit/s			
			2	300 MBit/s			
			3	450 MBit/s			
			4	600 MBit/s			
IEEE 802.11ac	2012	5 GHz	1	433 MBit/s	bis 400 MBit/s		
			2	867 MBit/s	bis 800 MBit/s		
			3	1.300 MBit/s	bis 1.200 MBit/s		
			4	1.733 MBit/s	bis 1.600 MBit/s		
			5 ... 8	bis 6.936 MBit/s			
IEEE 802.11ad	2012	60 GHz	1	4.620 MBit/s	4.620 MBit/s		
				6.757 MBit/s	6.757 MBit/s		

Abbildung 36: WLAN-Standards, Betriebsfrequenzbereich und der jeweilige Bruttodatenraten [23], [31], [32]

Soll über ein WLAN-Netz eine Internetverbindung hergestellt werden, so muss diese dem Access-Point erst einmal zugeführt werden. Typischerweise geschieht dies über den privaten oder den Breitbandanschluss eines Unternehmens. Damit belasten die

WLAN-Geräte auch immer den Festnetzbreitbandanschluss, sofern eine Internetanbindung besteht.

Die sogenannten freien WLAN-Netze, wie „freifunk“, setzen auf die freiwillige Mithilfe von Bürgern, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen, die ihre bestehenden, kostenpflichtigen (Breitband-)Internetanschlüsse über ein offenes WLAN allen Personen in Reichweite kostenfrei zur Verfügung stellen. Damit werden die bestehenden Breitbandanschlüsse der Anbieter von freien WLAN-Hotspots belastet und die Anbieter finanzieren die Nutzung durch Dritte. Damit sind freie WLAN-Netze keinerlei Mittel um die Breitbandversorgung zu verbessern, da sie auf einer *bestehenden* und durch andere errichtete (und finanzierte) Festnetzinfrastruktur aufbauen.

Richtfunksysteme sind zumeist hochbitratige (symmetrische) Übertragungswege zur drahtlosen Verbindung in Kommunikationsnetzen. Diese Systeme sind seit Jahrzehnten sehr zuverlässig im Einsatz und im Bereich des Kernnetzes Alternativen zu Glasfaserverbindungen, insbesondere als Zuführungsstrecken. Sie dienen vor der breiten Verfügbarkeit der Glasfasertechnik u. a. als bundesweite bidirektionale Zuführungsstrecken zu den TV-Studios des Rundfunks (z. B. BR-WDR-NDR).

Ihre Bezeichnung leitet sich aus der Richtcharakteristik ihrer Antennen ab. Sie bündeln die elektro-magnetischen Wellen in einen relativ engen Strahl, auch Beam genannt. Dadurch breiten sich die Signale nur in bestimmte Richtungen aus, wodurch die Antennen sehr genau aufeinander ausgerichtet sein müssen.

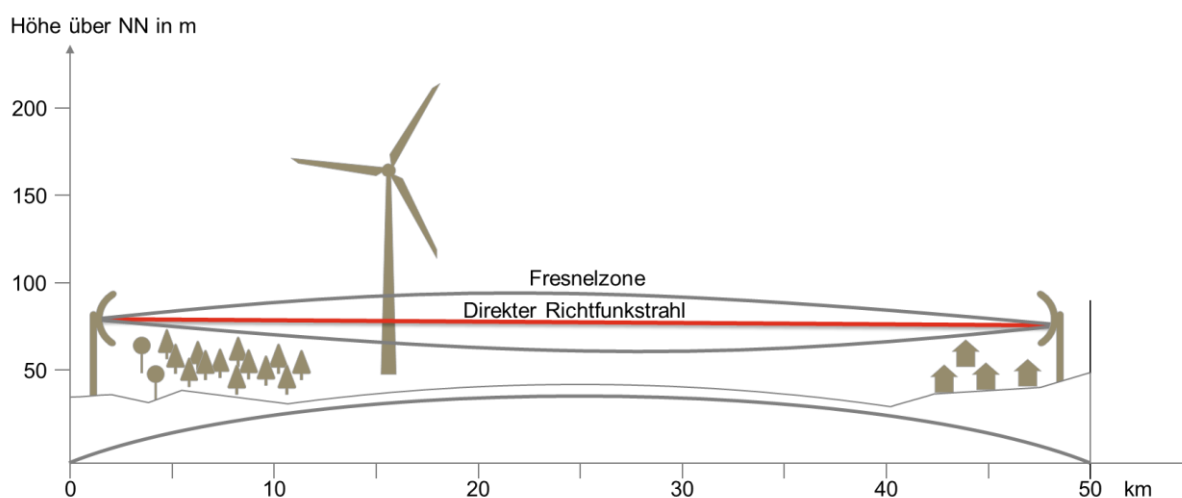


Abbildung 37: Darstellung einer Richtfunkverbindung [33]

Topologisch sind Richtfunkverbindungen in zwei Gruppen einzuteilen:

- Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
- Punkt-zu-Multipunkt-Verbindungen

Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bestehen aus genau zwei Funkstationen, die mittels Richtantennen genau aufeinander ausgerichtet werden (s. *Abbildung 327*). Durch die starke Bündelung der elektro-magnetischen Wellen entsteht ein Strahl, der quasioptische Ausbreitungseigenschaften aufweist. Dies hat zur Folge, dass zwischen den An-

tennen eine Sichtverbindung bestehen muss. Ist dies nicht der Fall, kommt für gewöhnlich keine Verbindung zustande. Hier muss ggf. einer Kette von Richtfunkstrecken eingerichtet werden, um z. B. Hindernisse, oder bei sehr langen Strecken, die Erdkrümmung zu überwinden. Die einzelnen Zwischenverbindungen werden Hops genannt.

Unter einer Sichtverbindung ist jedoch nicht zu verstehen, dass die Antenne der Gegenstelle gerade nicht durch ein Hindernis verdeckt wird. Vielmehr muss auf der gesamten Übertragungsstrecke ein Mindestabstand zu Hindernissen eingehalten werden. Wie die *Abbildung 37* zeigt, bildet sich um die rote Sichtverbindung eine Ellipse. Diese wird als Fresnel-Ellipsoid bezeichnet. Der maximale Abstand zwischen Sichtachse und Ellipsoid berechnet sich nach folgender Formel:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C * r}{f}}$$

a = kleine Halbachse des Fresnel-Ellipsoiden
C = Lichtgeschwindigkeit
f = Frequenz des Sendesignals
r = Abstand in Meter

Abbildung 38: Formel zur Berechnung der kleinen Halbachse des Fresnel-Ellipsoiden [23]

Bei einer Frequenz $f = 2,4$ GHz (siehe WLAN) und einem Abstand zwischen den Antennen von $r = 800$ m, ergibt sich $a = 5$ m. Dies bedeutet, dass auf der gesamten Richtfunkstrecke die mittlere Sichtverbindung (s. *rote Linie in Abbildung 37*) mindestens 5 m über dem höchsten Hindernis verlaufen sollte. Die Antennen der beiden Funkstationen müssen in entsprechenden Höhen montiert werden.

Professionelle Richtfunksysteme für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen arbeiten in verschiedenen Frequenzbereichen – 4 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 13 GHz, 15 GHz, 18 GHz, 23 GHz, 26 GHz, 28 GHz, 32 GHz, 38 GHz 42 GHz, 52 GHz und 71-76/81-86 GHz [34]. Zu beachten ist, dass es für Punkt-zu-Punkt-Systeme bei den aufgeführten Frequenzen einer Einzelzuteilung durch die Bundesnetzagentur bedarf. Ohne eine Genehmigung und Frequenzzuteilung ist der Aufbau und Betrieb nicht gestattet. Dadurch soll eine möglichst störungsfreie und effiziente Nutzung der dem Richtfunk zugewiesenen Frequenzen gewährleistet werden.

Neben den Punkt-zu-Punkt-Systemen gibt es auch Punkt-zu-Multipunkt-Systeme. Hier werden die elektro-magnetischen Wellen nicht so stark, wie bei den Punkt-zu-Punkt-Verbindungen gebündelt. Dadurch können mehrere Teilnehmerstationen von einem festen Punkt aus erreicht werden, die im Strahl des Senders liegen. Sie dienen häufig als Verteilnetze oder als Access-Netze.

Für Punkt-zu-Multipunkt-Systeme stehen Frequenzen in den Bereichen 26 GHz und 28 GHz zur Verfügung. Frequenzen aus dem Bereich 28 GHz sind ausschließlich für Infrastruktur-Übertragungswege in UMTS- und anderen Mobilfunknetzen vorgesehen.

Mittels Richtfunkssystemen können heute Datenraten von bis zu mehreren Gigabit bidirektional realisiert werden. Allerdings sind hierzu große Bandbreiten notwendig, welche erst in sehr hohen Frequenzbereichen zur Verfügung stehen. Diese hohen Frequenzbereiche weisen jedoch hohe Freiraumdämpfungen und damit stark beschränkte Entfernungen auf, die überbrückt werden können.

Dennoch sind Richtfunkssysteme kostengünstige und effiziente Mittel, um hohe Datenraten mit sehr hohen Verfügbarkeiten über große Strecken zu realisieren. Sie sind daher ein sehr wichtiger Baustein zur Verbesserung der Breitbandversorgung und insbesondere als Zuführung zu regionalen FTTB-Netzen geeignet.

Hybrid-Systeme sind Systeme der Internet-Anbindung des Endkunden, die eine kabelgebundene Versorgung mit derjenigen einer WLAN oder Mobilfunk-Versorgung kombinieren. Dazu werden die fibre nodes⁹ oder die mit Outdoor-DSLAMs¹⁰ überbauten KVz der Kabel-TV- und 2-Draht-Netze mit lokalen Funksystemen ausgestattet.

