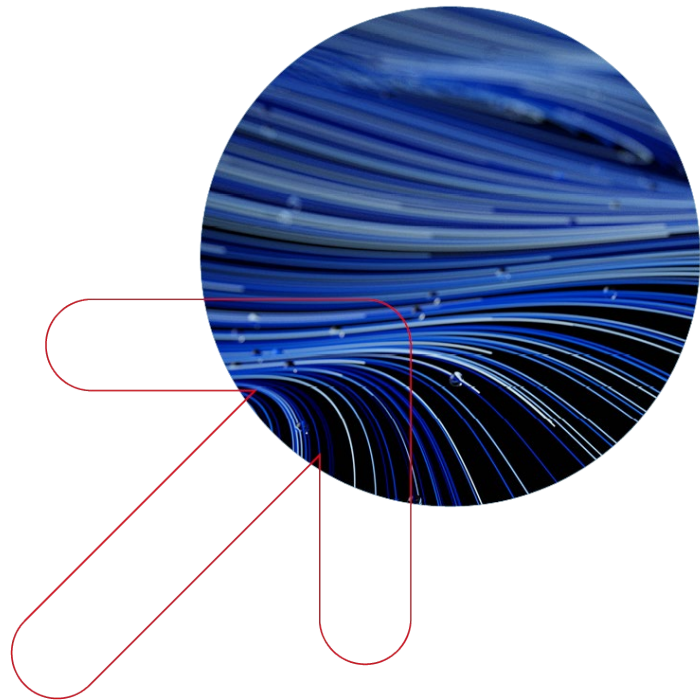


WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 493



Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen

Autoren:
Gonzalo Zuloaga
Dr. Gabriele Kulenkampff
Martin Ockenfels
Dr. Thomas Plückebaum

Bad Honnef, Dezember 2022

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

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

Stand: Dezember 2022

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

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.
ISSN 1865-8997

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
Zusammenfassung	V
Summary	VI
1 Einführung	1
1.1 Hintergrund und Fragestellung	1
1.2 Methodische Vorgehensweise	2
2 Untersuchungsgegenstand und Definitionen	4
2.1 Anschlussnetz	4
2.2 Räumliche Erstreckung	6
3 Technische Grundlagen und Zusammenhänge	8
3.1 Allgemeine Konzepte	8
3.1.1 Leistungsfähigkeit und Reichweite einer Kommunikationsverbindung	8
3.1.2 Signal-Arten und Signalstärke	9
3.1.3 Leitung, Widerstand und Signalverlust	10
3.2 Besonderheiten von Kupferleitungen	11
3.2.1 Nebensprechen (elektromagnetische Störungen)	12
3.2.2 Leistungs- / Reichweiteverhältnis – xDSL Technologien	14
3.3 Besonderheiten von Glasfaserleitungen	16
3.4 Dämpfung und Signalverlust	17
3.4.1.1 Kabeldämpfung	18
3.4.1.2 Steckerverlust	19
3.4.1.3 Spleißverlust	21
3.4.1.4 Splittingverlust (GPON)	22
3.4.1.5 Gesamtverlust – vergleichende Gegenüberstellung	24
3.5 Sender und Empfänger	26
3.5.1 Bei kupferbasierten Technologien	26
3.5.2 Bei glasfaserbasierten Technologien	27
3.6 Verlusttoleranz und das Dämpfungsbudget	30

4 Reichweiten glasfaserbasierter Technologien	32
4.1 10 km Reichweite – Versuch einer Bottom-up Validierung von Herstellerangaben	32
4.2 Analyse von SFP-Modulen mit größeren Reichweiten bei PtP-Netzarchitekturen	39
4.3 Analyse der Reichweiten bei PtMP-Netzarchitekturen	40
5 Zusammenhang der technologieabhängigen Reichweiten und der regionalen Erstreckung von Anschlussbereichen	45
6 Ergebnisse	48
Literaturverzeichnis	50
Anhang	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Untersuchung des technischen Verlängerungspotential von Anschlusslinien	2
Abbildung 2-1: Abgrenzung des Anschlussnetzes & TV-Kabel-Breitbandanschlussnetz	5
Abbildung 2-2: Exemplarische Darstellung der Abgrenzung von Anschlussbereichen (ASB) und Möglichkeiten der räumlichen Ausdehnung von Verzweiger und Anschlussbereichen	7
Abbildung 3-1: Vereinfachte Darstellung der Elemente einer Kommunikationsverbindung	8
Abbildung 3-2: Einflussfaktoren des Nebensprechens	12
Abbildung 3-3: Ungeschirmte und geschirmte Kupferdoppelader	13
Abbildung 3-4: Leistungs- / Reichweiteverhältnis bei kupferbasierten Übertragungstechnologien auf Basis von Labormessungen verschiedener xDSL Protokollen	14
Abbildung 3-5: Vergleichende Gegenüberstellung des Leistung-/ Reichweitenverhältnisses nach Übertragungstechnik	15
Abbildung 3-6: Exemplarische Darstellung der Kabeldämpfung, Spleißverlust und Steckerverlust	17
Abbildung 3-7: Gegenüberstellung von Kabel- bzw. Einfügedämpfungen (dB) (kumuliert) von Kupfer-, Koaxial- und Glasfaserkabeln bei 1, 100 und 1.000 Meter	25

Abbildung 3-8:	Huawei MA5600 DSLAM für ADSL+2 und VDSL2 (links) und Huawei DSLAM/ MSAN MA5800C für VDSL, Vectoring und SuperVectoring (rechts)	27
Abbildung 3-9:	„Stand-alone“ Anwendung von SFP-Modulen (optischen Transceiver) für die Verbindung von zwei Ethernet Switches über ein Singlemode-Faserkabel und Cat5e-Kabel	28
Abbildung 3-10:	Preis-/ Reichweiteverhältnis für SFP-Module 1G bis 10G (Singlemode-Kabel, LC Duplex Stecker, Wellenlängen zwischen 1310 nm und 1550 nm)	29
Abbildung 3-11:	SFP-Modul TX-Power, Empfängerempfindlichkeit und das Dämpfungsbudget	31
Abbildung 4-1:	TX-Power und Empfängerempfindlichkeit für einen 1G SFP-Modul 10 km	36
Abbildung 4-2:	Einhaltung des Dämpfungsbudgets eines 1G SFP-Moduls gemäß Herstellerangaben für die Überbrückung von 10 km	36
Abbildung 4-3:	Sensibilitätsanalyse 1G SFP-Modul – Überbrückung von 10 km mit Spleißarbeiten jede 4 km (Alternativszenario 1) und mit OS2-Singlemode (Alternativszenario 2)	38
Abbildung 4-4:	OLT (Optical Line Termination) und seine dazugehörige GPON OLT SFP Module	41
Abbildung 4-5:	Gegenüberstellung der „bottom-up“ berechneten Reichweiten für GPON-SFP Module der Klasse B+ (links) und C+ (rechts) nach Splittingverhältnissen	43
Abbildung 4-6:	GPON-Netzdesign, Dämpfung und Reichweite	44
Abbildung 5-1:	Darstellung der ASB-Erstreckungsergebnissen nach Netzarchitekturen	46
Abbildung 0-1:	„Hybrid Fibre Coax“ (HFC) Netze und „Node-Splitting“	60
Abbildung 0-2:	Gegenüberstellung aktiver Equipments in FTTC-, FTTB und FTTH-Netzarchitekturen	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	,Typische‘ und maximal zulässige Kabeldämpfung für Singlemode-Fasern	19
Tabelle 3-2:	,Typischer und maximal zulässiger Steckerverlust (dB) für optische Steckerverbindungen	21
Tabelle 3-3:	Spleißverlust (dB) beim Glasfaserkabel	22
Tabelle 3-4:	Splittingverlust (in dB) nach Splittingverhältnis	23
Tabelle 4-1:	Typische sowie standardisierte Dämpfungswerte für Singlemode-Faser	33
Tabelle 4-2:	,Bottom-up‘ Beispielrechnung des gesamten Leistungsverlusts (dB) für 1G SFP-Modul (Wellenlänge 1310 nm) bei einer vom Hersteller angegebenen Reichweite von 10 km für drei verschiedene Konstellationen von Dämpfungswerten	34
Tabelle 4-3:	Maximal erreichbare Entfernung (km) eines 1G-SFP-Modul unterschiedlicher Herstellerangaben (Reichweiten 10 bis 120 km) unter Berücksichtigung des verfügbaren Dämpfungsbudgets (dB) in verschiedenen bottom-up Szenarien	39
Tabelle 4-4:	Maximal erreichbare Entfernung (km) eines GPON OLT SFP-Modul (bidirektional, 2,5 Gbps in Download und 1,25 Gbps in Upload, Klasse B+) bei unterschiedlichen Splittingverhältnissen unter Berücksichtigung des verfügbaren Dämpfungsbudgets (dB) in verschiedenen bottom-up Szenarien	42
Tabelle 0-1:	Frequenz, Signalpegel, Datenratefähigkeit (,minimum bidirectional net data rate capability‘ MBDC), Knotenequipment und Strecke reiner kupferbasierten Übertragungstechniken bei Kupfernetzarchitekturen (FTTEx)	55
Tabelle 0-2:	Frequenz, Signalpegel, Datenratefähigkeit (MBDC bzw. ,aggregate net data-rate capability‘ ANDR), Knotenequipment und Strecke von kupferbasierten Übertragungstechniken bei hybriden Netzarchitekturen (FTTC und FTTS)	56
Tabelle 0-3:	Wellenlängen, ggf. Splittingverhältnisse, Knotenequipment und Strecke reiner glasfaserbasierten Übertragungstechniken bei Glasfasernetzarchitekturen (FTTH PtMP und FTTH PtP)	58
Tabelle 0-4:	Frequenzbereich, Teilnehmerkapazität und Strecke reiner koaxialbasierten Übertragungstechniken (DOCSIS 3.0)	59
Tabelle 0-5:	Frequenzbereich, Gesamtdatenrate, Fiber-Node-Kapazität und Strecke von koaxialkabelbasierten Übertragungstechniken bei hybriden ,Hybrid Fibre Coax‘ (HFC) Netzarchitekturen	61

Zusammenfassung

Für Zwecke der regulatorischen Kostenbestimmung wurde in der Vergangenheit die Abgrenzung der Anschlussbereiche im Netz des regulierten Unternehmens unter Anwendung des sogenannten ‚scorched-node‘ Ansatzes übernommen. Die Auslegung der bestehenden Anschlussbereiche ist letztlich den Anforderungen und Restriktionen des kupferbasierten Telefonnetzes geschuldet. Mit der Verfügbarkeit glasfaserbasierter Anslusstechologien haben sich die technischen Restriktionen hinsichtlich der Reichweite von Anschlusslinien relevant verändert. Der Einsatz der Glasfaser eröffnet die Möglichkeit, Anschlussnetze räumlich weiter auszudehnen, als dies in reinen Kupfernetzen möglich war.

Im Rahmen dieser Studie wird der Frage nachgegangen, von was für einer Leistungsfähigkeit bei glasfaserbasierten Anschlussnetztechnologien hinsichtlich der räumlichen Erstreckung heutzutage ausgegangen werden kann. Dabei werden die technischen Besonderheiten der Signalübertragung, Störung und Dämpfung in Abhängigkeit des eingesetzten Mediums – Kupferdoppelader oder Glasfaser vergleichend gegenüber gestellt und gezeigt, dass für glasfaserbasierte nahezu keine relevante Beschränkung hinsichtlich der Reichweite der Anschlusslinie bestehen. Unter ungünstigsten Bedingungen stellt eine Länge von 6 bis 10 km die Untergrenze für eine FTTH PtP Anschlusslinie dar. In der Regel liegt diese aber deutlich höher. Qualität von Spleißen und Steckern sowie der Einsatz leistungsfähiger SFP-Module sind dafür entscheidend.

Mit Blick auf die räumliche Abgrenzung von glasfaserbasierten Anschlussbereichen ist festzustellen, dass auch für hybride Lösungen eine deutliche Ausweitung aus technischer Sicht möglich ist. Unterschiede zwischen verschiedenen Glasfasertechnologien kommen lediglich bei PON-Architekturen im Vergleich zu FTTH PtP Ethernet Technologien zum Tragen. Aufgrund der relevanten Dämpfungseigenschaften von Splittern weisen PON-Architekturen im Vergleich eine deutlich geringere Reichweite auf. Je nach Auswahl des Splittingverhältnisses liegt die Erstreckungsmöglichkeit zwischen 7 und 55 km.

Ob sich aus diesen Zusammenhängen ein Credo für eine generelle Ausdehnung der räumlichen Erstreckung von Anschlussbereichen und damit Auflösung von Hauptverteilerstandorten des Kupfernetzes ableiten lässt, kann nicht allein auf Basis der technischen Zusammenhänge beantwortet werden. Dazu bedarf es einer weitergehenden ökonomische Analyse, die Gegenstand des WIK Diskussionsbeitrags Nr. 494 ist (Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen).

Summary

The application of a scorched node methodology has been common practice of National regulatory Authorities (NRAs) for the purposes of regulatory costing and pricing. According to this concept, the shape and demarcation of the SMP operator's access areas has been taken for granted by NRAs.

With the availability of fibre-based access network technologies, the technical restrictions regarding the range of length of access lines have changed significantly and open up the possibility of spatially enlarging access networks further than was possible in pure copper networks by deploying fibre optics.

In this study, we analyse the capabilities of fibre-based access network technologies with regard to spatial extension of individual access lines and thus spatial enlargement of access networks. The technical characteristics of signal transmission, interference and attenuation are compared depending on the medium used - copper twisted pair or fibre optics. It is shown that for both purely fibre-based and hybrid technologies there are almost no relevant limitations with regard to the range of access line lengths. Under the most unfavourable conditions, a length of 6 to 10 km represents the lower limit for an FTTH PtP access line. In general, however, this is significantly higher. The quality of splices and connectors as well as the use of high-performance SFP modules are decisive for this.

With regard to the spatial extension of fibre-based access networks from the end-user to the MPoP, a significant expansion of access areas is possible not only for fibre-only technologies but also for hybrid solutions. Differences between fibre optic technologies only come into play with PON architectures compared to FTTH PtP Ethernet technologies. Due to the relevant attenuation properties of splitters, PON architectures show a significantly shorter range of access line lengths in comparison. Depending on the selection of the splitting ratio, the possible range is between 7 and 55 km.

Although the findings confirm the technical capabilities of fibre base access networks regarding relevant spatial enlargement, we have to emphasise that there is a need for an examination of the economic interrelationships, in order to identify the limitations of the spatial extension of fibre based access areas. This is examined in the WIK-Discussion Paper 494 "Spatial Extension of Access Networks – an Economic Analysis".

1 Einführung

1.1 Hintergrund und Fragestellung

Für Zwecke der regulatorischen Kostenbestimmung wurde in der Vergangenheit die Abgrenzung der Anschlussbereiche (ASB) im Netz des regulierten Unternehmens übernommen. Diese Vorgehensweise ist im regulatorischen Kontext als sogenannter ‚scorched-node‘ Ansatz bekannt. Dabei werden sowohl die tatsächlichen MPoP (im Kupfernetz als HVt-Standorte bekannt)¹ als auch die Zuordnung der Endkundennachfrage dem jeweiligen MPoP für die Abgrenzung der Anschlussbereiche übernommen.

Die räumliche Erstreckung der Anschlussbereiche im Kupfernetz – und damit auch die Anzahl von ASB, die für eine Versorgung aller Endkunden erforderlich ist – hängt aus technischer Sicht von der Signalreichweite der Anschlusstechnologie ab. Beispielsweise hat die Signalübertragung auf den Kupferdoppeladern ohne Zwischenverstärkung nur über eine Reichweite von maximal ca. 7 km.² Diesen Restriktionen ist der Zuschnitt der bestehenden Anschlussnetze geschuldet.

Aufgrund der veränderten technischen Rahmenbedingungen wird davon ausgegangen, dass insbesondere Glasfaseranschlussnetze die Restriktionen aus der Kupferanschlusswelt überwinden können und zwar nicht nur mit Blick auf die erreichbaren Datenübertragungsraten, sondern auch in Bezug auf die räumliche Erstreckung.³ Aufgrund dieser Erwartungen wird im Kontext der regulatorischen Diskussion die These aufgestellt, dass bei der Kostenermittlung von entgeltgenehmigungspflichtigen Vorleistungen von Anschlussnetzen der ‚scorched-node‘ Ansatz aus der Welt der Kupfernetze fallen gelassen werden müsse. Die vergrößerte Reichweite der Signalübertragung in Glasfasernetzen könnte eine effizienzsteigernde Reduktion der Anzahl der Anschlussbereiche ermöglichen. Dem sei bei der regulatorischen Kostenmodellierung von ‚modernen effizienten NGA-Netzen⁴ Rechnung zu tragen.

Im Rahmen dieser Studie wird der Frage nachgegangen, von was für einer Leistungsfähigkeit bei glasfaserbasierten Anschlussnetztechnologien hinsichtlich der räumlichen Erstreckung heutzutage ausgegangen werden kann. Dabei sollen die Unterschiede zu kupferbasierten Anschlussnetztechnologien erläutert sowie herausgearbeitet werden, wie

¹ Der Begriff MPoP (Metropolitan Point of Presence) entstand im Kontext der zunehmenden Bedeutung von Next Generation Access (NGA) und dient als technologieneutrale Bezeichnung des Standortes für den Demarkationspunkt zwischen Anschlussnetz und Konzentrationsnetz.

² Plückebaum & Ockenfels (2020), S.7 und Plückebaum (2007). ‚Breitband - Ausbauphilosophie der Netzbetreiber im Wettbewerb‘. Vortrag auf der Tagung „Wie breit ist Breitband – Ist Breitband breit genug“ Eltville, Kloster Eberbach, 31. Mai – 1. Juli 2006 (S.4).

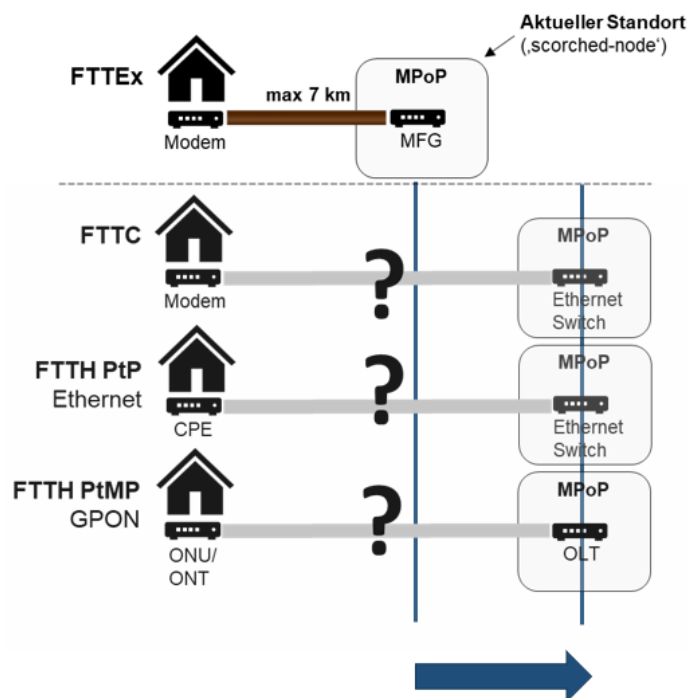
³ Insbesondere dann, wenn eine vollständige Neuauslegung der Anschlussnetze erfolgt und nicht auf bestehende Trassen- bzw. Leerrohrsystemen zur Installation der neuen Glasfaserkabel zurückgegriffen werden kann.

⁴ Europäische Kommission (2013). Empfehlung der Kommission über einheitliche Nichtdiskriminierungsverpflichtungen und Kostenrechnungsmethoden zur Förderung des Wettbewerbs und zur Verbesserung des Umfelds für Breitbandinvestitionen. 11. September 2013. (2013/4666EU).

sich die verschiedenen glasfaserbasierten Anschlussstechnologien hinsichtlich der erzielbaren Reichweite voneinander unterscheiden.

Die nachfolgende Abbildung 1-1 illustriert die Fragestellung: In welchem Umfang ist es durch den Einsatz von Glasfaser im Anschlussnetz möglich, die räumliche Erstreckung des Anschlussbereichs im Vergleich zum rein kupferbasierten Anschlussbereich (FTTEx, Fibre to the Exchange) zu vergrößern. Die in dieser Studie betrachteten Anschlussstechnologien umfassen dabei hybride Kupfer-Glasfaser-Technologien (FTTC, Fibre to the Curb, auf Basis von xDSL), sowie FTTH (Fibre to the Home) mit den beiden Realisierungsformen Punkt-zu-Punkt (PtP) mit Einsatz von Ethernet und Punkt-zu-Multipunkt (PtMP) als PON-Lösung.

Abbildung 1-1: Untersuchung des technischen Verlängerungspotential von Anschlusslinien



Quelle: WIK.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Um Erkenntnisse über die Reichweite von glasfaserbasierten Anschlussstechnologien zu gewinnen, wurde hauptsächlich auf Informationen zu technischen Spezifikationen zurückgegriffen, die aus Sekundärquellen und Herstellerinformationen stammen („Desk-Research“). Diese wurden durch Einschätzungen von WIK-Experten bzw. -Ingenieuren validiert und ergänzt.

Die Untersuchung ist wie folgt aufgebaut: im Kapitel 2 wird zunächst das Anschlussnetz und seine räumliche Erstreckung definiert und abgegrenzt. Im Kapitel 3 werden Konzepte und technische Zusammenhänge vorgestellt, die für das Verständnis der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen von Relevanz sind. Hierzu werden insbesondere technische Unterschiede zwischen Kupfer- und Glasfaserkabeln als Übertragungsmedium erläutert. Im Kapitel 4 werden maximale Reichweiten für glasfaserbasierte Anschlusstechnologien auf Basis unterschiedlicher Annahmen über die Qualität der verwendeten Netzkomponenten ‚bottom-up‘ ermittelt. Im Kapitel 5 werden unter Rückgriff auf die in Kapitel 4 analysierten Reichweiten Rückschlüsse auf die für die Anschlussbereichsbildung relevanten maximalen Erstreckung gezogen. Die Ergebnisse werden für die verschiedenen Anschlussnetztechnologien (FTTC, FTTH PtP, PtMP, etc.) vergleichend gegenübergestellt. Kapitel 6 fasst die erarbeiteten Erkenntnisse zusammen.

2 Untersuchungsgegenstand und Definitionen

2.1 Anschlussnetz

Das **Anschlussnetz**, auch ‚letzte Meile‘ genannt, ist der Abschnitt eines Telekommunikationsnetzes, der die Endkundenanschlüsse (Teilnehmeranschlussleitung, TAL) in der Fläche aggregiert und auf einen zentralen Knotenpunkt, den *Metropolitan-Point-of-Presence* (MPoP), zusammenführt.⁵ Der MPoP stellt den Demarkationspunkt zwischen dem Anschlussnetz und den Netzsegmenten höherer Ebenen dar (Verbindungsnetz). Mit der Wahl des MPoP als Demarkation zwischen Anschluss- und Verbindungsnetz wurde der regulatorischen Anforderung, Netzkosten für Anschluss- und Verbindungsnetze (nach Maßgabe der Kostentreiber) zu separieren, Rechnung getragen. Über die Anschlussleitung erfolgt dann der Anschluss des Nutzers an das dienstrealisierende Verbindungs-/Breitbandnetz.

In ihrer NGA-Empfehlung definiert die EU-Kommission den MPoP losgelöst von der Anschlussnetztechnologie:

„The "Metropolitan Point of Presence" (MPoP) means the point of inter-connection between the access and core networks of an NGA operator. It is equivalent to the Main Distribution Frame (MDF) in the case of the copper access network. All NGA subscribers' connections in a given area (usually a town or part of a town) are centralised to the MPoP on an Optical Distribution Frame (ODF). From the ODF, NGA loops are connected to the core network equipment of the NGA operator or of other operators, possibly via intermediate backhaul links where equipment is not collocated in the MPoP”

Die Gesamtheit der Anschlüsse, die an einen gemeinsamen Aggregationspunkt (MPoP) angebunden sind, konstituieren einen Anschlussbereich (ASB).

In einem Anschlussbereich (ASB) finden verschiedenste Anschlusstechnologien Anwendung:

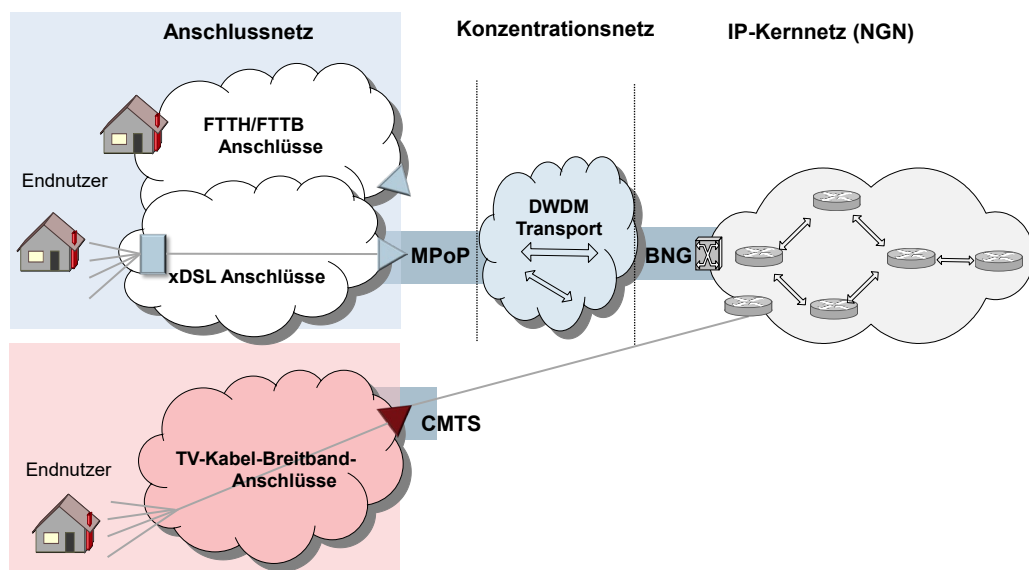
- kupferbasierte Technologien – FTTE_x (Fibre-to-the-Exchange)
- hybride Technologien – FTTC (Fibre-to-the-Curb) und FTTS (Fibre-to-the-Street)

⁵ Anstelle von HVt und/oder ODF wird der Begriff MPoP im vorliegenden Dokument im Sinne der MPoP-Definition in der NGA-Empfehlung vom 20.09.2010 (2010/572/EU) verwendet. Die Definition der Empfehlung lautet: ‚Hauptverteilerpunkt‘ (MPoP, Metropolitan Point of Presence) ist der Zusammenschaltungspunkt zwischen Zugangs- und Kernnetz eines NGA-Netzbetreibers. Er entspricht dem Hauptverteilerknoten in einem Kupferkabel-Zugangsnetz (Kulenkampff, G., Plückerbaum, T., Zoz, K., 2019. ‚Analytisches Kostenmodell für das Anschlussnetz AKM-AN Version 3.0. Referenzdokument. Studie für die Bundesnetzagentur‘, S. 16).

