

Plückebaum, Thomas; Ockenfels, Martin

Working Paper

Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze

WIK Diskussionsbeitrag, No. 457

Provided in Cooperation with:

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, Bad Honnef

Suggested Citation: Plückebaum, Thomas; Ockenfels, Martin (2020) : Kosten und andere
Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, WIK Diskussionsbeitrag, No. 457, WIK
Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste, Bad Honnef

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/227068>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze

Autoren:

Thomas Plückebaum

Martin Ockenfels

Bad Honnef, Februar 2020

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 Abteilungsleiter Post und Logistik	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
Vorsitzende des Aufsichtsrates	Dr. Daniela Brönstrup
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeföhrten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstoße 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.

ELEKTRONISCHE S
ISSN 1865-8997

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungen	V
Zusammenfassung	VII
Summary	IX
1 Einführung	1
2 Ausgangssituation	3
2.1 Startpunkt	7
2.2 NGA Architekturen im Lösungsraum	7
2.2.1 FTTC	9
2.2.2 FTTS/dp	10
2.2.3 FTTB	11
2.2.4 FTTH PtMP	12
2.2.5 FTTH PtP	14
2.2.6 Kabel-TV	16
2.3 Die NGA-Technologien im Überblick	21
3 Zielarchitektur	22
4 Migrationswege	24
4.1 Physische Migration	25
4.1.1 FTTN – FTTC	27
4.1.2 FTTC – FTTS/dp	27
4.1.3 FTTC – FTTB	28
4.1.4 FTTC – FTTH PtMP	29
4.1.5 FTTC – FTTH PtP	30
4.1.6 FTTS/dp – FTTB	30
4.1.7 FTTS/dp – FTTH PtMP	31
4.1.8 FTTS/dp – FTTH PtP	31
4.1.9 FTTB – FTTH PtMP	32
4.1.10 FTTB – FTTH PtP	33
4.1.11 FTTN – FTTH PtMP	33

4.1.12 FTTN – FTTH PtP	34
4.1.13 FTTH PtMP – FTTH PtP	34
4.1.14 Gemeinsamkeiten der Migrationsschritte	35
4.2 Kostenaspekte	36
4.3 Investitionen der verschiedenen Migrationsschritte und –wege	38
4.4 Zeitabläufe	41
4.5 Aspekte der physischen Entbündelung	41
5 Bewertung und Empfehlung	46
Literatur	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Ausschnitt eines Anschlussnetzes in Deutschland	3
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung eines Anschlussbereiches	4
Abbildung 2-3:	Komponenten eines klassischen Kupfer-Anschlussnetzes in Deutschland	4
Abbildung 2-4:	Verteiler im Anschlussnetz (z.B. im KVz oder als Hauptverteiler/ Optischer Verteiler)	5
Abbildung 2-5:	Größenverteilung der Anschlussbereiche (Hvt) in Deutschland	5
Abbildung 2-6:	NGA Architekturen in ihrem strukturellen Aufbau	8
Abbildung 2-7:	Upgrade von G.PON, Austausch intermediärer Systeme (grün, ggf. auch rot)	14
Abbildung 2-8:	Upgrade von Ethernet PtP, individuelles Upgrade einzelner Ports nach Kundenbedarf (ggf. incl. CPE Routertausch)	15
Abbildung 2-9:	DOCSIS Frequenzbelegung in einer Kabel-TV Architektur, vereinfachte Prinzipdarstellung	17
Abbildung 2-10:	Prinzip des Fibre Node Splitting, von der traditionellen Größe über Deep Fibre zu RFoG (Radio Frequency over Glas)	18
Abbildung 2-11:	DOCSIS 3.1 mit Full Duplex Erweiterung (DOCSIS 4.0)	19
Abbildung 3-1:	Abgleich Breitbandnachfrage 2025 in Deutschland mit NGA Architekturen	22
Abbildung 4-1:	Netzsegmente einer sukzessiven Kupfer – Glasfaser Migration	26
Abbildung 4-2:	Typische Kostenstruktur eines Telekommunikationsnetzes (auf Basis FTTH PtP)	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	G.PON-Familie, Charakteristika und Entwicklungspfad	13
Tabelle 2-2:	Die NGA Festnetzarchitekturen im Vergleich	21
Tabelle 4-1:	Investitionen der verschiedenen Migrationsschritte	39
Tabelle 4-2:	VULA-Kriterien im Fall staatlicher Beihilfen	44