Im Markt werden derartige Hybrid-Produkte vielfach dort angeboten, wo eine leitungsgebundene Infrastruktur keine oder nur eine unzureichende Versorgung gewährleistet: Der Endkunde wird über einen Festnetzanschluss versorgt (Basis) und im Falle höherer Leistungsanforderung wird zusätzlich die Kapazität der Mobilfunkssysteme oder eines WLAN-Systems genutzt, um die Kundenanforderung zu befriedigen. Dieses bedarf spezieller Routersysteme beim Endkunden, die die Verkehrstrennung (in Richtung des Netzes) bzw. die Zusammenführung (in Richtung des Endanwenders) vornehmen. Im Fall der Nutzung des Mobilfunknetzes ergeben sich diesbezüglich Herausforderungen in der Funknetzplanung, um in die bestehenden Netze integriert zu werden. Sofern WLAN-Technologien genutzt werden, ergeben sich die typischen Störproblematiken dieser Netze.

In jedem Fall erhöhen diese zusätzlich verbauten Komponenten den Energiebedarf in der Fläche über die in den fibre nodes und Outdoor-DSLAM verbauten Systeme hinaus.

⁹ s. Anhang 2: Nutzung von CATV-Netzen für die Internet-Versorgung.

¹⁰ s. Anhang 1: 2-Draht-Netze für die Internet-Versorgung.

Übersicht – Funktechnische Systeme (bodengebunden)

Merkmale:

- Ortsunabhängige Internet-Versorgung,
- Physikalisches Medium: Ausbreitung im freien Raum bis in die Gebäude,
- Aufbau als zellenorientiertes System (z. B. Mobilfunk) oder Richtfunk.

Vorteile:

- Relativ große Gebiete mit wenig Infrastrukturtechnik versorgbar,
- Flexibel und kostengünstig im Auf- und Abbau,
- Versorgung weiter Gebiete im ländlichen Raum ist eingeschränkt möglich,
- Rückbau z. B. von Richtfunkstrecken im Zuführungsbereich möglich, wenn diese durch leitungsgebundene Systeme (z. B. Glasfaser) ersetzt werden,
- Basisstationen müssen verstärkt mit Glasfaser angebunden werden, dadurch wird die Glasfaser weiter in die Fläche geführt,
- Unterstützungsmöglichkeit leitungsgebundener Systeme in schlecht versorgten Regionen.

Nachteile:

- „Shared Medium“ im Mobilfunkbereich: Die vorhandenen Bandbreiten wird auf viele Teilnehmer verteilt,
- Basisstationen müssen verstärkt mit Glasfaser angebunden werden, um Datenvolumen zu- und abzuführen.
- Hoher Energieaufwand bei flächendeckender Bereitstellung hoher Datenraten, auch bei Hybrid-Systemen,
- Anders als bei leitungsgebundenen Technologien begrenzt die Aufteilung der per Lizenz zugeordneten Mobilfunkfrequenzen das zur Verfügung stehende Übertragungsspektrum je Zelle.
- Produkte für Endkunden enthalten oft begrenzte Transfervolumen, die schnell erreicht werden können,
- Danach nur noch geringe Datenrate verfügbar oder Zubuchung von Volumen gegen Aufpreis.

Satellitensysteme

Kommunikations-, Fernmelde oder TV-Satellitensysteme sind generell „fliegende Richtfunkrelaisstellen“, die i. a. von der Erde gesendete Signale empfangen. Entsprechend ihrer Position und der Ausrichtungen ihrer Antennen werden die Signale wiederum auf die Erdoberfläche abgestrahlt; der dabei vom Satelliten erreichbare geographische Bereich trägt die Bezeichnung *footprint*. Beispiele hierfür zeigt **Error! Reference source not found.**

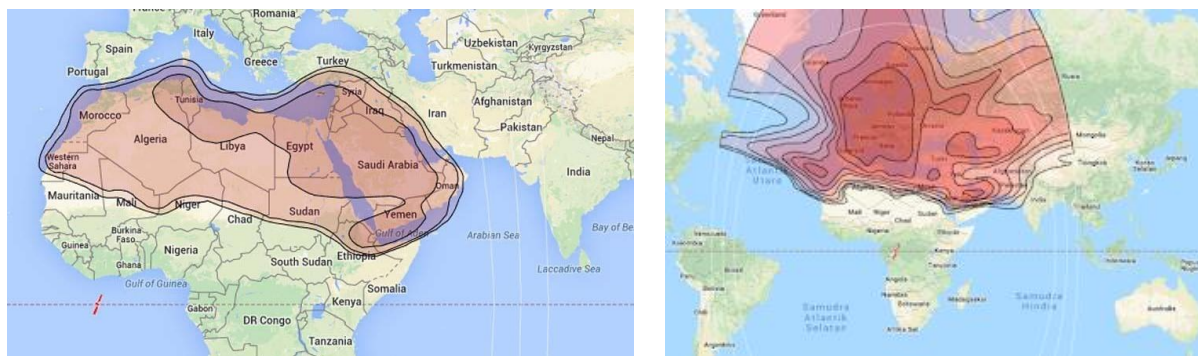


Abbildung 39: Footprint eines Satelliten zur Versorgung von Nordafrika und Zentraleuropa (Quelle: SAT7UK)

Die Übertragungskanäle, die ein Satellit aufweist, werden Transponder genannt und haben – je nach Bauart des Satelliten – unterschiedliche Transpostkapazitäten (Bandbreite bzw. Datenrate). In einem Satelliten stehen i.a. mehrere Transponder zur Verfügung, die für die Übertragung genutzt werden können.

Für die Internetübertragung werden derzeit zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze der Satellitenkommunikation verfolgt, die sich vor allem hinsichtlich der Position der Satelliten und deren erforderliche Anzahl zur Bereitstellung eines Internetzugangs unterscheiden:

- Geostationäre Satelliten, die an Positionen typischer Rundfunksatelliten stehen (z. B. 19,2°Ost),
- Umlaufende Satelliten, die ein Netz von fliegenden Basisstationen aufspannen, die neben der Kommunikation zur Erde, d. h. zum Nutzer auch eine Kommunikation untereinander zum Zwecke des erforderlichen handovers (s. u.) durchführen.

Beide Systeme und ihre spezifischen Eigenheiten werden nachfolgend vorgestellt.

Geostationäre Satelliten sind Satelliten, die sich auf einer Kreisbahn von ca. 36.000 Kilometer über dem Äquator befinden, **Error! Reference source not found.** Sie folgen der Erdrotation, so dass sie für den Betrachter auf der Erdoberfläche still zu stehen scheinen, sich aber absolut mit ca. 3 km/s bewegen. Zu diesen Satelliten gehört auch die überwiegende Anzahl der Satelliten von SES S.A. und Eutelsat, [3].

Mit der Einführung der digitalen Übertragungstechnik nach DVB (Digital Video Broadcasting ab 1994, DVB-S und DVB-S2 ab 2005) und der Abschaltung der analogen Rundfunkübertragung über Satellit, konnte die Programmkapazität über Satellit

deutlich erhöht werden. So können über die Transponder, die analog nur 1 TV-Programm beinhalteten, nun mehr als 10 (HDTV)Programme übertragen werden. Gleichzeitig fiel der Preis für einen einzelnen Programmkanal bei europaweiter Satellitenverbreitung erheblich, so dass immer neue Programmanbieter diesen preiswerten Verbreitungsweg nutzen. SES betreibt international mehr als 40 geostationäre Satelliten; für den deutschen Sprachraum ist die Position 19,2° Ost von besonderer Bedeutung. Eutelsat betreibt derzeit 39 Satelliten mit mehr als 5.500 TV-Kanälen über 200 Millionen Haushalte in Europa (Stand: 2019), [35].

Überschlagsmäßige Kapazitätsberechnung: Legt man eine typische Transportkapazität eines Satelliten (Gesamtbandbreite) von 4 GHz zugrunde, dann ergibt sich bei einer Transponderbandbreite von ca. 40 MHz eine Anzahl von 100 Transpondern ($100 \cdot 40\text{MHz} = 4\text{GHz}$). Jeder Transponder ist in der Lage ca. 60 Mbit/s zu transportieren, was ungefähr eine Gesamtdatenrate von ca. 8 (datenratenreduzierten) HDTV-Signalen entspricht. Somit wäre ein Satellit in der Lage, 800 HDTV-Kanäle zu übertragen. Aufgrund der hohen (digitalen) Gesamtkapazität wurden neue Dienstangebot wie Internet-Anbindungen über Satellit entwickelt.

