



Handreichung – Die Gigabit-Fähigkeit der Breitbandtechnologien

Stand 28.05.2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1. Einführung	3
2. xDSL	4
2.1 Physikalische Infrastruktur	4
2.2 Topologie/Netzstruktur	6
2.3 Übertragungstechnologie	8
3. DOCIS	12
3.1 Physikalische Infrastruktur	12
3.2 Topologie	14
3.3 Übertragungstechnologie	17
4. Besonderheiten im Bereich des Kabelnetzes	20
5. Glasfaseranschluss	22
5.1 Physikalische Infrastruktur	22
5.2 Topologie	23
5.3 Übertragungstechnologien	24
6. Gigabitfähigkeit	25
7. Überbuchung	26
8. Literaturverzeichnis	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typischer Ausbau des Telefonnetzes von der Netz- bis zur Kundenseite	5
Abbildung 2: Exemplarischer Aufbau eines Kupferzweidrahtkabels, wie es im Telefonnetz Verwendung findet	6
Abbildung 3: Ausbau eines Telefonie kompatiblen DSL-Systems.....	8
Abbildung 4: Aufteilung des Frequenzspektrums für analoge Telefonie, ISDN und DSL Übertragung	8
Abbildung 5: Aufbau eines DSL-System ohne analoge Telefonie und ISDN bei Einsatz von VoIP	9
Abbildung 6: Aufteilung der DSL-Spektrums ohne analoge Telefonie und ISDN.....	9
Abbildung 7: Beispielhafter Vergleich der Reichweite und Datenrate einer DSL-Technologie bei verschiedener Aderdurchmessern	10
Abbildung 8: Ein typisches Kabelnetz, das die Haushalte mit Fernsehen und über Kabelmodems mit Internetdiensten versorgt, [14]	13
Abbildung 9: Überblick über die ursprünglichen Netzebenen eines Kabel-TV-Netzes (Netzebene 3 veräußert und in privater Hand, Netzebene 4 Hausverteilung)	14
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Netzebene 3.....	15
Abbildung 11: Erweiterung der Netzebene 3 durch eine Glasfasertechnik zu einem HFC-Netz. 16	
Abbildung 12: Segmentierung des CATV-Netzes und Zuführung zu den optical nodes (Fibre Nodes)	17
Abbildung 13: Ursprüngliche Belegung des Kabel-TV's (Anm.: Daten in Rückrichtung nur für betriebliche Zwecke)	18
Abbildung 14: Mögliche Aufteilung des Frequenzspektrums zur Datenkommunikation.....	18
Abbildung 15: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften von DOCSIS 3.0 und DOCSIS 3.1. Werte in Klammern sind künftige Erweiterungen, [14].....	19
Abbildung 16: Point to Multipoint mit optischem Splitter/Glasfaserverzweiger	23
Abbildung 17: Kurzer Überblick über verschiedene Glasfaserübertragungstechnologien, [23]...24	
Abbildung 18: Exemplarische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Anzahl Kunden, gebuchter Bandbreite, Anbindung des DSLAM und nutzbarer Datenrate	27

1. Einführung

Die Weiterentwicklung der breitbandigen Übertragungstechnologien sowie der Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur sind in den letzten Jahren immer weiter vorangeschritten. Der positive Effekt: die Versorgung von Unternehmen und Bevölkerung hat sich deutlich verbessert. Ein negativer Effekt ist jedoch der entstandene „Urwald“ an Technologien und Abkürzungen. Diese Handreichung soll helfen, dieses „Dickicht“ zu lichten.

Dabei gilt zu beachten, dass im umgangssprachlichen Gebrauch Teilaspekte und Technologien häufig synonym für komplexe Gesamtsysteme genutzt werden. Dieses vereinfacht natürlich die Sprache, erschwert jedoch das Verständnis über die Möglichkeiten und die Einschränkungen, die in einem Gesamtsystem entstehen können. Die gängigen Gesamtsysteme insbesondere für den Bereich des Zugangnetzes sollen daher diesbezüglich genauer betrachtet werden.

Zunächst können telekommunikationstechnische Gesamtsysteme anhand von drei Fragestellungen unterteilt werden:

1. Physikalische Infrastruktur – welches physikalische Medium wird für dieses Netz verwendet?
2. Topologie – wie erfolgt der Teilnehmeranschluss strukturell?
3. Übertragungstechnologie – welche Technologie wird zur Datenübertragung eingesetzt?

Unter der physikalischen Infrastruktur versteht man die für die Übertragung genutzten physischen Bauelemente und Leitungen, die teilweise neu errichtet werden, ggf. aber schon seit vielen Jahrzehnten vorhanden sind.

Die Netz-Topologie gibt an, in welcher Art von „Verschaltung“ (Bus, Ring, Stern etc.) die einzelnen Netzelemente über Leitungen miteinander und zum Endkunden hin verbunden sind.

Die Übertragungstechnologie beschreibt den logischen und physikalischen Signaltransport und die Signalverarbeitung über die physikalische Infrastruktur. Hierbei handelt es sich um standardisierte Verfahren, die von den Netzbetreibern aufgrund der einzusetzenden physischen Elemente und der Unternehmensstrategie ausgewählt und eingesetzt werden. Häufig erfolgt die Umsetzung der Standards dabei nur in leistungsreduzierten Varianten, was zum einen durch betriebliche oder technische Gründe andererseits aber auch durch ordnungspolitische Randbedingungen bedingt sein kann. Zudem werden im europäischen Raum andere Varianten derselben Standards eingesetzt, wie sie in Asien oder Amerika Verwendung finden.

Nachfolgend werden heute gängigen Synonyme der Zugangstechnik beschrieben und die wesentlichen Unterschiede herausgearbeitet.

2. xDSL

DSL (Digital Subscriber Line) beschreibt eine sehr umfangreiche Familie von Übertragungstechnologien auf dem Kupferzweidraht-Netz (Telefonnetz). Es kommt auf der letzten Meile zum Einsatz und wird im Zweidrahtnetz als Teilnehmer-Anschluss-Leitung (TAL) bezeichnet. Es verbindet ein Kundenmodem (Teilnehmerseite) mit einem DSLAM (DSL Access Multiplexer, Netzseite) über eine dedizierte, d.h. durchgängige Zweidrahtleitung.

- Physikalische Infrastruktur: Kupferzweidraht-Netz/Telefonnetz
- Topologie: Punkt zu Punkt (DSLAM der Netzseite zum Modem beim Kunden)
- Übertragungstechnologie: DSL

2.1 Physikalische Infrastruktur

Die ersten öffentlichen Telefonnetze entstanden in Deutschland ab ca. 1881 [1]. In den folgenden Jahren wurden die Telefonnetze weiter ausgebaut und mit neuen technischen Komponenten versehen. Bereits 1930 gab es in Deutschland rund 3,2 Mio. Telefonanschlüsse. Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges, in dem der Netzausbau und die private Telefonie nahezu zum Erliegen kamen, wurde der Ausbau ab Mitte der 1950er Jahre massiv vorangetrieben. Heute besteht das Telefonnetz daher aus Teilsegmenten, die aus teils deutlich unterschiedlichen Baujahren stammen.

Technisch basiert das Telefonnetz auf der Kupferdoppelader, die elektromagnetische Signale theoretisch in einem Frequenzbereich bis zu einigen Gigahertz übertragen kann, [2]. Dabei handelt es sich um zwei Kupferadern als Hin- und Rückleiter. Der Aderquerschnitt eines einzelnen Leiters variiert zwischen 0,35 mm und 0,8 mm [2], [3] und war dabei insbesondere vom Einsatzzweck des jeweiligen Kabelsegments abhängig. Üblicherweise nimmt der Ader-Querschnitt in Richtung zum Kunden zu, da weniger einzelne Leitungen in einem Kabel geführt werden müssen. Abbildung 1 zeigt einen typischen Aufbau von der Netz- (links) bis zur Kundenseite (rechts).

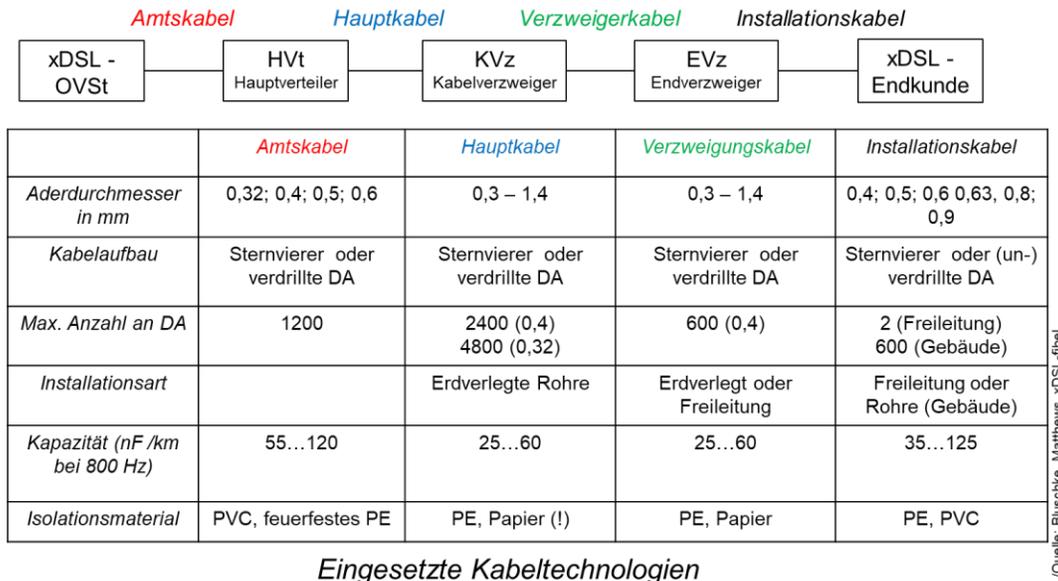


Abbildung 1: Typischer Ausbau des Telefonnetzes von der Netz- bis zur Kundenseite

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, gibt es über die gesamte Bau- und Betriebszeit von mehr als 100 Jahren keine vollständig einheitliche Richtlinie bzgl. des verbauten Ader-Querschnitts. Daher besteht das Netz heute aus Abschnitten mit sehr unterschiedlichen Ader-Querschnitten. Dies ist im Betrieb problematisch, da an Übergängen (Muffen) zwischen zwei unterschiedlichen Kabeln vermehrt Störungen (Reflektionen) auftreten können, die die Signalübertragung negativ beeinflussen. Auch ändern sich weitere physikalische Leitungseigenschaften bei unterschiedlichen Ader-Querschnitten. Hier sei beispielhaft auf den *Widerstandsbelag* R' , also den Leitungswiderstand pro Meter verwiesen. Dieser steigt mit abnehmenden Ader-Querschnitt und führt dann zu höheren Verlusten bei gleicher Leitungslänge.

Generell kann festgehalten werden: Je mehr Adern ein Kabel umfasst, desto geringer ist der Querschnitt der einzelnen Ader (um Gewicht zu sparen) und umso schlechter sind die übertragungstechnischen Eigenschaften für die DSL-Übertragung.

Die einzelnen Doppeladern werden konstruktiv zu Kabeln zusammengefasst. Dabei bilden z.B.:

- 2 Doppeladern einen Vierer
- 5 Vierer bilden ein Grundbündel
- 5/10 Grundbündel bilden ein Hauptbündel

Ein oder mehrere Grundbündel bzw. ein oder mehrere Hauptbündel bilden die Kabelseele, welche mit einem Mantel je nach Anforderung (z.B. Erdkabel oder Luftkabel) umfasst wird (vgl. Abbildung 2). Auf diese Weise entstehen Kabel mit bis zu 4800 Doppeladern, [2].

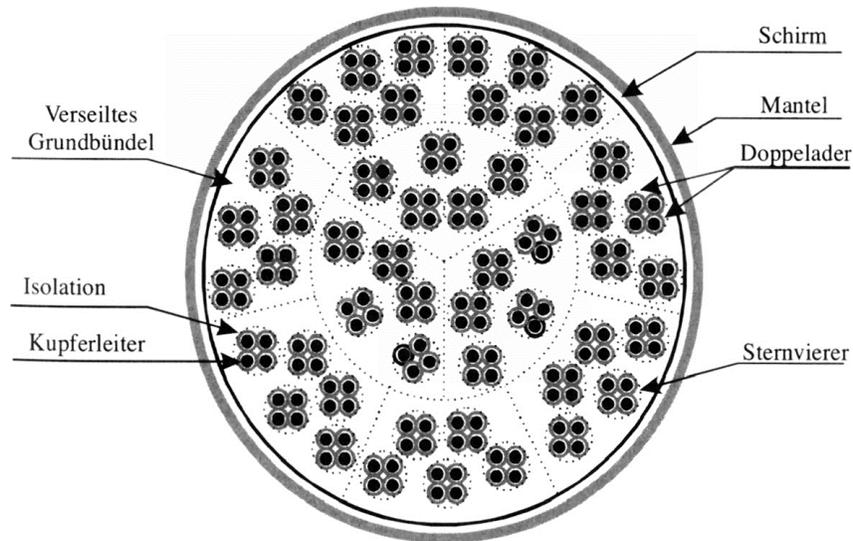


Abbildung 2: Exemplarischer Aufbau eines Kupferzweidrahtkabels, wie es im Telefonnetz Verwendung findet

Durch steigende Anforderungen wurden diese Kupferdoppeladern in höheren Netzsegmenten (siehe Topologie / Netzstruktur) – dem Kernnetz – durch neuartige Kabeltypen (z.B. Glasfaserkabel) ersetzt. In vielen Ortsnetzen bildet die Kupferdoppelader jedoch bis heute die wichtigste physikalische Infrastruktur.