- glasfaserbasierte Technologien
 - FTTB (Fibre-to-the-Building)
 - FTTH (Fibre-to-the-Home), Fibre-to-the-Building mit den beiden Realisierungsformen Punkt-zu-Punkt (PtP) mit Einsatz von Ethernet und Punkt-zu-Multipunkt (PtMP) als PON-Lösung.

Das koaxialkabelbasierte TV-Kabelnetz, über das zunehmend neben TV auch Internet angeboten wird, stellt ein separates breitbandiges Anschlussnetz dar.⁶ Es setzt auf der Kabel-TV-Anschluss-Infrastruktur auf und ist damit im Anschlusssegment ein eigenständiges Netz mit eigener passiver Infrastruktur. Der netzseitige Abschlusspunkt („Cable Modem Termination System, CMTS) fällt daher nicht mit dem MPoP des klassischen TK-Netzes zusammen. Aufgrund der technischen Besonderheiten ist die Signalreichweite im koaxialkabelbasierten Netz auf etwa 400 m, weswegen diese Netze auf den Einsatz von Verstärkern angewiesen sind. Aus Sicht der räumlichen Erstreckung von ASB stehen daher TV-Kabelnetze nicht im Vordergrund dieser Studie und werden lediglich aus Vergleichsgründen in der Analyse mitberücksichtigt.

Abbildung 2-1: Abgrenzung des Anschlussnetzes & TV-Kabel- Breitbandanschlussnetz



Quelle: WIK.

⁶ Der koax-basierte Breitbandzugang ist als ein sog. „shared Medium“ zu charakterisieren. Bei Netzarchitekturen mit geteilten Kapazitäten, zu denen neben DOCSIS- auch die GPON-Familien zählen, muss für die Abschätzung der pro Anschluss zur Verfügung stehenden Datenübertragungsrate die Busy Hour Nachfrage in der Hauptverkehrszeit und der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Einschätzungen zufolge nehmen 20% aller angeschlossenen Kunden gleichzeitig das Netz in Anspruch. Plückerbaum et. al, (2019). Vorleistungsprodukte in Kabel-TV-Netzen, S.10. European Commission (2021). ‚Annexes to the Guidelines on State aid for broadband networks‘. Draft. https://competition-policy.ec.europa.eu/public-consultations/2021-broadband_en. Last accessed: 19.12.2022.

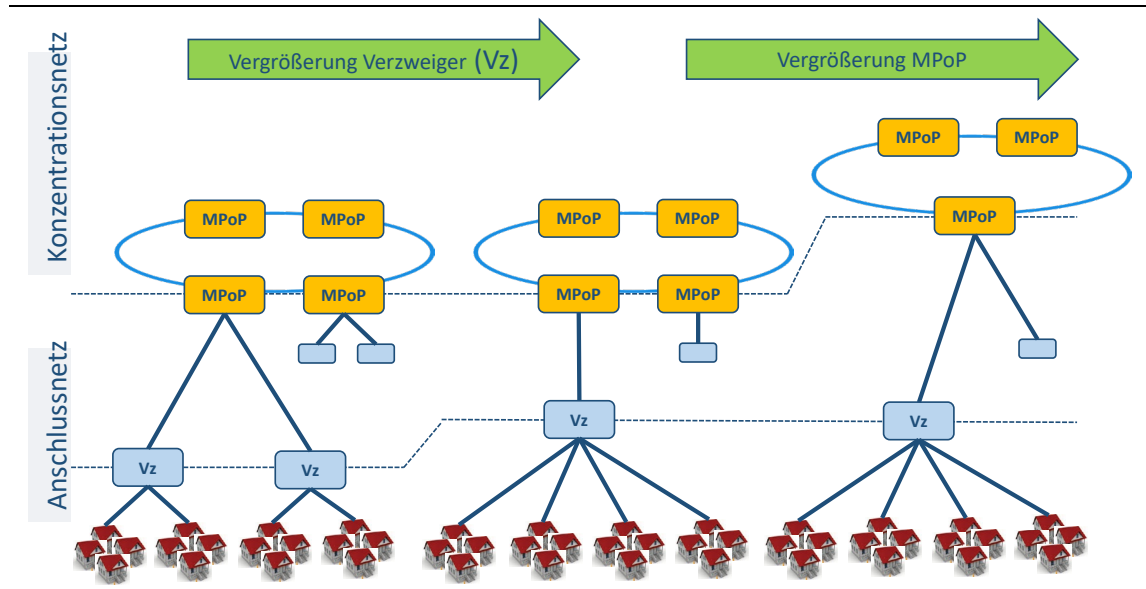
2.2 Räumliche Erstreckung

Die räumliche Erstreckung eines ASB wird durch die Reichweite der Anschlusslinie begrenzt. Sie bestimmt die maximale Kabellänge zwischen dem Standort des Teilnehmers und dem netzseitigen Abschlusspunkt des Anschlussnetzes am MPoP. Anschlussnetze entstehen für konkrete Besiedlungsstrukturen und damit Verteilungen der Anschlussnachfrage in der Fläche. Um die Endkunden an das Dienste erbringende Netz anzuschließen, werden die Anschlüsse in der Regel zweistufig konzentriert: zuerst am Verzweiger und im zweiten Schritt am MPoP. Die gesamte Länge der Anschlusslinie besteht somit aus Verzweigerkabellänge (Endkunde bis Verzweiger) sowie Hauptkabellänge (Verzweiger bis MPoP). In Abhängigkeit der jeweiligen technischen Restriktionen der Signalreichweite, ergeben sich unterschiedliche Restriktionen für die räumliche Gestaltung (Ausweitung) der Anschlussbereiche. Davon betroffen ist dabei nicht nur der einzelne Anschlussbereich, sondern in der Gesamtbetrachtung auch die insgesamt für die Versorgung aller Anschlüsse erforderliche Anzahl von Anschlussbereichen. Dieser Aspekt sind in der Abbildung 2-2 mit der Ausweitung sowohl von Verzweiger- als auch Anschlussbereichen durch den Einsatz von Glasfasertechnologie im Anschlussnetz illustriert.

Die hier in dieser Studie herausgearbeiteten technischen Leistungsmerkmale sollen Aufschluss darüber geben, welches Potential einer Vergrößerung (und damit räumlichen Ausdehnung) von Anschlussbereichen durch den Einsatz von glasfaserbasierten Technologien einhergeht. Dabei fokussieren wir auf die maximale Reichweite von Endverzweiger bis MPoP von glasfaserbasierten bzw. hybriden Anschlussnetzen und vergleichen diese mit der rein kupferbasierten Anschlusstechnologie.⁷

⁷ Es ist nicht Ziel dieser Kurzstudie, eine neu optimierte Abgrenzung aller Anschlussbereiche in Deutschland zu ermitteln, sondern die allgemeinen technisch maximalen Reichweiten abzuleiten, die nicht unter dem ‚scorched-node‘ sondern unter dem neuen Ansatz (‚scorched-earth‘ und seinen Randbedingungen) erreichbar wären. Mit der Frage der ökonomischen Bestimmungsfaktoren der räumlichen Ausweitung von Anschlussnetzen befasst sich der Diskussionsbeitrag Ockenfels, M., Kulenkampff, G. (2022): Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 494, Bad Honnef.

Abbildung 2-2: Exemplarische Darstellung der Abgrenzung von Anschlussbereichen (ASB) und Möglichkeiten der räumlichen Ausdehnung von Verzweiger und Anschlussbereichen



Quelle: WIK

3 Technische Grundlagen und Zusammenhänge

Die Ausdehnung eines ASB wird durch unterschiedliche technische Faktoren limitiert. Welche technischen Grundlagen liegen den limitierenden Faktoren zugrunde und wie stark schränken sie die Leistung und Reichweite von kupfer- und glasfaserbasierten Anschlussnetzen ein? Dies wird in den folgenden Abschnitten analysiert.

3.1 Allgemeine Konzepte

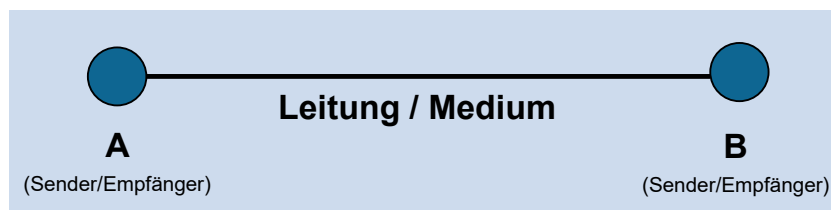
3.1.1 Leistungsfähigkeit und Reichweite einer Kommunikationsverbindung

Die Datenübertragungsrate und Reichweite, die auf einer Kommunikationsverbindung erzielt werden kann, hängt von der Kombination verschiedener technischer Faktoren ab. Vereinfacht lassen sich Kommunikationsverbindungen auf die folgenden Elemente reduzieren:

- Sender
- Empfänger
- Leitung / Übertragungsmedium

Die Leistungsfähigkeit ist grundsätzlich von der eingesetzten Technologie am Sender bzw. Empfänger⁸ und der Übertragungseigenschaft des eingesetzten Mediums abhängig (beispielsweise Kupfer- oder Glasfaserkabel mit bestimmten Längen, Durchmesser der Leiter, Beschaffenheiten, etc.). Die Übertragungstechnologie und das beanspruchte Übertragungsmedium sind in ihrer Funktionsweise technisch aufeinander abgestimmt. Aufgrund einer Vielzahl von Technologien und zugehöriger Einrichtungen (Sender und Empfänger) existieren verschiedenste Umsetzungsmöglichkeiten (Anschlusstechnologien).

Abbildung 3-1: Vereinfachte Darstellung der Elemente einer Kommunikationsverbindung



Quelle: WIK.

⁸ Um eine bidirektionale Kommunikation zu ermöglichen, muss ein Sender auch gleichzeitig immer Empfänger sein.

Übertragungsmedium. Für die Übertragung von Daten bildet das Übertragungsmedium die physische Verbindung zwischen zwei Enden (Empfänger/ Sender). Bei kabelgebundenen Übertragungsmedien können je nach Art des Kabels, der Länge und der Beschaffenheit verschiedenen Störfaktoren die Leistungsfähigkeit und damit die Reichweite und Qualität einer Anschlusslinie beschränken. Das Übertragungsmedium und die damit einhergehenden Störfaktoren bestimmen die theoretisch maximal erreichbare Datenübertragungsrate und Entfernung einer Kommunikationsverbindung.

Sender/Empfänger. Sender und Empfänger sind Kodierer und Dekodierer von zu übertragenden Signalen. Die Datenübertragungsrate und Entfernung, die tatsächlich erreicht werden, sind letztendlich von der Wahl der Anschlusstechnologie sowie von der Leistungsfähigkeit der zugehörigen technischen Einrichtungen (Sender und Empfänger) abhängig.⁹

3.1.2 Signal-Arten und Signalstärke

Das Signal transportiert Informationen zwischen Sender und Empfänger. Signale breiten sich in Wellen aus und unterscheiden sich in

- elektrische Signale (analog oder digital), die durch elektrische Spannung entstehen, und
- optische Signale (digital), die durch Licht bzw. Lichtfarben geschaffen werden.

Sie können sich ferner hinsichtlich ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge (und damit Eignung für eine breitbandige Datenübertragung) unterscheiden. Die technischen Zusammenhänge zwischen Frequenz, Wellenlänge und Datenübertragungsrate sind in der separaten Infobox dargestellt.

Die Signalstärke wird in Dezibel (dB) gemessen. Sie wird in negativen Zahlen ausgedrückt. Je größer der Wert ist, desto höher ist die Signalstärke (i.d.R. handelt es sich dabei um negative Werte).

⁹ FTTH Council (2013). White Paper: Broadband Access Technologies, S.8.

Infobox: Frequenz, Wellenlänge und Datenübertragungsraten

Die **Frequenz** ist die Anzahl von vollständigen Zyklen einer Welle pro Sekunde und wird in Hertz (Hz) gemessen. Ein Hertz ist ein vollständiger Zyklus pro Sekunde, d.h. je mehr Zyklen pro Sekunde, desto höher die Frequenz.

Die **Wellenlänge** ist der minimale Abstand von zwei benachbarten Punkten in einer Phase bei einer ausbreitenden Welle. Im Gegensatz zu Frequenz ist die Wellenlänge nicht eine zeitliche, sondern eine räumliche Größe und wird daher in Meter (m) bzw. Nanometer (nm) gemessen.

Beide Größen stehen durch folgende Umwandlungsformel zueinander in Verbindung (Messeinheit in Klammern):

$$\text{Wellenlänge (nm)} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit} \left(\frac{\text{nm}}{\text{s}} \right)}{\text{Frequenz} \left(\frac{1}{\text{s}} \right)}$$

Die **Datenübertragungsrate** ist die Datenmenge, die über ein Übertragungsmedium transportiert werden kann und wird in Bit gemessen. Die maximal erreichbare Bitrate (in bps) als Funktion der Breite eines Intervalls in einem Frequenzspektrum (Bandbreite in Hz) und des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR, engl. *Signal-to-Noise Ratio*) kann durch das ‚Shannon-Hartley-Theorem‘ ermittelt werden:

$$\text{Kapazität (bps)} = \text{Bandbreite (Hz)} * \log_2 \left(1 + \frac{\text{Signal (W)}}{\text{Rausch (W)}} \right)$$

Bei gegebener Frequenz bzw. Wellenlänge bestimmt die eingesetzte Übertragungstechnik die Datenübertragungsrate.

Vgl. Fluke (2022). [‘Was versteht man unter Frequenz?’](#) und FTTH Europe Council (2013). White Paper: Broadband Access Technologies, S.8.

3.1.3 Leitung, Widerstand und Signalverlust

Auf dem Weg von Sender zum Empfänger sind die übertragenen Signale dem elektrischen Widerstand auf Leitung ausgesetzt. Dies schwächt das Signal im Verlauf der Leitung ab. Bei Kupferleitungen wird der Widerstand als Leitungsimpedanz bezeichnet. Dieser Widerstand gegen Wechselspannung dämpft die Amplitude des Ausgangssignals.¹⁰ Je länger die Leitung und je höher die Signalfrequenz, desto stärker ist der Widerstand einer Kupferleitung. Bei Glasfaserleitungen ist der Wellenwiderstand nicht abhängig von der Frequenz.

Auf der Leitung können zusätzlich noch weitere Signalverluste aus verschiedenen Ursachen entstehen. Hierbei sind zwei relevante Verlustmaße voneinander zu unterscheiden:

- **Einfügedämpfung** (engl. *insertion loss*) ist der Signalverlust, der durch die Verbindung von zwei Kabeln am Verbindungspunkt auftritt (beispielsweise durch

¹⁰ Kupfer hat einen spezifischen Widerstand von 0,0171 Ohm mm²/m (daher Abhängigkeit vom Querschnitt).

Stecker oder Spleißen, oder durch den Einsatz von Splittern). Je kleiner der Wert (in dB) der Einfügedämpfung, desto geringer der Signalverlust.¹¹

- **Rückflusdämpfung** (engl. *return loss*) misst die Menge an Leistung (Energie bzw. Licht), die eingespeist wird, im Vergleich zur Menge, die zurückreflektiert wird,¹² d.h. die Signale, die beim Empfänger ankommen, und nicht in Richtung Sender zurückreflektiert sind. Daher gilt, je höher der Wert (in dB) der Rückflusdämpfung, desto besser ist die Leistung.

3.2 Besonderheiten von Kupferleitungen

Als Übertragungsmedium sind Kupferleitungen ausschließlich für die Übertragung elektrischer Signale geeignet. Die Übertragung von elektrischen Signalen kann auf verschiedenen Frequenzbereichen erfolgen. Mit höheren Frequenzen können höhere Bitraten erreicht werden.

Die physikalische Struktur des Kupferkabels beeinflusst sowohl ihre Übertragungsfähigkeit als auch ihre Signalqualität. In dieser Hinsicht können sich Kupferkabel nach den folgenden Merkmalen unterscheiden:

- Länge
- Querschnitt¹³
- Verdrillung der Doppeladern
- Isolierung der Drähte
- Art der Schirmung

Sie sind außerdem empfindlich gegenüber externen physikalischen Faktoren:

- Feuchtigkeit
- hohe Temperaturen
- elektromagnetische Störungen

Für die Bestimmung der Leitungsqualität von Kupferkabeln und die damit einhergehende Leistungsfähigkeit und Reichweite ist die Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen von wesentlicher Bedeutung.

¹¹ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 140.

¹² Fluke Networks (2011). Insertion Loss: General, 101 learning, Installation and testing, August 25, 2021. <https://www.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/cable-testing-101-insertion-loss-matters-fiber-and-copper>. Zuletzt besucht: 24.08.2022

¹³ Auch der Wechsel von Querschnitten der Kabelanbindung über verschiedene Kabelsegmente der Anschlussleitung

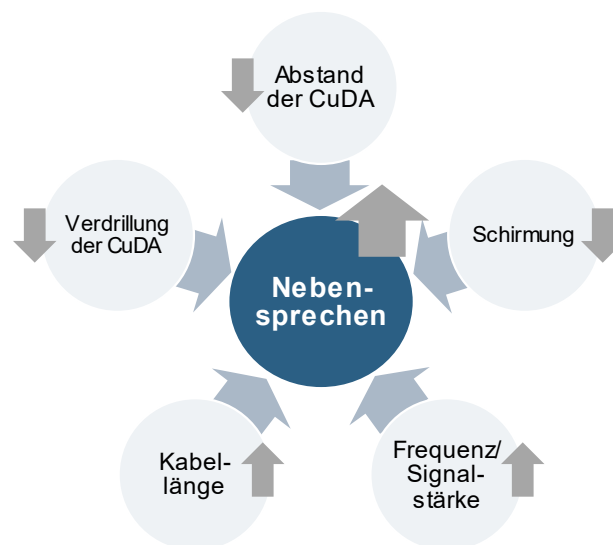
3.2.1 Nebensprechen (elektromagnetische Störungen)

Bei der Übertragung von elektrischen Signalen auf Kupferkabel werden elektromagnetische Felder um die Doppeladler herum erzeugt. Die als Antennen wirkenden Doppeladern stören sich dann gegenseitig. Dieser unerwünschte elektromagnetische Effekt wird als Nebensprechen bezeichnet.

Nebensprechen mindert die Signalqualität und führt zu Beschädigungen der zu übertragenden Daten bzw. zu Verlust. Nebensprechen ist umso wahrscheinlicher oder größer

- je dichter die Kupferdoppelader beieinander liegen,
- je schlechter die Kupferdoppelader verdrillt sind,
- je länger die Kupferdoppelader parallel verlaufen, und
- je höher der Frequenzbereich und die ursprüngliche Signalspannung ist (siehe Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Einflussfaktoren des Nebensprechens



Quelle: WIK.

Die Stärke des Nebensprechens, die ebenfalls in Dezibel (dB) angegeben wird, ist als das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangssignal definiert. Deshalb zeichnet sich eine gute Signalqualität durch höhere dB-Werte beim Nebensprechen aus. Allerdings ist Nebensprechen keine Dämpfung, da das Nebensprechen das eigentliche Signal stört (und nicht abschwächt) und somit von der Dämpfung zu unterscheiden ist.

Grundsätzlich ist es möglich, die Störempfindlichkeit von Kupferdoppeladern gegenüber elektromagnetischen Interferenzen zu reduzieren, indem die Kupferdoppeladern

abgeschirmt werden.¹⁴ Kupferkabel mit Abschirmung werden als STP-Kupferkabel und ohne Abschirmung als UTP-Kupferkabel bezeichnet.

UTP-Kupferkabel (engl. *unshielded Twisted Pair*) sind ungeschirmte Kupferdoppeladern, auf der die elektromagnetische Abstrahlung die Umgebung stören kann. Daraus wird das Nebensprechen in die benachbart im selben Kabel liegenden anderen Doppeladern induziert. Alle Doppeladern eines Kabels wirken somit aufeinander ein.

STP-Kupferkabel (engl. *shielded Twisted Pair*) sind geschirmte Doppeladerpaare, die die unerwünschten elektromagnetischen Effekte verhindern. Sie sind allerdings deutlich dicker und teurer als UTP-Kupferkabel.¹⁵

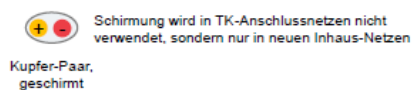
Die kupferbasierten Anschlussnetze sind herkömmlich mit UTP-Kabeln ausgebaut worden, nicht zuletzt, weil die Relevanz des Nebensprechens im reinen Telefonnetz und den dabei verwendeten Frequenzen eine untergeordnete Rolle gespielt hat. Vereinzelt kommen STP-Kabel für die gebäudeinterne Verkabelung zum Einsatz. Dort aber auch nur vereinzelt, hauptsächlich bei Geschäftskunden.

Abbildung 3-3: Ungeschirmte und geschirmte Kupferdoppelader

- Das elektromagnetische Feld zwischen den Leitern induziert gleichzeitig ein (Stör-)Signal in den benachbarten Leitern, abhängig von der Frequenz, der Signalstärke und dem Abstand, ...



- Schirmung begrenzt das elektromagnetische Feld auf den Bereich innerhalb des Schirmes



Quelle: Plückebaum et al (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. S.2.

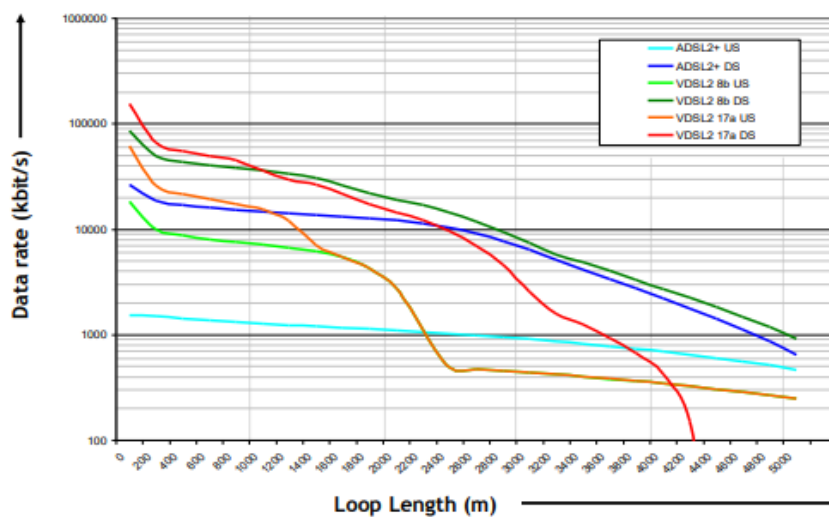
¹⁴ Sheldon (2022). 'Twisted-Pair-Kabel – Alle wichtige Informationen'. FS Deutschland. <https://community.fs.com/de/blog/twisted-pair-cables-everything-you-need-to-know.html>. Zuletzt besucht: 16.12.2022

¹⁵ Plückebaum et al (2019). 'Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS'. Studie für die Bundesnetzagentur. S.2.

3.2.2 Leistungs-/ Reichweiteverhältnis – xDSL Technologien

Die Datenübertragungsrate, die auf Kupferleitungen erreicht werden können, ist im Wesentlichen abhängig vom Übertragungsprotokoll, von der Frequenz und von der Stärke der auf die Leitung einwirkenden Störfaktoren. Je größer die Frequenz (und länger die Strecke, auf welcher diese Störung wirken kann), desto größer ist der störende Effekt auf die Signalqualität. Daher können bei hohen Datenübertragungsraten über kupferbasierte Leitungen nur geringe Reichweiten erzielt werden.