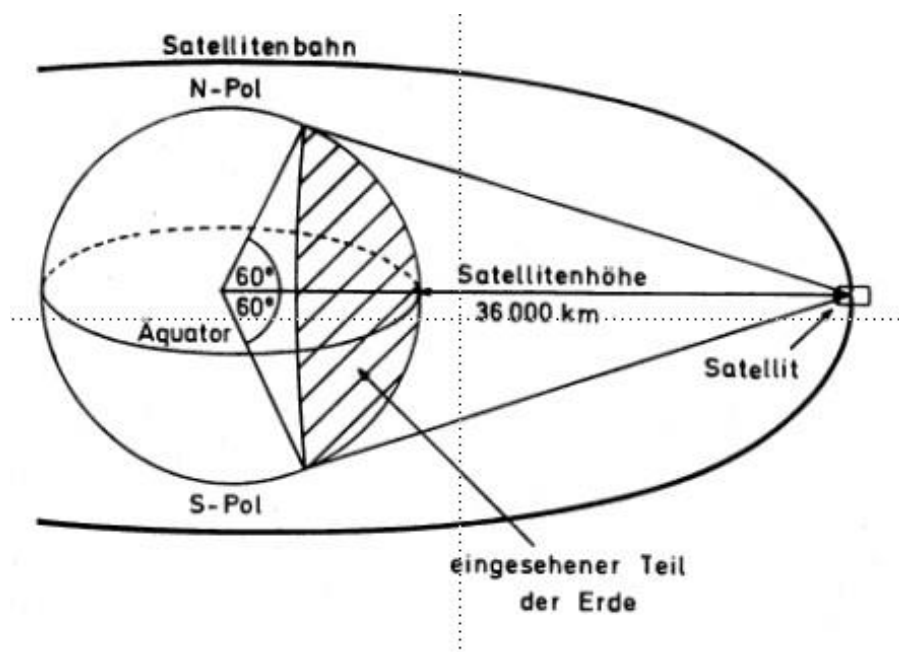


Abbildung 40: Geostationärer Satellit (Quelle: www.easy-wetter.de)

Ursprünglich wurden die geostationären Satelliten lediglich für die digitale, unidirektionale Rundfunkverteilung genutzt. Beim Einsatz dieser geostationären Satelliten für die Internetversorgung mussten unterschiedliche Herausforderungen bewältigt werden, wie z. B.:

- Die Einrichtung des Rückkanals für die Internetanbindung sowie die Bereitstellung einer dafür erforderlichen, möglichst preiswerten Technik.
- Die Bereitstellung einer akzeptablen Datenrate für den Anwender, da sich die übertragbare Datenrate eines Transponders bzw. des Satelliten auf die gesamte Ausleuchtzone (footprint) verteilt (shared medium).

Nutzungseinschränkungen: Aufgrund der großen Entfernung zwischen potenziellem Nutzer und Satellit von ca. 36.000 km ergibt sich eine erhebliche Kommunikationslaufzeit (Latenz). Trotz der Ausbreitung von Radiowellen mit Lichtgeschwindigkeit ergibt sich eine ungefähre Laufzeit von 300 ms für den Weg zum Satelliten und zurück.

Bei bidirektionalen Kommunikationsanwendungen muss der Weg zweimal durchlaufen werden, so dass sich z. B. bei Telefonie rein durch den Übertragungsweg Verzögerungszeiten von 500 – 700 ms ergeben, die nicht durch technische Veränderungen reduziert werden können. Zum Vergleich: Die Latenzzeiten von xDSL-Systemen liegen bei 20 – 30 ms. Daher ist die Nutzung von geostationären Satellitensystemen für Internet-Anwendungen mit einer geringen geforderten Latenzzeit nur eingeschränkt möglich.

Rückkanal bei geostationären Satelliten

Bis Mitte der 2010-Jahre wurden 1-Weg-Satellitensysteme auch von Nutzern in Europa eingesetzt, **Error! Reference source not found.** Dabei wird der Downstream über Satellit, der notwendige Upstream über terrestrische (Telefon-)Wege realisiert. Diese Systeme waren daher nur dort einsetzbar, wo mindestens eine Telefon-Infrastruktur (Festnetz oder Mobil) vorhanden war. Die Upstream Datenrate war dabei i. a. auf 128kbit/s beschränkt.

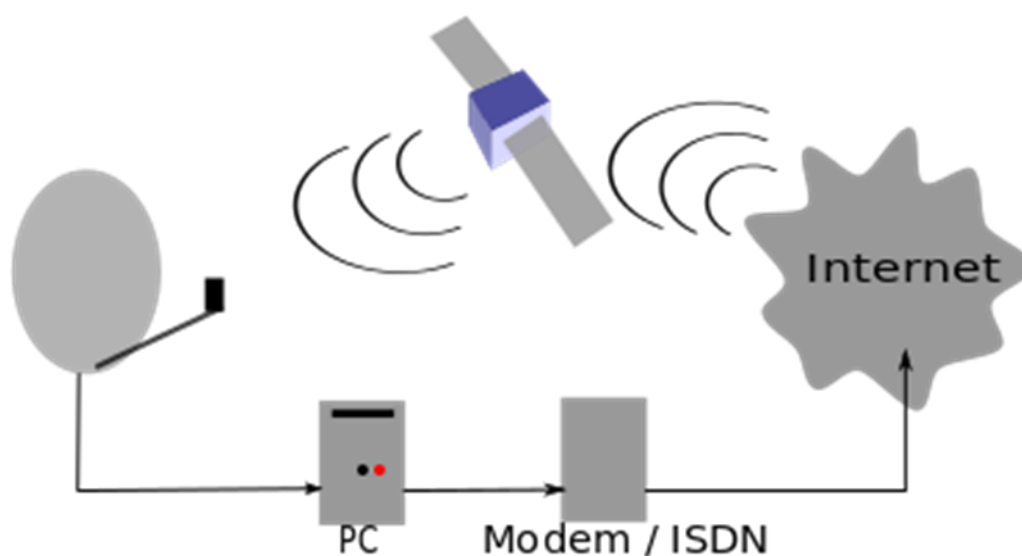


Abbildung 41: 1-Wege-Satellitenkommunikation für Internetzugang (Quelle: Wikipedia)

Mit der weltweit höheren Verfügbarkeit von Mobilfunknetzen für die Datenübertragung (UMTS, LTE, 5G, ...) sowie dem fortschreitenden Ausbau der Festnetzinfrastruktur (xDSL, Kabel-TV-Netze, Glasfaser) reduzierte sich der Markt auf wenige spezielle Anwendungsbereiche.

Mit der Standardisierung von DVB-RCS (Return Channel via Satellite) wurde um das Jahr 2000 aufbauend auf dem DVB-System für den Downstream die Möglichkeit geschaffen, eine 2-Wege-Verbindung, d.h. auch den Upstream über Satellit für den Endkunden, anzubieten. Die Übertragung vom Satelliten erfolgt dabei kompatibel zu DVB-S bzw. DVB-S2 im KU-Band (11-14 GHz), die Übertragung zum Satelliten über das KA-Band (20-30 GHz-Bereich). Es können dieselben Antennen für den TV-Empfang

und den Internet-Zugang genutzt werden, die mit einer entsprechenden Rückkanaleinheit ergänzt werden.

Das Grundprinzip des Internet-Satellitenzugangs ist in **Error! Reference source not found.** anhand der von SES Astra angebotenen Variante dargestellt.

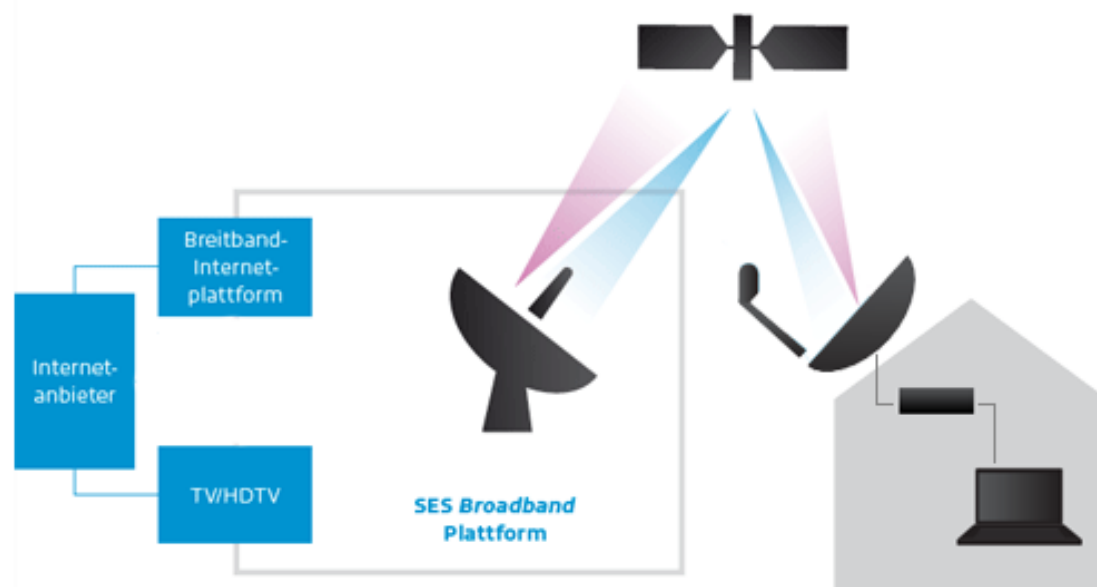


Abbildung 42: DVB-RCS-System für die Internet-Anbindung (Quelle: SES S.A.)

International bieten aktuell über 20 Unternehmen weltweit 2-Wege-Kommunikationssysteme über Satellit an, die sich technisch in Details unterscheiden und für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden. Die o. g. SNG-Anwendungen nutzen häufig die VSAT-Systeme (Very Small Aperture Terminal), die von verschiedenen Satellitenbetreibern z. B. Eutelsat (Gebiet: Europa, Nordafrika, Naher Osten), PanAmSat (Gebiet: Nord- und Südafrika, Europa) oder Intelsat unterstützt werden.

Der Vorteil ist die völlige Unabhängigkeit von anderen Infrastrukturen zur Realisierung einer Internetverbindung. Die von den Anbietern angebotenen Datenraten liegen derzeit für den Downstream bei bis zu 100 Mbit/s und bis zu 5 Mbit/s im Upstream für das Privatkundensegment, [36].