2.2 Topologie/Netzstruktur

Das Telefonnetz wurde für die Ver- und Übermittlung von analogen Telefongesprächen konzipiert und optimiert. Dabei sind die Anschlüsse eines bestimmten Bereichs in sogenannten Ortsnetzen zusammengefasst. Bei größeren Städten, kann nochmals eine Unterteilung der Ortsnetze in einzelne Anschlussbereiche erfolgen. In den Ortsnetzen bzw. Anschlussbereichen ist jeder Teilnehmer über mindestens eine Kupferdoppelader direkt mit einer Vermittlungsstelle (Ortsvermittlungsstelle – OVSt – oder Teilnehmervermittlungs-Stelle – TVSt) verbunden. Die OVSt / TVSt sind wiederum an Fernverkehrsvermittlungs-Stellen (FVSt) angeschlossen.

Besteht im Bereich der Ortsnetze noch jeweils eine dedizierte Kabelverbindung zwischen Teilnehmer und Vermittlungsstelle, so wird die Anzahl der Kabelverbindungen zwischen den OVStn / TVStn und den FVStn sowie zwischen den FVStn soweit reduziert, dass die aus der Verkehrstheorie ermittelte statistische Nachfrage bedient werden kann: Planerisch erfolgte zunächst von Ebene zu Ebene eine Verringerung der Leitungszahl ungefähr um den Faktor 10, d.h. eine OVSt mit 1000 Teilnehmern wurde mit 100 Leitungen an das Fernnetz angebunden. Der Konzentrationsfaktor beträgt somit 0,1. Dieser Faktor wurde dann im Laufe der Zeit auf Basis der Verkehrststatistik (bzw. der Erfahrungswerte der Netzbetreiber) angepasst: Waren in diesem Ortsnetz häufige Netzblockierungen zu verzeichnen, d.h. dass Teilnehmer nicht in das Fernnetz telefonieren konnten, so wurden weitere Leitungen gebaut bzw. geschaltet, [2], [3].

Im Laufe der Weiterentwicklung wurden die Verbindungen oberhalb der OVStn / TVStn durch andere Leitungs- und Übertragungssysteme ersetzt. Heute sind hier hauptsächlich Glasfaserver-

bindungen und –übertragungstechniken zu finden, [3]. Ferner erfolgte eine weitgehend vollständige Vermaschung der Vermittlungsstellen der verschiedenen Ebenen untereinander, so dass mehr (alternative) Wege für den Fernverkehr bereitstanden. Eine weitere wesentliche Änderung war die Trennung von Zeichengabe (Wählinformation) und Signalweg (Sprachsignal). Damit erfolgt nach dem Wählprozess eine Durchschaltung über beliebige der vorhandenen Übertragungswege, d.h. auch bei Wahl derselben Telefonnummer kann der physikalische Weg der Signale im Netz – je nach Verfügbarkeit – verschieden verlaufen. Insbesondere diese Wahlfreiheit des Weges hat dazu geführt, dass heute im Fernnetz kaum Blockierungen auftreten. Es war ferner die Grundlage zur Einführung der Flatrate-Tarife bereits im ISDN-System, [2], [3].

Der topologische Aufbau der Ortsnetze ist im Wesentlichen bis heute gleichgeblieben. Ausgehend von den Vermittlungsstellen werden die TAE-Dosen (TAE – Telekommunikations-Anschluss-Einheit) der Teilnehmer mittels Kupferdoppeladern angebunden. Zwischen VSt und TAE liegen weitere Netzelemente, [3]:

- Hauptverteiler (HVT)
- Kabelverzweiger (KVz)
- Endverzweiger (EVz)

Die Verkabelung folgt dabei einem hierarchischen Ordnungsprinzip, wie im Bild 1 dargestellt, [2], [3]:

- Hauptkabel: zwischen HVT und KVz: Ein Hauptkabel ist heute durchschnittlich 1,7 km lang und umfasst 150 bis 4.800 Doppeladern (durchschnittlich 400 Doppeladern)
- Verzweigerkabel: zwischen KVz und EVz: Ein Verzweigerkabel ist heute durchschnittlich 300 m lang und umfasst 6 bis 600 Doppeladern (durchschnittlich 36 Doppeladern)
- Endleitung: zwischen EVz und TAE: Eine Endleitung bzw. ein Installationskabel ist i.a. nur noch einige Meter lang und umfasst wenige Doppeladern, die in der TAE beim Endkunden enden.

Zwischen dem HVT und TAE besteht also eine eindeutige Punkt-zu-Punktverbindung ohne weitere Teilnehmer, d.h. diese Verbindung wird mit keinem anderen Teilnehmer geteilt.

Bei der Einführung von ISDN wurden insbesondere die Vermittlungstechnik und die Übertragungstechnologie geändert. Die Ortsnetze blieben von Ihrer physikalischen Infrastruktur weitgehend unberührt. Aufgrund der Reduzierung der zulässigen Leitungslänge auf ca. 6 km mussten allerdings teilweise Anschlüsse zu anderen VStn umgelegt werden. Insgesamt erfolgte daher mit der Einführung des ISDN aus wirtschaftlichen Gründen auch eine „Bereinigung“ von sehr kleinen Ortsvermittlungsstellen, die z.B. in Dörfern des ländlichen Raums nur wenige Kunden versorgten. Die Flächendeckung und der Endausbau des ISDN-Systems waren ca. 1998 erreicht.

2.3 Übertragungstechnologie

DSL (Digital Subscriber Line – zu Deutsch: digitale Teilnehmeranschlussleitung) ist eine Übertragungstechnologie zur breitbandigen Übertragung von Datendiensten auf Basis eines Kupferzweidraht-Netzes (Telefonnetz). Es sind heute eine Reihe von DSL-Varianten vorhanden, die im Laufe der Zeit immer leistungsfähiger wurden. Grundsätzlich handelt es sich um eine Übertragungstechnologie, die - ohne den Telefonverkehr zu stören - zusätzlich auf der Teilnehmeranschlussleitung (TAL) des Telefonnetzes eingesetzt werden kann (vgl. Abbildung 3). Dabei wird der bisher nicht genutzte Frequenzbereich oberhalb der von Analog- und ISDN-Telefonie verwendeten Frequenzen genutzt (vgl. Abbildung 4), [2], [3]. Nach Abschaltung des ISDN-Dienstes werden nur noch Datendienste angeboten, in denen die Telefonie mittels VoIP (Voice over IP) realisiert wird (vgl. Abbildung 5). Wenn auf einer Leitung zum Endkunden keine analoge oder ISDN-Telefonie mehr angeboten bzw. benötigt werden, können auch die unteren Frequenzbereiche für die DSL-Technik benutzt werden (vgl. Abbildung 6).

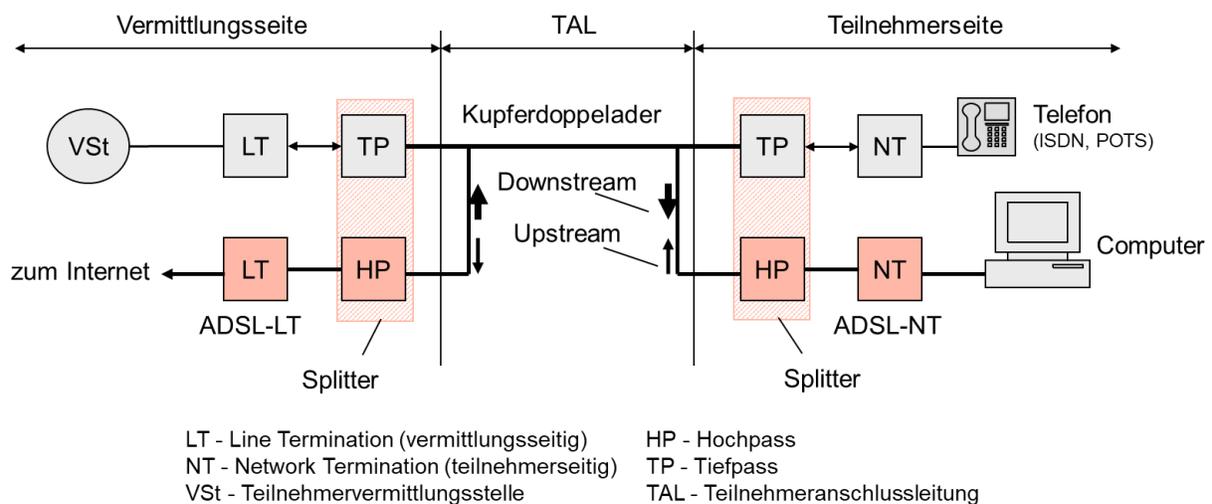


Abbildung 3: Aufbau eines Telefonie kompatiblen DSL-Systems

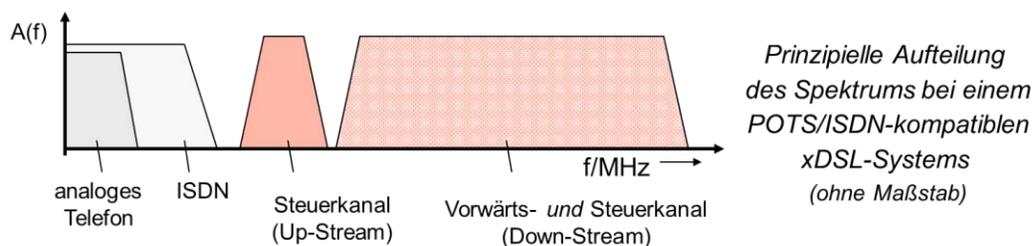


Abbildung 4: Aufteilung des Frequenzspektrums für analoge Telefonie, ISDN und DSL Übertragung

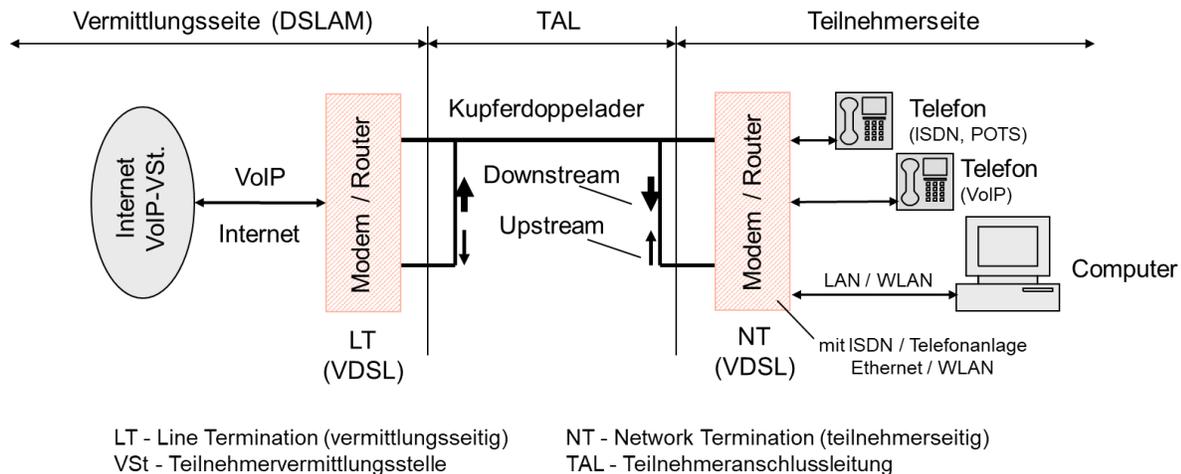


Abbildung 5: Aufbau eines DSL-System ohne analoge Telefonie und ISDN bei Einsatz von VoIP

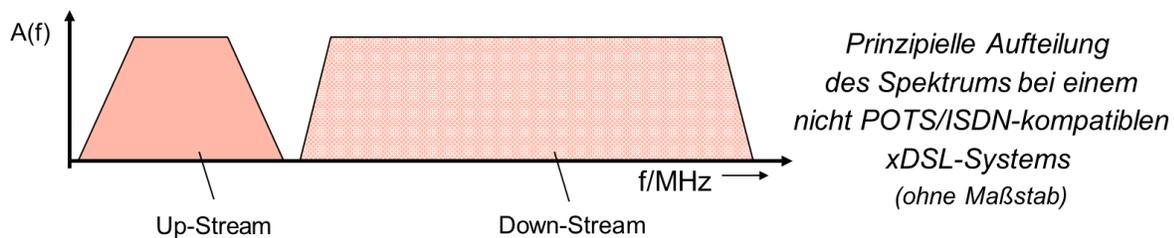


Abbildung 6: Aufteilung der DSL-Spektrums ohne analoge Telefonie und ISDN

Es ist natürlich wirtschaftlich vorteilhaft, ein bestehendes, flächendeckendes Netz für die Nutzung neuer Dienste zu verwenden. Allerdings war das Telefonnetz in seinen Ursprüngen für eine Nutzung im Frequenzbereich bis zu wenigen Kilohertz ausgelegt. Da die übertragene Datenrate proportional zur genutzten Frequenzbandbreite ist, benötigen die DSL-Verfahren Frequenzbandbreiten im zweistelligen Megahertz-Bereich. Hierauf ist das Kupferzweidraht-Netz weder ausgelegt noch optimiert. So waren die im Laufe der Zeit verlegten Aderquerschnitte häufig zu gering, denn für die Übertragung von DSL ist ein Ader-Querschnitt von min. 0,5 mm notwendig.