Abbildung 3-4: Leistungs- / Reichweiteverhältnis bei kupferbasierten Übertragungstechnologien auf Basis von Labormessungen verschiedener xDSL Protokollen



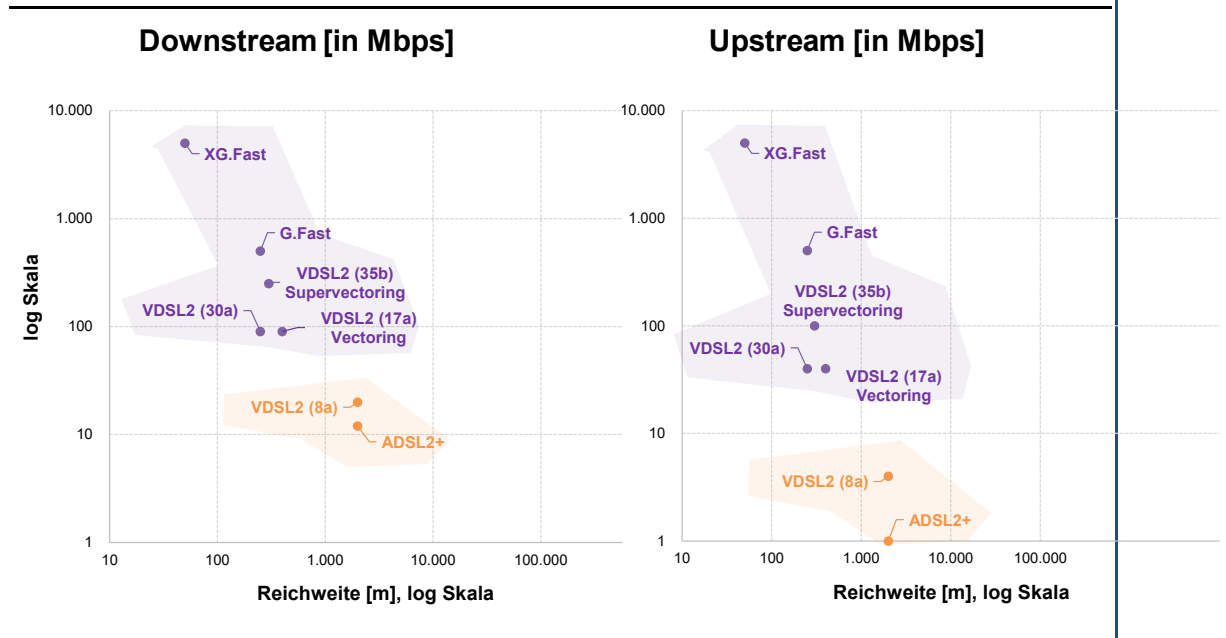
Quelle: Wulf, A. H. (2007). 'VDSL Access Options, Alcatel Lucent, WIK VDSL Conference, Königswinter, March 2007

Infobox: Dämpfung-, Reichweite- und Leistungsverhältnis

Bei gegebener Datenübertragungsrate kann mit zunehmender Dämpfung nur eine kleinere Entfernung überbrückt werden. In dämpfungsreichen Szenarien deutet dies auf einem signifikanten *Trade-off* zwischen Reichweite und Leistung hin. Im vorherigen Abschnitt (siehe Abbildung 3-7) wurde dargestellt, wie hoch die Dämpfung nach Übertragungsmedium ist und wie schwer sie sich auf die Reichweite-/ Leistungsverhältnis auswirkt.

Bei Anschlusstechnologien, die auf UTP-Kupferkabel abstellen, lässt sich dieser *Trade-off* deutlich spüren. Die Abbildung 3-5 stellt die Leistungs- / Reichweiteverhältnis (log-Skala) nach Berücksichtigung von Störfaktoren unter Laborbedingungen dar:

Abbildung 3-5: Vergleichende Gegenüberstellung des Leistungs-/ Reichweitenverhältnisses nach Übertragungstechnik



: Vgl. hierzu Wulf (2007): DSL-Daten auf Basis von Laborwerten für einen Kabeldurchmesser von 0,5 mm mit Störern. Für VDSL Vectoring entsprechen die Bandbreiten den Labormessungen der Swisscom auf einem 400-paarigen Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 0,4 mm, Papier isoliert und mit einer Länge von 500 m (Plückebaum, 2013: VDSL Vectoring, Bonding, Phantomring, S.9-11). Laborwerten sind von empirischen Beobachtungen zu unterscheiden.

3.3 Besonderheiten von Glasfaserleitungen

Die Glasfaser ist ein Lichtleiter, der Lichtimpulse weiterleitet. Lichtimpulse werden von Lasern oder anderen optischen Quellen erzeugt, die dann über die Glasfaser zu einem empfangenden Sensor oder Detektor transportiert werden.¹⁶ Daher werden Glasfasern ausschließlich für die Übertragung optischer Signale über Wellenlängen verwendet. Jede Wellenlänge repräsentiert dabei eine Farbe.

Lichtimpulse bzw. optische Signale im Glasfaserkabel sind anders als Kupferkabel völlig unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen (Nebensprechen) oder Feuchtigkeit.

Die Leistungsfähigkeit eines Glasfaserkabels wird durch seine physikalische Struktur bestimmt. Es gibt unterschiedliche Arten von Glasfaserkabeln, die sich nach ihrem Querschnitt und Material unterscheiden (siehe Infobox ‚Single- und Glasfasermode‘). Bei der Glasfaser sind folgende Zusammenhänge zu beachten: Je größer der Querschnitt (Durchmesser), desto größer ist die Signaldämpfung aus dem Wellenwiderstand. Ebenfalls sind Glasfasern hinsichtlich ihres Materials und ihrer Eignung für die zu übertragenden Wellenlängen zu unterscheiden.

Infobox:	Single- und Multifasermode
<p>Singlemode Fasern haben einen kleinen Glasfaserkern (9 µm). Dies ermöglicht geringe Übertragungsdämpfung und wird deshalb über lange Distanzen verwendet.</p>	
<p>Multimode Fasern haben dagegen einen größeren Kerndurchmesser (50 µm) und können mehr Daten übertragen. Da hierdurch mehr Lichtbrechung stattfindet, entstehen größere Dämpfungswerte. Sie werden deshalb eher in Backbones und Local Area Networks (LAN) in Gebäuden eingesetzt.</p>	
<p><small>Vgl. CBO GmbH. 2016, ‚Was ist der Unterschied zwischen Multimode und Singlemode Fasern?‘ 08.11.2016. https://www.cbo-it.de/de/blog/lwl-patchkabel/was-ist-der-unterschied-zwischen-multimode-fasern-und-singlemode-fasern.html und FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 128.</small></p>	

Im Gegensatz zu Kupferkabeln sind Glasfasern gegenüber Biegung / Knick und Zug empfindlich. Bei starker Biegung geht ein Teil des Lichts verloren (Dämpfung). Eine Zugbelastung auf Glasfasern kann zu Dehnungen bzw. Rissen führen, die ebenfalls die Weiterleitung des Lichts stören.

Glasfaserkabel sind dünner als Kupferkabel und erlauben größere Längen auf der Trommel im Vergleich zu Kupferkabeln. Außerdem sind Glasfaserkabel so konfiguriert, dass

¹⁶ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 127.

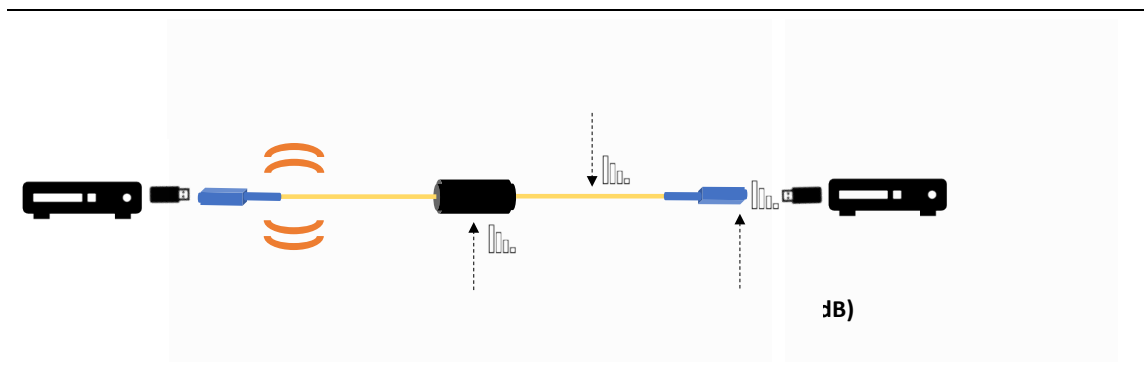
sie eingeblasen werden können. Die größeren Längen auf der Trommel sowie die Möglichkeit des kaskadierten Einblasens reduzieren Spleißerfordernisse bei Glasfaserkabeln.

3.4 Dämpfung und Signalverlust

Das übertragene Signal wird sowohl auf Kupfer- als auch Glasfaserleitungen aus unterschiedlichen Quellen, Intensitäten und mit unterschiedlichen Häufigkeiten abgeschwächt. Dabei ist die Anfälligkeit gegenüber den verschiedenen Dämpfungs- und Signalverlust-Ursachen für Kupferleitungen und Glasfaserleitungen unterschiedlich.

Grundsätzlich gilt, dass das Signal entlang der Leitung aufgrund ihres Widerstands stetig verloren geht (Kabeldämpfung).¹⁷ Darüber hinaus kommt es an konkreten Verbindungspunkten auf der Leitung zu unterschiedlich starken Signalverlusten, die aufgrund von Spleißarbeiten (Spleißverlust), Steckerverbindern (Steckerverlust) und, falls erforderlich, durch den Einsatz von Splitttern (Splitterverlust) entstehen. Diese Verbindungspunkte werden exemplarisch in Abbildung 3-6 dargestellt.

Abbildung 3-6: Exemplarische Darstellung der Kabeldämpfung, Spleißverlust und Steckerverlust



Quelle: WIK.

Die Intensität der Störung bzw. Signaldämpfung wird in Dezibel (dB) gemessen. Dezibel ist ein logarithmischer und relativer Wert. Je höher das Verhältnis des Eingangssignals zum Ausgangssignal, desto größer ist der Dämpfungswert (in dB). Beispielsweise entsprechen 3 dB Dämpfung bereits einer Leistungsreduzierung von 50%. Diese Leistung reduziert sich um weitere 50% jede 3 dB Dämpfung.

Die maximal zulässigen Dämpfungswerte variieren nicht nur je Übertragungsmedium, sondern auch je Kabel- und Steckertyp. Die ISO/IEC 11801 legt für sie Kategorien nach ihrer Leistungsfähigkeit fest, beispielsweise Cat5 bis Cat8 für UTP bzw. STP -Kupferkabel, und OS1 und OS2 (Singlemode) oder OM1 bis OM5 (Multimode) für Glasfaserkabel. Multimode- und Singlemode Glasfaserkabel werden ferner von ITU-T in sieben ITU-T

¹⁷ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 128.

Normen (von ITU-T G.651 bis ITU-T G.657) nach ihrer Übertragungseigenschaften unterschieden.¹⁸

3.4.1.1 Kabeldämpfung

Die Kabeldämpfung schwächt das vom Kabel übertragene Signal über die Entfernung ab. Sie wird in Dezibel pro Kilometer (dB/km) ausgedrückt, und ist auch als ‚Dämpfungskoeffizient‘ oder Dämpfungsrate bekannt.¹⁹

Kupferkabel. Bei ungeschirmten Kupferkabeln (UTP) nimmt die Kabeldämpfung mit höheren Frequenzen zu. Die hohen Frequenzen, die zur Übertragung höherer Bitraten benötigt werden, werden durch die Kupferdoppeladern bereits über kurze Entfernungen stark gedämpft. Daher sind höhere Geschwindigkeiten nur über kurze Kabellängen möglich. Haushalte, die über längere UTP-Kabel angeschlossen werden, können nicht auf die höheren Geschwindigkeiten zugreifen.²⁰

Die ISO-Norm legt für eines der meistverbreiteten UTP-Kupferkabel Cat5e, welches für bei 100 MHz bei einer Entfernung bis 100 Meter konfektioniert ist, eine maximale Dämpfung in Höhe von 24 dB fest.²¹ Dieser Dämpfungswert wurde auch auf Basis von Untersuchungen der Technischen Universität München (TUM) im Netz der Deutschen Telekom bestätigt (siehe Infobox).

Infobox: Kupferkabel Dämpfungskoeffizient (dB/km)

Die TUM hat bei einem Leitungsdurchmesser von 0,4 mm folgende Dämpfungsfunktion auf Basis empirischer Untersuchungen im Netz der Deutschen Telekom abgeleitet:

$$\alpha(f) = [5,1 + 14,3 \times f^{0,59}] \text{ dB / km}$$

$\alpha(f)$ steigt näherungsweise proportional mit der Wurzel der Frequenz an. Beispielsweise bei einer Frequenz von 100 MHz beträgt die Dämpfung 222 dB /km, umgerechnet auf 100 Meter sind das 22 dB.

Vgl. Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Nachrichtentechnik (LNT) (2019) Beispiele von Nachrichtensystemen. Abschnitt: 2.4 Verfahren zur Senkung der Bitfehlerrate bei DSL. https://www.intwww.de/Beispiele_von_Nachrichtensystemen/Verfahren_zur_Senkung_der_Bitfehlerrate_bei_DSL. Diese Seite wurde zuletzt am 7. August 2019 um 11:19 Uhr bearbeitet. Zuletzt besucht: 16.08.2022.

¹⁸ Die ITU-T G.652 Fasern erfüllen Anforderungen von FTTH-Anwendungen und reichen für die meisten Netzen aus (FTTH Council Europe, 2017. FTTH Handbook, S. 128; und Worton, 2022. ‚ITU-T-Normen für verschiedene optische Fasern‘. Aktualisiert am 07.06.2022. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/itu-t-standards-for-various-optical-fibers.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022).

¹⁹ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 128

²⁰ FTTH Council (2013). ‚White Paper: Broadband Access Technologies‘, S.9.

²¹ Industrial Solutions GmbH (2022). ‚Dämpfung‘. <https://www.indu-sol.com/support/glossar/daempfungsmass/>. Zuletzt besucht: 07.09.2022 und John (2021). Cat5/5e, Cat6/6a, Cat7 and Cat8 Cable Buying Guide‘. Aktualisiert am 01.11.2021. FS Community. <https://community.fs.com/blog/quick-view-ethernet-cables-cat5-cat5e-and-cat6.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022

Leistungsfähigere Kupferkabel (Cat6 bis Cat8) sind in geschirmten Varianten vorhanden und für viel kürzere Strecken, typischerweise im Gebäude, gedacht (15 bis 100 Meter).²²

Glasfaser. Selbst bei Anwendung von sehr reinen Materialien geht die Leistung über die Entfernung durch Streuung und Absorption innerhalb der Faser verloren.²³ Die Kabeldämpfung begrenzt die Distanz, die die Lichtpulse zurücklegen können. Allerdings fällt die Kabeldämpfung bei Singlemode-Fasern im Vergleich zum Kupferkabel vernachlässigbar gering aus. Aus Messungen geht hervor, dass sie im Durchschnitt zwischen 0,20 und 0,35 dB/km liegt (sog. ‚typische‘ Bedingungen, siehe Tabelle 3-1). Die von der ITU vorgegebenen Standards, die bei der Herstellung der Glasfaserkabel Beachtung finden, sehen maximal zulässige Dämpfungswerte zwischen 0,3 und 0,4 dB/km für OS2-Kabel und 1,0 dB/km für OS1-Kabel vor (siehe Tabelle 3-1, Spalte „Nomen (ITU-T)“). Gegenüber dem Kupferkabel, das eine Kabeldämpfung in Höhe von 222 dB/km bei 100 MHz aufweist (siehe Infobox), sind das sehr niedrige Dämpfungswerte.

Tabelle 3-1: ‚Typische‘ und maximal zulässige Kabeldämpfung für Singlemode-Fasern

	‚typischer‘ Wert	Standards (ITU-T)
	Ø	max. zulässig
Kabeldämpfung [dB/km]	1310 nm: ~0,35 1490 nm: ~0,27 1550 nm: ~0,20	OS1: 1,0 OS2 (1310 nm): 0,4 OS2 (1550 nm): 0,3

Quelle: CBO GmbH (2021). ‚OS1 vs. OS2 -Welches ist besser?‘ 14.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/os1-vs-os2-welches-ist-besser.html> für die maximal zulässigen Kabeldämpfungen nach ITU-T G.652A/B/C/D (OS1) und G.652C/D (OS2); EXFO (2012). ‚FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen‘, 5. Ausgabe, S.23 für die typischen Kabeldämpfungen (Faser G.652C).

3.4.1.2 Steckerverlust

Der Steckerverlust ist der Verlust an Signalstärke, der beim Steckerübergang entsteht. Zu einem wird das Signal durch den Übergang abgeschwächt (sogenannte ‚Einfügedämpfung‘). Zum anderen wird es zurückreflektiert (sogenannte ‚Rückflussdämpfung‘). Diese Dämpfungen werden in dB gemessen. Der auf einer Verbindung relevante Steckerverlust hängt letztlich nicht von der Länge der Verbindung ab, sondern davon, wie oft Steckerverbindungen zum Einsatz kommen.²⁴

²² Industrial Solutions GmbH (2022). ‚Dämpfung‘. <https://www.indu-sol.com/support/glossar/daempfungsmass/>. Zuletzt besucht: 07.09.2022 und John (2021). ‚Cat5/5e, Cat6/6a, Cat7 and Cat8 Cable Buying Guide‘. Aktualisiert am 01.11.2021. FS Community. <https://community.fs.com/blog/quick-view-ethernet-cables-cat5-cat5e-and-cat6.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022

²³ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 128

²⁴ Anschlussnetze mit hoher Flexibilität verfügen über Kabel- bzw. Faserverteiler mit Patchpanels für jede Teilnehmergruppe. Der Patchpanel verbindet die Kabel bzw. Faser durch Steckverbinder, der die

Kupferkabel. Bei ungeschirmten Kupferkabeln ändert sich der Signalverlust mit der Frequenz des Signals. Die ISO/EC stellt daher die Einfüge- und Rückflusdämpfung als Funktion der Frequenz (f) dar (siehe Infobox).

Infobox: Steckerverlust (dB) als Funktion der Frequenz	
Einfügedämpfung	
Steckverbindungskategorie	Dämpfung [dB]
Kategorie 5 (bis 100 MHz)	$0,04\sqrt{f}$
Kategorie 6 und 7 (bis 600 MHz)	$0,02\sqrt{f}$
Rückflusdämpfung	
Steckverbindungskategorie	Dämpfung [dB]
Kategorie 5 (bis 100 MHz)	$60 - 20 \log(f)$
Kategorie 6 (bis 250 MHz)	$64 - 20 \log(f)$
Kategorie 7 (bis 600 MHz)	$68 - 20 \log(f)$
: Vgl. ISO/EC (2002) International Standard: ISO/IEC 11801. Information technology – Generic cabling for customer premises, Second Edition. 2002-09, Tabelle 31, S.68	

Alle Steckverbindungskategorien haben eine abnehmende Steigerung der Einfügedämpfung mit zunehmender Frequenz., d.h. der Anstieg der Dämpfung ist überproportional bei kleineren Frequenzen und unterproportional bei höheren Frequenzen. Zugleich verschlechtert sich (sinkt) die Rückflusdämpfung ebenfalls abnehmend mit zunehmender Frequenz. Beispielsweise beläuft sich die Einfügedämpfung 0,4 dB bei den oft verwendeten Steckverbindungen der Kategorie 5 und einer Frequenz von 100 MHz, die Rückflusdämpfung beträgt dabei 20 dB.

Glasfaser. Der Steckerverlust bei Glasfasern hängt von der Art der Stecker ab: Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Steckverbinder mit unterschiedlicher Passgenauigkeit hinsichtlich der zusammenzufügenden Fasern. Diese bestimmt maßgeblich die Dämpfungseigenschaften. Es gibt z.B. PC-Stecker (engl. *Physical Contact*), UPC (engl. *Ultra-Physical Contact*) oder APC-Stecker (engl. *Angled Physical Contact*).²⁵ Letztlich hängt die Qualität davon ab, wie gut die mit dem Stecker verbundenen Fasern aufeinanderpassen (Schrägschliff vs. Kugelschliff). Ein weiter wesentlicher Einflussfaktor ist der Konfektionierungsmodus. Werkskonfektionierte Singlemode-Steckverbinder zeigen Verluste im

Aktivierung bzw. Deaktivierung von Teilnehmern bei Bedarf ermöglicht. Anschlussnetze mit geringer Flexibilität haben dagegen Kabel bzw. Fasern, die vom Anfang bis Ende gespleißt sind (FTTH Council Europe, 2017, FTTH Handbook, S. 151-152).

²⁵ Worton (2020). 'Grundlegendes zu Glasfaserstecker-Typen'. Aktualisiert am 22.07.2020. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/understanding-fiber-optic-connector-types.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022.

Bereich von 0,1–0,2 dB, während feldkonfektionierte Steckverbinder höhere Verluste (von bis zu 0,2–1,0 dB) haben.²⁶

Allgemein weisen von Cisco veröffentlichte Durchschnittswerte auf einen Steckerverlust zwischen 0,35 und 0,60 dB hin (siehe Tabelle 3-2, ‚typischer‘ Wert). Das ist mit dem Steckerverlust für UTP-Kupferkabeln vergleichbar. Obergrenzen für den Steckerverlust sind von der International Electrotechnical Commission (IEC), einem Normungsgremium, definiert, welches verschiedene Qualitätsklassen von Verbindungselementen etabliert hat. Für jede Qualitätsklasse werden von der IEC Dämpfungsgrenzwerte festgelegt (siehe Tabelle 3-2). Die maximal zulässige Einfügedämpfung beim schlechtesten Steckerverbinder (Grade D) darf den Grenzwert von 1,0 dB nicht übersteigen.

Tabelle 3-2: ‚Typischer und maximal zulässiger Steckerverlust (dB) für optische Steckerverbindungen

	‚typischer‘ Wert	Standards (IEC 61300)
	∅	max. zulässig
Einfügedämpfung [dB]	1310 nm: ~0,60 1550 nm: ~0,35	Grade A: ≤ 0,15 Grade B: ≤ 0,25 Grade C: ≤ 0,50 Grade D: ≤ 1,0
Rückflussdämpfung [dB]	PC-Stecker: 45-50 UPC-Stecker: 50-55 APC-Stecker: 60-90	Grade 1: ≥ 60 Grade 2: ≥ 45 Grade 3: ≥ 35 Grade 4: ≥ 26

Quelle: WIK auf Basis von Cisco (2005). ‚Berechnung der maximalen Hop-Distanzen für 15454 Glasfaserverbindungen‘. https://www.cisco.com/c/de_de/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-platform-mspp/19762-max-hop-19762.html für die ‚typischen‘ Einfügedämpfungen und FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 140-145 für die ‚typischen‘ Rückflussdämpfungen und Grenzwerten der IEC-61300 Qualitätsklassen und CBO GmbH (2021). ‚APC vs. PC vs. UPC - Wo liegt der Unterschied?‘ 18.01.2021. <https://www.cbo.it/de/de/blog/apc-vs-pc-vs-upc-wo-liegt-der-unterschied.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022 für UPC-Stecker.

3.4.1.3 Spleißverlust

Durch Spleißen werden Enden von Adern oder Fasern miteinander verbunden. Dies ist immer notwendig, wenn die zur Verfügung stehende Länge von Kabeln nicht hinreichend ist, um die vorgesehene Distanz zu überbrücken. Aber auch bei jeder anderen Notwendigkeit, Adern bzw. Fasern eines Kabels mit denen eines anderen zu verbinden.

²⁶ Versitron, Inc. (2022). White Paper: Tips on How to Calculate Fiber Loss in a Network. [How to Calculate and Reduce Fiber Optic Loss in a Network | Versitron](https://www.versitron.com/white-paper/tips-on-how-to-calculate-fiber-loss-in-a-network/). Zuletzt besucht: 20.12.2022.

Kupferkabel. Im Gegensatz zur erforderlichen Feinarbeit bei Glasfasern sind Spleißverluste beim UTP-Kupferkabel vernachlässigbar.

Glasfaserkabel. Optische Fasern haben i.d.R. eine maximale Länge von ca. 4 km. Bei der Durchführung von Spleißen soll möglichst sichergestellt werden, dass das Lichtsignal, das durch die Spleißstelle geleitet wird, in seiner Güte weitestgehend unbeeinträchtigt bleibt.²⁷ Die wichtigsten Spleißtechniken, die in Glasfaserkabelnetzen verwendet werden, sind Mechanischer- und Fusionspleiß (Schmelzpleißen). Mechanisches Spleißen verwendet Steckersätze an den Faserenden, während beim Schmelzpleißen die Faserenden direkt miteinander verbunden werden. Durch Schmelzpleiß liegt die in der Praxis beobachtete Einfügedämpfung mittlerweile bei sehr niedrigen Werten (unter 0,05 dB, siehe Tabelle 3-3, ‚typischer Wert‘). Im Vergleich dazu liegt die Einfügedämpfung für einen mechanischen Spleiß deutlich höher. Hier wird ein Grenzwert von unter 0,5 dB aus der Praxis genannt (siehe ebenfalls Tabelle 3-3, ‚typischer‘ Wert). Allgemein ist die Beobachtung, dass im ‚typischen‘ Fall die Einfügedämpfung aus Spleißarbeiten nicht mehr als 0,10 dB beträgt.²⁸

Tabelle 3-3: Spleißverlust (dB) beim Glasfaserkabel

	‚typischer‘ Wert	Standards
	∅	max. zulässig
Einfügedämpfung [dB]	Allgemein: ~0,10 Schmelzpleiß: < 0,05 Mechanisches Spleiß: < 0,5	keine Anwendung
Rückflusdämpfung [dB]	mindestens 60	keine Anwendung

Quelle: WIK auf Basis von FTTH Council (2017). FTTH Handbook, S. 141-142 und Noegig (2015). ‚Niederösterreich Glasfaser Handbuch. Leitfaden für Ausbau Mitverlegung. Begleitung für Pilotprojekte in Niederösterreich‘, S.38.

3.4.1.4 Splittingverlust (GPON)

Glasfaserbasierte Anschlussnetze können auf Basis von x.PON-Technologien auch über Punkt-zu-Multipunkt-Topologien (PtMP) realisiert werden. Der dafür erforderliche Einsatz von passiven (optischen) Splitttern geht – wie auch jeder andere Verbindungsknoten – mit einer Dämpfung einher.