Erhöhung der Downstream-Geschwindigkeit bei geostationären Satelliten

Grundsätzlich überdecken geostationäre Satelliten mit Ihrem Footprint einen großen geografischen Bereich (s.o.) auf der Erdoberfläche und sind daher sehr gut für die kostengünstige Verbreitung von Rundfunksignalen an viele Teilnehmer geeignet. Doch genau hier zeigt sich auch eine Schwachstelle: Die Internet-Kommunikation ist eine bidirektionale Kommunikation, da sich die von einem Satelliten bzw. Satellitentransponder abgestrahlte Datenmenge auf alle Teilnehmer im Empfangsbereich aufteilt. Es handelt sich also um ein (ausgeprägtes) „Shared Medium“ mit potenziell hohem Aufteilungsfaktor: Je mehr Teilnehmer den Dienst in Anspruch nehmen, desto weniger Datenrate steht jedem Einzelnen im Mittel zur Verfügung. Dieses stellte bisher eine erhebliche Nutzungseinschränkung dar und ist darauf zurückzuführen, dass die

geostationären Satellitentypen eben nicht für die Kommunikations- sondern die Rundfunk-Verbreitung optimiert waren.

Bei neuentwickelten Satelliten wurde dieser Anforderung Rechnung getragen. Eutelsat setzt z. B. unter dem Markennamen KONNECT nunmehr auf der Position 7°Ost einen Satelliten ein, der eine Gesamtkapazität von 75 Gbit/s auf 65 sogenannte Spot-Beams verteilt, d. h. der Footprint der bisherigen Satellitenposition wird auf 65 einzelne, voneinander getrennte Beams verteilt, **Error! Reference source not found.** Dadurch ergibt sich eine Verringerung der durch den einzelnen Beam zu versorgenden Erdoberfläche und damit eine höhere potenzielle Datenrate im Downstream für den Nutzer – der Aufteilungsfaktor wird geringer [37].

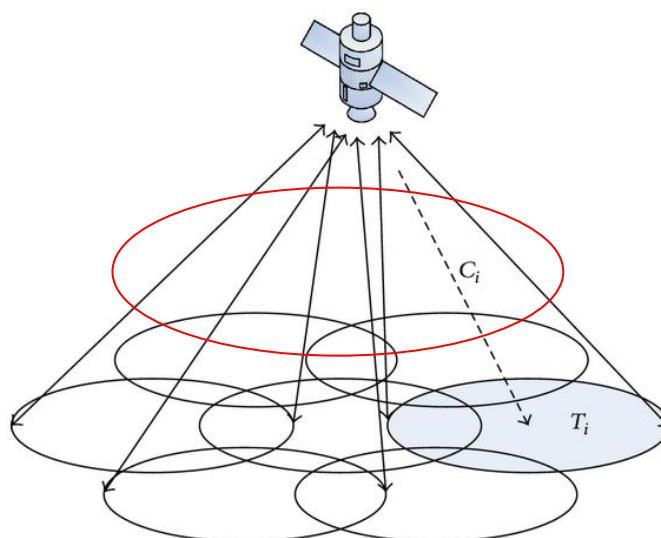


Abbildung 43: Aufteilung des Footprint in einzelne Beams bei geostationären Satelliten rot eingezeichnet ist der Abdeckungsbereich (Quelle: Eutelsat)

Diese Technologie wird von verschiedenen Satellitenbetreibern zur Verbesserung der angebotenen Dienstleistung verwendet. Bereits mit der Einführung von DirecTV in den USA 1994 für den digitalen Satellitendirektempfang im TV-Rundfunk wurde dieses erfolgreich eingeführt, in diesem Fall, um die empfangbare Leistung zu erhöhen und den Empfang mit kleineren Antennendurchmessern zu ermöglichen. Satelliten dieser Bauart, die eine Aufteilung des Versorgungsbereichs in eine Vielzahl von Unterbereichen ermöglichen, werden auch als High Throughput Satellites (HTS) bezeichnet, wie das Beispiel von Telenorsat in **Error! Reference source not found.** zeigt.

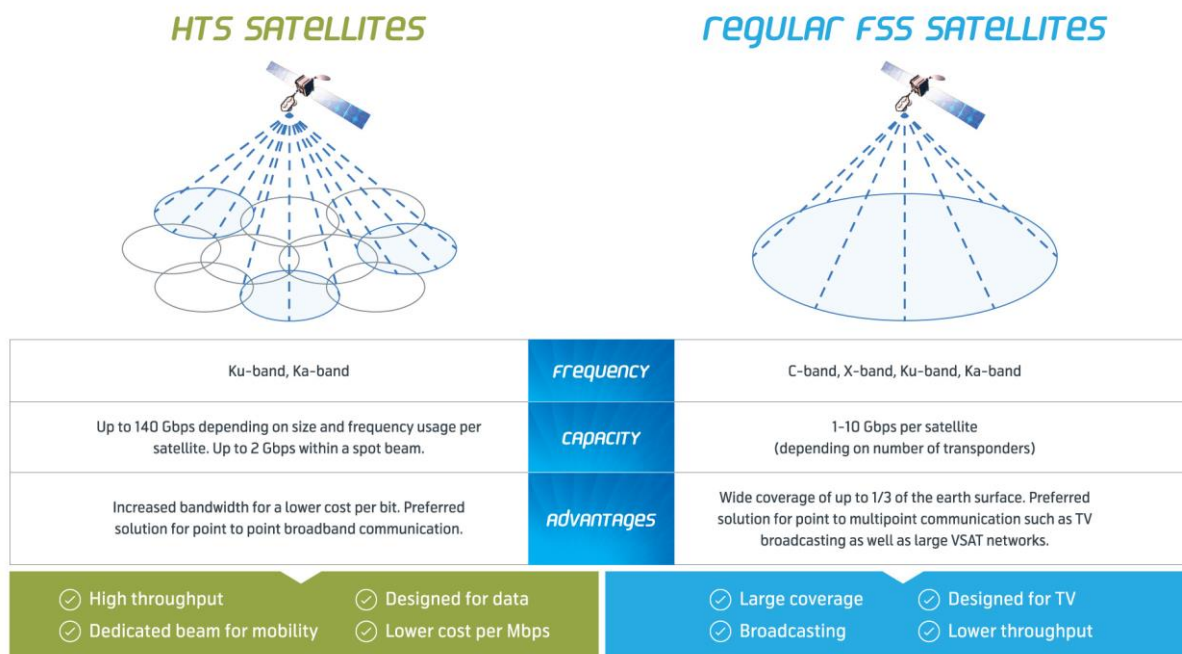


Abbildung 44: Vergleich von Spotbeam-Satelliten mit klassischen Direkt-Empfang-Satelliten, Quelle: Telenorsat

Fazit: Mit der neuen geostationären Satellitengeneration, die speziell für die Datenkommunikation optimiert wurde, sowie der Verfügbarkeit preiswerter Endgerätelösungen wurde eine gute Möglichkeit geschaffen, Gebiete ans Internet anzubinden, die schwer oder nicht durch terrestrische Netze zu erschließen sind. Dieses gilt vor allem für typische Datenanwendungen (z. B. Internet-Surfen, Datentransfer, e-mail usw.), jedoch nur eingeschränkt für die Echtzeitkommunikation (z. B. Videokonferenz, Telefonie). Nicht geeignet sind derartige Systeme für Anwendungen mit einer erforderlichen sehr kurzen Reaktionszeit (z. B. interaktive Spiele oder Börsen bzw. Warentermin-geschäfte).

Zum Betrieb von geostationären Satelliten liegen jahrzehntelange Erfahrungen vor. Aufgrund der hohen Entfernung von der Erde unterliegen diese keinem wesentlichen Verschleiß durch die Restatmosphäre der Erde. Die Nutzungsdauer konnte in den letzten 40 Jahren von ca. 2 Jahren auf heute 12 – 15 Jahre erhöht werden. Ihr Austausch ist dabei häufig eher durch die Einführung einer neuen, leistungsfähigeren Satelliten-Generation bedingt.

Satellitensysteme in erdnaheer Umlaufbahn

Die Nachteile einer langen Umweglaufzeit geostationärer Satelliten entfällt nahezu beim Einsatz von Satelliten in erdnaheer Umlaufbahn – den Low Earth Orbit Satelliten (LEO). Hierzu zählen Satelliten, die die Erde in Höhen zwischen 200 km und 2000 km umkreisen. Sie fliegen deutlich schneller als die Erddrehung, um im Orbit zu bleiben und umrunden die Erde in ca. 100 Minuten, so dass der Kontakt zu einer Erdfunkstation pro Umlauf nur max. 15 min. beträgt, [38]. Der Bereich LEO wird u. a. genutzt von der Internationalen Raumstation ISS, Spionagesatelliten, Wetter- und Erderkundungs-

satelliten, Amateurfunksatelliten und für Forschungs- und Erprobungssatelliten. Aufgrund des kurzen Kontaktes zwischen Erdfunkstation (z.B. einem Satelliten-Mobilfunkgerät) und dem Satelliten muss zwischen den Satelliten permanent eine Übergabe der Kommunikationsverbindungen (Handover) erfolgen, damit diese nicht abreißt. Dies ist vergleichbar mit der mobilen Kommunikation auf der Erde im Zug oder Auto: bei der Bewegung des Nutzers erfolgt ein überwiegend lückenloser Handover zwischen den Basisstationen. Bei LEO-Kommunikationssystemen bewegt sich der Nutzer ggf. gar nicht, jedoch die Basisstationen permanent auf der Erdumlaufbahn. Im Falle der Bewegung des Nutzers (z. B. Schiffs- oder Flugzeugkommunikation) kommt diese Bewegung noch hinzu, diese ist aber langsam im Vergleich zur Bewegung der Satelliten.