Mit steigender Signalfrequenz steigt bei gleicher Leitungslänge die Signaldämpfung. Daher konnten bei Einführung der ersten DSL-Verfahren in Deutschland 1999 unter dem Namen „T-ADSL“ [4] nicht alle Telefonanschlüsse mit DSL erreicht werden, wenn die verbaute Kabellänge schlicht zu groß war für die Übertragung der hochfrequenten DSL-Signale. Selbst wenn die Leitungslänge kurz genug für die grundsätzliche Übertragung der DSL-Dienste ist, tritt für alle Anschlüsse die bekannte Abhängigkeit der realisierten Datenrate bezogen auf die Kabellänge bis zum Teilnehmer auf, vgl. Abbildung 7.

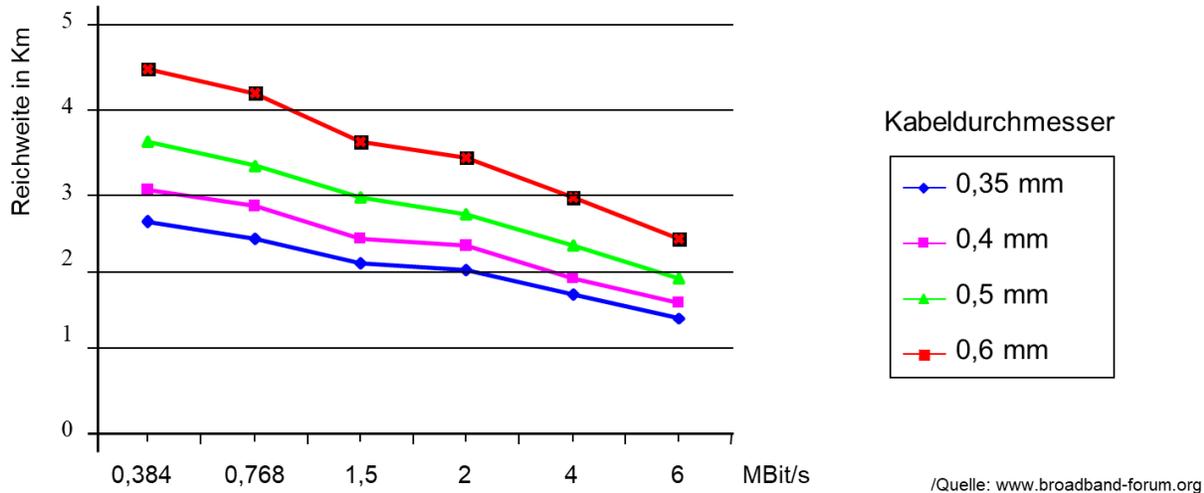


Abbildung 7: Beispielhafter Vergleich der Reichweite und Datenrate einer DSL-Technologie bei verschiedener Aderdurchmessern

Die Weiterentwicklung der DSL-Übertragungstechnologie hatte daher sowohl die Erhöhung der Datenrate als auch die Erhöhung der Signalreichweite zum Ziel. Mit der Entwicklung von ADSL2+ Extended Reach wurde eine entsprechend Reichweiten-gesteigerte Spezifikation geschaffen. Allerdings funktionierte diese Variante lediglich zusammen mit der analogen Telefonie und nicht mit ISDN (ITU-T G.992.3 Annex L), [5] und wurde daher in Europa kaum eingesetzt.

Die Erhöhung der Datenrate wurde mit jedem neuen DSL-Standard weiter vorangetrieben. Mit Einführung von VDSL (Very High Speed DSL) und VDSL2 ist eine Datenrate in der Übertragungstechnologie bis 400 Mbit/s im Downstream spezifiziert. Eine Voraussetzung für die Erhöhung der Datenrate ist dabei die Erhöhung der Frequenzbandbreite. So wurde die Bandbreite von knapp 1 MHz bei ADSL (ITU-T G.992.1), [6], auf über 35 MHz bei VDSL2 im Profil 35b (ITU-T G.993.2 Annex Q), [7], erhöht. Wie oben bereits beschrieben, steigt mit dieser Datenratenerhöhung durch Vergrößerung der Frequenzbandbreite auch die Signaldämpfung. Die Erhöhung der Datenrate wurde daher mit einer erheblichen Verringerung der Signalreichweite erkaufte.

Um dennoch möglichst viele Kunden mit einem DSL-Produkt zu erreichen, musste die mit DSL zu überbrückende Leitungslänge verringert werden. Dazu verlegte man den DSL Access Multiplexer (DSLAM) von den HVTs der Vermittlungsstelle in die KVz – es entstanden die überbauten Kabelverzweiger (Outdoor-DSLAMs). Die Kabelinfrastruktur der Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) blieb dabei erhalten, jedoch musste nun nur noch das Teilstück der Verzweiger- und Endkabel mit dem DSL-Signal überbrückt werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass zwar zwischen DSLAM und Kundenmodem nach wie vor eine dedizierte Leitung besteht, die verfügbare Datenrate steht dem Kunden aber nur auf diesem Netzabschnitt allein zur Verfügung. Die Anbindung des DSLAMs wird von allen Teilnehmern, die an diesen DSLAM angeschlossen sind, gemeinsam genutzt: An diesem Punkt erfolgt eine Verkehrskonzentration. Umgangssprachlich ausgedrückt: „Ein zur Verfügung stehendes Mbit/s wird nicht an einen, sondern an mehrere Kunden verkauft.“ Diese Verkehrskonzentration wird auch Überbuchung genannt. Wie stark die Überbuchung ausfällt, liegt in der Entscheidung des jeweiligen Netzbetreibers, die überwiegend auf Basis betriebswirtschaftlicher Überlegungen getroffen wird.

Sie hat natürlich in Abhängigkeit von der Nutzungsintensität direkten Einfluss auf die Datenrate des Kunden, wenn der gesamte Übertragungsweg und nicht nur die reine DSL-Verbindung betrachtet wird.

Dies gilt für alle Verkehrskonzentrationen, egal an welchem Ort sie erfolgt – am Outdoor-DSLAM, im HVT oder im KVz oder weiter vorgelagert im Kernnetz.

Bei den VDSL2-Profilen mit hohen Frequenzbandbreiten kommen weitere Probleme aufgrund der physikalischen Bauart des Netzes hinzu, die zusätzliche Maßnahmen zur sicheren Signalübertragung notwendig machen. In den verwendeten Kabeln sind stets mehrere Doppeladern verbaut. Da die Adern der Kabel jedoch nicht einzeln geschirmt sind, stören sich die Doppeladern mit hochfrequenten VDSL2-Signalen gegenseitig. Dieser Effekt wird Übersprechen genannt und beeinflusst die Übertragung negativ. Durch zu starkes Übersprechen kann die Signalqualität soweit beeinträchtigt werden, dass eine Datenübertragung völlig unmöglich wird. Eine Möglichkeit das Übersprechen zu verringern, ist die Vergrößerung des Abstands zwischen den Doppeladern. In einem Kabel bedeutet dies, dass nur bestimmte Doppeladern für eine entsprechende VDSL2-Übertragung in Frage kämen. Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch auch, dass einige Teilnehmer, die über das entsprechende Kabel angebunden sind, keinen VDSL2-Anschluss bekommen könnten. Dies stellte keine zufriedenstellende Lösung dar.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Vorverzerrung der Signale dar, so dass das *vorverzerrte Signal in Wechselwirkung mit der Störung auf der Strecke* ein möglichst gutes Originalsignal bilden. Dieser Effekt ist vielen Menschen von sogenannten Noise-Cancelling-Kopfhörern bekannt. Hierbei werden Umgebungsgeräusche mit Hilfe eines gegenphasigen Signals ausgelöscht oder zumindest stark reduziert. Dieses Verfahren wird bei VDSL2 als Vectoring oder Super Vectoring bezeichnet, [8].

Eine wesentliche Voraussetzung für Vectoring ist die Kenntnis über die entlang des Signalwegs auftretenden Störungen. Das ist jedoch nur sinnvoll möglich, wenn der mit Vectoring betriebene Kabelabschnitt möglichst nur von einem Netzbetreiber betrieben wird. Dieses führte im Vorfeld der Einführung zu massiver Kritik, da man eine Re-Monopolisierung der Anschlussnetze durch die Telekom fürchtete, [9], [10], [11].

Eine weitere Erhöhung der Datenrate ist theoretisch durch eine weitere Erhöhung der genutzten Frequenzbandbreite, andere Modulationsarten, eine weitere Verringerung der Leitungslänge etc. möglich. Allerdings wäre gerade der letzte Ansatz mit erheblichen Investitionen verbunden. Ob eine weitere Evolutionsstufe von DSL (z.B. G.Fast oder Super G.Fast) und ihr Rollout tatsächlich wesentlich günstiger umzusetzen ist als ein alternativer fibre to the building (FTTB-) Ausbau ausgehend von den mit Glasfaser angebotenen Outdoor-DSLAMs, bleibt fraglich. Aktuell sind weder die Infrastruktur noch die Übertragungstechnik für Datenraten von 1 Gbit/s ausgelegt.

3. DOCIS

DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) beschreibt eine Gruppe von Übertragungstechnologien für die Datenkommunikation über Koaxialkabelnetze („Kabelfernsehnetze“) und kommt auf der letzten Meile zum Einsatz. Dabei verbinden sich mehrere Kundenmodems mit einem CMTS (Cable Modem Termination System) über eine *gemeinsame* Koaxialkabelverbindung.

- Physikalische Infrastruktur: Koaxialkabelnetz / Kabelfernsehnetz / CATV-Netz
- Topologie: Punkt zu Multipunkt / Bus
- Übertragungstechnologie: DOCSIS

3.1 Physikalische Infrastruktur

Die ersten Kabelfernsehnetze wurden Anfang der 1980er Jahre als Verbreitungswege für den Fernseh- und Hörrundfunk gebaut. Mit der Zulassung des privaten Fernsehroundfunks wurden zwingend neue Übertragungskapazitäten gebraucht, da die vorhandenen terrestrischen Ressourcen allein nicht ausreichten und die Satellitenübertragung noch nicht preiswert zur Verfügung stand, [12].

Im Gegensatz zum Telefonnetz, wurden die Kabelfernsehnetze nie flächendeckend in Deutschland ausgebaut. Ein nennenswerter weiterer geografischer Ausbau findet auch nicht mehr statt. Weiterhin wurden die Kabelnetze als regionale Einzelnetze betrieben und bildeten kein mit dem Telefonnetz vergleichbares, zusammenhängendes Gesamtnetz. Trotzdem bildet das Kabel-TV-Netz mit heute ca. 22,4 Mio. erreichbaren Haushalten die zweitgrößte technische Kommunikationsnetzinfrastruktur in Deutschland.

Technisch basiert das Kabelfernsehnetz im teilnehmernahen Bereich auf sogenannten Koaxialleitungen. Diese sind von vorneherein für die breitbandige Signalübertragung über größere Entfernungen ausgelegt worden. In der ursprünglichen Ausbauvariante wurde eine maximale Signalfrequenz von 450 MHz vorgesehen, die nachfolgend auf heute 862 MHz erweitert wurde, [2].

Sämtliche physikalisch passiven Bauteile, wie Kabel, Muffen (Verbindungen), Ver- bzw. Abzweiger oder die aktiven Verstärker sind auf diesen Frequenzbereich ausgelegt. Sämtliche Komponenten vom Fernsehstudio bis zum Übergabepunkt (ÜP) beim Endkunden wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften exakt spezifiziert. Hierzu wurde das gesamte Übertragungssystem in 4 Netzebenen gegliedert (siehe hierzu Kapitel 3.2), [2].