Der in diesen Anschlussnetzen eingesetzte optische Splitter ist ein passives Bauelement, das das optische Signal auf mehrere Glasfasern verteilt (in Richtung Endkunde) bzw. von

²⁷ Faserkerne müssen mit Submikron-Genauigkeit miteinander gespleißt werden (FTTH Council, 2017. FTTH Handbook, S. 55-56).

²⁸ Noegig (2015). Niederösterreich Glasfaser Handbuch. Leitfaden für Ausbau Mitverlegung. Begleitung für Pilotprojekte in Niederösterreich‘, S.38.

mehreren Endkunden in Richtung MPoP bündelt. Hierfür besitzt der Splitter einen Eingang und mehrere Ausgänge.

Durch die Aufteilung der Eingangsleistung entsteht eine Dämpfung des Signals, die mit zunehmendem Splittingverhältnis zunimmt. Die ITU-T Empfehlungen G.984 und G.984.6 erlauben Splittingverhältnisse von bis zu 1:32 bzw. 1:64. Die typisch beobachtbaren Splitterdämpfungen nach den für GPON zulässigen Splittingverhältnissen sind in Tabelle 3-4 dargestellt.²⁹ Neue x.PON-Verfahren wie XGS.PON, NG-PON2, TWDM-PON und MW-PON erlauben Splittingverhältnisse bis 1:256, was den Einsatz von Lasern mit sehr hoher Leistung voraussetzt (und entsprechendem Preis).³⁰

Tabelle 3-4: Splittingverlust (in dB) nach Splittingverhältnis

Splittingverhältnis	Splitterverlust [dB]
Splitter 1:2	3
Splitter 1:4	6 – 7,1
Splitter 1:8	9 – 10,5
Splitter 1:16	12
Splitter 1:32	15 – 17,1
Splitter 1:64	18

Quelle: WIK auf Basis von EXFO (2012). 'FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen', 5. Ausgabe, S.12. und Kulenkampff, G., Plückerbaum, T., Zoz, K. (2019). Analytisches Kostenmodell für das Anschlussnetz AKM-AN Version 3.0. Referenzdokument. Studie für die Bundesnetzagentur, S. 24.

Wie aus der Tabelle 3-4 ersichtlich ist, steigt der Splitterverlust (dB) mit zunehmendem Splittingverhältnis in einer festen Proportion an, d.h. dass sich der Verlust mit einer Verdoppelung des Splittingverhältnisses jeweils um 3 dB erhöht. Das führt dazu, dass beispielsweise für einen 1:32-Splitter der Splitterverlust (15 dB) dem aggregierten Splitterverlust entspricht, der sich aus dem kaskadierten Einsatz von einem 1:2-Splitter (3 dB) und einem 1:16-Splitter (12 dB) ergibt.

Im Vergleich zu den bisherigen Dämpfungswerten für Glasfaserkabel, Steckerverbinder oder Spleißen ist der Splitterverlust – der je nach Splittingverhältnis zwischen 3 und 18 dB je liegt – relativ hoch und ist von der Anzahl der beschalteten Fasern unabhängig.

²⁹ EXFO (2012). 'FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen', 5. Ausgabe, S.12. https://cdn2.hubspot.net/hub/281197/file-258811849-pdf/docs/reference_guide_ftth_pon5deutsch.pdf. Zuletzt besucht: 06.09.2022.

³⁰ Vgl. ITU-T G980.1

3.4.1.5 Gesamtverlust – vergleichende Gegenüberstellung

Der gesamte Signalverlust einer Leitung wird durch die Summe aller Dämpfungsquellen ermittelt. Diese lässt sich, wie in der untenstehenden Formel beschrieben, errechnen.

Formel 1: Ermittlung der Gesamtverlust (in dB) nach relevanten Dämpfungsquellen:³¹

$$\begin{aligned} \text{Gesamtverlust} = & + \text{Kabeldämpfung (dB)} \\ & + \text{Steckerverlust (dB)} \\ & + \text{Spleißverlust (dB)} \\ & + \text{Splitterverlust (dB)} \end{aligned}$$

wobei:

- *Kabeldämpfung* (dB) = Maximaler Kabeldämpfungskoeffizient (dB/km) × Länge (km)
- *Steckerverlust* (dB) = Zulässiger Steckerverlust (dB) x Anzahl der Steckverbindungspaare
- *Spleißverlust* (dB) = Spleißverlusttoleranz (dB) x Anzahl der Spleiße
- *Splitterverlust* (dB)³² = Splitterverlust (dB) nach Splittingverhältnis x Anzahl der Splitter

Abbildung 3-7 stellt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der bisher betrachteten Störfaktoren in Hinblick auf die Reichweite dar. Differenziert nach Übertragungsmedium (Cu = UTP-Kupferkabel; Coax = Koaxialkabel oder Gf = Glasfaser) bzw. Netzarchitektur (PtP oder PtMP) wird dargestellt, wie stark die gesamte Dämpfung (aus Kabel, Stecker-Verbindung, Spleißen oder ggf. Splitter) zunimmt, wenn die überbrückbare Entfernung von einem Meter auf 100 bzw. 1.000 Meter ausgedehnt wird.³³

In Abbildung 3-7 ist ersichtlich, dass sich der Steckerverlust zwischen Kupfer-, Koaxial- und Glasfaserkabel nur geringfügig unterscheidet (Steckerverluste sind entfernungs-unabhängig und liegen überall zwischen 0,8 und 2 dB)³⁴, dass jedoch die längenabhän-gige Kabeldämpfung den größten Unterschied zwischen den Übertragungsmedien dar-stellt. Die Kabeldämpfung für Kupferkabel mit einer Frequenz von 100 MHz beträgt 0,22 dB bei bereits einem Meter, 22 dB bei 100 Meter und den hohen Wert von 222 dB bei 1.000 Meter. Das ist um den Faktor 2,5 höher (schlechter) im Vergleich zum Koaxialkabel und mehr als den Faktor 200 höher (schlechter) als bei dem dämpfungsreichsten Glas-faserkabel (OS1: 1,0 dB/ km), ohne dabei zu berücksichtigen, dass die übertragbaren Datenraten von Glasfasern gegenüber UTP-Kabeln viel höher ist, selbst in hypothetisch dämpfungs-freien Szenarien. Bei Glasfaserkabeln entstehen allerdings weitere nennens-werte Verluste, die für Kupferkabel vernachlässig sind. Zum einem Spleißverluste (hier 0,5 dB pro mechanischem Faserspleiß), wobei der durchschnittliche Spleißverlust 0,1 dB

³¹ Versitron, Inc. (2022). White Paper: Tips on How to Calculate Fiber Loss in a Network. [How to Calculate and Reduce Fiber Optic Loss in a Network | Versitron](#). Zuletzt besucht: 20.12.2022.

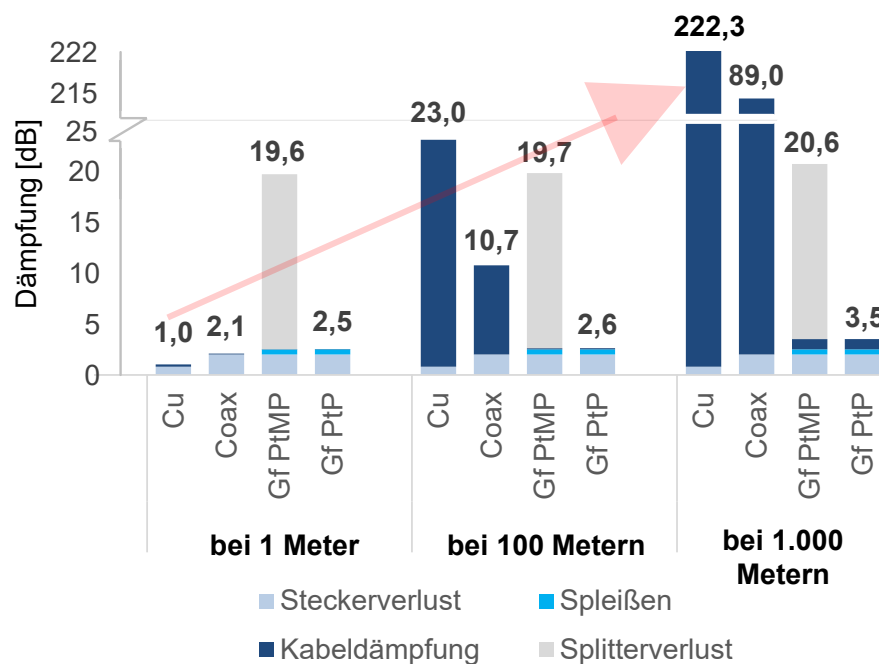
³² In Punkt-zu-Multipunkt-Netzstrukturen beeinflusst das Splittingverhältnis zusätzlich die Höhe der Dämpfung.

³³ Die Wahl von einem Meter als Ausgangswert für den vollzogenen Vergleich hat keine Praxisrelevanz und dient hier ausschließlich der Illustration der Sensitivität in Bezug auf die Länge der zu überbrücken-den Entfernung.

³⁴ Angenommen sind zwei Steckerverbindungen.

viel geringer ausfällt als der Steckverlust. Zum anderem Splitterverluste, die in Punkt-zu-Multipunkt-Netzarchitekturen (x.PON) beim Einsatz von Splitttern zustande kommen (hier 17,1 dB für den marktüblichen 1:32 Splitter). Der Splitterverlust ist von der Länge unabhängig. Die Dämpfung beispielsweise eines 1:2 Splitters ist in ihrer Höhe vergleichbar mit 30 km Kabeldämpfung bei Glasfaser, d.h. die Splitter haben eine hohe Bedeutung für die Ausdehnung eines x.PON Netzes und die Anforderungen an die Laser und Empfänger.

Abbildung 3-7: Gegenüberstellung von Kabel- bzw. Einfügedämpfungen (dB) (kumuliert) von Kupfer-, Koaxial- und Glasfaserkabeln bei 1, 100 und 1.000 Meter



Quelle: WIK auf Basis von maximal zulässigen Dämpfungswerten aus Tabelle 3-1 bis Tabelle 3-4, sowie aus der Infobox zu UTP-Kabeldämpfung (bei $f = 100$ MHz). Dämpfungswerte für Koaxialkabel ($f = 200$ MHz) stammen aus Helukabel GmbH (2015). „Kabel und Leitungen: Auswahltabellen für Koaxialkabel“. L&Z Ausgabe 27. Veröffentlicht am 01.04.2015. https://www.helukabel.com/publication/DE/CATALOGUES/CW/Auswahltabellen_DE/Kap_M_336_347_dt_link.pdf. Zuletzt besucht: 16.08.2022.

Fußnote: ‚Gf PtMP‘ bezieht sich auf Glasfaserkabel in einer FTTH Punkt-zu-Multipunkt-Netzarchitektur mit einem Splittingverhältnis von 1:32. Dargestellte Dämpfungszahlen (fett) entsprechen der Summe aller Kabel- bzw. Einfügedämpfungen (dB) (bei ggf. einmaliger Anwendung) nach Übertragungsmedium und Entfernung.

Bereits nach 100 Metern geht mit UTP-Kupferkabeln die höchste Gesamtdämpfung einher (23 dB, siehe Abbildung 3-7), gefolgt von GPON (19,7 dB) und Koaxialkabel (10,7 dB). Die niedrigsten Werte weist die Glasfaser PtP Architektur mit einer Gesamtdämpfung von lediglich 2,6 dB auf. Bei 1.000 Meter erfahren UTP-Kupferkabel und Koaxialkabel aufgrund der hohen Kabeldämpfung einen signifikanten Anstieg in der

Gesamtdämpfung (~ Faktor 10), während Glasfaserkabel in PtP und PtMP Netzarchitekturen gegenüber Kupferkabeln in der Dämpfung nur geringfügig ansteigen.³⁵

3.5 Sender und Empfänger

Sender und Empfänger gibt es für verschiedenste Technologien und damit Frequenzen bzw. Wellenlängen. Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf der Leistungsfähigkeit dieser Netzkomponenten (Sender und Empfänger), die die Signalgebung und damit Reichweite in Anschlussnetzen bestimmen.

3.5.1 Bei kupferbasierten Technologien

In kupferbasierten Anschlussnetzen wird am Ende der Kupferleitung aktives Equipment eingesetzt. Dabei handelt es sich um DSLAM (engl. *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) bzw. MSAN (engl. *Multi-Service Access Node*), die in diesen hybriden Netzarchitekturen für den Übergang zwischen Kupfer- und Glasfaserkabel eingesetzt werden. Dort wird für die Anschlüsse ein DSL-Profil konfiguriert. Die zu verwendende DSL-Norm (beispielsweise ADSL, ADSL2+ oder VDSL) und deren Übertragungskapazität werden durch die Interaktion zwischen dem DSLAM und dem DSL-Modem vom Endnutzer festgelegt.³⁶

Die Ports in einem DSLAM können sich kartenweise unterscheiden. Auf dem Markt werden beispielsweise von einigen Herstellern DSLAMs mit 64 Ports für ADSL+2 Teilnehmer und 32 Ports für VDSL2/ SHDSL Teilnehmer je Schnittstellenkarte angeboten:³⁷

Für ADSL2+ Teilnehmer kann laut Angaben des Herstellers eine maximale Reichweite von 6,5 km bei einer Datenübertragungsrate von 24 Mbps in Download und 2,5 Mbits in Upload erreicht werden.

Für VDSL2 Teilnehmer kann unter Verwendung von den Profilen 8a, 8b, 8c, 8d, 12a, 12b, and 17a laut Herstellerangaben eine Reichweite bis zu 3,5 km erreicht werden.

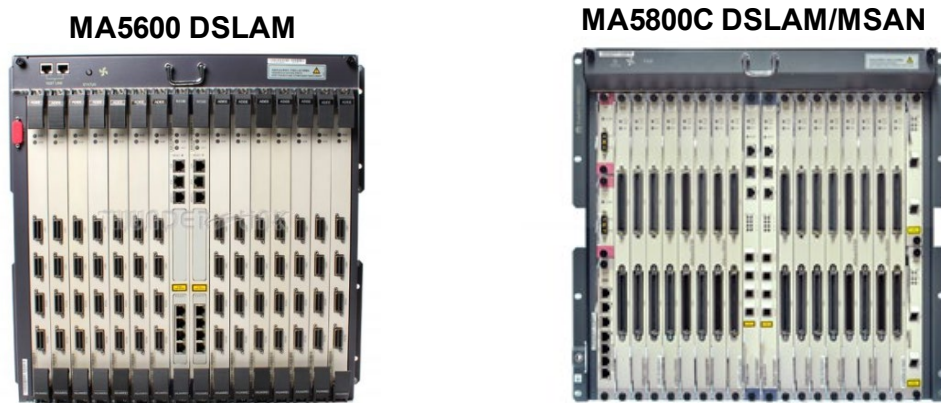
Über Vectoring sind je nach Profil Übertragungsraten von ca. 60 Mbps bis 100 Mbps bei einer Entfernung von bis zu 0,8 km möglich. Mit SuperVectoring können Übertragungsraten auf bis zu ca. 300 Mbps innerhalb einer 0,3 km Reichweite hochgerüstet werden.

³⁵ In Bezug auf das Koaxialkabel ist hier nochmals anzumerken, dass die DOCSIS-Anschlussnetze Verstärker im durchschnittlichen Abstand von 400 m einsetzen, um dem beschriebenen Dämpfungseffekt auszugleichen.

³⁶ Luber, S., Donner, A. (2019). Was ist ein DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer). IP-Insider. 12.04.2019. <https://www.ip-insider.de/was-ist-ein-dslam-digital-subscriber-line-access-multiplexer-a-820375/>. Zuletzt besucht: 25.08.2022.

³⁷ Sie unterstützt 14 Schnittstellenkarten, somit können insgesamt 896 ADSL2+ Teilnehmer und 448 VDSL2 Teilnehmer versorgt werden. Thunder Link International Co. Ltd (2022). Huawei MA5600 DSLAM. https://www.thunder-link.com/HUAWEI-MA5600_p599.html#attributetech_specs. Zuletzt besucht: 16.08.2022.

Abbildung 3-8: Huawei MA5600 DSLAM für ADSL+2 und VDSL2 (links) und Huawei DSLAM/ MSAN MA5800C für VDSL, Vectoring und SuperVectoring (rechts)



Quelle: Thunder Link International Co. Ltd (2022). Huawei MA5600 DSLAM. https://www.thunderlink.com/HUAWEI-MA5600_p599.html#attributetech_specs. Zuletzt besucht: 16.08.2022 und Huawei (2022). MA5800C DSLAM/ MSAN. <https://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network/access/msan-dslam/ma5800c>. Zuletzt besucht: 20.09.2022.

3.5.2 Bei glasfaserbasierten Technologien

In glasfaserbasierten Anschlussnetzen werden optische SFP-Module (engl. *Small Form-Factor Pluggable*) eingesetzt. Hierbei handelt es sich um plug-fähige (steckbare) Verbindungsstecker oder sogenannte 'Transceiver', die für das Senden (engl. *transmitter*) und Empfangen (engl. *receiver*) von optischen Datensignalen zwischen Netzwerkgeräten zuständig sind. Sie setzen optische in elektrische Signale um (und umgekehrt).³⁸ Sie sind somit für die optische Übertragung verantwortlich.

SFP-Module sind inzwischen eines der am weitesten verbreiteten Geräte im Telekommunikationsnetz. Sie werden an Netzwerkkarten, Ethernet-Switches oder Media-Convertern eingesetzt. Sie werden in den DSLAM, Routern und in jedem großen Gerät als sogenanntes Plug-in-Modul auf einem optischen SFP-Port eingesteckt (siehe Abbildung 3-9). Sie werden daher nicht nur für die Signalverarbeitung in jedes aktive Equipment mit einer Glasfaserverbindung eingesetzt, sondern auch in hybriden Netzverbindungen, um optische Kabel mit elektrischen Geräten zu verbinden. In diesen Fällen wird das UTP-Kupferkabel (Kabelqualität über Cat5) auf einem elektrischen RJ45-Port im Transceiver eingesteckt.³⁹ Von den optischen SFP-Modulen sind diejenige Netzarchitekturen betroffen, für die Glasfaser eingesetzt wird (FTTC, FTTB und FTTH).

³⁸ Kirschkewitz, H. (2020). SFP-Modul: Der „Dolmetscher“ fürs Internet. Blog.Telekom 01.12.2020 <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/sfp-modul-613626>. Zuletzt besucht: 16.08.2022.

³⁹ HTF (2021). 'How to use fiber optic transceiver in network?' 19.02.2021. <https://www.htfwdm.com/info/how-to-use-fiber-optic-transceiver-in-network-53917308.html>. Zuletzt besucht: 31.08.2022

Abbildung 3-9: ‚Stand-alone‘ Anwendung von SFP-Modulen (optischen Transceiver) für die Verbindung von zwei Ethernet Switches über ein Singlemode-Faserkabel und Cat5e-Kabel

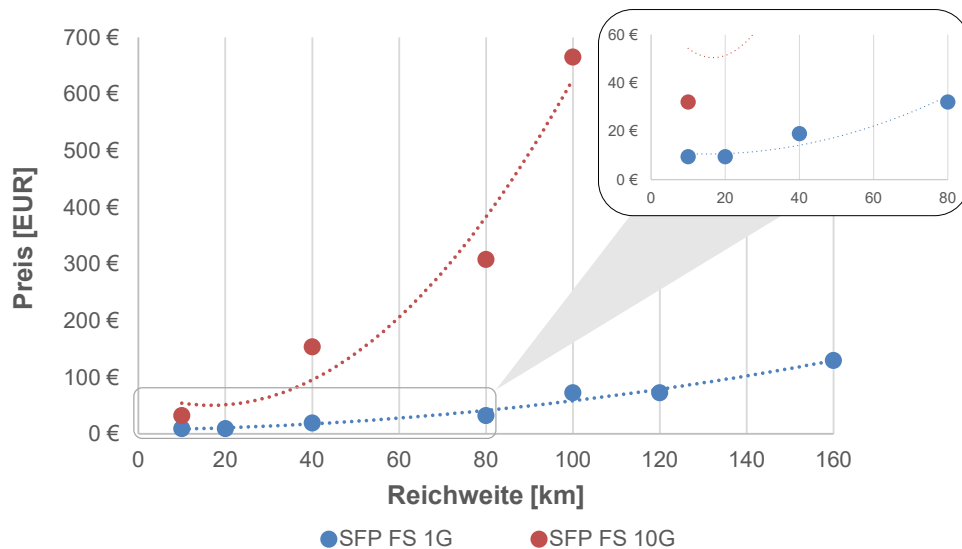


Quelle: HTF (2021). ‚How to use fiber optic transceiver in network?‘ <https://www.htfwdm.com/info/how-to-use-fiber-optic-transceiver-in-network-53917308.html>.

Auf dem Markt werden SFP-Module in verschiedenen Ausführungen angeboten, die sich hinsichtlich ihrer Signalstärke, -empfindlichkeit und Datenübertragungsrate unterscheiden. Beispielsweise bietet der Hersteller FS Deutschland SFP-Module von 0,1 bis zu 850 Gbps mit Reichweiten zwischen 0,1 und 160 km.⁴⁰ Allerdings unterstützen Ethernet-Ports im Anschlussnetz heute standardmäßig lediglich 1 bis 10 Gbit/s. Es ist dementsprechend zu erwarten, dass die im Anschlussbereich eingesetzten SFP-Module ebenfalls 1 bis 10G entsprechen, da mit einer höheren Kapazität und Reichweite ein höherer Preis einhergeht (siehe Abbildung 3-10). Es gibt jedoch heute bereits für anspruchsvollere Anwendungen auch Ethernetbandbreiten bis 100 Gbit/s und darüber hinaus. Dies ist unter anderem in Abbildung 3-10 illustriert.

⁴⁰ FS Deutschland (2022). Transceiver-Module | Transceiver-Lösung - FS Deutschland - FS Deutschland <https://www.fs.com/de/c/optics-and-transceivers-9>. Zuletzt besucht: 30.08.2022

Abbildung 3-10: Preis-/ Reichweiteverhältnis für SFP-Module 1G bis 10G (Singlemode-Kabel, LC Duplex Stecker, Wellenlängen zwischen 1310 nm und 1550 nm)



Quelle: WIK auf Basis von Herstellerangaben FS Deutschland ([Transceiver-Module | Transceiver-Lösung - FS Deutschland - FS Deutschland](#)). Preisangaben vom 30.08.2022.

Mit dem Standard ‚Ethernet in der ersten Meile‘ (IEEE 802.3ah) ist seit 2004 für den Anschlussbereich *Gigabit Ethernet* bis maximal 10 km definiert.⁴¹ Durch die Anwendung von 1G SFP-Modulen im Anschlussbereich wird die tatsächliche verfügbare Kapazität im Glasfaserkabel bei weitem nicht ausgeschöpft.⁴² Auch größere Reichweiten sind auf dem Markt verfügbar. Da jeder Anschluss sein eigenes Plug-in-Modul hat, kann in Einzelfällen ein Endkunde mit einem entweder auf die Reichweite oder die Leistungsfähigkeit höherwertigen SFP-Modul versorgt werden:

- Ethernet Interfaces können auf beiden Seiten individuell für einzelne Kunden je nach Bedarf auf 10 oder gar 100 Gbit/s hochgerüstet werden (beispielsweise für Geschäftskunden).⁴³
- Deutlich größere Entfernungen können mit optischen Transceivern mit nicht standardmäßigen Eigenschaften überbrücken werden. Sie sind auf dem Markt verfügbar und eignen sich beispielsweise für den Einsatz in ländlichen Gebieten.⁴⁴

Allerdings sind das Einzelfalllösungen, die nicht repräsentativ für den Massenmarkt in Anschlussbereichen mit tendenziell geringer räumlicher Erstreckung sind.

⁴¹ FTTH Council (2017). FTTH Handbook, S. 48-49.

⁴² Die Datenübertragungsraten reichen von Giga- bis Terabit pro Sekunde.

⁴³ Plückebaum & Ockenfels (2020). S.14.

⁴⁴ FTTH Council (2017). FTTH Handbook, S. 48-49.

Bei den mit Splittern arbeitenden x.PON-Netzen werden von vorneherein deutlich leistungsfähigere SFP-Module eingesetzt, um die garantierte Ausdehnung von 20 km sicherstellen zu können. Dennoch werden bei manchen Netzen zusätzlich sogenannte Reach Extender eingesetzt, aktive Zwischenverstärker, die dann nicht mehr dem Gedanken des „Passiven“ Optischen Anschlussnetzes entsprechen.⁴⁵

3.6 Verlusttoleranz und das Dämpfungsbudget

Damit die Verbindung wie geplant funktionieren kann, muss das vom Sender auf den Weg geschickte Signal eine Mindeststärke aufweisen, damit es verstanden wird, wenn es beim Empfänger ankommt. Die Spannbreite, die zwischen Ausgangssignalstärke und geforderter Stärke des Eingangssignals aufgespannt wird, beschreibt den tolerierten Verbindungsverlust. Diesen bezeichnet man als Dämpfungsbudget.

In Abbildung 3-11 ist das Dämpfungsbudget als Differenz zwischen Senderleistung TX-Power und Empfänger-Empfindlichkeit beschrieben.⁴⁶ Die ‚TX-Power‘ misst die Intensität des vom optischen Modul gesendeten optischen Signals. Die ‚RX-Empfängerempfindlichkeit‘ ist die niedrigste optische Signalintensität, die das optische Modul bei der normal zulässigen Bitfehlerrate empfangen kann. Sollte die Intensität des gesendeten optischen Signals die Empfängerempfindlichkeit unterschreitet, dann nimmt die Bitfehlerrate stark zu.^{47, 48}

Die ‚TX-Power‘ wird auf dem Weg zum Empfänger über die Distanz durch unvermeidbare Verluste bzw. Dämpfungen abgeschwächt. Wie bereits im Abschnitt 3.4 dargestellt, sind die Ursachen dafür Steckverbindungen, Spleißarbeiten und der entfernungsabhängigen Kabeldämpfung reduziert (siehe Abbildung 3-11).