Leo-Satellitensysteme zur weltweiten Internetversorgung

Die weltweite Internetversorgung über Satellit wird derzeit von verschiedenen Unternehmen als Geschäftsidee verfolgt. Durch eine erhebliche Erhöhung der Satellitenanzahl und damit eine höhere Satellitendichte kann die individuell nutzbare Datenrate maßgeblich erhöht werden.

Die 2012 gegründete Firma OneWeb (GB, USA) mit einem Netzwerk von zunächst 588 und später geplanten ca. 6.300 Satelliten, musste im Jahr 2020 Insolvenz anmelden. Inzwischen konnten neue Finanzmittel akquiriert werden, so dass das Projekt zum Ende des Jahres 2020 wieder neu starten konnte. So sind bis Ende 2022 16 Starts mit jeweils bis zu 36 Satelliten geplant. Derzeit kann nicht abgeschätzt werden, ob dieses Projekt bis zur Markteinführung fortgesetzt werden kann.

Im Jahr 2002 erfolgte die Gründung des Unternehmens SpaceX durch Elon Musk, das sich privatwirtschaftlich intensiv mit der kommerziellen Nutzung der Raumfahrt befasst. Stand zunächst die Entwicklung von verschiedenen, u. a. wiederverwendbaren Raketensystemen und Raumschiffen im Vordergrund, wurde mit dem Projekt „Starlink“ auch ein Satellitenkommunikationssystem entwickelt.

Ziel ist die Bereitstellung eines weltweiten, leistungsfähigen Internetzugangs. Mit derzeit 3.275 Satelliten im Orbit ist SpaceX der weltweit größte Satellitenbetreiber. Die Anzahl soll noch wesentlich erhöht werden (11.927 Satelliten bis 2027). Mit Starlink steht dem Konzern dann eine von anderen Anbietern weitgehend unabhängige, direkte Kommunikationsplattform zur Verfügung, über die z. B. die ebenfalls im Konzern hergestellten Fahrzeuge der Fa. Tesla unmittelbar erreicht werden können, um diese mit individuellen Informationen zu versorgen.

Bei Starlink handelt es sich um ein LEO-System mit einer sehr hohen Dichte von Satelliten in einer Umlaufhöhe von ca. 550 km. In der Zukunft ist auch die Nutzung von geringeren Bahnhöhen ab 320 km geplant. Um die Vielzahl der Satelliten kostengünstig in die Umlaufbahn transportieren zu können, werden bis zu 400 Satelliten mit einer Rakete befördert. Erste Prototypen (Vorserienmodelle) wurden bereits 2019 platziert, sind aber überwiegend (planmäßig) wieder verglüht.

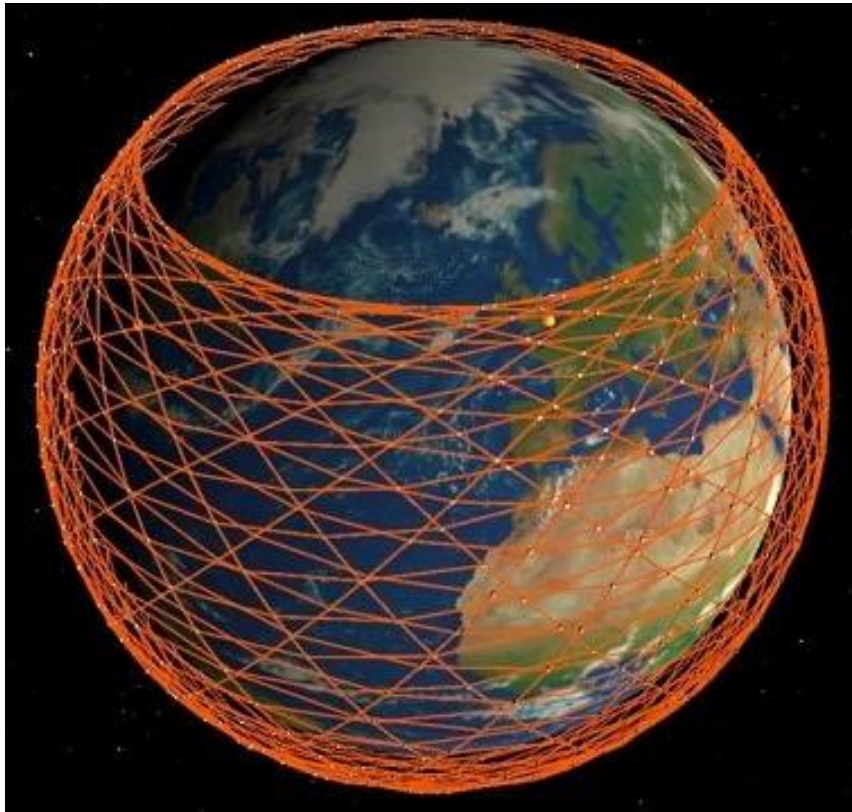


Abbildung 45: Satelliten-Konstellation des Starlink-Systems, Quelle: SpaceX

Im April 2020 begann die Beta-Erprobungsphase des Systems, insbesondere in den USA. Ende 2020 befanden sich 882 Starlink-Satelliten im Erdorbit. SpaceX geht von einer maximalen Nutzungsdauer von 5 Jahren für den einzelnen Satelliten aus, d. h. es ist eine ständige Erneuerung des Netzes erforderlich.

Amerikanische und kanadische Teilnehmer am Betatest, die Empfangssysteme nach **Error! Reference source not found.** verwendeten, berichten von Downstream-Datenraten von bis zu 150 Mbit/s und Upstream-Datenraten von bis zu 30 Mbit/s. Die Verzögerungszeit lag bei ca. 40 ms und damit im Bereich terrestrischer Verbindungen. Die Grundausstattung mit einer technisch aufwendigen Sende- und Empfangsantenne kostet ca. 500 \$ (der vermutete Herstellungspreis liegt zwischen 1000 und 2000 \$), die Abonnementgebühren betragen 99 \$ pro Monat, bei einer Downstream-Datenrate von bis zu 50 Mbit/s und einer Upstream-Datenrate von bis zu 10 Mbit/s. Die Datenmenge ist dabei nicht begrenzt (Flatrate).

Trotz der hohen Satellitendichte und der Tatsache, dass ein einzelner Satellit nur wenige Minuten Verbindung zu einer Bodenstation hat, ist das System immer noch grundsätzlich ein Shared-Medium-System: Die individuelle Datenrate reduziert sich bei steigender Nutzerzahl in einem durch den einzelnen Satelliten abgedeckten geographischen Bereich. Die Gesamtkapazität liegt bei ca. 1TBit/s (1000 Gbit/s) je 60 Satelliten. Eine wirtschaftliche Profitabilität erwartet SpaceX sofern ca. 1000 Satelliten in Betrieb sind. In Deutschland wurde mit der Starlink Germany GmbH die Betreiberfirma des Netzes in Deutschland gegründet und Produkte ab ca. 80 € pro Monat gebucht werden.

Weitere Anbieter, die sich derzeit mit vergleichbaren Projekten beschäftigen sind Telesat (292 Satelliten) und Amazon (3236 Satelliten).



Abbildung 46: Starlink-Antennensystem, Quelle: Tesla Sattelite

Zusammenfassung und Fazit

Die Internet-Versorgung über Satelliten kann einen wichtigen Beitrag für eine Versorgung terrestrisch nicht versorgbarer Gebiete darstellen. In nachrangig ausgebauten (in der Regel dünn besiedelten) Gebieten kann sie nur eine klar zeitbefristete Übergangsmaßnahme sein.

Durch neue geostationäre Systeme können mit wenigen Satelliten große Bereiche kostengünstig versorgt werden. Es handelt sich um ein Shared-Medium mit nicht garantierter Datenrate im Up- und Downstream.

Die Nutzung ist auf Anwendungen mit geringen Ansprüchen an die Verzögerungszeit begrenzt, d. h. Videokonferenzen oder Telefonie-Anwendungen bedürfen einer systemtypischen Anpassung des Nutzungsverhaltens.

Die LEO-Systeme stellen eine technische Alternative für eine allgemeine Nutzung auch für Anwendungen mit Anforderungen an eine kurze Reaktionszeit dar. Wirtschaftlich sind sie jedoch i. d. R. aufgrund ihrer erheblich höheren Kosten nicht geeignet. Aufgrund der hohen Satellitenzahl sowie dem hohen Verschleiß in einer erdnahen Umlaufbahn ist der Aufbau und der Betrieb derartiger Netze teuer, was sich in höheren Endkundenpreisen im Vergleich zu den über terrestrischen Netzen oder über geosta-

tionäre Satelliten erbrachten Diensten bemerkbar macht und derzeit durch Quersubventionen insbesondere im Konzern von Elon Musk verdeckt wird. Gerade für die bereits gut ausgebauten Bereiche in Zentraleuropa ist das System ggf. eine Brückentechnologie für die Anbindung nachrangig versorgter Einzelgebiete. Von Starlink selbst angegebene Zielmärkte sind u. a. die dünn besiedelten Regionen in den USA und Kanada, wo der Aufbau von Mobilfunknetzen aufgrund fehlender Rentabilität nicht erfolgt und auch keine leistungsfähige Festnetzinfrastruktur existiert.

Weltweit sind die Leo-Systeme eher zur Erfüllung spezifischer Diensteanforderungen (z.B. für die Kommunikation zu den Tesla-Fahrzeugflotten) oder zur Überbrückung während des Aufbaus von Glasfaser- und leistungsfähigen Mobilfunknetze geeignet. Ferner können sie als Element der Kommunikation im Katastrophenfall oder beim Ausfall von terrestrischen Kommunikationsnetzen vorgehalten werden.

Anhang 5 – Offener Netzzugang - Open Access

Der offene Netzzugang, auch Open Access genannt, ist heute bereits ein wichtiger technologischer und wettbewerblicher Aspekt der breitbandigen Internetversorgung.