Das Kabelfernsehnetz wurde als Rundfunkverteilstrecknetz – also als ein unidirektionales Netz – geplant und gebaut. Ein Rückkanal war nur für das Netzmanagement und betriebliche Überwachungsaufgaben vorgesehen und wurde durch die ursprünglich verbauten Komponenten, hier sind insbesondere die Verstärker zu nennen, sehr eingeschränkt ermöglicht, [2].

Die in den Kabelfernsehnetzen eingesetzten Verstärker haben eine besondere Bedeutung, denn ohne sie wäre eine Übertragung über lange Leitungswege nicht möglich. Dabei müssen die Ver-

stärker eine einheitliche und möglichst lineare, d.h. ideale Verstärkungskennlinie über den gesamten relevanten Frequenzbereich aufweisen. Dieses im laufenden Betrieb, bei wechselnden Temperaturverhältnissen und über die gesamte Lebensdauer, möglichst konstant zu halten, bedarf eines nicht unerheblichen (konstruktiven) Aufwands. Eine signifikante Erhöhung der Frequenzbandbreite ist daher ohne Austausch sämtlicher betroffenen Verstärker nicht möglich. Ähnliches gilt für Verzweiger und Muffen. Es ist ferner zu beachten, dass alle verbauten Verstärker mit elektrischer Energie zu speisen sind und dieses Netzwerk einen erheblichen betrieblichen Energieverbrauch aufweist.

Für die Realisierung eines Rückkanals sind die ursprünglich verbauten Verstärker im Verteilnetz ungeeignet und eine Signalübertragung in Rückrichtung war nicht vorgesehen. Daher mussten bei Einführung der Datenkommunikation über die Kabelfernsehnetze bzw. bereits mit dem Angebot, darüber Telefoniedienste zu realisieren, alle betroffenen Verstärker einer Region gegen neue, rückkanalfähige Verstärker ausgetauscht werden, [13].

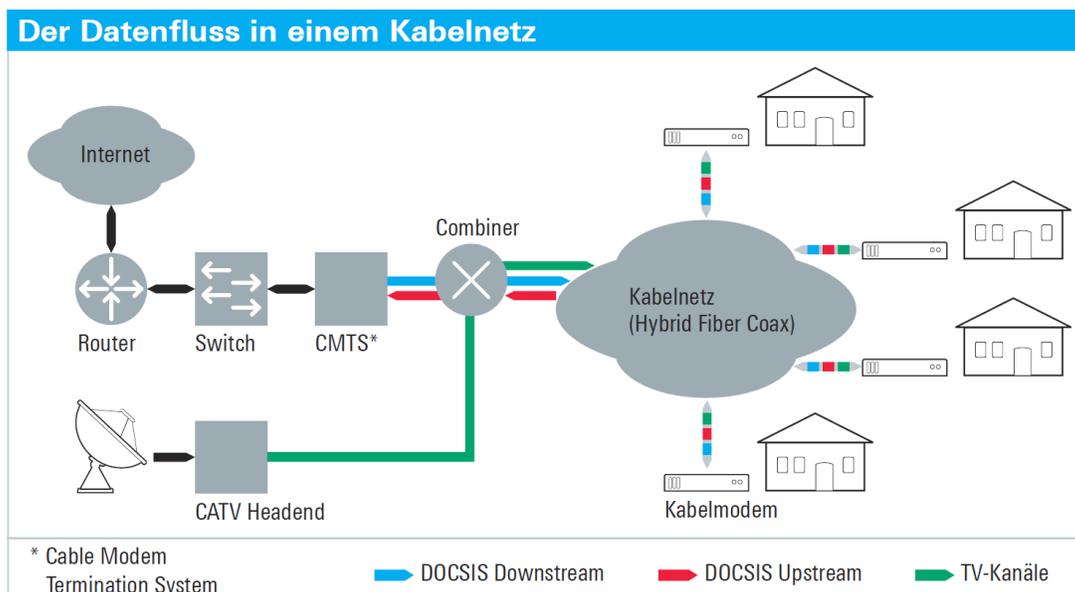


Abbildung 8: Ein typisches Kabelnetz, das die Haushalte mit Fernsehen und über Kabelmodems mit Internetdiensten versorgt, [14]

Neben dem Austausch vorhandener Netzelemente bedurfte die Einrichtung des Rückkanals den Aufbau neuer, zusätzlicher Netzelemente für die Übertragungstechnologie DOCSIS, die von den CableLabs in den USA und Europa standardisiert wurde. Hier sind insbesondere das CMTS (Cable Modem Termination System) zu nennen. Das CMTS bildet die netzseitige Gegenstelle für die Kabelmodems (CM) der Kunden, zwischen denen die Datenkommunikation auf dem Kabelfernsehnetz abgewickelt wird, vgl. Abbildung 8.

3.2 Topologie

Die Kabelfernsehnetze sind in einem Gesamtsystem ausgehend von den Fernsehstudios bis zum Übergabepunkt genau spezifiziert. Im Zuge der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes musste der ursprüngliche Eigner in Deutschland, die Deutsche Bundespost Telekom, das Netz auf Druck der EU-Monopolkommission Mitte der 90er-Jahre veräußern bzw. privatisieren. Dieses bezog sich *nur* auf das Zugangsnetz, d.h. die im Folgenden angegebene Netzebene 3. Wenn heute von „Kabelnetzen“ gesprochen wird, ist in erster Linie die Netzebene 3 gemeint, die inzwischen in der Hand von privaten Anbietern wie z.B. Vodafone ist.

Bei den Netzebenen 1 und 2 handelt es sich um Fernsehstudios und die zentralen Verteilwege. Die Netzebene 4 beginnt hinter dem Übergabepunkt (ÜP) und liegt in der Hand des jeweiligen Gebäudeeigentümers. Dieser kann nach dem Übergabepunkt ein eigenes Netz betreiben, [2]:

- Bei Einfamilienhäusern gibt es i.a. einen Endpunkt, d.h. der Übergabepunkt des Netzbetreibers versorgt einen Haushalt, in dem natürlich mehrere Geräte angeschlossen sein können.
- Bei Mehrfamilienhäusern oder großen Gebäudekomplexen der Wohn- und Gebäudewirtschaft gibt es einen oder nur sehr wenige zentrale Übergabepunkte für sehr viele angeschlossene (Wohn-)Einheiten (teilweise mehr als 10.000 WE). Die in den Gebäuden verlegten Kabel vom Übergabepunkt (ÜP) bis in die einzelnen Wohnungen befinden sich in der Regel im Besitz und der Verantwortung der Gebäudeeigentümer. In diesem Fall haben die Kabelnetzbetreiber kein durchgehendes Netz bis zum eigentlichen Endnutzer und damit auch kein direktes Endkundenvertragsverhältnis. Dieses betrifft in Deutschland mehr als 50 % der Kabel-TV-Nutzer. Hinsichtlich der Bereitstellung von (neuen) Diensten oder im Störfall kann dieses problematisch werden, wenn die Kabelnetzbetreiber auf die Netzebene 4 keinen Einfluss haben, vgl. Abbildung 9.

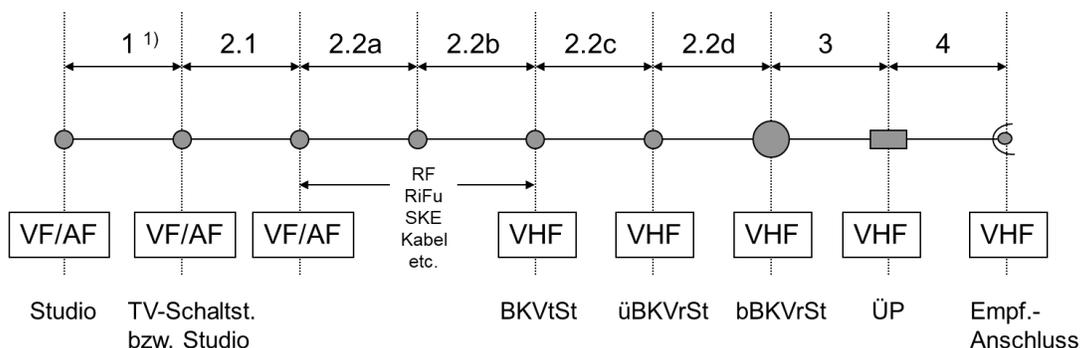


Abbildung 9: Überblick über die ursprünglichen Netzebenen eines Kabel-TV-Netzes (Netzebene 3 veräußert und in privater Hand, Netzebene 4 Hausverteilung)

Wie bereits beschrieben, wurden die Kabelnetze als regionale Einzelnetze geplant, gebaut und betrieben. Die ursprüngliche Struktur sah daher vor, dass das regionale Programmangebot am Übergang zwischen Netzebene 2 und 3, an den sogenannten benutzerseitigen Breitbandkabelverstärkerstellen (bBKVrSt) – häufig auch Kabel-Kopfstationen genannt – abschließend zusammengestellt wurde. Hier wurden die regionalen oder lokalen Content-Angebote eingespeist.

Ausgehend von einer bBKVrSt wurden größere Entfernungen, z.B. zwischen Ortschaften, mit sogenannten A-Kabellinien überbrückt. Die B-Kabellinien erschlossen dann die Fläche zwischen den A-Kabellinien. Die C-Kabellinien überbrücken nur noch die kurzen Entfernungen zu den jeweiligen Übergabepunkten der einzelnen Gebäude (D-Kabellinie). Die bereits erwähnten Verstärker befinden sich auf den A-, B- und C-Kabellinien. Insgesamt sollen zwischen bBKVrSt und ÜP nicht mehr als 23 Verstärker in Reihe geschaltet sein, [2].

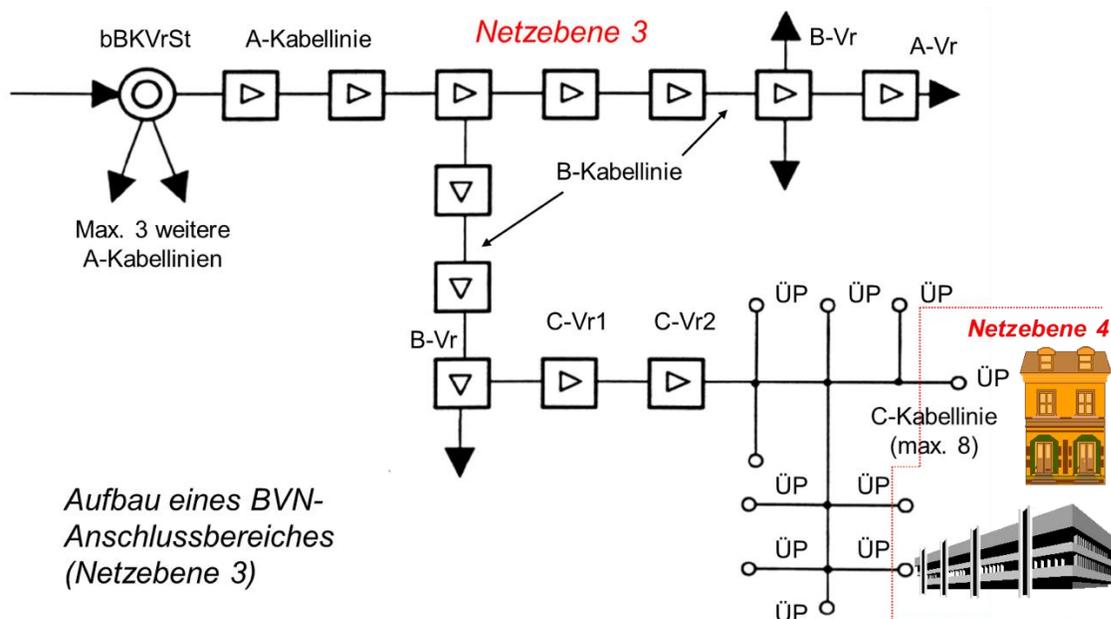


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Netzebene 3

Wie die Abbildung 10 zeigt, handelt es sich um eine Baumstruktur, die von einem zentralen Punkt aus viele Endstellen versorgt. Diese Grundstruktur besteht bis heute und bedeutet, dass sämtliche an dem zentralen Punkt eingespeisten Signale an allen nachgelagerten Stellen des Kabelfernsehnetzes ankommen und alle Teilnehmer die gleichen Signale erhalten, was für die Verbreitung eines einheitlichen Programm bouquets, wie Rundfunk und Fernsehen, durchaus ideal geeignet ist.

Die angestrebte Datenkommunikation verläuft jedoch in zwei Richtungen und ist i.d.R. eine Individualkommunikation. Werden die Daten über die beschriebene Baumstruktur übertragen, erhalten alle Teilnehmer alle Daten und teilen sich die gesamte verfügbare Übertragungskapazität. Daher sind einerseits Maßnahmen zu ergreifen, damit nur der jeweilige Adressat seine Daten erhält bzw. einsehen kann (Aufgabe der Übertragungstechnologie) und die Anzahl der Teilnehmer muss ggf. begrenzt werden, damit ausreichende Kapazitäten für jeden Teilnehmer (insbesondere in der Rückrichtung) zur Verfügung stehen.