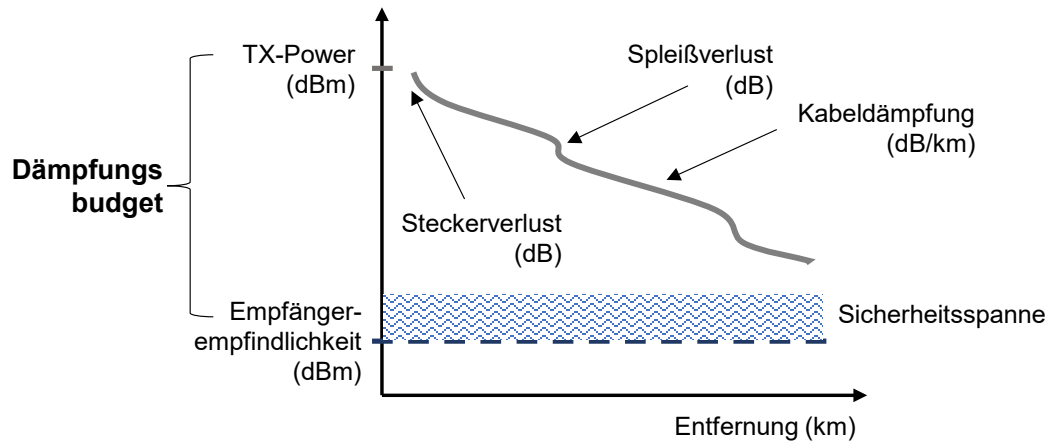
⁴⁵ ITU-T G.9804.1, section 10.7

⁴⁶ CBO GmbH (2021). ‚Verständnis der Verluste von Glasfaserverbindungen‘. 12.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/versaendnis-der-verluste-von-glasfaserverbindungen.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.

⁴⁷ Russel, G. (2022). ‚Wie hoch ist die SFP-Tx-Leistung und Rx-Empfindlichkeit eines SFP-Moduls?‘ <https://ecloudlight.com/de-eu/blogs/articles/what-is-the-sfp-tx-power-and-rx-sensitivity-of-an-sfp-module>.

⁴⁸ Verlust-Toleranz gibt es auch bei Kupfer. Allerdings ist die Ermittlung des Dämpfungsbudgets nicht praktikabel, da bei Kupfer mehr Einflussfaktoren greifen.

Abbildung 3-11: SFP-Modul TX-Power, Empfängerempfindlichkeit und das Dämpfungsbudget



Quelle: WIK auf Basis von CBO GmbH (2021). ‚Verständnis der Verluste von Glasfaserverbindungen‘. 12.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/versaendnis-der-verluste-von-glasfaserverbindungen.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.

Bei der Installation von glasfaserbasierten Verbindungen sind für die Kontrolle des Dämpfungsbudgets die maximalen zulässigen Werte der Einfügedämpfung bei der Installation von Spleißen oder Steckern zu beachten, ebenso sind die Rückreflexionen auf ein Minimum zu reduzieren.⁴⁹

Das gesamte Ende-zu-Ende Dämpfungsbudget (mit ausreichender Reserve) kann über die Summe relevanter Dämpfungen aus unterschiedlichen Dämpfungsquellen berechnet werden (siehe die Werte in den zuvor dargestellten Abschnitten). Die tatsächlichen Dämpfungswerte können in der Praxis aufgrund verschiedener Faktoren höher oder niedriger ausfallen.⁵⁰

Die von den Herstellern angegebenen Dämpfungsbudgets berücksichtigen i.d.R. eine sogenannte Sicherheitspanne, um den durch Patchkabel, Kabelbiegung oder unvorhersehbare optische Dämpfungsereignisse entstehenden Einbußen Rechnung zu tragen. Die Sicherheitspanne umfasst dabei in der Regel ca. 3 dB.⁵¹

⁴⁹ Um Dämpfungsschwankungen zu berücksichtigen, die im Lebenszyklus des Systems auftreten können (EXFO (2012). FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen, 5. Ausgabe)

⁵⁰ Verluste können ebenfalls aus fundamentalen Materialeigenschaften und unerwünschten Verunreinigungen (z.B. Glasfaserverschmutzung) verursacht werden. Auch durch Biegen können Verluste entstehen, die beispielsweise aus unsachgemäßer Handhabung der Kabel initiiert werden (Versitron, Inc., 2022. White Paper: Tips on How to Calculate Fiber Loss in a Network).

⁵¹ Cisco (2005). ‚Berechnung der maximalen Hop-Distanzen für 15454 Glasfaserverbindungen‘. https://www.cisco.com/c/de_de/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-plattform-mspp/19762-max-hop-19762.html. Dokument-ID:19762. 07.02.2005. Zuletzt besucht 01.09.2022

4 Reichweiten glasfaserbasierter Technologien

Die faktische Reichweite des Signals hängt neben den Dämpfungseigenschaften der Leitung (und ihrer passiven Verbindungspunkte) ebenfalls von den Leistungsmerkmalen der Endgeräte ab.

Die optischen SFP-Module, die laut Angaben des Herstellers den Standard ‚Ethernet in der ersten Meile‘ (IEEE 802.3ah) erfüllen, haben für eine Datenrate zwischen 1 und 1,25 Gbps eine maximal erreichbare Reichweite zwischen 10 und 120 km.⁵²

4.1 10 km Reichweite – Versuch einer Bottom-up Validierung von Herstellerangaben

In der Praxis sind Netzbetreiber jedoch während der Netzauslegung oft damit konfrontiert, dass die im Feld gemessenen Dämpfungswerte von den auf der Produktspezifikation ausgewiesenen Werten signifikant nach oben abweichen. Der Hersteller geben oftmals bei der Produktspezifikation auf Basis einer ‚Best-Case‘-Umgebung ermittelte Werte an, die auf der Verwendung eines verlustarmen Referenz- oder Stammkabels beruhen. Diese unrealistische, jedoch gängige Messmethode führt dazu, dass die ausgewiesenen Dämpfungsbudgets, deren Berücksichtigung für die Überbrückung bestimmter Entfernungen erforderlich sind, oft nicht eingehalten werden können.⁵³

Aufgrund dieser Feststellung, und der mangelnden Kenntnis über die den Herstellerangaben zugrunde liegenden Messbedingungen, versuchen wir in diesem Abschnitt anhand einer einfachen ‚bottom-up‘ Kalkulation, die Herstellerangaben hinsichtlich ihrer Angaben zur Signalreichweite, die für die räumliche Erstreckung von Anschlussbereichen relevant ist, zu validieren. Diese Überprüfung nehmen wir für drei Szenarien vor, die sich hinsichtlich der unterstellten Dämpfungseigenschaften unterscheiden. Im Einzelnen sind dies:

- Typische Dämpfungswerte
beschreiben Durchschnittswerte, die aus empirischen Beobachtungen abgeleitet und im ‚normalen‘ Fall zu erwarten sind. Die zugrundeliegenden Daten wurden von Entwicklern von Test- und Analysegeräten für Festnetzbetreiber (EXFO) oder Hersteller von Netzwerkgeräten (Cisco) ermittelt und werden nach Wellenlängen (nm) differenziert.
- TIA-Standards
geben maximale Dämpfungswerte an, die von der TIA (engl. *Telecommunications*

⁵² FS Deutschland (2022). Transceiver-Module | Transceiver-Lösung - FS Deutschland - FS Deutschland <https://www.fs.com/de/c/optics-and-transceivers-9>. Zuletzt besucht: 30.08.2022.

⁵³ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 147.

Industry Association) als Standard für die Telekommunikationsverkabelung gewerblicher Gebäude (sogenanntes TIA-568) festgelegt wurden.

- IEC/ITU-Standards
sind die maximal zulässigen Dämpfungswerte für optische Kabel und Stecker nach Anforderungen der IEC 61300-3-34 (IEC ‚optische Verbindungsgeräte und passive Komponenten‘) und ITU-T G.652/ G.657 (ITU Singlemode-Faserklassifikation).

Diese Werte werden in Tabelle 4-1 für die zu berücksichtigen Dämpfungsquellen einer Glasfaserverbindung dargestellt. Je nach Anwendbarkeit sind diese Dämpfungswerte nach Kabeltyp (Singlemode OS1 / OS2), Wellenlänge (1310 / 1490 / 1550 nm) oder Qualitätsklasse (Grade A / B / C / D) vorhanden. Ein Vergleich der Werte für die drei Kategorien zeigt, dass die IEC/ITU-Standards die höchsten Dämpfungswerte im Sinne einer maximalen Zulässigkeit aufweisen.

Tabelle 4-1: Typische sowie standardisierte Dämpfungswerte für Singlemode-Faser

	‚typischer‘ Wert	TIA-568	IEC, ITU
Kabeldämpfung [dB/km]	1310 nm: ~0,35 1490 nm: ~0,27 1550 nm: ~0,20	OS1/2: max. 0,5 (outside plant)	OS1: 1,0 OS2 (1310 nm): 0,4 OS2 (1550 nm): 0,3
Steckerverlust [dB]	1310 nm: ~0,60 1550 nm: ~0,35	max. 0,75	Grade A: ≤ 0,15 Grade B: ≤ 0,25 Grade C: ≤ 0,50 Grade D: ≤ 1,0
Spleißverlust [dB]	allgemein: ~0,10 Schmelzspleiß: < 0,05 mechanisch: < 0,5	max. 0,30	keine Angabe

Quelle: WIK auf Basis von The Fiber Optic Association (FOA) (2021). Reference Guide. <https://www.the-foa.org/tech/tia568b3.htm> für ITA-568 Standards; Worton (2019). ‚Wie lassen sich verschiedene Arten von Verlustfaktoren bei Glasfasern reduzieren? <https://community.fs.com/de/blog/how-to-reduce-various-types-of-losses-in-optical-fiber.html> für IEC und ITU-T Normen; EXFO (2012). ‚FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen‘, 5. Ausgabe, S.23 für die typischen Kabeldämpfungen (Faser G.652C); Cisco (2005). ‚Berechnung der maximalen Hop-Distanzen für 15454 Glasfaserverbindungen‘. https://www.cisco.com/c/de_de/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-platform-mspp/19762-max-hop-19762.html für die ‚typischen‘ Steckerverluste; und FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S. 141-142 und Russel, G. (2022). ‚Wie hoch ist die SFP-Tx-Leistung und Rx-Empfindlichkeit eines SFP-Moduls?‘ <https://ecloudlight.com/de-eu/blogs/articles/what-is-the-sfp-tx-power-and-rx-sensitivity-of-an-sfp-module>.

Um auf Basis dieser Angaben eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Sende- und Empfangs-Einrichtungen vornehmen zu können, sind Annahmen für das einer glasfaserbasierten Anschlussleitung zugrunde liegende Mengengerüst zu machen. D.h., es sind Annahmen über die Kabellänge sowie die Anzahl von Steckern und Spleißen zu machen.

Dann kann im nächsten Schritt durch die Multiplikation der in Tabelle 4-1 dargestellten Dämpfungskoeffizienten mit dem dazugehörigen Mengengerüst ein Dämpfungswert ermittelt werden. Dieser Dämpfungswert kann mit dem vom Hersteller angegebenen Dämpfungsbudget verglichen werden. Mit dieser bottom-up Methodik kann somit für jedes der drei Szenarien Vergleichswert zu den Herstellerangaben ermittelt werden. Die für diese Berechnung verwendete Formel 1 ist im Abschnitt 3.4.1.5 dargestellt. Tabelle 4-2 stellt die Ergebnisse der Berechnung des ‚bottom-up‘ ermittelten Dämpfungsbudgets für das 1G SFP-Modul mit einer Wellenlänge 1310 nm und einer Reichweite von 10 km dar.

Tabelle 4-2: ‚Bottom-up‘ Beispielrechnung des gesamten Leistungsverlusts (dB) für 1G SFP-Modul (Wellenlänge 1310 nm) bei einer vom Hersteller angegebenen Reichweite von 10 km für drei verschiedene Konstellationen von Dämpfungswerten

	Kabeldämpfung [dB/km]	Entfernung [km]	Stekkerverlust [dB]	Steckeranzahl [#]	Spleißverlust [dB]	Spleißanzahl [#]	Gesamt
typisch	0,35 dB/km	10 km	0,60 dB	2	0,1 dB	9	5,6 dB
TIA	0,50 dB/km	10 km	0,75 dB	2	0,3 dB	9	9,2 dB
IEC/ITU	1,00 dB/km	10 km	1,0 dB	2	0,5 dB	9	16,5 dB

Quelle: WIK. Dämpfungskoeffizienten aus Tabelle 4-1.

Im Einzelnen werden der Berechnung nachfolgend dargestellte Koeffizienten und unterstelltes Mengengerüst zugrunde gelegt:

Koeffizienten. Da es sich bei der oben dargestellten Berechnung um ein SFP-Modul mit einer Wellenlänge von 1310 nm handelt, werden die dazugehörigen wellenlängenspezifischen Dämpfungskoeffizienten aus Tabelle 4-1 für die Berechnung verwendet. Bei Fasern mit Wellenlängen von 1310 nm liegt die ‚typische‘ Kabeldämpfung im Durchschnitt bei 0,35 dB/km und der ‚typische‘ Steckerverlust bei 0,60 dB pro Stecker. Beim Spleißverlust sind es nicht die Wellenlängen, sondern die Spleißtechnik, die für die Höhe der Dämpfung maßgeblich ist (je nach Methode liegt sie zwischen <0,05 und < 0,5 dB). Hierbei wird im ‚typischen‘ Fall von einem allgemeinen Spleißverlust in Höhe von 0,1 dB⁵⁴ ausgegangen. Für TIA-568-Standard liegen keine nach Kabeltypen, Wellenlängen oder Spleißtechnik differenzierten Werte vor. Dieser Standard definiert allgemeine, maximale Dämpfungswerte in Höhe von 0,50 dB/km bei Kabeldämpfung, 0,75 dB beim Steckverbinden und 0,3 dB beim Spleißen fest (siehe dritte Zeile in Tabelle 4-2). Im dritten Szenario sind die von der ITU-T G.652/ G.657 maximal zulässigen Dämpfungswerten nach Kabeltyp (OS1 oder OS2) und ggf. nach Wellenlängen (1310 bzw. 1550 nm) differenziert (siehe Tabelle 4-1). Hier wird zunächst in Tabelle 4-2 von OS1 Singlemode-Fasern

⁵⁴ Noegig (2015). Niederösterreich Glasfaser Handbuch. Leitfaden für Ausbau Mitverlegung. Begleitung für Pilotprojekte in Niederösterreich, S.38.

ausgegangen, da sie die Reichweite des vorliegenden SFP-Moduls (bis zu 10 km) erreichen können.⁵⁵ Für den Steckerverlust wird ein maximaler Dämpfungswert angenommen, der der niedrigsten zulässigen Qualitätsklasse entspricht (Grade D: 1,0 dB). Ebenfalls wird (aufgrund fehlender Vorgaben IEC/ITU) in diesem Szenario beim Spleißverlust der maximale Dämpfungswert angenommen (0,5 dB). Dieser Wert kann mit einem mechanischen Spleiß erreicht werden. Die zugehörigen Werte sind in der untersten Zeile in Tabelle 4-2 wiedergegeben.


Mengengerüst. Die Entfernung (10 km) entspricht der in der Produktspezifikation ausgewiesenen Reichweite des SFP-Moduls. Da im Anschlussbereich im Vergleich zum Aggregations- und Kernnetz öfters gespleißt wird, gehen wir davon aus, dass Glasfaserkabel jede 1 km gespleißt werden (d.h. insgesamt 9-mal) und für jedes Verbindungsende einen Verbindungsstecker (insgesamt 2-mal) verwendet wird (siehe Tabelle 4-2).

Somit ergibt die ‚bottom-up‘ Berechnung für SFP-Module mit einer Reichweite von 10 km maximale Dämpfungswerte von 5,6 dB im ‚typischen‘ Szenario, 9,2 dB im TIA-Szenario, und 16,5 dB im IEC/ITU-Szenario. Das IEC/ITU-Szenario hat die höchsten (schlechtesten) Dämpfungswerte und stellt somit eine Obergrenze im Sinne des ungünstigsten Falles dar.

Diese bottom-up berechneten Dämpfungen werden im nächsten Schritt mit dem vom Hersteller angegebenen Dämpfungsbudget (Abstand zwischen Senderleistung/ TX-Power und Empfängerempfindlichkeit) verglichen. Die Herstellerangaben zu TX-Power und Empfängerempfindlichkeit sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

⁵⁵ Die maximale Reichweite, die mit einem OS1-Kabel erreicht werden kann, ist 10 km. Mit OS2 sind das bis zu 200 km (Worton, 2020. ‚Singlemode-Faser: Typen und Anwendungen‘. 07.08.2020. <https://community.fs.com/de/blog/single-mode-fiber-os1-vs-os2-what-is-the-difference.html>. Zuletzt besucht 01.09.2022).

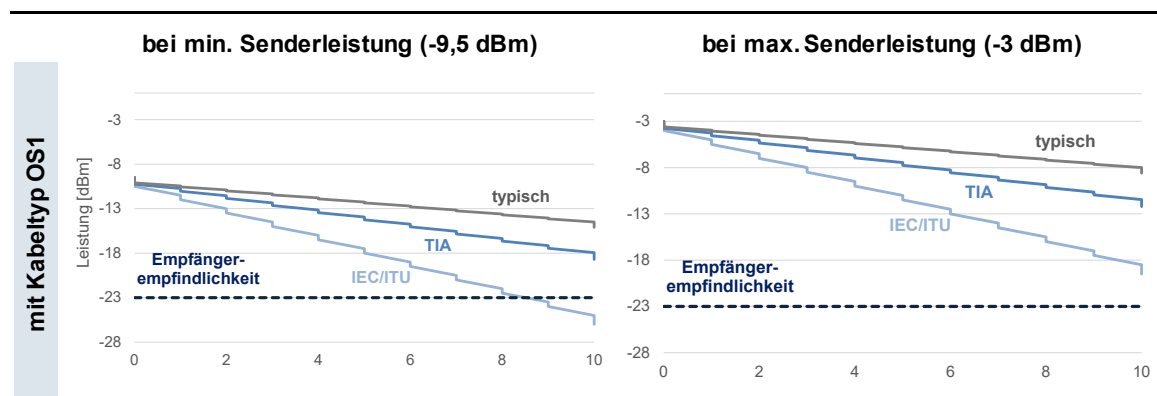
Abbildung 4-1: TX-Power und Empfängerempfindlichkeit für einen 1G SFP-Modul
10 km

1G SFP-Modul 10 km (SM)	Relevante Produktspezifikation	
	TX Power	-9.5 ~ -3dBm
	Empfängerempfindlichkeit	< -23dBm
	Wellenlänge	1310nm

Quelle: FS (2022). SFP Transceiver Modul mit DOM - Cisco GLC-LH-SM Kompatibel 1000BASE-LXLH 1310nm 10km LC MMF/SMF. [Cisco GLC-LH-SM Glasfaser SFP Modul | 1000BASE-LX/LH SFP Transceiver 1310nm 10km - FS Deutschland](#). Zuletzt besucht: 16.12.2022.

Die Gegenüberstellung von Herstellerangaben zu dem SFP-Modul mit Senderleistung/ TX-Power und Empfängerempfindlichkeit einerseits und dem ‚bottom-up‘ berechneten Dämpfungsbudget aus Tabelle 4-2 andererseits wird in Abbildung 4-2 grafisch illustriert.

Abbildung 4-2: Einhaltung des Dämpfungsbudgets eines 1G SFP-Moduls gemäß Herstellerangaben für die Überbrückung von 10 km



Quelle: WIK auf Basis von FS Deutschland (2022). Produkt: ‚SFP Transceiver Modul mit DOM - Cisco GLC-LH-SM Kompatibel 1000BASE-LX/LH 1310nm 10km LC MMF/SMF‘ (SFP1G-LX-31).

Abbildung 4-2 zeigt, dass Sendeleistung, Dämpfungseigenschaften des Kabels sowie Anzahl der Spleiße relevant die Reichweite beeinflussen.⁵⁶ Bei der minimalen Senderleistung (TX-Power von -9,5 dBm) des oben dargestellten 1G-SFP-Modul können die Dämpfungsbudgets sowohl mit TIA als auch mit ‚typischen‘ Dämpfungswerten eingehalten werden, da die abgeschwächte Leistung (in dBm) nach Überbrückung der

⁵⁶ Unter der Annahme, dass jede 1 km gespleißt wird. Jeder Spleiß „kostet“ zwischen 100 Meter (‚typisch‘) bis maximal 500 Meter (‚IEC/ITU‘) Reichweite. Hierbei ist es zu beachten, dass bei den IEC/ITU Standards der maximale Spleißverlust eingesetzt wird (in der Regel aus mechanischem Spleiß).

vorgesehenen Entfernung (10 km) stets über der Empfängerempfindlichkeit (-23 dBm) liegt. Anders sieht es mit dem Szenario mit den Dämpfungswerten nach IEC/ITU aus. Im Fall minimaler Sendeleistung (TX-Power von -9,5 dBm) kann das Dämpfungsbudget nicht eingehalten werden. In diesem Fall können ohne Sicherheitsmarge maximal knapp 8 km überbrückt werden (siehe Abbildung 4-2).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass zum einen durch den Verzicht auf Spleiße und zum anderen durch den Einsatz von höherwertigen Bauteilen die Reichweite von Sende- und Empfangseinrichtungen gesteigert werden kann (siehe den Unterschied bei den Bauteilen zwischen den TIA- sowie den IEC/ITU-Standards).

Sensibilitätsanalyse

Im Folgenden werden zwei Alternativszenarien betrachtet, um die Wirkung auf die erzielbare Reichweite bzw. Einhaltung des Dämpfungsbudgets zu analysieren. In jedem Alternativszenario wird jeweils lediglich ein Schüsselparameter aus der Basisberechnung in Abbildung 4-2 geändert:

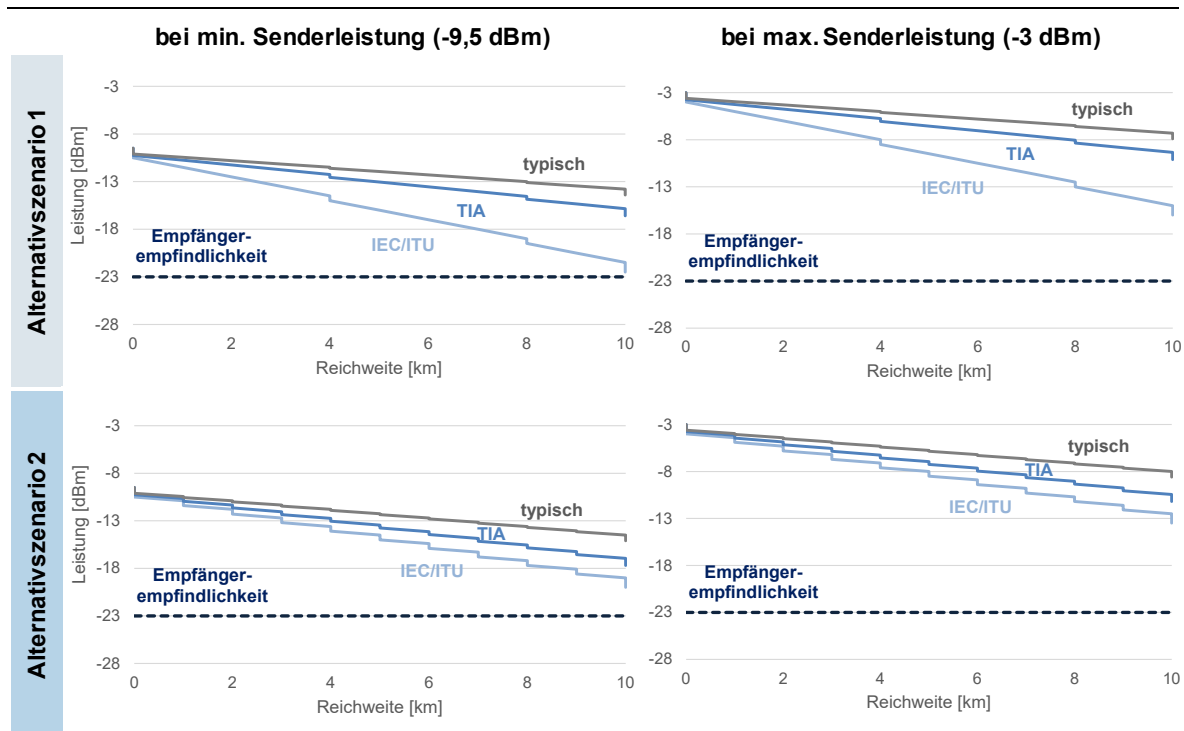
- **Alternativszenario 1:** die Anzahl von Spleißen wird durch die Verringerung der Häufigkeit des Spleißes auf 1-mal jeden 4 km (anstatt 1-mal jeden 1 km) reduziert, um eine angenommene maximale Glasfaserkabellänge von 4 km bei der Erstreckung von Anschlussbereichen auszuschöpfen.
- **Alternativszenario 2:** hier gehen wir von einem dämpfungsärmeren (allerdings teureren) Kabeltyp aus (OS2- anstatt OS1-Kabel).⁵⁷ Dies betrifft lediglich die maximal zulässige Kabeldämpfung (0,4 dB/ km anstatt 1,0 dB/km)⁵⁸, da nur hier im Szenario mit IEC/ITU Dämpfungswerten eine kabeltypspezifische Dämpfung für OS1/ OS2 angegeben ist.

Abbildung 4-3 stellt die Ergebnisse der Änderungen in der Anzahl der Spleiße pro km sowie des Kabeltyps und deren Wirkung auf die Einhaltung des Dämpfungsbudgets dar.