Open Access ist eine Kernforderung der Europäischen Kommission insbesondere im Rahmen des geförderten Breitbandausbaus. Die Gewährung eines „offenen Zugangs“ auf Vorleistungsebene muss nach den Vorgaben der Kommission zu gleichen und nichtdiskriminierenden Bedingungen erfolgen.

Der offene Netzzugang wird im Hinblick auf die Öffnung der Wertschöpfungskette in FTTB/H-Netze weiter an Bedeutung gewinnen. Ähnlich dem Breitbandbegriff gibt es keine einheitliche Definition für den offenen Netzzugang, durch den alle Diensteanbieter zu gleichen Bedingungen und zu gleichen Konditionen Zugang zur Netzinfrastruktur und/oder Transportdienstleistung erhalten.

Die Umsetzung wird aktuell unterschiedlich gehandhabt: Generell kann bei Open Access zwischen dem physikalischen Zugang zur passiven Infrastruktur (z. B. Teilnehmeranschlussleitung, Leerrohre, Dark-Fiber) und dem Zugang über die aktiven Komponenten (z. B. Bitstromzugang) unterschieden werden.

Im Falle der Teilnehmeranschlussleitung (TAL) wird der physikalische Zugang zur Infrastruktur als Vorleistungsprodukt für den offenen Zugang verstanden. In diesem Fall nutzt ein Anbieter die physikalische Leitung bzw. Verbindung i. a. zwischen Ortsvermittlungsstelle und Endkunden, um seine Dienstleistungen anzubieten. Hierfür kann die kundenbezogene Teilnehmeranschlussleitung bei der Telekom zu festgelegten Bedingungen angemietet werden. Dieses entspricht einem Zugang auf Layer 1 des OSI-Schichtenmodells¹¹. Allerdings ist der physikalische Zugang nicht bei allen Infrastrukturen und Übertragungstechnologien möglich. Bei Kabel-TV-Netzen existieren keine einzelnen Teilnehmeranschlussleitungen oder bei der DSL-Vectoring-Systemen müssen alle TAL eines KVZ in der Hand eines Netzbetreibers sein, damit das Vectoring-System funktioniert.

Im Falle des Bitstromzugangs wird der offene Zugang dagegen als logischer Zugang zu einer Transportdienstleistung des Infrastrukturbetreibers verstanden und auch als solcher realisiert. Dies bedeutet, dass ein Dienstanbieter diesen Netzabschnitt häufig nicht direkt in seine Infrastruktur und in sein vorhandenes Netzmanagement integrieren kann. Bei Diensten mit hohen Qualitätsanforderungen kann dies sehr schwierig sein oder sogar die Erbringbarkeit der Dienstleistung verhindern. Je nach Art der Schnittstelle wird unter Bezugnahme auf die OSI-Protokollebenen zwischen der Übergabe auf Layer 2 (z. B. ATM/Ethernet) und derjenigen Übergabe auf Layer 3 (z. B. IP) unterschieden.

In Abhängigkeit vom Verkehrsübergabepunkt können daher verschiedene Bitstromprodukte definiert werden. Wesentlicher Vorteil des Bitstromprodukts auf Layer 2 ist die Verkehrsübergabe auf der Transport- statt auf der Dienstebene. Dadurch hat der

¹¹ Gemäß den OSI-Schichten-Modell (Open System Interconnection); vgl. <http://www.netzwerke.com/OSI-Schichten-Modell.htm>.

Nachfrager eine größere Gestaltungsfreiheit bei den eigenen Endkundenprodukten und erbringt entsprechend auch eine höhere Wertschöpfung.

Es ist daher für die Umsetzung von (zukünftigen) Geschäftsmodellen von besonderer Bedeutung, dass der offene Netzzugang in seiner Umsetzung einheitlich definiert wird. Dazu ist auch zu klären, wie zukünftig der Wettbewerb auf und um die leitungsgebundenen Telekommunikationsinfrastrukturen erfolgen soll. Welche Vision gibt es für die Nutzung und den Zugang zu den zukünftigen FTTH/B-Netzen?

Soll auch zukünftig auf die Weiterführung des Infrastrukturwettbewerbs mit dem physikalischen Zugang zur Infrastruktur als wichtigen Wettbewerbsfaktor gesetzt werden, der auf der einen Seite die Integration fremder Teilstrecken in die eigene Infrastruktur und das Netzmanagement erlaubt, jedoch Infrastrukturen voraussetzt, die einen physikalischen Zugang überhaupt ermöglichen? Bei FTTB/H-Netzen in Punkt zu Punkt Topologie stellt dies kein Problem dar. Bei GPON-Netzen ist dies bereits nicht mehr so einfach.

Der wichtigste Vorteil eines offenen Netzzugangs auf physikalischer Ebene ist die Tatsache, dass jeder Anbieter seine Dienstleistung überall diskriminierungsfrei erbringen kann. Weiterhin können Kosten auf Basis einer einheitlichen und transparenten Kalkulationsgrundlage einfach ermittelt werden. Selbst Spezialdienstleistungen mit besonderen Anforderungen, z. B. einer zeitkritischen Übertragung, können aufgrund der Integrierbarkeit der Fremdinfrasturktur in die eigenen Überwachungs- und Managementfunktionalitäten sicher erbracht werden. Damit können Angebote geschaffen werden, die über den reinen Internetzugang hinaus gehen.

Eine andere Vision beschreibt die bundesweite Telekommunikationsinfrastruktur zukünftig als eine Dienstplattform, die es vielen Anbietern möglichst einfach und kurzfristig erlaubt neue Dienste flächendeckend und kurzfristig anbieten zu können. Hierzu bieten sich insbesondere Netzzugangsvarianten auf Basis der Transportdienstleistung an. Sie sind ortsunabhängig, flexibel und bieten schnelle Umsetzungszeiten, da sie nicht auf den exklusiven Zugriff auf die physikalische Infrastruktur setzen. Allerdings bedarf es dafür einer durchgehenden Infrastruktur, die allen Qualitätsanforderungen gerecht werden kann und damit die Notwendigkeit einer Integration von Fremdinfrasturktur in das eigene Netzmanagement überflüssig macht. Der Wettbewerb erfolgt auf der Diensteebene und nicht mehr auf der Infrastrukturebene.

Es wird deutlich, dass der offene Netzzugang im Hinblick auf den FTTB/H-Ausbau nicht nur eine technologische Spezialfragestellung darstellt. Neben den technologischen Aspekten ergeben sich aus der Frage der Umsetzung auch Fragen und Randbedingungen zu Wirtschaftsmodellen und Wertschöpfungsketten.

Ganz grundsätzlich ist festzuhalten, dass Open-Access eine bessere Auslastung der Infrastruktur und somit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sowie eine Verbreiterung des Dienste-Angebotes zur Stimulierung der Nutzung ermöglicht. Dabei gewährt der Open-Access-Betreiber anderen Unternehmen Zugang zu seinem Glasfasernetz. Dies kann auf allen drei Ebenen der Wertschöpfungskette geschehen – also bei der Infrastruktur, dem Netzbetrieb und dem Angebot von Diensten durch Service-

Provider – und ermöglicht hohe Freiheitsgrade im wirtschaftlichen Handeln und befördert Kooperationen.

Neben der Frage des Zugangs zur Infrastruktur zur Datenübertragung kann der Open Access Begriff noch weiter gefasst werden. In seiner maximalen Form ermöglicht Open Access Unternehmen sich in einer oder mehreren der drei Ebenen der Wertschöpfungskette zu betätigen. Die drei Ebenen der Wertschöpfung sind in der folgenden Übersicht dargestellt.

Wertschöpfungsstufe	Gegenstand der Dienstleistung	Mögliche Akteure
Dienste	Telefonie, Internet, Fernsehen	TK-Unternehmen, Service Provider, Kabelbetreiber
Netzbetrieb	Betrieb der aktiven Komponenten (BRAS, DSLAM, CPE's, etc.)	TK-Unternehmen, Energieversorger, Stadtwerke
Infrastruktur	Bau und Wartung des (Glasfaser-)Netzes (passive Komponenten)	TK-Unternehmen, Energieversorger, Stadtwerke und Beteiligungsgesellschaften

Abbildung 47: Open Access Modell

Demzufolge muss der Netzaufbau nicht notwendigerweise durch ein Telekommunikationsunternehmen erfolgen: Auf der einen Seite können Investoren z. B. aus der Versicherungswirtschaft als Eigner einer derartigen Infrastruktur auftreten, andererseits kommen insbesondere regionale Energieversorger oder Stadtwerke für den Aufbau regionaler Glasfasernetze in Betracht, da sie Erfahrungen mit dem Aufbau und Betrieb von leitungsgebundenen Infrastrukturen sowie Zugang zum Hausanschluss haben. Zudem besitzen sie in der Regel schon passive Infrastrukturen wie Kabelkanäle oder Leerrohre. Kostspielige Tiefbauarbeiten, die bis zu 80 Prozent der Kosten des Netzaufbaus ausmachen, können so reduziert und Synergien beim Netzausbau genutzt werden.

Oft verfügen Regionalversorger und Stadtwerke – zum Teil über eigene Telekommunikationstöchter – auch über das notwendige Wissen, um den Netzbetrieb zu übernehmen. Lokale oder regionale und überregionale Telekommunikationsunternehmen mieten beispielsweise die Infrastruktur von der vorgelagerten Ebene an. Das Dienstangebot selbst von Telefonie über Internet bis hin zu IPTV kann über Telekommunikationsunternehmen, Service Provider oder auch Versorgungsunternehmen erfolgen, die bereits über Kundenbeziehungen verfügen oder neue Kunden erschließen wollen. Aber diese Standarddienste können auch als „White-Label“ Vorprodukte gekauft bzw. als Dienstleistung dazu gekauft werden.