Diese Reduktion der Teilnehmer ist nur mit einem Eingriff in die Topologie bzw. Netzstruktur zu realisieren. Wie bereits beschrieben, erhalten alle Teilnehmer hinter einem Einspeisepunkt die gleichen Signale. Um die Anzahl der Teilnehmer zu reduzieren, müssen zusätzliche Einspeisepunkte für die Datenkommunikation eingebaut werden. Diese neuen Daten-Einspeisepunkte werden Fibre Nodes genannt und über Glasfaserverbindungen zentral angebunden. Auf diesem Wege entsteht ein Overlay-Netz – das sogenannte Hybrid-Fibre-Coax-Netz (HFC-Netz), vgl. Abbildung 11.

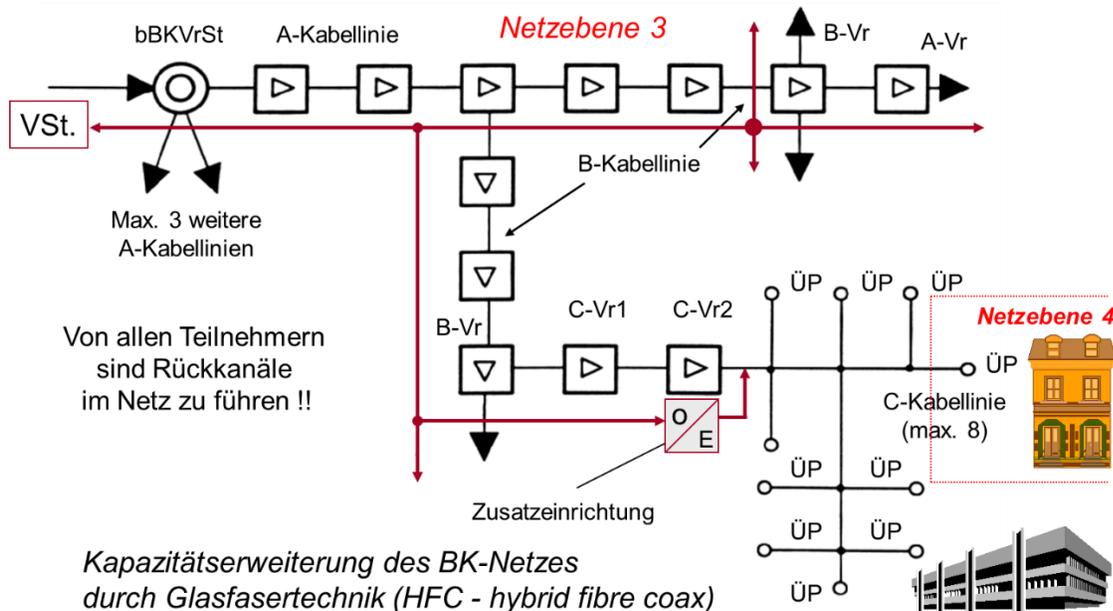


Abbildung 11: Erweiterung der Netzebene 3 durch eine Glasfasertechnik zu einem HFC-Netz

Im Wesentlichen handelt es sich dabei um opto-elektrische Wandler, die die DOCSIS-Signale zwischen CMTS und Fibre Node (optical nodes) über separate Glasfaserverbindungen und nicht über das ursprüngliche Kabelfernsehtz übertragen. Dadurch wird das Kabelfernsehtz in kleinere Teilnetze, die sogenannten Cluster aufgeteilt. Die Anzahl der Teilnehmer hinter einer Fiber Node hat direkten Einfluss auf die nutzbare Übertragungskapazität eines jeden einzelnen Teilnehmers. Hier wird so gesehen eine doppelte Überbuchung wirksam: Zum einen die Anbindung des CMTS in Richtung Internet / Kernnetz und zum anderen die Anzahl Teilnehmer eines Clusters, vgl. Abbildung 12.

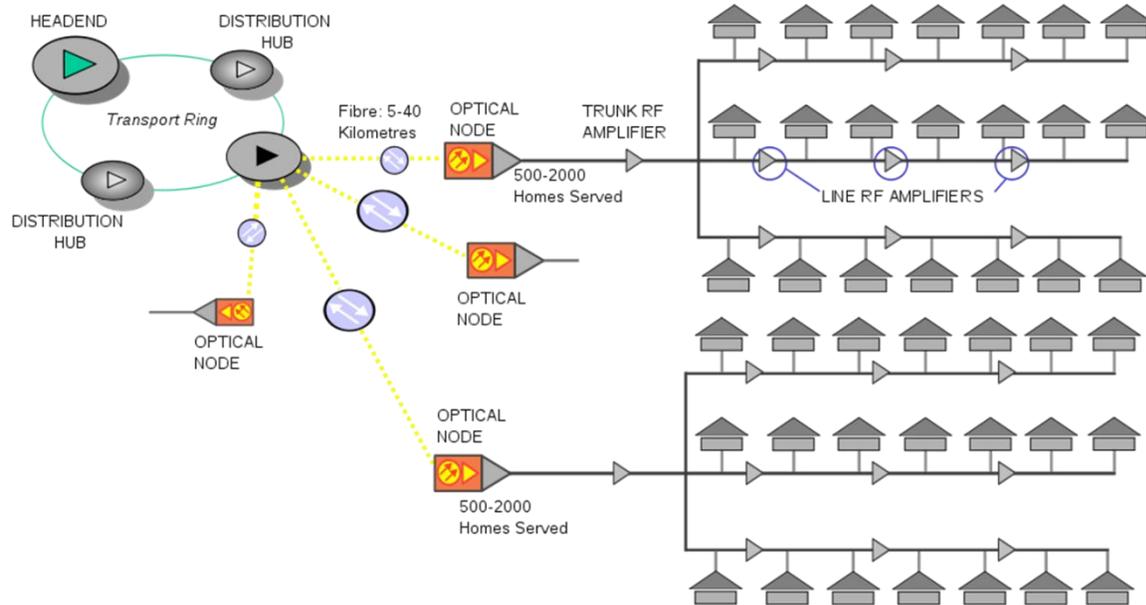


Abbildung 12: Segmentierung des CATV-Netztes und Zuführung zu den optical nodes (Fibre Nodes)

Eine weitere Segmentierung und damit Verkleinerung der Cluster ist möglich. Da sie jedoch stets mit Investitionen in Gerätetechnik und Glasfaseranbindung einhergeht, stellt sich die Frage, bis zu welchem Punkt eine weitere Verkleinerung der Clustergröße wirtschaftlich ist. Zudem werden mit jeder Clusterverkleinerung weitere Glasfaserverbindungen in Richtung des Kunden geführt. Auch hier stellt sich die Frage, ab wann ein Ausbau der durchgehenden Glasfaser bis zum Kunden wirtschaftlicher ist, als der Ausbau und der Betrieb der alten Infrastruktur mit ihren zahlreichen aktiven (energieversorgten) Komponenten. Ein wesentlicher Treiber bleibt vor diesem Hintergrund die Produktnachfrage im jeweiligen Versorgungsgebiet.

3.3 Übertragungstechnologie

Die eingeführte Übertragungstechnologie auf den Kabelfernsehtetzen ist DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification). DOCSIS wird parallel zur bestehenden Fernseh- und Hörfunkübertragung betrieben und muss in die Rundfunknutzung bei endlicher Frequenzressource (862 MHz) eingepasst werden, [2], [3].

Zu Beginn der Rundfunkübertragung in den Kabelfernsehtetzen wurden sämtliche Programme analog übertragen. Die einzelnen Kanäle wurden in einem 7 MHz bzw. 8 MHz Raster übertragen, vgl. Abbildung 13. Mit einem Frequenzkanal konnte zu diesem Zeitpunkt genau ein Fernsehprogramm übertragen werden, [2].

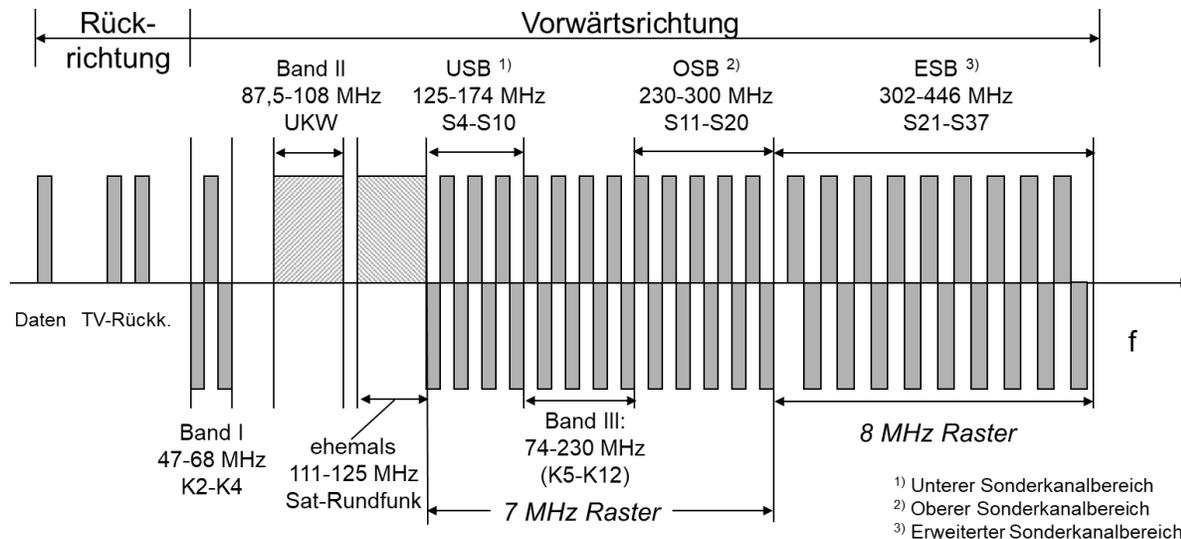


Abbildung 13: Ursprüngliche Belegung des Kabel-TV's (Anm.: Daten in Rückrichtung nur für betriebliche Zwecke)

Seit 2006 werden Fernsehprogramme mit dem Standard DVB-C auch digital übertragen. Ein wesentlicher Vorteil ist die gesteigerte Ressourceneffizienz. So können auf einem Frequenzkanal – diese bestehen auch bei der digitalen Übertragung weiter – mehrere Fernsehprogramme gleichzeitig übertragen werden. Die Anzahl der Fernsehkanäle pro Frequenzkanal ist dabei von der Bildqualität und damit von der Datenrate der einzelnen Programme abhängig.

Ab 2017 erfolgte die sukzessive Abschaltung der analogen Fernsehübertragung in den deutschen Kabelfernsehnetzen, [14]. Insgesamt konnten durch die Digitalisierung der Fernsehprogramme und die Abschaltung der analogen Übertragung Frequenzressourcen für die Datenkommunikation freigegeben werden.

DOCSIS (bis einschließlich 3.1) überträgt die Daten für den Upstream (vom Kunden) und den Downstream (zum Kunden) in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Für den Upstream ist bei DOCSIS 3.0 und 3.1 weniger Frequenzbandbreite vorgesehen, als für den Downstream, vgl. Abbildung 14.

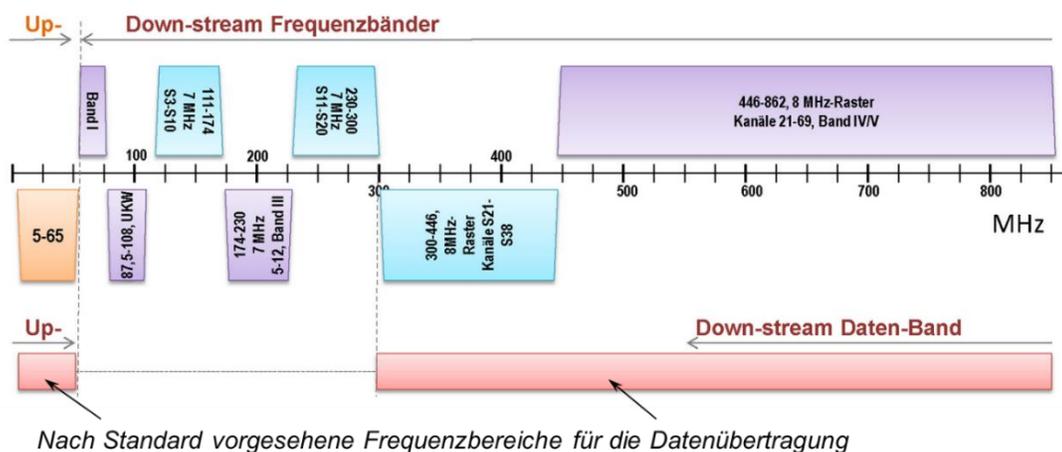


Abbildung 14: Mögliche Aufteilung des Frequenzspektrums zur Datenkommunikation

Dadurch ist die maximal mögliche Datenrate im Downstream höher, als im Upstream. Wieviel Frequenzbandbreite ein Kabelnetzbetreiber für Up- und Downstream bereitstellt, legt dieser selbst fest, die Spezifikationen sehen hier lediglich Maximalwerte vor. Ein Kabelnetzbetreiber entscheidet grundsätzlich in dem Spannungsfeld zwischen der zu befriedigenden Datenratenachfrage der Breitbandkunden, dem Programmangebot für die Rundfunkkunden sowie den gesetzlichen Vorgaben und kann nicht einfach die in den DOCSIS-Spezifikationen beschriebenen Maximalressourcen einsetzen.