⁵⁷ Während OS1 Singlemode-Glasfaserkabel für Innenanwendungen konzipiert sind, sind OS2-Kabel aufgrund ihrer Konstruktionsmerkmale eine bessere Wahl für Außenanwendungen. CBO GmbH (2021). ‚OS1 vs. OS2 -Welches ist besser?‘ 14.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/os1-vs-os2-welches-ist-besser.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.

⁵⁸ Da das IEC/ITU-Standards als Obergrenze dargestellt wird, müssen die Dämpfungskoeffizienten aus den TIA und ‚typischen‘ Szenarien darunter liegen. Um diese Stetigkeit zu gewährleisten, wird bei dem TIA Szenario der wellenlängenundifferenzierten Kabeldämpfung (0,5 dB/km) verworfen und stattdessen die wellenlängenspezifische maximal zulässige Kabeldämpfung (0,4 dB/km für 1310 nm und 0,3 dB/km für 1550 nm) übernommen.

Abbildung 4-3: Sensibilitätsanalyse 1G SFP-Modul – Überbrückung von 10 km mit Spleißarbeiten jede 4 km (Alternativszenario 1) und mit OS2-Singlemode (Alternativszenario 2)



Quelle: WIK auf Basis von FS Deutschland (2022). Produkt: ‚SFP Transceiver Modul mit DOM - Cisco GLC-LH-SM Kompatibel 1000BASE-LX/LH 1310nm 10km LC MMF/SMF‘ (SFP1G-LX-31).

Gegenüber der Basisberechnung führt die Reduktion der Anzahl der Spleiße dazu, dass bei allen betrachteten Szenarien das Dämpfungsbudget für 10 km auch bei minimaler Senderleistung (-9,5 dBm) eingehalten werden kann. Vor allem für das wenig strenge IEC/ITU-Szenario erhöht sich die erzielbare Reichweite von 8 km auf knapp 10 km (ohne Sicherheitsmarge).

Die Anwendung von dämpfungsarmen OS2-Kabeln (über 50% weniger Dämpfung als OS1) führt zu einer erheblichen Reduktion der Gesamtdämpfung im IEC/ITU-Szenario, so dass mehr als die vorgesehene 10 km selbst bei minimaler Senderleistung erreicht werden können.

4.2 Analyse von SFP-Modulen mit größeren Reichweiten bei PtP-Netzarchitekturen

Wir weiten die Analyse für weitere verfügbare 1G-SFP Modulvarianten für ‚Ethernet in der ersten Meile‘ (IEEE 802.3ah) aus, die laut Herstellerangaben Reichweiten bis zu 120 km erlauben. Tabelle 4-3 zeigt, welche Reichweiten mit den vom Hersteller angegebenen Dämpfungsbudget (dB) korrespondieren. Dem sind im rechten Teil der Tabelle 4-3 die von uns für die drei Szenarien berechneten Reichweiten dargestellt.

Tabelle 4-3: Maximal erreichbare Entfernung (km) eines 1G-SFP-Modul unterschiedlicher Herstellerangaben (Reichweiten 10 bis 120 km) unter Berücksichtigung des verfügbaren Dämpfungsbudgets (dB) in verschiedenen bottom-up Szenarien

Herstellerangaben				‚bottom-up‘ Berechnung		
1G SFP Module		Dämpfungsbudget		~erreichbare Entfernung (min – max)		
Varianten	Wellenlänge	min. [dB]	max. [dB]	typisch [km]	TIA [km]	IEC/ITU [km]
10 km (OS1)	1310 nm	13,5	20,0	21 – 35	12 - 20	6 - 10
10 km (OS2)	1310 nm	13,5	20,0	21 - 35	13 - 23	10 - 17
20 km	1310 nm	13,5	20,0	21 - 35	13 - 23	10 - 17
40 km	1310 nm	19,0	24,0	33 - 44	21 - 28	16 - 22
80 km	1550 nm	24,0	29,0	68 - 85	33 - 41	24 - 31
120 km	1550 nm	32,0	37,0	95 - 111	46 - 55	34 - 41

Quelle: WIK auf Basis von Herstellerangaben FS Deutschland ([Transceiver-Module](#) | [Transceiver-Lösung-FS Deutschland](#) - [FS Deutschland](#)).

Tabelle 4-3 zeigt, dass SFP-Module mit höheren Dämpfungsbudget (d.h. mit höherer Senderleistung und/ oder niedriger Empfängerempfindlichkeit) längere Entfernungen überbrücken können. Das 1G-Modul, mit einer vorgesehenen Reichweite von 10 km laut Hersteller, kann unter ‚typischen‘ Bedingungen mindestens 21 km, unter Einhaltung von TIA-Standards 12 km und unter der Einhaltung von IEC/ITU-Standards lediglich 6 km überbrücken (inkl. Sicherheitsmarge: 3 dB). Das leistungsstärkste SFP-Modul (mit einer Reichweite von 120 km laut Hersteller) kann der von uns durchgeführten bottom-up Überprüfung zufolge je nach Szenario zwischen 34 km und 111 km überbrücken.⁵⁹

⁵⁹ Gegenüber der ‚bottom-up‘ Berechnung für das 1G SFP-Modul für 10 km sind folgende entfernungsbedingten Anpassungen erforderlich. Für alle Reichweiten ab 10 km wird immer ein OS2-Kabel (anstatt OS1) unterstellt, da OS1 für max. 10 km konfektioniert ist. Hierbei wird die wellenlängenspezifischen Kabeldämpfung für OS2-Kabel angenommen (siehe Tabelle 4-1: max. zulässige Kabeldämpfung beträgt 0,4 dB/km für 1310 nm und 0,3 dB/km für 1550 nm; anstatt 1,0 dB/km). Die ‚typische‘ Kabeldämpfung (dB/km) und der Steckerverlust (dB) sind ebenfalls wellenlängenspezifisch vorhanden. Dementsprechend werden die dazugehörigen Dämpfungswerte für die Wellenlängen 1310 nm und 1550 nm

4.3 Analyse der Reichweiten bei PtMP-Netzarchitekturen

Anders als Punkt-zu-Punkt-Netzarchitekturen stellen Punkt-zu-Multipunkt-Netzarchitekturen ein ‚geteiltes Medium‘ dar. Für eine Gigabitübertragung auf einem geteilten Glasfaserkabel wird die Übertragungstechnik ‚GPON‘ (engl. *Gigabit Passive Optical Network*) nach ITU-G.984.x eingesetzt.⁶⁰ Sie findet in passiven Glasfasernetzen Anwendung, d.h. Glasfaseranschlussnetze ohne intermediäres aktives Equipment. Hierbei wird das optische Signal lediglich über aktive Netzwerkgeräte an beiden Enden der Verbindungslinie gesteuert:

- das OLT (engl. *Optical Line Termination*) am MPoP und
- das ONT (engl. *Optical Network Termination*) oder ggf. ONU (engl. *Optical Network Unit*) am Teilnehmer.

Auch für diese Netzwerkgeräte kommen SFP-Module zum Einsatz.⁶¹ Allerdings handelt es sich hier um die sogenannten ‚GPON SFP Module‘. Im Gegensatz zu den bisherigen SFP-Modulen, sind GPON SFP Module bidirektionale optische Gigabit-Transceiver, die über ein Wellenlängen-Multiplexing-Verfahren (engl. *Wavelength Division Multiplexing* oder WDM) sowohl in Downstream als auch Upstream Daten übertragen und empfangen können. Je nach aktivem Netzwerkgerät (OLT, ONT oder ONU) sind sie in unterschiedliche Ausführungen vorhanden.⁶²

aus Tabelle 4-1 übernommen. Es wird für alle SFP-Module einheitlich davon ausgegangen, dass die Glasfaser je 1 km gespleißt wird.

60 Worton (2020). ‚Warum ist GPON in FTTH-Netzwerken so beliebt?‘. Aktualisiert am 12.09.2020. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/an-overview-of-gpon-ftth-access-network.html>. Zuletzt besucht: 13.09.2022.

61 Es gibt OLT bzw. ONT/ ONU mit integrierter SFP-Modul Funktion.

62 Worton (2018). ‚GPON SFP Transceiver Basics‘. Veröffentlicht am 12.11.2018. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/gpon-sfp-transceiver-basics.html>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.

Abbildung 4-4: OLT (Optical Line Termination) und seine dazugehörige GPON OLT SFP Module



Quelle: Worton (2018). ‚GPON SFP Transceiver Basics‘. 12.11.2018. <https://community.fs.com/de/blog/gpon-sfp-transceiver-basics.html>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.

Für unsere Analyse haben wir die Produktinformationen des Herstellers FS zur Sendeleistung (‚TX-Power‘) und Empfangsempfindlichkeit von GPON SFP-Modulen herangezogen, um die GPON-spezifischen Dämpfungsbudgets zu analysieren. Aufgrund der relevanten Dämpfungseigenschaften der Splitter kommen bei PON-Technologien i.d.R. deutlich leistungsfähigere SFP-Module zum Einsatz.⁶³ Laut Angaben des Herstellers können bei einem Splittingverhältnis von 1:64 mit GPON SFP-Modulen maximal 20 km überbrückt werden.

Wie bereits bei der Analyse der Reichweite bei einer Punkt-zu-Punkt-Netzarchitektur werden auch für die PON-Architektur die ‚bottom-up‘ Reichweiten auf Basis der Dämpfungswerten in Tabelle 4-1 ermittelt. Auch hier analysieren wir die drei Szenarien, differenziert nach ‚typischen‘ Werten, TIA-Standard sowie IEC/ITU-Standard.

Zusätzlich zu den Verlusten in Tabelle 4-1 (Kabeldämpfung, Steckerverlust und Spleißverlust) ist der Verlust in Tabelle 3-4, der durch den Einsatz vom optischen Splittern und ggf. von WDM-Kopplungen entsteht, für GPON-Netzarchitekturen zu berücksichtigen. Der Splitterverlust unterscheidet sich nach Splittingverhältnis (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 3.4.1.4). Anders als bei Punkt-zu-Punkt-Netzarchitekturen, wird für GPON-Netzarchitekturen angenommen, dass aufgrund des eingesetzten Splitters einmal weniger gespleißt werden muss, zugleich aber zweimal mehr Stecker verwendet

⁶³ Diese sind teurer und verbrauchen mehr elektrische Energie. Für einen Vergleich zwischen Ethernet und x.PON müssen beide SFP an der ONU (bei den Endkunden) abgewogen werden gegenüber der geringeren Zahl SFP am OLT (im Fall von x.PON). Dies gilt sowohl in Hinblick auf die Investitionen als auch in Hinblick auf den Energieverbrauch. Für letzteres vgl: Obermann, K.: Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien, Technische Hochschule Mittelhessen, 3. März 2020, https://www.brekoverband.de/site/assets/files/4853/gutachten_nachhaltigkeitsvergleich_ftth_fttc.pdf.

werden (an beiden Enden des Splitters).⁶⁴ Die Ergebnisse der ‚bottom-up‘ errechneten Reichweiten bei GPON-Netzarchitekturen werden in Tabelle 4-4 dargestellt.

Aus der Tabelle 4-4 ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Splittingverhältnis die Reichweite abnimmt. Bei niedrigem Splittingverhältnis 1:2 liegt die maximale Reichweite zwischen 22 und 53 km je nach Szenario. Beim höheren Splittingverhältnis 1:64 liegt sie allerdings nur zwischen 5 und 20 km. Da mit größeren Splittingverhältnissen mehrere Kunden angeschlossen werden können, stellt dieser Zusammenhang einen ‚trade-off‘ zwischen quantitativer und geographischer Abdeckung dar, die unter demselben MPoP bei einer PON-Netzarchitektur realisierbar ist.

Tabelle 4-4: Maximal erreichbare Entfernung (km) eines GPON OLT SFP-Modul (bidirektional, 2,5 Gbps in Download und 1,25 Gbps in Upload, Klasse B+) bei unterschiedlichen Splittingverhältnissen unter Berücksichtigung des verfügbaren Dämpfungsbudgets (dB) in verschiedenen bottom-up Szenarien

Splitting- verhältnis	Herstellerangaben			‚bottom-up‘ Berechnung		
	GPON SFP	Dämpfungsbudget		~erreichbare Entfernung (min – max)		
	SFP-Klasse	min. [dB]	max. [dB]	typisch [km]	TIA [km]	IEC/ITU [km]
1:2	Klasse B+	29,5	33,0	45 – 53	28 – 34	22 – 26
1:4	Klasse B+	29,5	33,0	38 – 46	24 – 29	18 – 22
1:8	Klasse B+	29,5	33,0	32 – 40	20 – 25	15 – 19
1:16	Klasse B+	29,5	33,0	25 – 33	16 – 21	12 – 16
1:32	Klasse B+	29,5	33,0	18 – 26	12 – 16	8 – 12
1:64	Klasse B+	29,5	33,0	12 – 20	7 – 12	5 – 9

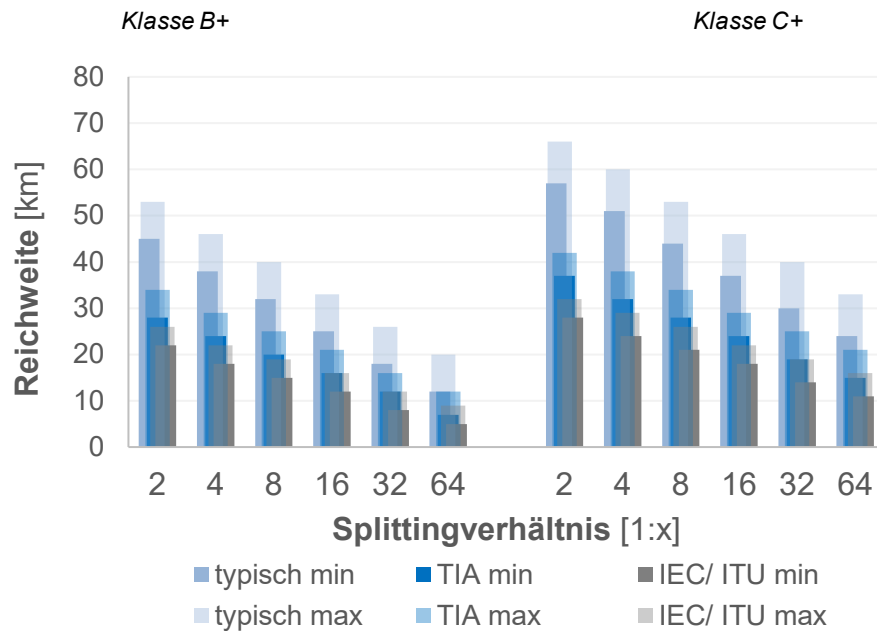
Quelle: WIK auf Basis der von Herstellerangaben FS Deutschland ([Gigabit Glasfaser PON Transceiver-Module - FS Deutschland](#)).

Die ‚GPON SFP-Module‘ unterscheiden sich weiterhin in Leistungsklassen: Klasse B+ und Klasse C+. Die bisherigen Ergebnisse stellen auf GPON SFP-Modul der Klasse B+ ab. GPON-SFP der Klasse C+ zeigt eine höhere Sendeleistung (‚TX-Power‘) bzw. niedrigere Empfangsempfindlichkeit im Vergleich zu Klasse B+.⁶⁵ Wie sich der Klassenunterschied zwischen GPON SFP-Modul der Klasse B+ und der Klasse C+ auf die erreichbare Reichweite auswirkt, wird in Abbildung 4-5 dargestellt.

⁶⁴ Man kann die Splitter auch fest einspleißen, das aber verringert die Flexibilität von deren Verwendung und erhöht den Aufwand bei späteren Beschaltungsänderungen.

⁶⁵ Worton (2018). ‚GPON SFP Transceiver Basics‘. Veröffentlicht am 12.11.2018. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/gpon-sfp-transceiver-basics.html>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.

Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der ‚bottom-up‘ berechneten Reichweiten für GPON-SFP Module der Klasse B+ (links) und C+ (rechts) nach Splittingverhältnissen

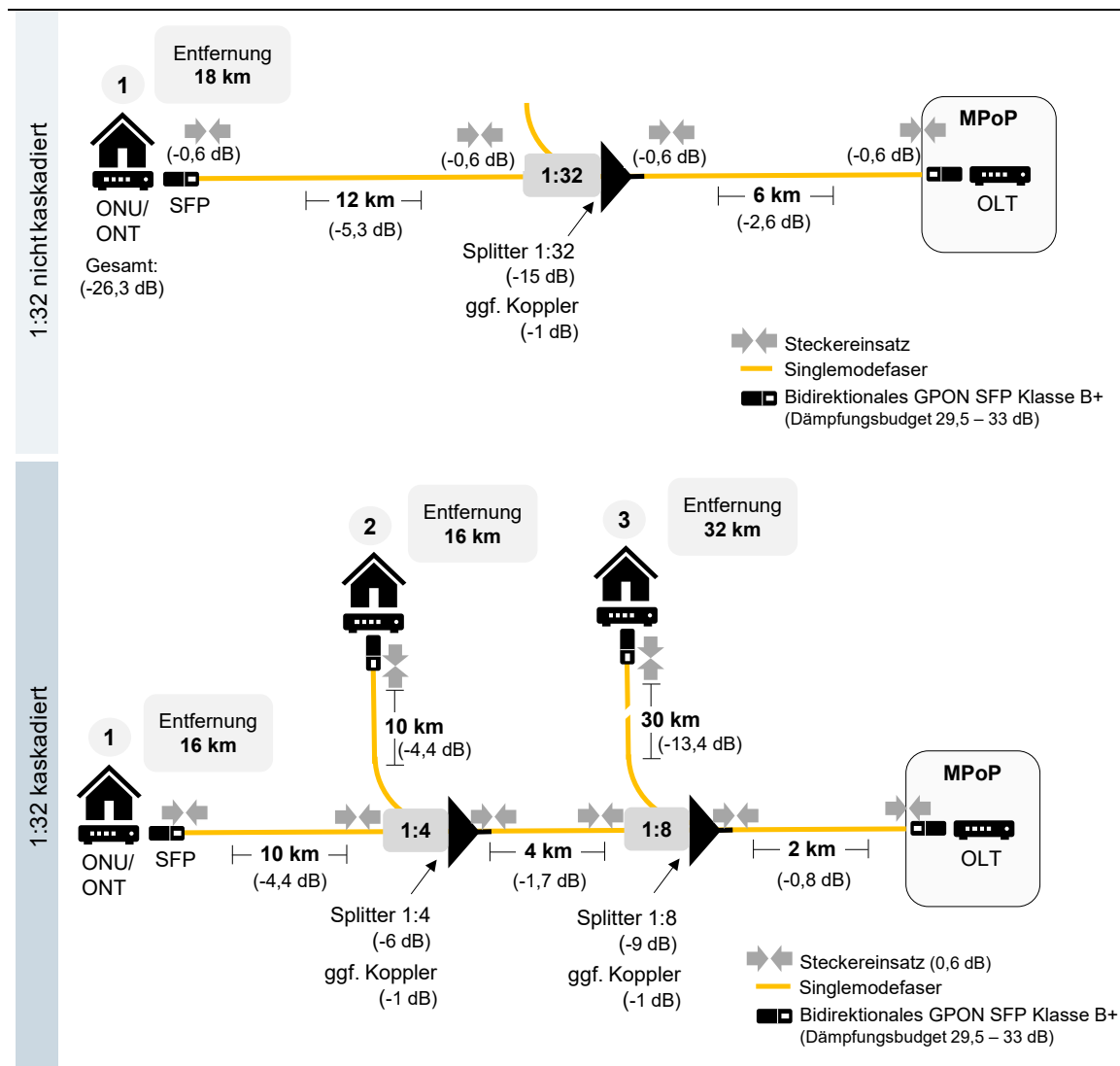


Quelle: WIK auf Basis von Angaben in Tabelle 4-4.

Durch die erhöhte Leistung- bzw. das erhöhte Dämpfungsbudget des GPON SFP-Moduls der Klasse C+ können größere Entfernungen bei allen Splittingverhältnissen überbrückt werden. Gegenüber den GPON SFP Modulen der Klasse B+ ist dieser Anstieg proportional über alle Splittingverhältnisse und Szenarien hinweg.

Allerdings sind in einer PtMP- bzw. PON-Netzarchitektur unterschiedliche maximale Reichweiten möglich, je nachdem wie die Splitter eingesetzt werden. Die bisherigen ermittelten Reichweiten beziehen sich auf ein Szenario, in dem die Splitter nicht kaskadiert eingesetzt werden. Sollte das gleiche Splittingverhältnis kaskadiert umgesetzt werden (d.h., ein Splitter nach dem anderen), dann ist die verfügbare, maximale Reichweite für die angeschlossenen Teilnehmer unterschiedlich. Abbildung 4-6 stellt die Konstellationen exemplarisch gegenüber. Teilnehmer mit ONU bzw. ONT, die durch mehrere Splitter mit dem OLT verbunden sind, dürfen weniger weit entfernt liegen im Vergleich zu Teilnehmern mit ONU bzw. ONT, die lediglich durch einen von den mehreren eingesetzten Splittern angeschlossen sind.

Abbildung 4-6: GPON-Netzdesign, Dämpfung und Reichweite



Quelle: WIK auf Basis von Ubiquiti (2022). 'UFiber GPON - Designing a GPON Network'. Ubiquiti Support & Help Center. <https://help.ui.com/hc/en-us/articles/115011654907--UFiber-GPON-Designing-a-GPON-Network>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.

Aus der Abbildung 4-6 ist ersichtlich, dass wenn anstatt eines Splitters mit einem Splittingverhältnis von 1:32 zwei Splitter mit jeweils 1:4 bzw. 1:8 kaskadiert eingesetzt werden, die überbrückbare Entfernung der Teilnehmer unterschiedlich sein kann, je nachdem ob sie durch einen oder durch mehrere kaskadierten Splitter angebunden sind. Im vorliegenden Fall liegt die maximale Reichweite für alle 32 Teilnehmer ohne Kaskadierung einheitlich bei 18 km, während mit Kaskadierung die maximal erreichbare Entfernung zwischen 32 km (für die sieben Teilnehmer mit dem ONU/OLT 3) und 16 km (für die vier Teilnehmer mit dem ONU/OLT 2 bzw. 3) variiert. Je nach Netzdesign, d.h. wie viele Splitter mit welchen Splitterverhältnissen an welcher Stelle gesetzt werden, sind zahlreiche Reichweiten-Kombinationen möglich.

5 Zusammenhang der technologieabhängigen Reichweiten und der regionalen Erstreckung von Anschlussbereichen

Die aktuelle Erstreckung der Anschlussbereiche ist vorwiegend durch die Restriktionen aus der veralteten Kupferwelt bestimmt. Diese bisherige (geerbte) Abgrenzung von Anschlussbereichen hat die aktuellen Standorte des MPoP bestimmt und die Länge der Anschlussleitungen auf maximal 7 km eingeschränkt (siehe Abbildung 5-1).

In den voranstehenden Kapiteln haben wir die technischen Bestimmungsfaktoren für die Reichweite von Anslusstechnologien in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Mediums untersucht. Zur Abschätzung der maximalen Erstreckung von Anschlussbereichen ist die technologieabhängige Reichweite auf der gesamten Anschlusslinie zu berücksichtigen. Dies erfordert bei hybriden Technologien die Berücksichtigung sowohl der Kupfer- als auch der Glasfaseranbindung.

Mit der Abbildung 5-1 greifen wir die in der Einführung gewählte Darstellung zur Reichweite der Anschlusslinie – vom Endkundenanschluss bis zum MPoP – auf. Anhand dieser Abbildung illustrieren wir die in dieser Studie herausgearbeiteten Zusammenhänge mit Blick auf die technischen Potentiale einer Ausweitung von Anschlussbereichen durch den Einsatz von glasfaserbasierten Technologien. Die Erkenntnisse lassen sich dabei wie folgt zusammenfassen:

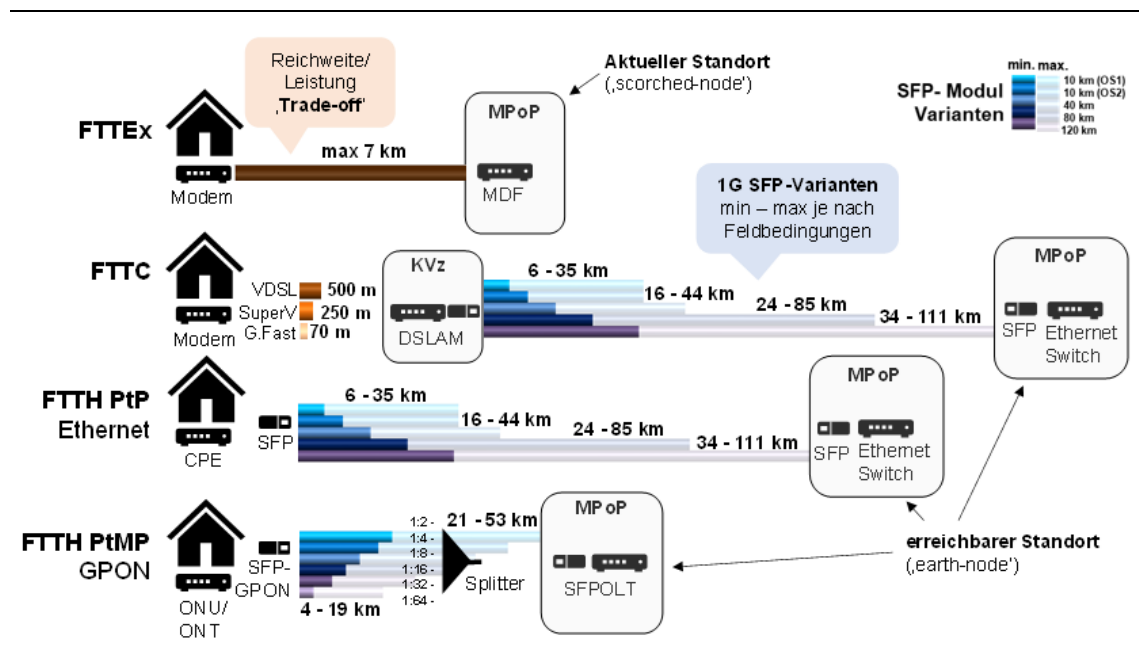
Unter Anwendung von ausschließlich kupferbasierten Anslusstechnologien (FTTEx) kann die zu Zeiten des Telefonnetzes relevante Reichweitenbeschränkung von 7 km nur mit völlig unzureichend niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten überbrückt werden (unter 1 Mbps).