Ein wichtiger Vorteil von Open-Access-Modellen ist, dass sich die beteiligten Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren und – durch Kooperationen – gleichzeitig Kosten teilen können. Zudem wird der Dienstewettbewerb im Sinne des Kunden nachhaltig gestärkt. Open-Access-Modelle sind aber auch aus volkswirtschaftlicher Perspektive wünschenswert, da Kosten auf den einmaligen Netzaufbau reduziert und unnötige Tiefbauarbeiten gespart werden können sowie durch den Wettbewerb auf der

Diensteebene die notwendige Netzauslastung sichergestellt werden könnte. Bei Errichtung eines FTTB-Netzes und dessen Betrieb als Open-Access-Netz entfällt der (sehr teure) Infrastrukturwettbewerb und wird in einen Dienstewettbewerb überführt.

In Deutschland ist die Telekom aufgrund seiner marktbeherrschenden Stellung das einzige regulierte Unternehmen im Festnetzbereich. Die Telekom ist aufgrund der Vorgaben des Telekommunikationsgesetzes (TKG) verpflichtet, Wettbewerbern einen entsprechenden diskriminierungsfreien Zugang zu ihrer Infrastruktur zu gewähren.

Im Rahmen des geförderten Breitbandausbaus müssen nach den Vorgaben der Europäischen Kommission alle Netzbetreiber einer mit öffentlichen Fördergeldern errichteten Breitbandinfrastruktur Wettbewerbern einen offenen Netzzugang gewähren – allerdings ohne, dass dieser einheitlich definiert wäre.

In Anlehnung an Anhang II der neuen Leitlinien der EU für die Anwendung der Vorschriften über staatliche Beihilfen im Zusammenhang mit dem schnellen Breitbandausbau vom 26.01.2013¹² können in Abhängigkeit von der Ausbauart eine Reihe von Zugangsvarianten unterschieden werden. Im Folgenden werden einige Hinweise bzw. Interpretationen zu den verschiedenen geforderten Zugangsvarianten für ausgewählte leitungsgebundene Technologien aufgeführt:

KVz-TAL	Zugang zur Kupferdoppelader an den ca. 330.000 KVz-Standorten der Telekom.
Passive Infrastruktur	Zugang zum MFG-Einbauplatz, zu Kabelkanalkapazitäten und bei Nichtverfügbarkeit zur unbeschalteten Glasfaser zwischen MFG und HVt.
HVt-TAL	Zugang zur Kupferdoppelader an den ca. 9.000 HVt-Standorten der Telekom.
Layer 2-Bitrom	Bitstromzugang an 900 Punkten im Konzentratornetz auf Basis der Ethernet-Technologie.
IP-Bitstrom	Bitstromzugang an 73 Punkten am Gateway des IP-Kernetzes auf Basis der IP-Technologie.

Abbildung 48: Vorleistungsprodukte der Telekom Deutschland.

¹² Amtsblatt der Europäischen Union (2013/C 25/01).

FTTH-/FTTB-Netze:

- entbündelter Zugang zur Glasfaseranschlussleitung, sofern die FTTH-/FTTB-Netze über eine Point-to-Point-Technologie¹³ realisiert werden,
- Bitstromzugang¹⁴ auf Layer 2 oder Layer 3,
- Zugang zur unbeschalteten Glasfaser und Zugang zu in eigenem Eigentum befindlichen Leerrohren, soweit diese sich im Ausbaugbiet befinden oder zur Anbindung des Ausbaugbiets an die zugeordnete, nächstgelegene Betriebsstätte des Netzbetreibers dienen.

FTTC-Netze:

- Zugang zur unbeschalteten Glasfaser zwischen den für das Erschließungsgebiet erforderlichen Straßenverteilerkästen und der zugeordneten, nächstgelegenen Betriebsstätte des Netzbetreibers,
- Zugang zu eigenerstellten bzw. in eigenem Eigentum befindlichen Leerrohren¹⁵, soweit diese sich im Erschließungsgebiet befinden oder zur Anbindung des Erschließungsgebiets an die zugeordnete, nächstgelegene Betriebsstätte des Netzbetreibers dienen.
- Bitstromzugang auf Layer 2 oder Layer 3,
- Zugang zu Straßenverteilerkästen entsprechend der jeweils gültigen Zugangsverpflichtung für marktbeherrschende Unternehmen¹⁶

HFC-Netze:

- Zugang zur unbeschalteten Glasfaser zwischen den für das Erschließungsgebiet erforderlichen Straßenverteilerkästen und der zugeordneten, nächstgelegenen Betriebsstätte des Netzbetreibers,
- Zugang zu in eigenem Eigentum befindlichen Leerrohren, soweit diese sich im Ausbaugbiet befinden oder zur Anbindung des Ausbaugbiets an die zugeordnete, nächstgelegene Betriebsstätte des Netzbetreibers dienen.¹⁷
- Bitstromzugang auf Layer 2 oder Layer 3,

¹³ FTTH/FTTB-Netze werden häufig mit (teilweise) gemeinsam genutzten Glasfasern realisiert, eine Entbündelung einer einzelnen Glasfaseranschlussleitung eines einzelnen Kunden zur Weitervermietung an einen Reseller oder Wettbewerber ist daher in diesem Fall technisch nicht möglich.

¹⁴ Die Leitlinien schreiben lediglich einen (unbestimmten) Bitstromzugang vor, eine restriktivere Auslegung, so dass nicht eindeutig davon auszugehen ist, dieser auf Layer 2 (als Ethernet-Schnittstelle) und gleichzeitig auf Layer 3 (als IP-BSA) zu erfolgen hat. Ein Wahlrecht für die Netzbetreiber schafft Flexibilität und kann auch die Wirtschaftlichkeit erhöhen, weil notwendigen Investitionen in die Zusammenschaltungstechniken unterbleiben können.

¹⁵ Leerrohre analog zur Zugangsverpflichtung für marktbeherrschende Unternehmen, d.h. in Kabelkanal- oder Kabelrohranlagen befindliche ¼ Leerrohre oder ein Vielfaches davon.

¹⁶ Mit dieser Referenz wird u.E. auch das Thema "Vectoring" abschließend geregelt. Maßgeblich für den Einsatz von Vectoring im Rahmen der Förderrichtlinie wird dann die von der BNetzA erlassene Zugangsverpflichtung sein.

¹⁷ Hinweis: Unseres Wissens nach, verfügen die Kabelnetzbetreiber (praktisch) nicht über eigene Leerrohre, sondern nutzen die der Telekom. Diese Verpflichtung läuft daher ins Leere.

- Zugang zu Straßenverteilerkästen¹⁸

Die Vorleistungsprodukte sind auf eine entsprechende Nachfrage eines Wettbewerbers innerhalb einer angemessenen Frist bereitzustellen bzw. zu entwickeln. Bei einer konkreten Zugangsnachfrage zur passiven Infrastruktur liegt die Angebotsfrist bei vier Wochen (entsprechend § 77b Abs. 2 TKG). Bei der erstmaligen Nachfrage nach einem Zugang zur aktiven Infrastruktur (Bitstrom) ist eine Angebotsfrist von drei Monaten angemessen (entsprechend § 22 Abs. 1 TKG). Die tatsächliche erstmalige Bereitstellung wird dann in der Regel noch eine gewisse Zeit für die konkrete technische Verabredung, Interoperabilitätstest und physikalische Bereitstellung erfordern. Jedoch kann sich das verpflichtete Unternehmen nicht auf rein innerbetriebliche Gründe, wie Produktzyklen, berufen:

- Der ausbauende Netzbetreiber muss dann keinen Zugang (mehr) gewähren, wenn bereits alle verfügbaren Kapazitäten (etwa von Leerrohren oder unbeschalteten Glasfaserleitungen) ausgeschöpft sind.
- Der ausbauende Netzbetreiber hat im Rahmen seines Ausbaus für die Versorgung des Erschließungsgebietes die neu zu errichtende Infrastruktur so zu dimensionieren, dass mindestens einen Wettbewerber die Zugangsmöglichkeiten - in diesen neu errichteten Anlagen - gemäß Ziffer 1 gewährt werden können.

Zusätzlich zu den genannten Zugangsvarianten auf Basis der EU-Leitlinien wird die Telekom ihren Konkurrenten ein lokales virtuell entbündeltes Zugangsprodukt (VULA) bei Einsatz der Vectoring-Technologie im HVt-Nahbereich anbieten müssen. Ein solcher Netzzugang ist als Ersatz für den in den Nahbereichen künftig nicht mehr überall verfügbaren Zugriff auf den „blanken Draht“ anzubieten, das in seinen Eigenschaften der entbündelten Teilnehmeranschlussleitung sehr nahekommen muss.¹⁹

In der folgenden Übersicht sind zusammenfassend die wesentlichen Zusammenschaltungs- und Kooperationsformen im Rahmen von Open Access dargestellt.

¹⁸ In den ursprünglichen Hinweisen nicht enthalten, aus Analogiegründen zu FTTC-Netzen und bei Berücksichtigung der Förderrichtlinie aber konsequenterweise hier aufzuerlegen.