Downstream			Upstream		
Parameter	DOCSIS 3.1	DOCSIS 3.0	Parameter	DOCSIS 3.1	DOCSIS 3.0
Modulation	OFDM 4k und 8k FFT ähnlich wie DVB-C2	Einzelträger mit J.83/B oder DVB-C	Modulation	OFDM 2k und 4k FFT ähnlich wie DVB-C2	Einzelträger mit TDMA oder CDMA
Frequenzbereich	108 MHz bis 1218 MHz (1794 MHz)	45 MHz bis 1002 MHz	Frequenzbereich	5 MHz bis 204 MHz	5 MHz bis 50 MHz
Kanalbandbreite	bis zu 192 MHz	6 MHz oder 8 MHz	Kanalbandbreite	bis zu 96 MHz	bis zu 6,4 MHz
QAM-Ordnung	bis zu 4096 (optional 8k, 16k)	bis zu 256	QAM-Ordnung	bis zu 4096	bis zu 64
Fehlerschutz	BCH-LDPC	Reed-Solomon	Fehlerschutz	LDPC, BCH	Reed-Solomon, Trellis
DS-Rate	10 Gbit/s (20 Gbit/s)	300 Mbit/s (1 Gbit/s)	US-Rate	1 Gbit/s (2,5 Gbit/s)	100 Mbit/s (300 Mbit/s)

Abbildung 15: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften von DOCSIS 3.0 und DOCSIS 3.1. Werte in Klammern sind künftige Erweiterungen, [14]

Aktuell ist DOCSIS 3.0 flächendeckend in allen Kabelfernsehtznetzen eingeführt und in vielen Regionen bereits DOCSIS 3.1. Die Umstellung von DOCSIS 3.0 auf 3.1 darf man sich nicht als eine Art von „Softwareupdate“ vorstellen. Nutzte DOCSIS 3.0 noch ein Einzelträger-Verfahren, wurde bei DOCSIS 3.1 auf ein Vielträger-OFDM-Verfahren umgestellt, d.h. es erfolgte eine völlige Änderung des technischen Übertragungsprinzips. Dieses bringt viele technische Vorteile mit sich, insbesondere hinsichtlich der Störfestigkeit und der Anpassbarkeit an die Kanalbedingungen. Allerdings sind die Sender- und Empfängertechnik von DOCSIS 3.1 *nicht* mit denen von DOCSIS 3.0 kompatibel und es bedarf eines entsprechenden Austausches bzw. einer Anpassung in allen CMTS (netzseitig) und des gesamten Kundenequipments (CPE) eines Bereichs, der mit DOCSIS 3.1 versorgt werden soll.

Wie die Abbildung 15 zeigt, sind sowohl DOCSIS 3.0 als auch DOCSIS 3.1 von ihrer Spezifikation her gigabitfähig. Allerdings sind dies Maximalwerte, die nur unter ganz bestimmten Bedingungen erreicht werden können. Hierzu muss zunächst eine hinreichende physikalische Infrastruktur bestehen (gute Kabel, funktionierende Verstärker und Muffen etc.) und der Kabelnetzbetreiber muss die entsprechend notwendigen Frequenzressourcen bereitstellen (können). Abschließend ist die Netzebene 4 des Endkunden, auf die der Netzbetreiber keinen Einfluss hat, zu berücksichtigen.¹

Für DOCSIS 4.0 wurden die technischen Spezifikationen im März 2020 veröffentlicht, [15]. Ein wesentliches Merkmal ist darin die Erhöhung der maximalen Signalfrequenz auf 1.794 MHz und damit der nutzbaren Frequenzbandbreite sowie die Erhöhung der Up-Stream-Datenrate für die parallele Übertragung von Up- und Down-Stream im gleichen Frequenzbereich. Ob die in Deutschland aufgebauten Kabelfernsehtznetze diese Verdoppelung der maximalen Signalfrequenz physikalisch überhaupt ermöglichen, ist derzeit offen. Es ist zu berücksichtigen, dass auch hier die Übertragungstechnik nicht kompatibel ist und ausgetauscht werden muss, d.h. ein „Update“

¹ s. Kap. 4

von DOCSIS 3.1 auf DOCSIS 4.0 ist mit erheblichen Investitionen von Seiten der Netzbetreiber verbunden.

Mit den oben beschriebenen Merkmalen soll DOCSIS 4.0 bis zu 10 Gbit/s im Downstream und 6 Gbit/s im Upstream ermöglichen. Allerdings sind hierfür auch zwingend Voraussetzungen im Bereich der physikalischen Infrastruktur zu erfüllen. Wie oben beschrieben, bedingt eine Verdoppelung der genutzten Frequenzbandbreite erhebliche Nachteile hinsichtlich der überbrückbaren Leitungslänge. Daher ist die Clustergröße extrem zu verringern, man spricht hier auch von FTTLA – Fibre To The Last Active, d.h. die Anbindung der letzten aktiven Komponente in Kundenrichtung an das Glasfasernetz. Ein Vorteil hierbei ist, dass sich dann keine Verstärker mehr in der Übertragungsstrecke in Kundenrichtung befinden, die nicht für diese hohen Frequenzbandbreiten ausgelegt sind. Allerdings muss die Zahl der notwendigen Fibre Nodes signifikant erhöht werden, die alle eine Glasfaseranbindung benötigen. Es stellt sich daher die Frage, ob dies im Vergleich zu einer durchgehenden FTTB-Erschließung insgesamt noch signifikante Kostenvorteile bringt.

4. Besonderheiten im Bereich des Kabelnetzes

Neben den bereits beschriebenen technischen Randbedingungen, die zwar bei den verschiedenen Infrastrukturen und Übertragungstechnologien graduell unterschiedlich, jedoch grundsätzlich auf die gleichen Parameter zurückzuführen sind, gelten nur für die Kabelfernsehtetze zusätzliche gesetzliche Randbedingungen mit sich daraus ableitenden weiteren Fragestellungen.

Wie der Name „Kabelfernsehtetze“ bereits aussagt, handelt es sich um Infrastrukturen zur Übertragung von Fernseh- sowie Radioprogrammen. Als Infrastrukturen zur Verbreitung von Rundfunkprogrammen und fallen die Kabelnetze gesetzlich unter die Vorgaben der Landesmediengesetze bzw. den Rundfunkstaatsvertrag (RStV), [16]. Dies gilt für das Telefonnetz oder neue Glasfasernetze so nicht und stellt einen erheblichen Unterschied dar.

Nach §52b RStV sind Plattformen privater Anbieter mit Fernsehprogrammen (also die Kabelfernsehtetze) dazu verpflichtet, die Verbreitung bestimmter Fernsehprogramme über die Bereitstellung einer „technischen Kapazität im Umfang von höchstens einem Drittel der für die digitale Verbreitung von Rundfunk zur Verfügung stehenden Gesamtkapazität sicherzustellen“. Der §52b RStV schreibt dies ebenfalls für die Verbreitung von Hörfunkprogrammen vor.

Über die nicht durch Programme nach §52b RStV belegte technische Kapazität kann der private Plattformanbieter (Kabelnetzbetreiber) dann nach eigener Entscheidung verfügen. Die Kabelnetzbetreiber sind also nicht vollständig frei in ihren Entscheidungen bzgl. der Belegung und Nutzung der Kabelfernsehtetze. So lange sie Fernseh- und / oder Radioprogramme übertragen (müssen), können sie nicht beliebig viele Ressourcen für die Datenkommunikation nutzen. Der Rundfunkstaatsvertrag sowie die jeweiligen Landesmediengesetze und Verordnungen geben eine Mindestschwelle für die Rundfunkübertragung vor, die nicht zu Gunsten der Datenkommunikation unterschritten werden darf.

Ob ein vollständiger Verzicht auf die Übertragung von Rundfunkprogrammen rechtlich möglich ist, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Auch ein Wechsel auf eine IP-TV-Lösung scheint auf-

grund §52c RStV zunächst ausgeschlossen, da die Programmanbieter aufgrund fehlender einheitlicher Schnittstellen an der Verbreitung ihrer Inhalte gehindert würden. Je nach Realisation eines solchen Alternativangebotes könnten auch weitere Bestimmungen des §52c RStV entgegenstehen.

Neben den rechtlichen Fragen, stellt sich auch aus wirtschaftlicher Sicht die Frage, wie viele Ressourcen ein Kabelnetzbetreiber für die Übertragung von Rundfunkprogrammen und für die Datenkommunikation zur Verfügung stellt.

Ein Vergleich der aktiven Anschlüsse im Bereich „Breitbandanschluss für Datenkommunikation“ und im Bereich „TV-Empfang“ gibt hier einen deutlichen Aufschluss. So ist die Zahl der Kunden im Bereich TV-Empfang mehr als doppelt so hoch wie im Bereich Breitbandanschluss:

- Breitbandanschlüsse: 8,0 Mio. Anschlüsse (2018) [17]
- TV-Empfang: ca. 17,2 Mio. Haushalte (2019) [18]

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass für den TV-Empfang kein Equipment (CPE) durch den Netzbetreiber zur Verfügung gestellt werden muss. Hier reicht ein handelsübliches TV-Gerät aus, welches durch den Kunden erworben wird. Es ist ein wichtiger Vorteil des Kabel-TV-Netzes, dass in Einfamilienhäusern die Verteilung der Signale sehr einfach erfolgen kann und dabei mehrere Geräte versorgt werden können. Dieser bereits aus der „analogen“ Zeit bekannte Vorteil gegenüber einer Satellitenempfangsanlage wurde mit der Verfügbarkeit preiswerter TV-Empfangsgeräte nach dem Standard DVB-C und DVB-C2 in das „digitale“ Zeitalter gerettet und ist für viele Kunden ein Grund, sich für das Kabel-TV zu entscheiden.

Für die Realisierung von Breitbandanschlüssen ist hingegen mindestens ein Modem, meist auch ein rückkanalfähiger Hausanschlussverstärker notwendig. Diese Geräte werden typischerweise durch den Netzbetreiber gestellt. Dies stellt einen finanziellen Nachteil im Vergleich zum Geschäftsfeld TV-Empfang dar und bei dem enormen Preisdruck auf dem Breitbandmarkt müssen die erforderlichen Mittel auch erstmal erwirtschaftet werden.

Eine deutliche Reduzierung oder gar Einstellung des klassischen, digitalen Rundfunkangebotes würde entweder zu einem massiven Kundenverlust führen oder erhebliche zusätzliche Investitionen erfordern, da die Verbreitung der Rundfunkprogramme nicht behindert werden darf (siehe RStV, [16]). Die Netzbetreiber müssten hierfür eine neue Schnittstelle zur Verfügung stellen, die den Empfang mit den verbreiteten handelsüblichen Rundfunkempfangsgeräten auch weiterhin ermöglicht – z.B. eine neuartige Set Top Box.

Perspektivisch mag die Entwicklung der Kabelnetze in diese Richtung gehen. Allerdings ist dies ein sehr langwieriger Prozess und eröffnet bei gleichbleibender Gesetzeslage keine kurzfristige – insbesondere aber auch keine wirtschaftlich tragfähige – Lösung.

Die Übertragungstechnologien DOCSIS 3.0 und höher sind theoretisch gigabitfähig. Inwieweit die Kabelnetzbetreiber dies wirklich umsetzen können, hängt erheblich ab von der Anpassung der physikalischen Infrastruktur (Verkleinerung der Cluster) und der Umverteilung der Übertragungsressourcen zu Lasten des Rundfunks. Dies bleiben jedoch Entscheidungen des jeweiligen Unternehmens, die entlang wirtschaftlicher Parameter getroffen und damit insbesondere durch die

Nachfrage der Produkte bedingt werden. Die öffentliche Hand hat vor diesem Hintergrund nur begrenzte Möglichkeiten der Einflussnahme.

5. Glasfaseranschluss

Bei den bisher beschriebenen Systemen wurden die Übertragungstechnologien als Synonym für das jeweilige Gesamtsystem verwendet. Im Bereich der Glasfaseranschluss-Netze wird dagegen häufig das Übertragungsmedium – die Glasfaser – oder der Endpunkt des Ausbaus – Fibre to the building (FTTB) oder Fibre to the home (FTTH) – als Synonym verwendet. Auch diese Systeme lassen sich mit den drei in der Einführung angeführten Fragen zur physikalischen Infrastruktur, Topologie und Übertragungstechnologie beschreiben.