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen Leistung und Reichweite muss bei zunehmendem Bedarf nach höheren Übertragungsgeschwindigkeiten die Länge der Kupferanschlussleitung proportional zur erwünschten Erhöhung der Bandbreite verkürzt werden, und die Strecke zwischen MSAN und MPoP durch eine Glasfaseranbindung realisiert werden. Weitverbreitete hybride Lösungen wie FTTC beschränken die zwischen dem Teilnehmerstandort und dem MSAN verbliebene Kupferleitung auf eine maximale Reichweite von 6,5 km für ADSL2+, 3,5 km für VDSL2, 0,8 km für Vectoring und 0,3 km für SuperVectoring (siehe DLSAM im Abschnitt 3.5.1).

Mit kürzer werdenden Kupferkabeln steigt der Anteil der Glasfaserkabeln an der gesamten Anschlussleitung bei unveränderter räumlicher Erstreckung des Anschlussbereichs. Wie gezeigt, kann durch den Einsatz von Glasfaserkabeln die Reichweite von Anschlusslinien und damit die räumliche Erstreckung eines Anschlussbereichs erheblich erhöht werden. Im Gegensatz zu Kupferkabeln ist die Leistungsfähigkeit von Glasfaserkabeln als Übertragungsmedium von Störfaktoren wenig betroffen (siehe Abschnitt 3.4.1.5). Der *trade-off* zwischen Leistung und Reichweite ist hier nicht gegeben. Stattdessen ist die Wahl der technischen Einrichtungen (wie SPF-Modulen und

dämpfungsräreren Netzkomponenten) der wesentliche Bestimmungsfaktor für die tatsächlich erzielbare Reichweite von Glasfaserverbindungen. Je nachdem, auf welchen Standards die eingesetzten Komponenten der Verbindungslinie basieren, sind relevante Unterschiede hinsichtlich der erzielbaren Reichweite festzustellen. Abbildung 5-1 stellt auf Basis der ermittelten ‚bottom-up‘ Reichweiten für optische SFP-Module die glasfaserbasierten Erstreckungsmöglichkeiten von Anschlusslinien in Abhängigkeit der jeweiligen Anschlussnetztechnologie dar.

Abbildung 5-1: Darstellung der ASB-Erstreckungsergebnissen nach Netzarchitekturen



Quelle: WIK: Die Reichweiten der Kupferdoppeladern im Anschlussnetz hängen zum einen vom Übertragungsprotokoll, zum anderen aber auch von der Zielbandbreite ab, die beim Kunden bereitgestellt werden soll (vgl. Neumann 2017, S. 15ff).

Je nach Dämpfungseigenschaften der eingesetzten Komponenten bzw. Verbindungen, können – wie anhand der Varianten typisch, TIA- bzw. IEC/ITU-Standards gezeigt – Entfernungen zwischen 6 bis 35 km mit den leistungsräreren SFP-Modulen überbrückt werden. Mit den leistungsräreren SFP-Modulen liegen die Reichweiten zwischen 35 und 111 km. Diese Feststellungen gelten nicht nur für ausschließlich glasfaserbasierte Anslusstechologien wie FTTH PtP, sondern auch für glasfaserbasierte Verbindungen zwischen KVz und MPoP in einer hybriden FTTC-Netzarchitektur.⁶⁶ Somit wäre eine relevante größere Abdeckung aus technischer Sicht nicht nur für FTTH PtP, sondern auch für die weitverbreitete FTTC Lösung möglich.

Für FTTH PtMP (GPON) sind die maximal erreichbaren Reichweiten darüber hinaus vom gewählten Splittingverhältnis abhängig. Je nach Dämpfungseigenschaften der

⁶⁶ Angaben von A. Mertz, M. Pollakowski, xDSL & Access Networks, Prentice Hall, 2000, S. 48f liefern in diesem Kontext eine Orientierungsgröße in Bezug auf das in Deutschland ausgebaute Anschlussnetz. Ihren Angaben zufolge sind 90% der Hauptkabel kürzer als 4 km.

eingesetzten Komponenten (typisch, TIA- bzw. IEC/ITU-Standards) und Leistungsklasse der eingesetzten Splitter (B+ oder C+) können für alle Teilnehmer einheitlich maximale Entfernungen zwischen 4 bis 19 km (beim Splittingverhältnis 1:64) und 21 und 53 km (beim Splittingverhältnis 1:2) überbrückt werden. Das Netzdesign in Bezug auf die Kaskadierung spielt dabei folgende Rolle: Je nachdem, wo die Splitter gesetzt werden, können längere Entfernungen für einige Teilnehmer erreicht werden, sofern auf die Netzverfügbarkeit anderer Teilnehmer verzichtet oder das Splittingverhältnis verringert wird (siehe Abschnitt 4.3).

In allen betrachteten Fällen kann aus technischer Sicht durch den Einsatz von Glasfaser im Anschlussnetz die Reichweite der Anschlusslinien und damit die räumliche Erstreckung des Anschlussnetzes relevant erhöht werden. Ob dies auch unter Berücksichtigung ökonomischer Überlegungen sinnvoll bzw. wünschenswert ist, bedarf einer gesonderten Analyse.⁶⁷

⁶⁷ Zu dieser Fragestellung siehe Ockenfels, M. / Kulenkampff, G. (2022): Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag, Bad Honnef Dezember 2022.

6 Ergebnisse

Aus der technischen Analyse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die technischen Eigenschaften des Glasfaserkabels ermöglichen es im Vergleich zu Kupferkabeln größere Distanzen zu überbrücken, ohne dabei auf hohe Datenübertragungsraten verzichten zu müssen (*Trade-off* zwischen Leistung und Reichweite löst sich auf). Dies beruht auf der geringeren Dämpfung von Glasfaser als Übertragungsmedium.

Die herausgearbeiteten Zusammenhänge lassen für die Frage nach der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen eine Trennlinie zwischen rein kupferbasierten Anschlussnetzen (FTTEx) auf der einen Seite und allen anderen Anschlussnetztechnologien auf der anderen Seite ziehen: Sowohl rein glasfaserbasierte als auch hybride Technologien erlauben für die heutzutage relevanten Datenübertragungsraten nahezu keine relevante Beschränkung hinsichtlich der Reichweite der Anschlusslinie:

- Anslusstechologien, die sich vom Gebäude bis zum MPoP nur auf Glasfaserverbindungen stützen, können bei leistungsschwachen SFP-Modulen unter ungünstigen Bedingungen mindestens eine Entfernung von 6 km abdecken, während bei leistungsstarken SFP-Modulen unter ‚typischen‘ Feldbedingungen bis zu 111 km erreicht werden können. Im ‚Best-Case‘ Szenario der Herstellerangaben liegt die maximale Reichweite dieser SFP-Module zwischen 10 km und 120 km. Eine größere Reichweite von glasfaserbasierten Leitungsabschnitten kann durch den Einsatz höherwertigeren Equipments erkaufte werden.
- Nicht nur FTTH/B, sondern auch hybride Anslusstechologien wie FTTC/S können ab dem Verzweiger bis zum MPoP weit erstreckt werden (von 6 bis 111 km wie bei FTTH).

Je nach Wahl der Netzkonfiguration, d.h. welche und wie häufig dämpfungsrelevante Netzelemente wie Steckerverbinder, Spleiße und ggf. Splitter eingesetzt werden, können unterschiedliche Entfernungen über Glasfaser erreicht werden.

Bezugnehmend auf den ‚scorched-node‘ Ansatz kann aufgrund der technischen Zusammenhänge festgestellt werden, dass die aus der reinen Kupferwelt stammende Beschränkung der Reichweite von Anschlusslinien vom Endkunden bis zum MPoP durch den Einsatz von Glasfaser überholt ist. Die technischen Möglichkeiten der Glasfasertechnologien erlauben – auch für hybride Lösungen – eine deutliche Ausweitung von Anschlussbereichen. Unterschiede zwischen verschiedenen Glasfasertechnologien kommen lediglich bei PON-Architekturen im Vergleich zu FTTH PtP Ethernet Technologien zum Tragen. Aufgrund der relevanten Dämpfungseigenschaften von Splittern weisen PON-Architekturen im Vergleich eine deutlich geringere Reichweite auf. Je nach Auswahl des Splittingverhältnisses liegt die Erstreckungsmöglichkeit zwischen 7 und 55 km.

Ob diese technischen Möglichkeiten sich tatsächlich in einer relevanten, größeren räumlichen Erstreckung von Anschlussbereichen niederschlagen sollten, ist unter Berücksichtigung der ökonomischen Zusammenhänge und Kostentreiber glasfaserbasierter Anschlussnetze zu entscheiden. Hierzu bedarf es einer gesonderten ökonomischen Analyse, die sowohl die räumliche Verteilung der Anschlussnachfrage als auch weitere Kostentreiber von glasfaserbasierten Anschlussbereichen einbezieht.⁶⁸

68 Ockenfels, M. / Kulenkampff, G. (2022): Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 494, Bad Honnef Dezember 2022.

Literaturverzeichnis

- Bundesnetzagentur (2022). Regulierungsverfügung zu Markt Nr. 3a. Beschluss BK3i-19/020. Öffentliche Fassung.
- CBO GmbH (2021). ‚APC vs. PC vs. UPC - Wo liegt der Unterschied?‘ Vom 18.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/apc-vs-pc-vs-upc-wo-liegt-der-unterschied.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022.
- CBO GmbH (2021). ‚OS1 vs. OS2 -Welches ist besser?‘ Veröffentlicht am 14.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/os1-vs-os2-welches-ist-besser.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.
- CBO GmbH (2021). ‚Verständnis der Verluste von Glasfaserverbindungen‘. Veröffentlicht am 12.01.2021. <https://www.cbo-it.de/de/blog/versaendnis-der-verluste-von-glasfaserverbindungen.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.
- Cisco (2005). ‚Berechnung der maximalen Hop-Distanzen für 15454 Glasfaserverbindungen‘. https://www.cisco.com/c/de_de/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multi-service-provisioning-platform-mspp/19762-max-hop-19762.html
- Europäische Kommission (2013). ‚Empfehlung der Kommission über einheitliche Nichtdiskriminierungsverpflichtungen und Kostenrechnungsmethoden zur Förderung des Wettbewerbs und zur Verbesserung des Umfelds für Breitbandinvestitionen‘. 11. September 2013. (2013/4666EU).
- Europäische Kommission (2021). ‚Annexes to the Guidelines on State aid for broadband networks‘. Draft. https://competition-policy.ec.europa.eu/public-consultations/2021-broadband_en. Last accessed: 19.12.2022.
- EXFO (2012). ‚FTTH PON-Leitfaden: Testen von passiven optischen Netzen‘, 5. Ausgabe, S.12. https://cdn2.hubspot.net/hub/281197/file-258811849-pdf/docs/reference_guide_ftth_pon5deutsch.pdf. Zuletzt besucht: 06.09.2022.
- Fibre to the Home Council Europe (2013). ‚White Paper: Broadband Access Technologies‘.
- Fibre to the Home Council Europe (2018). ‚FTTH Handbook Edition 8‘. D&O Committee. Revision Date: 13/02/2018.
- Fluke Networks (2011). ‚Insertion Loss: General, 101 learning, Installation and testing‘. August 25, 2021. <https://www.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/cable-testing-101-insertion-loss-matters-fiber-and-copper>. Zuletzt besucht: 24.08.2022.
- Fluke Networks (2022). ‚Was versteht man unter Frequenz‘. <https://www.fluke.com/de-de/mehrfach-erfahren/blog/elektrik/was-versteht-man-unter-frequenz#:~:text=Wechselspannung%20ist%20die%20Anzahl%20von,1%20Zyklus%20pro%20Sekunde%20ist.> Zuletzt besucht: 20.12.2022.
- FS Deutschland (2022). Transceiver-Module | Transceiver-Lösung - FS Deutschland - FS Deutschland <https://www.fs.com/de/c/optics-and-transceivers-9>. Zuletzt besucht: 30.08.2022.
- HTF (2021). ‚How to use fiber optic transceiver in network?‘ 19.02.2021. <https://www.htfwdm.com/info/how-to-use-fiber-optic-transceiver-in-network-53917308.html>. Zuletzt besucht: 31.08.2022.

- Industrial Solutions GmbH (2022). ‚Dämpfung‘. <https://www.indu-sol.com/support/glossar/daempfungsmass/>. Zuletzt besucht: 07.09.2022
- ISO/IEC (2002) International Standard: ISO/IEC 11801. Information technology – Generic cabling for customer premises, Second Edition. 2002-09.
- Jodl, M. (2017). ‚Glasfaser in der Telekommunikation: Geschichte, Entstehung, Möglichkeiten‘. Blog-Telekom. 16. Mai 2017. <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/glasfasern-in-der-telekommunikation-geschichte-entstehung-moeglichkeiten-492076>. Zuletzt besucht: 18.07.2022
- John (2021). ‚Cat5/5e, Cat6/6a, Cat7 and Cat8 Cable Buying Guide‘. Aktualisiert am 01.11.2021. FS Community. <https://community.fs.com/blog/quick-view-ethernet-cables-cat5-cat5e-and-cat6.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022.
- Kirschkewitz, H. (2020). ‚SFP-Modul: Der „Dolmetscher“ fürs Internet.‘ Blog.Telekom 01.12.2020 <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/sfp-modul-613626>. Zuletzt besucht: 16.08.2022.
- Kulenkampff, G., Ockenfels, M., Zoz, K., Zuloaga, G. Kosten von Breitband-Zugangsnetzen (2020). Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus. bottom-up Modellierung und statistische Analyse. WIK Diskussionsbeitrag, No. 473. WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste, Bad Honnef
- Kulenkampff, G., Plückerbaum, T., Zoz, K. (2019). Analytisches Kostenmodell für das Anschlussnetz AKM-AN Version 3.0. Referenzdokument. Studie für die Bundesnetzagentur
- Luber, S., Donner, A. (2019). ‚Was ist ein DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer)‘. IP-Insider. 12.04.2019. <https://www.ip-insider.de/was-ist-ein-dslam-digital-subscriber-line-access-multiplexer-a-820375/>. Zuletzt besucht: 25.08.2022.
- Mertz, A., Pollakowski, M. (2000): ‚xDSL & Access Networks. Grundlagen, Techniken und Einsatzaspekte von HDSL, ADSL und VDSL‘. Prentice Hall.
- Neumann, K.-H.; Ockenfels, M.; Plückerbaum, T. (2017). Modellierung der Kosten eines flächen-deckenden Hochbreitbandnetzes in der Schweiz, Bad Honnef, 5. Oktober 2017, <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesgesetze/fmg-revision-2017.html>
- Noegig (2015). ‚Niederösterreich Glasfaser Handbuch. Leitfaden für Ausbau Mitverlegung. Begleitung für Pilotprojekte in Niederösterreich‘.
- Obermann, K.: (2020). ‚Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien‘. Technische Hochschule Mittelhessen, 3. März 2020, https://www.brekoverband.de/site/assets/files/4853/gutachten_nachhaltigkeitsvergleich_ftth_fttc.pdf.
- Ockenfels, M., Kulenkampff, G. (2022). ‚Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 494, Bad Honnef, Dezember 2022.
- Plückerbaum, T. (2007). ‚Breitband - Ausbauphilosophie der Netzbetreiber im Wettbewerb‘. Vortrag auf der Tagung „Wie breit ist Breitband – Ist Breitband breit genug“ Eltville, Kloster Eberbach, 31. Mai – 1. Juli 2006 (S.4).
- Plückerbaum, T. (2013). ‚VDSL Vectoring, Bonding und Phantoming: Technisches Konzept, marktliche und regulatorische Implikationen‘. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 374.

- Plückebaum, T., Eltges, F., Ockenfels, M. (2019). ‚Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS‘. Studie für die Bundesnetzagentur. WIK-Consult.
- Plückebaum, T., Ockenfels, M. (2020). ‚Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer auf Glasfasernetze‘. WIK Diskussionsbeitrag Nr.457
- Russel, G. (2022). ‚Wie hoch ist die SFP-Tx-Leistung und Rx-Empfindlichkeit eines SFP-Moduls?‘ <https://ecloudlight.com/de-eu/blogs/articles/what-is-the-sfp-tx-power-and-rx-sensitivity-of-an-sfp-module>. Zuletzt besucht: 20.12.2022.
- Sawall, A. (2020). ‚50 Jahre Glasfaser. Warum der erste Glasfaserausbau der Telekom scheiterte‘. Golem Media GmbH. 10.Dezember 2020. <https://www.golem.de/news/50-jahre-glasfaser-warum-der-erste-glasfaserausbau-der-telekom-scheiterte-2012-152748.html>. Zuletzt besucht: 18.07.2022.
- Sheldon (2022). ‚Twisted-Pair-Kabel – Alle wichtige Informationen‘. FS Deutschland. <https://community.fs.com/de/blog/twisted-pair-cables-everything-you-need-to-know.html>. Zuletzt besucht: 16.12.2022.
- Shenzhen HTFuture Co., Ltd (2021). ‚How to use fiber optic transceiver in network?‘ Veröffentlicht am 19.02.2021. <https://www.htfwdm.com/info/how-to-use-fiber-optic-transceiver-in-network-53917308.html>. Zuletzt besucht: 15.07.2022.
- Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Nachrichtentechnik (LNT) (2019) Beispiele von Nachrichtensystemen. Abschnitt:2.4 Verfahren zur Senkung der Bitfehlerrate bei DSL. https://www.intwww.de/Beispiele_von_Nachrichtensystemen/Verfahren_zur_Senkung_der_Bitfehlerrate_bei_DSL. Diese Seite wurde zuletzt am 7. August 2019 um 11:19 Uhr bearbeitet. Zuletzt besucht: 16.08.2022.
- The Fiber Optic Association (FOA) (2021). Reference Guide. <https://www.thefoa.org/tech/tia568b3.htm>. Zuletzt besucht: 20.12.2022.
- Thunder Link International Co. Ltd (2022). ‚Huawei MA5600 DSLAM‘. https://www.thunderlink.com/HUAWEI-MA5600_p599.html#attributetech_specs. Zuletzt besucht: 16.08.2022.
- Ubiquiti (2022). ‚UFiber GPON - Designing a GPON Network‘. Ubiquiti Support & Help Center. <https://help.ui.com/hc/en-us/articles/115011654907--UFiber-GPON-Designing-a-GPON-Network>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.
- Versitron, Inc. (2022). ‚White Paper: Tips on How to Calculate Fiber Loss in a Network‘. [How to Calculate and Reduce Fiber Optic Loss in a Network | Versitron](https://www.versitron.com/white-paper-tips-on-how-to-calculate-fiber-loss-in-a-network). Zuletzt besucht: 20.12.2022.
- Worton (2018). ‚GPON SFP Transceiver Basics‘. Veröffentlicht am 12.11.2018. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/gpon-sfp-transceiver-basics.html>. Zuletzt besucht: 12.09.2022.
- Worton (2019). ‚Wie lassen sich verschiedene Arten von Verlustfaktoren bei Glasfasern reduzieren?‘ Veröffentlicht am 05.06.2019. <https://community.fs.com/de/blog/how-to-reduce-various-types-of-losses-in-optical-fiber.html>. Zuletzt besucht: 20.12.2022.
- Worton (2020). ‚Grundlegendes zu Glasfaserstecker-Typen‘. Aktualisiert am 22.07.2020. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/understanding-fiber-optic-connector-types.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022.

- Worton (2020). ‚Singlemode-Faser: Typen und Anwendungen‘. Veröffentlicht am 07.08.2020. <https://community.fs.com/de/blog/single-mode-fiber-os1-vs-os2-what-is-the-difference.html>. Zuletzt besucht: 01.09.2022.
- Worton (2020). ‚Warum ist GPON in FTTH-Netzwerken so beliebt?‘. Aktualisiert am 12.09.2020. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/an-overview-of-gpon-ftth-access-network.html>. Zuletzt besucht: 13.09.2022.
- Worton (2022). ‚ITU-T-Normen für verschiedene optische Fasern‘. Aktualisiert am 07.06.2022. FS Community. <https://community.fs.com/de/blog/itu-t-standards-for-various-optical-fibers.html>. Zuletzt besucht: 07.09.2022.
- Wulf, A. H. (2007). ‚VDSL Access Options‘. Alcatel Lucent, WIK VDSL Conference, Königswinter, March 2007.
- Zhao, R., Fischer, W., Aker, E., Rigby P. (2013). ‚White Paper: Broadband Access Technologies‘. FTTH Council Europe.

Anhang

Kupferbasierte Technologien

Das kupferbasierte Anschlussnetz (FTTEx – Fibre to the Exchange) war ursprünglich für die analoge Übertragung eines Telefonsignals ausgelegt. Dieses Signal (von 3,6 kHz) wurde herkömmlich über einen ungeschirmten Kupferdoppelader (engl. *Unshielded Twisted Pair* oder UTP) übertragen und war bis maximal ca. 7 km längenbeschränkt.⁶⁹ Die Auslegung der Anschlussbereiche für das Telefonnetz hatte dieser Restriktion Rechnung zu tragen. Entsprechend ist die Lage und Anzahl von MPoP im Sinne von Hauptverteilerstandorten auch dieser technischen Restriktion in der Reichweite des Signals geschuldet.⁷⁰

Mit der Verbreitung von Internetdiensten und der damit einhergehenden wachsender Bandbreitennachfrage entstanden separate Datenübertragungssysteme, die oberhalb des Frequenzbereiches für Telefonie Daten übertragen (etwa ab dem Jahr 2000).

Mit Einsatz dieser Technologien rüstete die Deutschen Telekom ihr Anschlussnetz auf und führte die Übertragungstechniken *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) und später ADSL2+ ein. Auf Basis von ADSL2+ konnte der Netzbetreiber Datenübertragungsraten bis zu 16 Mbps im Download anbieten.⁷¹ ADSL2+ sowie *Very High Speed Digital Subscriber Line* (VDSL) bzw. VDSL2 (Profil 8a) können auf der gesamten Strecke des Anschlussbereiches Daten vollständig über sog. UTP-Kupferkabel (UTP - unshielded twisted copper) vom Endkunden bis zum HVt (MPoP in der FTTEEx Netzarchitektur) übertragen.

In der unterstehenden Tabelle werden die reichweitenrelevanten technischen Merkmale von kupferbasierten Übertragungstechniken dargestellt. Dazu gehören die Frequenz (in Hz), der Signalpegel (in dBm) sowie die Datenratefähigkeit (in Mbps).

⁶⁹ Plückebaum & Ockenfels (2020), S.7 und Plückebaum (2007). ‚Breitband - Ausbauphilosophie der Netzbetreiber im Wettbewerb‘. Vortrag auf der Tagung ‚Wie breit ist Breitband – Ist Breitband breit genug‘ Eltville, Kloster Eberbach, 31. Mai – 1. Juli 2006 (S.4).

⁷⁰ Plückebaum & Ockenfels (2020), S.7

⁷¹ Bundesnetzagentur (2022). Regulierungsverfügung zu Markt Nr. 3a. Beschluss BK3i-19/020. Öffentliche Fassung, S. 22

Tabelle 0-1: Frequenz, Signalpegel, Datenratefähigkeit („minimum bidirectional net data rate capability“ MBDC), Knotenequipment und Strecke reiner kupferbasierten Übertragungstechniken bei Kupfernetzarchitekturen (FTTEx)

Übertragungstechnik	Frequenz [Hz]	Signalpegel [dBm]	Datenratefähigkeit [Mbps]	Knoten A (Equipment)	Knoten C (Equipment)
ADSL2+	bis 2,2 kHz			EVz (CPE)	MPoP (MDF)
VDSL2 (8a)	12 MHz	+17,5 dBm	50 Mbps (bidirektional)	EVz (CPE)	MPoP (MDF)

Quelle: WIK. Information zu Signalpegel von Elektronik-Kompodium.de (2022) (<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/index.htm#a2>). Zuletzt besucht: 21.07.2022

Hybride kupfer- / glasfaserbasierte Technologien

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach höherer Datenübertragungsraten wurden xDSL-Technologien weiterentwickelt, um möglichst höhere Frequenzen zu zulassen. Allerdings hat der Einsatz von höheren Frequenzen bei ungeschirmten Kupferkabeln nicht nur eine reduzierte Signalstärke aufgrund der potenziellen elektromagnetischen Störung als Folge, sondern auch eine stärkere Dämpfung, was die erreichbare Reichweite sehr stark einschränkt.⁷² Glasfaser ist in dieser Hinsicht viel weniger betroffen. Deshalb wurde in verkehrsaggregierenden Netzsegmenten zunehmend Glasfaser eingesetzt. Je nach dem wie weit sich die Länge des Glasfaserkabels auf der letzten Meile erstreckt, d.h. wie naher Glasfaser an den Endnutzer kommt, lassen sich unterschiedliche Netzarchitekturen auf Basis von hybriden kupfer- / glasfaserbasierten Technologien (FTTC oder FTTS) ausbauen.⁷³ Hierbei wird bei FTTC (*Fiber-to-the-Cabinet*) Glasfaser bis in die KVZ-Standorte verlegt, während bei FTTS (*Fiber-to-the-Street*) Glasfaser noch kurz vor den Gebäuden geführt wird.