¹⁹ Vgl. Erlass Regulierungsverfügung BK3-15-004

		Formen der Kooperation/Nachfrage			
		Per Line	Kontingent	Co-Invest	
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf Zeit ▪ Vermarktungsrisiko liegt beim Anbieter ▪ Margenrisiko (Preis, Laufzeit, Nutzung) liegt beim Wholesale-Nachfrager ▪ Wholesale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf längere Zeit ▪ Vermarktungsrisiko liegt beim Nachfrager ▪ Mindestabnahme je Ausbaugbiet > 10% 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf lange Zeit ▪ Investitionsrisiko aufgeteilt ▪ Verschiedene Formen d. Infrastrukturbeteiligung: <ul style="list-style-type: none"> – SWAP – DTAG-Kooperation – Kapazitätstausch ▪ Hauptinvestor (baut), Co-Investor (zahlt) ▪ Mindestbeteiligung je Ausbaugbiet > 10% 	
Zugangsvarianten OLT zum ...					
Passiv	Leerrohr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zum Haus 	-	-	++
	Unbeleuchtete Faser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zum Haus ▪ Zur Wohnung 	O	+	++
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zur Wohnung 	O	+	++
Farbe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zum Haus ▪ Zur Wohnung 	O	+	++	
Aktiv	Layer 2 BSA am GF-POP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumentransport ▪ Gigabit-Ethernet ▪ Dezentrale Verkehrsübergabe an jedem technisch geeigneten Punkt so nah am Kunden wie möglich 	++	++	++
	Layer 3 BSA am BRAS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protokolltransport ▪ Zentrale Verkehrsübergabe wie DTAG-IP-BSA an max. 72 Punkten 	++	++	O

Abbildung 49: Zugangsvarianten und Kooperationsmodelle (Quelle VATM).

Literaturverzeichnis

- [1] Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes NRW, „Gigabit-Strategie Nordrhein-Westfalen,“ Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes NRW, Düsseldorf, 2016.
- [2] Institut für Breitband- und Medientechnologie - I.BM.T, *Interne Mitteilung*.
- [3] Beuth, Breide, Lüders, Kurz und Hanebuth, Nachrichtentechnik, Würzburg: Vogel Business Media, 2016.
- [4] ITU-T, *ITU-T G.992.x - Sammlung von Standards der DSL-Familie*, ITU-T.
- [5] P. Schnabel, Kommunikationstechnik-Fibel, Books on Demand, 2015.
- [6] International Telecommunication Union - G.992.3, *Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2)*, ITU, 2009.
- [7] International Telecommunication Union, *Asymmetric digital subscriber line transceiver 2 (ADSL2) - Extended bandwidth (ADSL2plus) - G.992.5*, ITU, 2009.
- [8] International Telecommunication Union, *Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2) - G.993.2*, ITU, 2015.
- [9] G. Siegmund, Technik der Netze 1, Berlin: VDE Verlag, 2014.
- [10] A. Bluschke und M. Matthews, xDSL-Fibel: Ein Leitfaden von A wie ADSL bis Z wie ZipDSL, VDE Verlag, 2008.

- [11] International Telecommunication Union, *ITU-T G.993.5 - Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers*, Genf: ITU, 2015.
- [12] P. Schnabel, „Elektronikkompedium - VDSL-Vectoring / ITU-T G.993.5 / G.vector,“ Elektronikkompedium, [Online]. Available: <http://www.elektronikkompedium.de/sites/kom/1804231.htm>. [Zugriff am 06 09 2016].
- [13] Teleste, „Breitbandkabelnetze in Deutschland - Gestern - Heute - Morgen“.
- [14] CableLabs, „CableLabs - Specifications Library DOCSIS 3.1,“ CableLabs, 2016. [Online]. Available: <http://www.cablelabs.com/specs/specification-search/?cat=docsis&scat=docsis-3-1>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [15] CableLabs, „CableLabs DOCSIS 4.0,“ CableLabs, [Online]. Available: <https://www.cablelabs.com/technologies/docsis-4-0-technology>. [Zugriff am 21 11 2022].
- [16] X. Ye und N. Hering, „DOCSIS 4.0 – echte Alternative zu Glasfaser?,“ Rödl & Partner, 13 10 2022. [Online]. Available: <https://www.roedl.de/themen/kompass-telekommunikation/2022/10/docsis-vier-null-alternative-zu-glasfaser>. [Zugriff am 21 11 2022].
- [17] Kabel Deutschland - Schaaf, *Kabelfernsehn war gestern – Wandel einer Infrastruktur*, Kabel Deutschland, 2012.
- [18] W. Sterlter, *Lichtwellenleiter in Theorie und Praxis - Seminarreihe Lichtwellenleiter an der FH Südwestfalen*, Oldenburg/Meschede: Stelter, 2016.
- [19] International Telecommunication Union, „ITU G984.1 - Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,“ ITU, Genf, 2008.
- [20] IEEE, „802.3ah-2004 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical

Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Sub,“ IEEE, 2005.

- [21] P. Schnabel, „Elektronikkompodium - GPON,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1403181.htm>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [22] P. Schnabel, „Elektronikkompodium - PtP-Ethernet (IEEE 802.3ah),“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1507281.htm>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [23] C. Lüders, Lokale Funknetze: Wireless LANs (IEEE 802.11), Bluetooth, DECT, Vogel Business Media, 2007.
- [24] P. Schnabel, „Elektronikkompodium - Funktechnik,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0810301.htm>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [25] Steute Schaltgeräte GmbH, Das Funkbuch – Evolution und Kommunikation, Löhne: Steute Schaltgeräte GmbH.
- [26] C. Lüders, Mobilfunksysteme, Vogel Business Media, 2001.
- [27] S. Steiner, „Struktur eines GSM-Netzes,“ [Online]. Available: <http://steinerstefan.net/index.php?page=358>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [28] Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur - Frequenzplan,“ 2016. [Online]. Available: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Grundlagen/Frequenzplan/frequenzplan-node.html. [Zugriff am 12 10 2016].

- [29] Teltarif, „Mobilfunkfrequenzen der Netzbetreiber im Überblick,“ Teltarif, [Online]. Available: <http://www.teltarif.de/frequenzen-mobilfunk-netzbetreiber-vergleich-ab-2017/news/60099.html>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [30] Bundesnetzagentur, „Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2014/2015,“ Bundesnetzagentur, Bonn, 2016.
- [31] C. Lüders, *Sminarreihe Funksysteme an der FH Südwestfalen*, Meschede: Lüders, 2016.
- [32] P. Schnabel, „Elektronikkompodium - IEEE 802.11 / WLAN-Grundlagen,“ [Online]. Available: <http://www.elektronikkompodium.de/sites/net/0610051.htm>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [33] Fachagentur Windenergie an Land, „Fachagentur Windenergie an Land - Richtfunk,“ [Online]. Available: <http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Radar/Richtfunk.web.png>. [Zugriff am 12 10 2016].
- [34] Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur: Richtfunk - Frequenzen für Richtfunkanwendungen,“ [Online]. Available: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Firmennetze/Richtfunk/richtfunk-node.html. [Zugriff am 12 10 2016].
- [35] Eutelsat, „Eutelsat.com,“ [Online]. Available: <https://www.eutelsat.com/de/home.html>. [Zugriff am 04 2021].
- [36] Satellite Signals Ltd., „Satellite Signals,“ [Online]. Available: https://www.satsig.net/vsat_top.htm. [Zugriff am 11 2022].

- [37] WE Konnect, „We Konnect,“ [Online]. Available: <https://europe.konnect.com/de-DE>. [Zugriff am 11 2022].
- [38] Wikipedia, „Wikipedia,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Iridium>. [Zugriff am 04 2021].
- [39] W. Sterlter, *Seminarreihe Lichtwellenleiter an der FH Südwestfalen*, Oldenburg/Meschede: Stelter, 2016.
- [40] P. Schnabel, „Elektronikkompodium - DSL - Digital Subscriber Line,“ Elektronikkompodium, [Online]. Available: <http://www.elektronikkompodium.de/sites/kom/0305232.htm>. [Zugriff am 06 09 2016].
- [41] CableLabs, *DOCSIS 4.0 Physical Layer Specification - Version 102*, CableLabs, 2020.

Herausgeber:

Kompetenzzentrum Gigabit.NRW
Postfach 10 54 44
40045 Düsseldorf
<http://gigabit.nrw.de/>

Das Kompetenzzentrum Gigabit.NRW ist Auftragnehmer des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Aufgabe und Ziel des Kompetenzzentrums Gigabit.NRW ist es, den Ausbau von zukunftsfähigen Breitbandnetzen in NRW nachhaltig voranzubringen. Das Kompetenzzentrum Gigabit.NRW soll dabei unterstützen, die Breitbandziele des Landes durch Vernetzung, Wissenstransfer sowie Informations- und Kommunikationsmaßnahmen zu erreichen.

Dieses Dokument ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Kompetenzzentrums Gigabit.NRW und wird vorbehaltlich aller Rechte ohne die Erhebung von Kosten abgegeben und ist nicht für den Verkauf bestimmt. Vervielfältigungen, Mikroverfilmung, die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Medien sind ohne Zustimmung des Herausgebers nicht gestattet.

Die Inhalte dieser Publikation sind zur grundlegenden Information für die am Thema „-“ Interessierte gedacht. Sie entsprechen dem Kenntnisstand der Autoren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung und haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Meinungsbeiträge geben die Auffassung einzelner Autoren bzw. Interviewter wieder. In den Grafiken kann es zu Rundungsdifferenzen kommen.

Bezugsquelle:

Kompetenzzentrum Gigabit.NRW
Postfach 10 54 44, 40045 Düsseldorf
Telefon: +49 211/981-2345
Email: info@gigabitnrw.de
Internet: <http://gigabit.nrw.de/>
Im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes NRW

Redaktion:

Kompetenzzentrum Gigabit.NRW

Stand: 31. Januar 2023, Auflage 2

Gestaltung: Kompetenzzentrum Gigabit.NRW