Allerdings handelt es sich im Unterschied zu den beschriebenen „DSL-Systemen“ und „DOCSIS-Systemen“ um keine Netzinfrastrukturen, die für die Datenkommunikation angepasst werden mussten. Vielmehr werden sie entweder vollständig neu aufgebaut oder aber bestehende Glasfaserstrukturen anderer Netze entsprechend erweitert. Auch bei dem Medium Glasfaser gibt es unterschiedliche Varianten und Technologien. In den nachfolgenden Abschnitten wird daher nur ein kurzer Überblick gegeben.

5.1 Physikalische Infrastruktur

Glasfaseranschluss-Netze basieren auf Glasfaserleitungen bis zum Übergabepunkt beim Kunden. Die Glasfaserleitung als Übertragungsmedium wurde in den 1960er Jahren entwickelt und stetig weiterentwickelt. Es gibt heute für unterschiedliche Anwendungszwecke unterschiedliche Glasfasertypen und –kabel, [2], [3].

Insbesondere werden sogenannte Monomode- und Multimode-Fasern unterschieden, die einen unterschiedlichen Aufbau aufweisen. So ist der (lichtleitende) Kerndurchmesser einer Monomode-Faser deutlich kleiner als derjenige einer Multimode-Faser. In Multimodefasern lässt sich Licht einfacher einkoppeln, weshalb sie u.a. mit kostengünstigeren Sendermodulen betrieben werden können. Dies ist bei Monomodefasern aufgrund des kleineren Kerndurchmesser schwieriger. Die überbrückbare Reichweite liegt bei einer Monomodefaser bei mehreren 10 km, Multimodefasern erlauben dagegen nur die Überbrückung von mehrere 100 m. Die Anwendungsbereiche unterscheiden sich entsprechend: Während Multimode-Fasern vor allem in der Gebäudevernetzung oder auf Schiffen und im Kfz. eingesetzt werden, sind Monomode-Fasern die vorherrschend eingesetzte Plattform für Telekommunikationsnetze.

Die Forschung und Feldtests zeigen, dass mit der Glasfaser als Übertragungsmedium erhebliche Datenratensteigerungen möglich sind. So konnte auf einer bestehenden Glasfaserstrecke zwischen München und Regensburg Datenraten von 50 TBit/s erzielen, [19]. In anderen Versuchen wurden sogar noch höhere Datenraten erzielt, [20], [21].

Die aktuellen Glasfasern bieten auf Jahre hinaus ein enormes Entwicklungspotential für den praktischen Betrieb. Sofern sie korrekt verlegt werden, sind Glasfaserkabel über Jahrzehnte nutzbar – ein Austausch erfolgt i.a. nur, wenn Materialfehler vorliegen oder neue optische Materialien mit

höheren Leistungsparametern einen Austausch auf einem Streckenabschnitt sinnvoll erscheinen lassen.

5.2 Topologie

Bei den Glasfaseranschlussnetzen gibt es im Wesentlichen zwei Topologien:

- Punkt-zu-Punkt (PtP)
- Punkt-zu-Multipunkt (PtMP)

Bei den Punkt-zu-Punkt-Netzen werden die Teilnehmer von einem zentralen Point of Presence (PoP) des Netzbetreibers über eine oder mehrere Glasfaserleitungen direkt angebunden. Zwischen PoP und Übergabepunkt des Teilnehmers befinden sich keine anderen Netzelemente und die Leitung(en) stehen dem jeweiligen Teilnehmer exklusiv zur Verfügung. Die Entfernung zwischen dem PoP und dem Endkunden kann dabei einige 10 km betragen.

Bei den Punkt-zu-Multipunkt-Netzen wird eine Glasfaserleitung ausgehend vom PoP zu einem sogenannten optischen Splitter geführt. Dieser Splitter verteilt das optische Signal auf mehrere Glasfasern, die zu den einzelnen Teilnehmern führen.

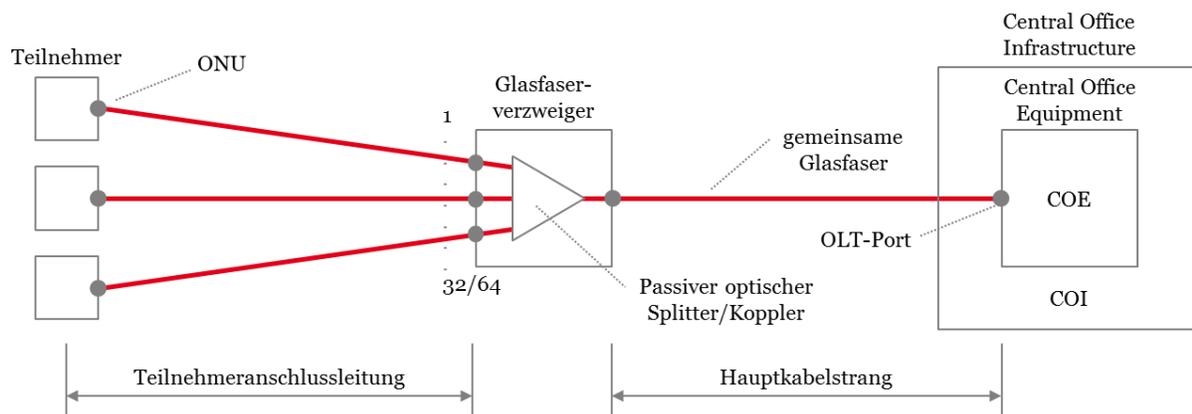


Abbildung 16: Point to Multipoint mit optischem Splitter/Glasfaserverzweiger

Allerdings werden dabei die Übertragungsressourcen auf alle an einen Splitter angeschlossene Teilnehmer aufgeteilt. Bei steigender Datenratennachfrage oder einem zu hohen Splittingverhältnis gehen einige Netzbetreiber dazu über, den passiven optischen Splitter durch aktive Komponenten zu ersetzen und die Anbindung dieser neuen aktiven Technik mit mehr Übertragungskapazitäten auszustatten.

Dieses Vorgehen hat aus betrieblicher Sicht jedoch erhebliche Nachteile. So bedarf die aktive Technik einer eigenen Energieversorgung und ist daher nicht an jedem beliebigen geographischen Ort sinnvoll zu platzieren. Aktive Komponenten weisen eine deutlich höhere Ausfallwahrscheinlichkeit auf als passive Komponenten, der Wartungsaufwand wird daher deutlich erhöht. Auch der Energieverbrauch wird steigen, da im Vergleich zu zentralisierten Strukturen die Energieversorgung der einzelnen Komponenten mit einer geringeren Effizienz erfolgt.

Die PtP-Topologie ist grundsätzlich flexibler, da PoP und Teilnehmer direkt verbunden sind und somit die Übertragungstechnologie vergleichsweise einfach umgestellt werden kann. Es ist sogar möglich durch die Platzierung eines optischen Splitters im PoP die PtP-Verkabelung für eine PtMP Übertragungstechnologie zu nutzen. Umgekehrt ist dies nicht möglich. Die PtMP-Topologie ist dementsprechend unflexibler, da aufgrund des Splitters nur Übertragungstechnologien zum Einsatz kommen können, die für die „Splittertechnik“ ausgelegt sind.

Allerdings bietet die PtMP-Topologie den großen Vorteil, dass sie vergleichsweise gut die gewachsenen Netzstrukturen der HFC- und FTTC-Netze ergänzt und für Bestandsnetzbetreiber den Ausbau / Umstieg von den bestehenden Anschluss-Netzen in Richtung FTTB/H vereinfacht. Ein Teil der bestehenden Infrastrukturen kann in der Regel weiter genutzt werden.

Die PtP-Topologie wird entsprechend typischerweise von Netzbetreibern ohne Bestandsnetz (neue Marktteilnehmer) eingesetzt, während die Bestandsnetzbetreiber weltweit aufgrund ihrer eher generischen Entwicklung der Netze die PtMP-Topologie verfolgen.

5.3 Übertragungstechnologien

Für die Glasfaseranschlussnetze gibt es unterschiedliche Übertragungstechnologien, die entweder für die PtP- oder PtMP-Topologie ausgelegt sind. Die Entscheidung für oder gegen eine Technologie ist von der zu erzielenden Datenrate, den Kosten und dem Betriebs- und Wartungsaufwand sowie ggf. der Integration in Bestandsysteme abhängig. Bei der PtP-Technik wird häufig auf die Ethernet-Standards zur Anbindung des Endkunden zurückgegriffen, so dass man an deren kontinuierlicher Weiterentwicklung partizipiert.

In der nachfolgenden Tabelle finden Sie einige Beispiele für Übertragungstechnologien.

Bezeichnung	DS / US Datenrate [Gbit/s]	Leitungslänge [km]
GPON	2,4 / 1,2	20 – 40 je nach Splittingfaktor
EPON	1,25 / 1,25	
10G-EPON	10 / 10	
XGPON	10 / 2,5	
XGSPON	10 / 10	
NG-PON2	40 / 40	
1000LX10 1000BX10	1 / 1	10
1000EX und ZX	1/1	40 bzw. 70
10GB-LW4 und LR	10/10	10
10GB-ER und LR	10/10	40
40GB-LR4	40/40	10
100GB-LR4	100/100	10
100GB-ER4	100/100	40
200GB-LR4	200/200	10
400GB-LR8	400/400	10

Abbildung 17: Kurzer Überblick über verschiedene Glasfaserübertragungstechnologien, [23].

Alle heute gängigen Glasfaserübertragungstechnologien sind von ihren Spezifikationen her gigabitfähig. Ob und wie dies implementiert wird, liegt grundlegend im Ermessen des jeweiligen Netzbetreibers und ist damit in erster Linie abhängig von den wirtschaftlichen und damit nachfragebedingten Rahmenbedingungen.

6. Gigabitfähigkeit

Es gibt in Deutschland verschiedene Infrastrukturen, die unterschiedliche Netz-Topologien aufweisen und mit unterschiedlichen Übertragungstechnologien betrieben werden. Zur Beurteilung der Gigabitfähigkeit ist zunächst das technische Gesamtsystem zu betrachten. Im weiteren Verlauf müssen auch rechtliche bzw. regulatorische Einflüsse sowie die Marktsituation berücksichtigt werden.

Die auf dem Kupferzweidraht-Netz betriebenen DSL-Varianten sind derzeit nicht gigabitfähig. Es wird vermutlich Weiterentwicklungen der DSL-Technologie geben, die zumindest im Labor Datenraten von 1 Gbit/s erzielen. Allerdings ist es fraglich, wie sinnvoll und wirtschaftlich eine solche Technologie auf dem bestehenden Zweidrahtnetz in der Praxis einsetzbar wäre. Aufgrund des starken Ausbaus der KVz mit DSLAMs und deren Anbindung mittels Glasfaser sind die zu überbrückenden Entfernungen zwischen KVz und Teilnehmer inzwischen in vielen Fällen relativ gering. Ein neues zusätzliches Netzelement zwischen KVz und Teilnehmer zu installieren, welches per Glasfaser angebunden werden müsste, ohne die Glasfaser direkt bis in das jeweilige Gebäude zu legen, scheint aus heutiger Sicht weder sinnvoll noch wirtschaftlich.

Bei den Kabelnetzen muss eine deutlich differenziertere Betrachtung erfolgen. Die physikalische Infrastruktur wurde für ein reines Verteilnetz geplant und gebaut und erst durch einen Umbau zu einem rückkanalfähigen Kommunikationsnetz (HFC-Netz). Allerdings sind die verbauten Komponenten (z.B. Verstärker) weiterhin auf eine maximale Signalfrequenz von 862 MHz ausgelegt. Eine Erhöhung dieser Maximalfrequenz und damit eine Vergrößerung der nutzbaren Frequenzbandbreite ist zwar theoretisch möglich, jedoch mit erheblichen Nachteilen verbunden. Insbesondere die Signaldämpfung würde deutlich zunehmen, wodurch eine erhebliche Verkleinerung der Clustergrößen und damit der Kabellänge in Richtung FTTLA notwendig würde.

Die Clustergröße ist ohnehin die entscheidende Größe in der Beurteilung der Leistungsfähigkeit, da die verfügbare Übertragungskapazität bei gleichzeitiger Nutzung auf alle in einem Cluster angeschlossenen Teilnehmer aufgeteilt werden. Eine Verkleinerung der Cluster stellt somit einem einzelnen Teilnehmer durchschnittlich mehr Übertragungskapazität zur Verfügung. Allerdings sind hierfür neue Fibre Nodes zu installieren und mit Glasfaser anzubinden.