Fibre-To-The-Curb (FTTC)

Durch die Verlegung von Glasfaserkabeln bis in die KVZ-Standorte kann der Netzbetreiber aufgrund einer reduzierten Länge der kupferbasierten Teilnehmeranschlussleitung Datenübertragungsraten bis zu 50 Mbps mit der Übertragungstechnik VDSL2 (Profil 17a) anbieten. Durch die Einführung von Vectoring-Verfahren können Datenübertragungsraten bis zu 100 Mbps angeboten werden. Eine weitere Erhöhung des genutzten Frequenzspektrums über das sogenannte SuperVectoring-Verfahren (VDSL2 Profil 35) hat

⁷² FTTH Council (2013). White Paper: Broadband Access Technologies, S.9.

⁷³ Die Deutsche Telekom begann im Jahr 2006 zwischen dem KVZ (Knotenpunkt B) und MPoP (Knotenpunkt C) Glasfaser zu verlegen und somit die den Verkehr aggregierenden DSLAMs/ MSANs vom MPoP-Standort in die KVZ-Standorte zu verschieben. Die Anschlussleitungen zum Kunden (von Knotenpunkten A bis B), die sogenannten ‚Subloops‘, blieben aus den vorhandenen ungeschirmten Kupferkabel (engl. Unshielded Twisted Pair oder UTP-Kupferkabel) bestehen.

Datenübertragungsraten von bis zu 250 Mbps ermöglicht.⁷⁴ VDSL (17a), VDSL (30a), SuperVectoring (35b) sind Übertragungstechniken, die sich für eine Fibre-To-The-Curb oder Fibre-To-The-Cabinet (FTTC) Netzarchitektur eignen.

Fibre-To-The Street (FTTS)

In ‚Fibre-To-The Street‘ (FTTS)-Netzarchitekturen eignen sich Übertragungstechniken wie G.fast. Hierfür werden kleinere *Optical Network Units* (ONUs) verwendet, auch Distribution Point Units (DPU) genannt, die welche kurz vor den Gebäuden eingesetzt werden.⁷⁵ Somit wird Glasfaser vom MPoP bis in die DPU eingerichtet. Je nach Profil können mit G.fast Datenraten von bis zu 1 – 2 Gbps in Down- und Upstream (aggregiert) erreicht werden.

Tabelle 0-2: Frequenz, Signalpegel, Datenratefähigkeit (MBDC bzw. ‚aggregate net data-rate capability‘ ANDR), Knotenequipment und Strecke von kupferbasierten Übertragungstechniken bei hybriden Netzarchitekturen (FTTC und FTTS)⁷⁶

Übertragungstechnik	Frequenz [MHz]	Signalpegel [dBm]	Datenratefähigkeit [Mbps]	Knoten A (Equipment)	Knoten B (Equipment)
VDSL2 (17a) ‚Vectoring‘	17 MHz	+14,5 dBm	100 Mbps (direktional)	EVz (CPE)	KVz (DSLAM)
VDSL2 (30a)	30 MHz	+14,5 dBm	200 Mbps (direktional)	EVz (CPE)	KVz/ Gebäude (DSLAM)
VDSL2 (35b) ‚Super-Vectoring‘	35 MHz	+17,0 dBm	200 Mbps (direktional)	EVz (CPE)	KVz (DSLAM)
G.Fast (106a)	bis 106 MHz	+4 dBm	1.000 Mbps (aggregiert)	EVz (CPE)	Distribution Point/ Gebäude (DSLAM)
G.Fast (212a)	bis 212 MHz	+4 dBm	2.000 Mbps (aggregiert)	EVz (CPE)	Distribution Point/ Gebäude (DSLAM)

Quelle: WIK auf Basis von ITU-T G.993.2 (02/2019). Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). S. 20 und Annex Q, S. 391, ITU-T G.9701 Amendment 3 (10/2020). Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Physical layer specification, S. 26 und ITU-T G.9711 Amendment 1 (04/2022): Multi-gigabit fast access to subscriber terminals (MGfast) – Physical layer specification, S. 538.

⁷⁴ Bundesnetzagentur (2022). Regulierungsverfügung zu Markt Nr. 3a. Beschluss BK3i-19/020. Öffentliche Fassung, S. 22-23 und Plückebaum & Ockenfels (2020), S.9.

⁷⁵ G.Fast wird auch in Fibre-To-The-Building (FTTB)-Netzarchitekturen eingesetzt. Hierbei reicht die Glasfaser vom MPoP bis in das Kundengebäude und wird dort durch eine *Optical Network Unit* (ONU) abgeschlossen (Plückebaum & Ockenfels, 2020. S.11).

⁷⁶ Wenn das Glasfaserkabel bis zum Gebäude geführt wird (siehe Knoten B in Tabelle 0-2), besteht dann nur die Inhausverkabelung aus Kupferdoppeladern. In diesen Fällen handelt es sich um eine FTTB-Netzarchitektur (*Fiber-to-the-Building*). Zum Zweck der ASB-Erstreckung fängt allerdings die Betrachtung in dieser Studie erst ab dem Gebäude an. In dieser Hinsicht qualifiziert sich FTTB wie FTTH als eine glasfaserbasierte Netzarchitektur.

Glasfaserbasierte Technologien

Bei Glasfaser-Zugangsnetztechnologien, wie Fibre-to-the-Home (FTTH) Technologien, reicht die optische Übertragung durchgehend vom MPoP bis in die optischen Anschlussdosen in jeder Wohnung. Hierbei kann man zwei Glasfaser-Zugangsnetztopologien unterscheiden, Glasfaser-Punkt-zu-Punkt (engl. *Point-to-Point*: PtP) und Glasfaser-Punkt-zu-Multipunkt (engl. *Point-to-Multipoint*: PtMP).

- Bei FTTH PtMP (Punkt-zu-Multipunkt) werden die Glasfaserverbindungen an einem intermediären Punkt zwischen der Wohnung und dem MPoP über einen sogenannten optischen Splitter auf eine einzige weiterführende Glasfaser geführt.⁷⁷ Diese weiterführende Glasfaser ist ein sogenannten ‚shared medium‘, dessen Bandbreitenkapazität sich die einzelnen Endnutzer teilen.⁷⁸
- Bei FTTH PtP (Punkt-zu-Punkt) wird jede Wohnung oder Geschäftsstätte mit einer individuellen Glasfaser am MPoP angeschlossen.⁷⁹

GPON und Ethernet sind Übertragungstechniken, die sich für FTTH-Netzarchitekturen eignen. Im Gegensatz zu kupferbasierten Technologien arbeiten GPON und Ethernet im Anschlussnetz mit optischen (anstatt elektrischen) Signalen. Für den Anschlussbereich sind das Lichtwellenleiter mit großen Bandbreiten und relativen geringen Dämpfungseigenschaften, d.h. mit Wellenlängen zwischen 1270 nm und 1600 nm (siehe Tabelle 0-3) vorgesehen. Theoretisch können durch die optische Datenübertragungstechnik größere Datenmengen (Giga- bis Terabit pro Sekunde) bei gleichzeitig größeren Reichweiten (über hundert Kilometer ohne Zwischenverstärker) transportiert werden.

In Zugangsnetzen sind *Fast Ethernet* und *Gigabit Ethernet* über Singlemode-Glasfaser (siehe Infobox) durch den Standard ‚Ethernet in der ersten Meile‘ (IEEE 802.3ah) seit dem Jahr 2004 normiert. *Fast Ethernet* wird als ‚100Base-BX10‘ und *Gigabit Ethernet* als ‚1000Base-BX10‘ bezeichnet. Beide Spezifikationen sind für eine nominelle maximale Reichweite von 10 km definiert. Mit leistungsfähigeren Sendern und Empfängern sind heute jedoch auch höhere Reichweiten über 1000-BX20, -BX40 oder -BX60 möglich.⁸⁰

⁷⁷ Wenn in KVz Ethernet Switches verbaut werden, dann ist es nicht mehr PON aber immer noch PtMP.

⁷⁸ Plückebaum & Ockenfels (2020), S.12.

⁷⁹ Plückebaum & Ockenfels (2020), S.14

⁸⁰ FTTH Council Europe (2017). FTTH Handbook, S.48-49.

Tabelle 0-3: Wellenlängen, ggf. Splittingverhältnisse, Knotenequipment und Strecke reiner glasfaserbasierten Übertragungstechniken bei Glasfasernetzarchitekturen (FTTH PtMP und FTTH PtP)

Übertragungstechnik	Wellenlängen [nm]	Splittingverhältnis [1:x]	Knoten A (Equipment)	Knoten C (Equipment)
FTTH PtMP				
GPON	Download: 1480 – 1500 nm Upload: 1300 – 1320 nm	max. 1:64	EVz (ONT)	MPoP (OLT)
XG.PON	Download: 1580 nm Upload: 1260 – 1280 nm	max. 1:128	EVz (ONT)	MPoP (OLT)
XGS.PON	Download: 1577 nm Upload: 1270 nm	max. 1:128	EVz (ONT)	MPoP (OLT)
FTTH PtP				
Ethernet	Download: 1490 – 1550 nm (100 oder 1000Base-BX-D) Upload: 1310 nm (100 oder 1000Base-BX-U)	keine Anwendung (1:1)	EVz (Modem)	MPoP (Ethernet Switch)

Quelle: WIK. Information zu Wellenlängen für XGS.PON aus der Herstellerseite ViaVI (2022) Startseite | XGS-PON. Stand: 21.07.2022

Koaxialkabelbasierte Technologien

Koaxialkabel wurden in Deutschland vor ca. 40 Jahren als Übertragungsmedium für TV-Kabelnetze ausgebaut, um breitbandige Fernsehsignale in die Haushalte leiten zu können. Da sie eine Bauform-immanente Schirmung haben, sind sie gut zur Übertragung hochfrequenter Signale (wie z.B. Fernsehsignale) geeignet.

Über Kabel-TV-Netze greifen alle Teilnehmer dasselbe TV-Signal ab. Der Informationsinhalt wird von zentraler Stelle ausschließlich in eine Richtung verteilt, im sogenannten Broadcast (einer sendet an alle Empfänger). Um die individuelle Kommunikation in beide Richtungen ermöglichen zu können, wurde in den 1980er Jahren der Standard DOCSIS (*Data over Cable Service Interface Specification*) entwickelt. Im Gegensatz zu Telefonkabeln gibt es zu jedem Anschluss nur das eine Koaxialkabel, das sich alle angeschlossenen Kunden teilen (sogenanntes ‚shared medium‘). Mit DOCSIS wurde die individuelle Kommunikation auf dem ‚shared medium‘ über eine an zentraler Stelle angesiedelten *Cable Modem Termination System* (CMTS) administriert.⁸¹

Über viele Zwischengenerationen hinweg sind heute die Standards DOCSIS 3.0 und 3.1 ‚Full Services‘ im Einsatz. Eine Nachfolgegeneration DOCSIS 4.0 befindet sich bereits in der Entwicklung.

⁸¹ Plückebaum et al. (2019), S.2 – 4.

Tabelle 0-4: Frequenzbereich, Teilnehmerkapazität und Strecke reiner koaxialbasierter Übertragungstechniken (DOCSIS 3.0)

	Frequenzbereich [MHz]	Datenrate [Mbps]	Kapazität [#Anschlüsse]	Knoten A	Knoten B
DOCSIS 3.0 'Full Services'	Downstream: bis 862 MHz (bis 24-32 Kanäle) Upstream: bis 85 MHz (bis 8-12 Kanäle)	Downstream: bis 1.600 Mbps (gesamt) 50 Mbps je Kanal Upstream: bis 324 Mbps (gesamt) 27 Mbps je Kanal	bis ca. 2.500 (,shared medium')	Endnutzer	CMTS

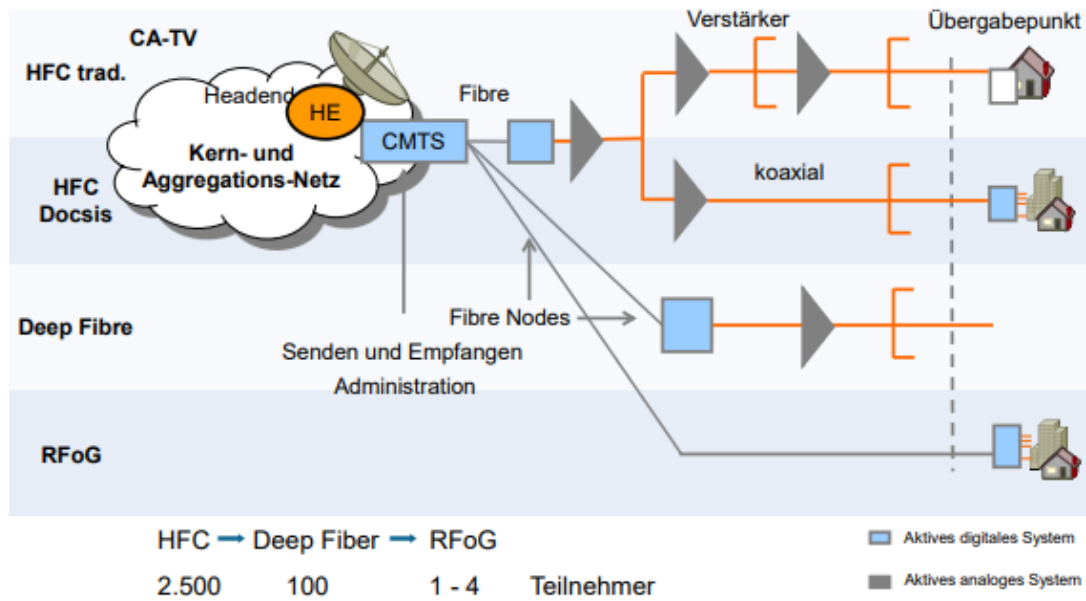
Quelle: WIK

Koaxialkabel und Glasfaser

Als ‚shared medium‘ hängen DOCSIS-Technologien in ihrer Leistungsfähigkeit von der Anzahl gleichzeitig aktiver benachbarten Nutzer am selben Fibre Node ab. Um die Kapazität zu erhöhen und die Kollisions- und Stauwahrscheinlichkeit zu reduzieren (und damit die Übertragungsqualität und Bandbreite je Kunde zu erhöhen), gibt es drei Möglichkeiten:

- Man kann entweder den Frequenzbereich der Datenkommunikation zu Lasten der Radio- und TV-Frequenzkapazität erweitern
- oder den insgesamt zur Verfügung stehenden Frequenzbereich vergrößern (z.B. bei neuen DOCSIS Releases)
- oder durch Anwendung von ‚Node-Splitting‘ die bestehenden Glasfaserknoten (Fibre-Nodes) in mehrere kleineren Knoten aufteilen. Das reduziert die Anzahl der Endnutzer in einem Kollisionsbereich. Für das Aufteilen der Glasfaserknoten bzw. ‚Node-Splitting‘ sind zusätzliche Glasfaserverbindungsbauelemente zu den neuen kleineren Glasfaserknotenstandorten erforderlich, wodurch die Glasfaser den Endnutzer näherkommt (siehe Abbildung 0-1).

Abbildung 0-1: ‚Hybrid Fibre Coax‘ (HFC) Netze und ‚Node-Splitting‘



Quelle: Plückebaum et al (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. S.7

In der Regel werden diese Techniken mehr oder weniger gleichzeitig eingesetzt. Unter Anwendung von Glasfasern für ‚Node-Splitting‘ können Deep Fibre für DOCSIS 3.0, 3.1, 4.0 FD und ‚Radio Frequency over Glas‘ (RFoG) unterstützt werden.

Tabelle 0-5: Frequenzbereich, Gesamtdatenrate, Fiber-Node-Kapazität und Strecke von koaxialkabelbasierten Übertragungstechniken bei hybriden ‚Hybrid Fibre Coax‘ (HFC) Netzarchitekturen

	Frequenzbereich [MHz bzw. GHz]	Datenrate [Mbps]	Kapazität [#Anschlüsse]	Knoten A	Knoten B
DOCSIS 3.0 ‚Deep Fibre‘	Downstream: bis 862 MHz (bis 24-32 Kanäle) Upstream: bis 85 MHz (bis 8-12 Kanäle)	Downstream: bis 1.600 Mbps (gesamt) je Kanal 50 Mbps Upstream: bis 324 Mbps je Kanal 27 Mbps	ca. 100 per fibre node (‚shared medium‘)	Endnutzer	Fibre Node ~ KVz Standort
DOCSIS 3.1	Downstream: bis 1,7 GHz (bis ~200 Kanäle) Upstream: bis 400 MHz (bis ~55 Kanäle)	Downstream: bis 10.000 Mbps (gesamt) je Kanal ? Mbps Upstream: bis 1.000 Mbps (gesamt) je Kanal ? Mbps	ca. 100 per fibre node (‚shared medium‘)	Endnutzer	Fibre Node ~ KVz Standort
DOCSIS 4.0 ‚Full Duplex‘	Up-/ Downstream: bis 1,8 GHz (keine Trennung nach Kanälen)	Up-/ Downstream: bis 10.000 Mbps (gesamt)	ca. 40-50 per fibre node (‚shared medium‘)	Endnutzer	XG-Cable Nodes (am Gebäude)
Radio Frequency over Glas (RfoG)		Downstream: bis 1.600 Mbps (gesamt) je Kanal ? Mbps Upstream: bis 324 Mbps je Kanal ? Mbps	ca. 1-4 per fibre node (‚shared medium‘)	Endnutzer	Fibre Node (in der Wohnung)

Quelle: WIK auf Basis von Plückebaum et al (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. S.5-10) und FTTH Council, 2013: White Paper: Broadband Access Technologies

Auf dem Markt werden seit einigen Jahren individuellen Spitzenbandbreiten von 400 Mbps angeboten.^{82,83} Mit der weitgehend im deutschen Markt eingesetzten marktverfügbaren nächsten Technologiegeneration DOCSIS 3.1 werden den Endnutzern aktuell individuellen Bandbreiten bis zu 1 Gbps in Downstream und bis zu 50 Mbps in Upstream angeboten.⁸⁴

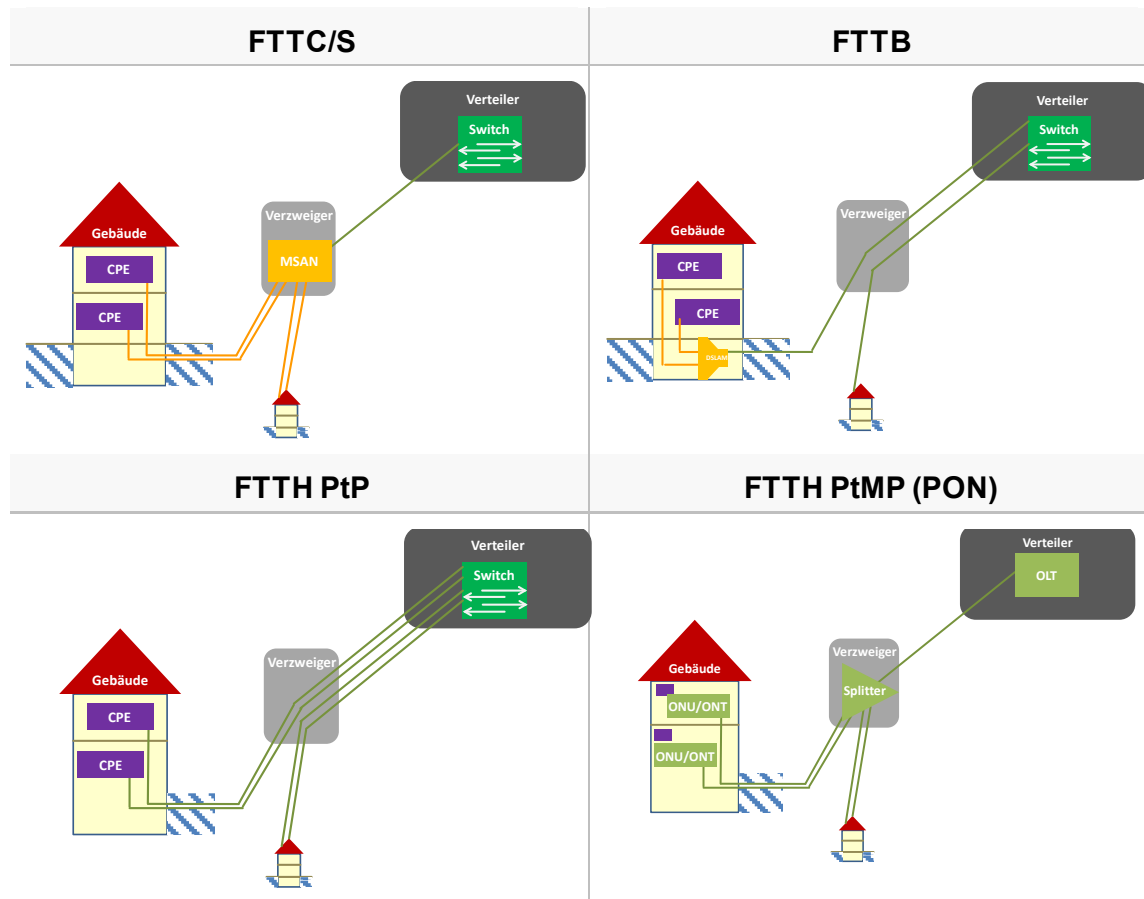
⁸² Plückebaum et al (2019). Potenziell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS. Studie für die Bundesnetzagentur. S.5-7.

⁸³ Vodafone, 2021. DOCSIS 3.1 erklärt – so kommt das Gigabit-Internet ins Kabelnetz. 26.02.2021. Zuletzt besucht: 12.08.2022)

⁸⁴ Vodafone, der dominanten Kabelnetzbetreiber in Deutschland, bietet derzeit, je nach Verfügbarkeit, Kabelinternet mit Downloadgeschwindigkeiten zwischen 1.000 Mbit/s (max.) und 600 Mbit/s (min.) und Uploadgeschwindigkeiten zwischen 50 Mbit/s (max.) und 15 Mbit/s (min.) an (Vodafone, 2022. Produktinformationsblatt gem. §1 TK-Transparenzverordnung) Vodafone CableMax 1000 Feb 2022.

Anschlussnetzarchitekturen und deren dazu gehörige Equipment

Abbildung 0-2: Gegenüberstellung aktiver Equipments in FTTC-, FTTB und FTTH-Netzarchitekturen



Quelle: WIK.

- Nr. 475: Christin-Isabel Gries, Martin Lundborg, Peter Stamm:
Digitale Arbeitswelten im Mittelstand - Auswertung von Studien zu Arbeit 4.0, November 2021
- Nr. 476: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:
Analyse der Angebotsentwicklung für leitungsgebundene Breitbanddienste für Privatkunden im deutschen Festnetzmarkt von 2017-2020, Dezember 2021
- Nr. 477: Christian Märkel, Marcus Stronzik, Martin Simons, Matthias Wissner, Martin Lundborg:
Einsatz von Blockchain in KMU: Chancen & Hemmnisse, Dezember 2021
- Nr. 478: Matthias Wissner, Ahmed Elbanna, Bernd Sörries, Thomas Plückerbaum:
Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, Dezember 2021
- Nr. 479: Dajan Baischew, Ahmed Elbanna, Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Thomas Plückerbaum:
Die Grundzüge von 6G, Dezember 2021
- Nr. 480: Marie-Christin Papen, Martin Lundborg, Sebastian Tenbrock:
360-Grad-Überblick über den Digitalisierungsstand in KMU, Dezember 2021
- Nr. 481: Nico Steffen, Lukas Wiewiorra, Peter Kroon, unter Mitarbeit von Philipp Thoste:
Wettbewerb und Regulierung in der Plattform- und Datenökonomie, Dezember 2021
- Nr. 482: Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Kupfer-Glas-Migration in Frankreich und im Vereinigten Königreich, Juli 2022
- Nr. 483: Dr. Karl-Heinz Neumann; Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Übergang von Kupfer- auf Glasfasernetze: Phasen und Prozesse der Migration, November 2022
- Nr. 484: Dr. Andrea Liebe; Martin Lundborg, Pirmin Puhl, Katrin Marques Magalhaes, Mitarbeit: Philipp Thoste:
Chancen digitaler Reifegradmodell für KMU, Dezember 2022
- Nr. 485: Julian Knips, Dr. Christian Wernick, Dr. Sebastian Tenbrock:
Analyse von Angeboten auf gigabitfähigen Infrastrukturen in Europa, Dezember 2022
- Nr. 486: Menessa Ricarda Braun, Dr. Christin Gries, Dr. Christian Wernick:
Politische und regulatorische Ansätze zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Smartphones, Dezember 2022
- Nr. 487: Dr. Nico Steffens, Dr. Lukas Wiewiorra:
Device Neutrality – Softwaremarktplätze und mobile Betriebssysteme, Dezember 2022
- Nr. 488: Dr. Lorenz Nett, Dr. Bernd Sörries:
Flexibilisierung der Frequenzregulierung und des Frequenzplans, Dezember 2022
- Nr. 489: Stefano Lucidi, Dajan Baischew, Dr. Bernd Sörries:
Signifikante Entwicklungen hin zu 6G, Dezember 2022
- Nr. 490: Dr. Sonia Strube Martins, Julian Knips, Dr. Christian Wernick:
eSIM – Potentiale, Anforderungen und Wettbewerbsprobleme, Dezember 2022
- Nr. 491: Dr. Christin-Gries, Dr. Christian Wernick, Menessa Ricarda Braun:
Die Rolle von Refurbishment-Anbietern im Smartphone-Markt, Dezember 2022
- Nr. 492: Dajan Baischew, Lisa Schrade-Grytsenko, Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele, Dezember 2022
- Nr. 493: Gonzalo Zuloaga, Dr. Gabriele Kulenkampff, Martin Ockenfels, Dr. Thomas Plückerbaum:
Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, Dezember 2022

ISSN 1865-8997