Auch die Frage der Ressourcenzuteilung ist unter der aktuellen deutschen Rechtslage schwieriger, als in anderen Ländern. Welche Frequenzressourcen ein Kabelnetzbetreiber für die Datenkommunikation zur Verfügung stellt, ist sowohl eine rechtliche als auch wirtschaftliche Entscheidung jedes Kabelnetzbetreibers. Im Grunde gelten diese Überlegungen auch für eine Einführung von DOCSIS 4.0.

Aktuell sind die Kabelnetze daher als Gesamtsystem als grundlegend gigabitfähig einzustufen. Sie können Datenraten von 1 Gbit/s im Downstream bereitstellen, sofern eine hinreichend gute

und segmentierte Infrastruktur vorhanden ist und die jeweiligen Netzbetreiber ausreichende Frequenzressourcen für die Datenkommunikation nutzen (können).

Bei den Glasfaseranschlussnetzen sind die PtP-Netze als uneingeschränkt gigabitfähig anzusehen. Bei den PtMP-Netzen ist dies aktuell von der genauen Netzstruktur und hierbei insbesondere von den Splittingfaktoren sowie von der eingesetzten Übertragungstechnologie abhängig. Perspektivisch sind aber auch diese als gigabitfähig einzustufen.

Im Hinblick auf den Ausbau sollte weniger auf eine bestimmte Datenrate als vielmehr auf die Struktur, Flexibilität und (Energie-)Effizienz geachtet werden. Hierbei sind im Hinblick auf Energieeffizienz, Ausfallwahrscheinlichkeit und Wartungsintensität möglichst wenig aktive Komponenten in der Fläche anzustreben. Der Einsatz der aktiven Komponenten an ausgewählten zentralen Orten ist demgegenüber deutlich von Vorteil. Sie sind zentral einfacher zu betreiben, zu unterhalten und erhöhen die Ausfallsicherheit. Der Einbau einer Vielzahl aktiver Komponenten in der Fläche kann auch im Angesicht der Herausforderungen des Klimawandels nicht der richtige Weg sein.

7. Überbuchung

In allen Kommunikationsnetzen wird an unterschiedlichen Stellen im Netz eine Verkehrskonzentration durchgeführt. Dies war bereits bei den ersten Telefonnetzen üblich, weil es wirtschaftlich sinnvoll war und ressourcenschonend. Große Kommunikationsnetze, wie die beschriebenen Telefon-, Kabelfernseh- oder Glasfaseranschlussnetze, wären ohne Verkehrskonzentration kaum finanzierbar.

Allerdings wird die Verkehrskonzentration an unterschiedlichen Stellen und mit unterschiedlichen Konzentrationsgraden realisiert. Die konkrete Ausführung hat direkten Einfluss auf die für einen einzelnen Nutzer oder eine Nutzergruppe zur Verfügung stehenden Übertragungskapazitäten.

Das Prinzip der Verkehrskonzentration erfolgt in den meisten Fällen gleich und wird nachfolgend am Beispiel von DSL-Systemen erklärt. Bei DSL-Systemen erfolgt die erste Verkehrskonzentration am DSLAM. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um einen DSLAM im HVT oder einen Outdoor-DSLAM im KVz handelt. Der DSLAM ist mit einer Glasfaserverbindung in Richtung des Kernnetzes angebunden, die über eine in der Netzplanung bestimmte Übertragungskapazität verfügt. Alle Teilnehmer teilen sich diese Übertragungskapazität, sobald sie Daten über ihren Anschluss übertragen. Die Auswirkungen der Verkehrskonzentration sind daher dynamisch.

Anzahl Anschlüsse	Aktive Anschlüsse	Gebuchte Datenrate [Mbit/s]	DSLAM- Anbindung [Mbit/s]	Nutzbare Datenrate [Mbit/s]	Überbuchung
100	10	100	1000	100	1
100	20	100	1000	50	2
100	30	100	1000	33	3
100	40	100	1000	25	4
100	50	100	1000	20	5
100	60	100	1000	17	6
100	70	100	1000	14	7
100	80	100	1000	13	8
100	90	100	1000	11	9
100	100	100	1000	10	10

Abbildung 18: Exemplarische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Anzahl Kunden, gebuchter Bandbreite, Anbindung des DSLAM und nutzbarer Datenrate

Die Abbildung 18 zeigt eine beispielhafte Verkehrskonzentration bei 100 Anschlüssen und einer DSLAM-Anbindung mit 1 Gbit/s. Die nutzbare Datenrate sinkt in dem Beispiel bei steigender Anzahl der aktiven 100 Mbit/s Anschlüsse, im ungünstigsten Fall auf 10 Mbit/s. Natürlich ist diese Rechnung nicht unmittelbar auf die Realität übertragbar, da das statistische Aufkommen des Datenverkehrs (es kommen nicht alle Datenpakete gleichzeitig an) die Auswirkungen der Verkehrskonzentration abmildert und die nutzbare Datenrate im Mittel höher liegen wird. Aus diesem Grund sind die Überbuchungsfaktoren in der Realität meist deutlich höher als 1:10. Ferner ergeben sich mit der Wahl des Konzentrationsfaktors betriebswirtschaftliche Gestaltungsmöglichkeiten: Mit höherem Überbuchungsfaktor kann dieselbe zugeführte DSLAM-Anbindung (hier z.B. 1 Gbit/s) mehr Kunden als Produkt (z.B. 50 Mbit/s) angeboten werden, so dass sich die Preise für den Endkunden ggf. reduzieren. So erklären sich auch die unterschiedlichen Entgelte, die verschiedene Anbieter am selben physikalischen Anschluss gegenüber dem Endkunden verlangen – für eine vermeintlich identische Dienstleistung.

Bei der Planung einer Verkehrskonzentration ist daher zu prüfen, wie groß die Übertragungskapazitäten in Richtung des nächsten nachgelagerten Netzelementes sein müssen, damit die Nutzer die Verkehrskonzentration nicht durch Leistungseinbußen bemerken. Ein statistisch breit verteiltes Verkehrsaufkommen begünstigt eine hohe Verkehrskonzentration. Kommt es allerdings häufig zu Spitzenlasten, muss die Verkehrskonzentration geringer ausfallen, um Blockaden bzw. merkliche Einschränkungen im Netz zu vermeiden.

Bei Änderungen im Nutzungsverhalten der Teilnehmer muss ggf. auch der Faktor der Verkehrskonzentration angepasst werden: Nutzen beispielsweise viele Teilnehmer Videostreamingdienste zur gleichen Zeit, muss zur Aufrechterhaltung des Leistungsniveaus der Faktor der Verkehrskonzentration verringert werden. Anderenfalls muss, wie in der Corona-Krise, das Volumen des Contents verkleinert werden.

Auch bei den Kabelfernsehtzen und Glasfasernetzen werden entsprechend Verkehrskonzentrationen durchgeführt. Bei den Kabelfernsehtzen erfolgt dies an den CMTSs und bei den Glasfaseranschlussnetzen in den PoPs.

Eine zusätzliche Verkehrskonzentration tritt bei PtMP-Netzen auf (Kabelfernsehnetzen und Glasfaseranschlussnetze mit optischen Splitttern). Hier teilen sich die Nutzer die Übertragungskapazitäten bereits vor dem ersten aktiven Netzelement, da alle über die gleiche Leitung angeschlossen sind. Grundsätzlich sind aber auch hier die gleichen Effekte zu beobachten, steigt die Anzahl aktiver Teilnehmer, sinkt die nutzbare Datenrate entsprechend.

Die Verkehrskonzentration bzw. Überbuchung (Überbuchung = Maß für die Verkehrskonzentration) beeinflusst somit direkt die nutzbare Datenrate eines jeden Teilnehmers. Sie ist aufgrund des Nutzungsverhaltens und der Verkehrsverteilung nicht grundsätzlich als negativ zu bewerten. Allerdings führen Netze oder Netzabschnitte mit einer hohen Überbuchung eher zu Einschränkungen und Blockaden im Netz, als solche mit niedriger Überbuchung.

Es sei an dieser Stelle nochmals angemerkt, dass das Mittel der Verkehrskonzentration in allen Netzen und Netzabschnitten angewandt wird. Betrachtet man eine vollständige Ende-zu-Ende-Kommunikation, so werden mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Konzentrationspunkte durchlaufen. Daher muss der limitierende Faktor nicht zwingend im Bereich des Anschlussnetzes liegen. Gleichwohl wirken sich Konzentrationspunkte, die näher an einem Teilnehmer liegen, stärker auf dessen Übertragungskapazitäten aus, als Konzentrationspunkte, die weiter zurück im Kernnetz liegen.

Letztlich liegt es in der Verantwortung und Entscheidung des jeweiligen Netzbetreibers, wie stark der Verkehr an den einzelnen Netzknoten konzentriert wird oder eben nicht. Die Entscheidung erfolgt i.a. auf Basis von Verkehrsmessungen und langjährigen Erfahrungswerten, die gegenüber betriebswirtschaftlichen Überlegungen hinsichtlich der erforderlichen Investitionen und Betriebskosten sowie der erzielbaren Einnahmen abgewogen werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Telekom, „Vom Hebdrehwähler bis zum Smartphone - Meilensteine aus 150 Jahren Telefon,“ Deutsche Telekom, 31.12.2010. [Online]. Available: <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/vom-hebdrehwaehler-bis-zum-smartphone-meilensteine-aus-150-jahren-telefon-333532>. [Zugriff am 04.2020].
- [2] K. Beuth, S. Breide, C.-F. Lüders, G. Kurz und R. Hanebuth, Nachrichtentechnik, Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2016.
- [3] S. Gerd, Technik der Netze, Bd. 1, Berlin: VDE Verlag GmbH, 2014.
- [4] F. Fremerey, J. Kuri und J. Endres, „Volles Rohr - T-ADSL in der Praxis,“ 30.07.1999. [Online]. Available: <https://www.heise.de/ct/artikel/Volles-Rohr-287180.html>. [Zugriff am 04.05.2020].
- [5] ITU-T, „G.992.3“.
- [6] ITU-T, „G.992.1“.
- [7] ITU-T, „G.993.2“.
- [8] ITU-T, „G.993.5“.
- [9] „DSL-Turbo Vectoring: Angst vor Monopol unbegründet?,“ 2015.
- [10] P. Marwan, „Mitbewerber: Telekom erhält durch Bundesnetzagentur Quasi-Monopol beim Vectoring,“ ZDNet, 2016.
- [11] T. Neuhetzki, „Telekom plant VDSL-Vectoring-Monopol durch die Hintertür,“ 2012.
- [12] J. Wilke, „Die zweite Säule des "dualen Systems": Privater Rundfunk,“ 2009.
- [13] B. Beckert, W. Schulz, P. Zoche und H. Dreier, Die Zukunft des deutschen Kabelfernsehnetzes: Sechs Schritte zur Digitalisierung, Heidelberg: Physica-Verlag, 2005.
- [14] Verbraucherzentrale, *Analoges Kabelfernsehen bis 2019 abgeschaltet: Was jetzt wichtig ist*, 2019.

- [15] CableLabs, *DOCSIS 4.0 Physical Layer Specification - Version I02*, CableLabs, 2020.
- [16] Bundesrepublik Deutschland, *Staatsvertrag für Rundfunk und Telemedien*, Berlin, 2020.
- [17] Bundesnetzagentur, „Jahresbericht 2018,“ Bundesnetzagentur, Bonn, 2019.
- [18] die medienanstalten – ALM GbR, „Digitalisierungsbericht Video 2019,“ die medienanstalten – ALM GbR, Berlin, 2019.
- [19] G. Prof. Dr. Kramer, *Geschwindigkeitsrekord unter Realbedingungen*, München, 2019.
- [20] S. Biesemann, *Forscher übertragen 1 Petabit pro Sekunde per Glasfaser*, 2018.
- [21] M. Janschitz, *255 Terabit pro Sekunde: Wissenschaftler stellen mit Glasfaser neuen Rekord auf*, 2014.
- [22] Rohde & Schwarz, *DOCSIS 3.1 – der Turbo für Kabel-TV und Internet*, 2015.
- [23] Viavi, „Viavi - Passive Optische Netze (PON),“ Viavi, [Online]. Available: <https://www.viavisolutions.com/de-de/passive-optische-netze-pon>. [Zugriff am 06 05 2020].
- [24] heise, „VDSL-Vectoring“.

Herausgeber:

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

Das Kompetenzzentrum Gigabit.NRW ist Auftragnehmer des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung 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 „Eigenwirtschaftlicher Breitbandausbau durch Bürgerinitiativen“ 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.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. S. Breide, S. Helleberg, M.Eng. Institut für Breitband- und Medientechnik (I.BM.T)

Bezugsquelle:

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

Redaktion:

Kompetenzzentrum Gigabit.NRW

Stand: 28.05.2020

Gestaltung: Kompetenzzentrum Gigabit.NRW



Kompetenzzentrum Gigabit.NRW
Postfach 10 54 44, 40045 Düsseldorf
Telefon: +49 211/981-2345
Email: info@gigabit.nrw.de
Internet: <https://www.gigabit.nrw.de/>