Abkürzungen

ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
APL	Abschlusspunkt Linientechnik
bn	Englisch: billion, Deutsch: Milliarden
BNG	Broadband Network Gateway
CM	Cable Modem
CMTS	Cable Modem Termination System
CPE	Customer Premise Equipment
DAE	Digital Agenda Europe
DOCSIS	Data over Cable Service Interface Specification
DP	Distribution Point
DPU	Distribution Point Unit
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DT	Deutsche Telekom
DWDM-PON	Dense Wavelength Division Multiplex - PON
EU	Europäische Union
EVU	Energie Versorgungs-Unternehmen
FD	Full Duplex
FTTB	Fibre to the Building
FTTC	Fibre to the Curb (Cabinet)
FTTE	Fibre to the Exchange
FTTLa	Fibre to the Last Amplifier
FTTN	Fibre to the Node
FTTS/dp	Fibre to the Street/ distribution point
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
GHz	GigaHerz
G.PON	Gigabit PON
Hvt	Hauptverteiler
ISDN	Integrated Services Digital Network
KHz	KiloHerz
KVz	Knotenverzweiger

Mbit/s	Megabit pro Sekunde
MHz	MegaHerz
Mrd	Milliarden
MSAN	Multi-Service Access Multiplexer
NGA	Next Generation Access
NG-PON2	Next Generation PON
ODF	Optical Distribution Frame
OLT	Optical Line Terminator
ONU	Optical Network Unit
PON	Passive Optical Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
PtP	Point-to-Point
PtMP	Point-to-MultiPoint
RFoG	Radio Frequency over Glas
TV	Television
TWDM-PON	Time Division Wavelength Division Multiplexer - PON
U.K.	United Kingdom
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line
WDM	Wave Division Multiplex
XG.PON	Extrafast Gigabit PON
XGS.PON	Extrafast Gigabit Symmetrical PON

Zusammenfassung

Während vor 10 Jahren die Fragen nach der richtigen zukünftigen Architektur für das klassische Festnetz im Vordergrund standen, stellt sich heute die Kernfrage, wie wir den stetig wachsenden Bedarf der Endnutzer, im Hinblick auf Bandbreite und Qualität zukunftssicher und leistungsfähig sowohl für die private wie auch die geschäftliche Nutzung bereitstellen können. Ausgehend vom klassischen Festnetz mit den Kupferdoppeladern vom Hauptverteiler (HVt) über den Knotenverzweiger (KVz) zum Endkunden wurden Techniken entweder auf der Basis von Kupferdoppeladern mit VDSL, VDSL2 Vectoring, G.fast, XG.fast, oder von Glasfaser FTTB oder FTTH mit G-PON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, TWDM-PON auf einer Glasfaser Punkt-zu-Multipunkt (PtMP) Topologie ODER schlicht FTTH mit einer Punkt-zu-Punkt (PtP) Topologie diskutiert. Auch ist die zukünftige Rolle von TV-Kabelnetzen in diesem Kontext immer wieder in der Diskussion, bis hin zu DOCSIS 4.0.

Inzwischen besteht weitgehend Einvernehmen, dass in Zukunft eine Glasfaser PtP Topologie die am ehesten langfristig tragende Infrastruktur sein wird, die ein hohes Maß an kundenindividueller Flexibilität bei höchster Qualität bietet. Diese ist gar geeignet zukünftige Terabit Kapazitäten zwischen Höchstleistungsrechenzentren (oder Clouds) nicht nur untereinander, sondern auch bis zu den irgendwo verorteten Nutzern zu übertragen. Um eine Plattform für hohes Innovationspotential zu schaffen, sollen die Nutzer im Prinzip in „Garagenfirmen“ angesiedelt sein können.¹

Der vorliegende Diskussionsbeitrag fasst die Eigenschaften der wesentlichen Übertragungstechnologien kurz zusammen und definiert verschiedene Migrationswege, um zum Ziel einer Glasfaser PtP Architektur zu gelangen. Diese Wege werden mit Hilfe des WIK NGA-Modells mit den für sie erforderlichen Investitionen bewertet. Da nicht die Zeit besteht, diese Architekturen über die volle technisch mögliche Lebensdauer zu betreiben werden zwei Migrationszyklen von 3,5 und 7 Jahren angenommen, für die jeweils die Restbuchwerte für die Komponenten bestimmt werden, die beim nächsten Migrationsschritt nicht mehr benötigt werden. Diese Art der Betrachtung des Ineinandergreifens ist neu und wurde in der Vergangenheit nach unserer Kenntnis nicht durchgeführt, weil im Denken vor 10 Jahren eher die Philosophie vorherrschend war, ich suche mir die für die längere Zukunft richtige Technologie, die geeignet ist, die nach meiner Meinung den Bedarf der Nutzer befriedigen kann. Während der eine der Meinung ist, wir überschätzen ständig den Bedarf, meint der andere, es kann nicht genug Kapazität sein. Die Studien des WIK über die Nachfrage nach Bandbreite bestätigen eher die zweite Gruppe.

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt ganz deutlich, dass mit dem EU-Ziel einer gigabitfähigen Versorgung bis 2030 nicht mehr die Zeit bleibt, alle möglichen Migrationsschritte zu durchlaufen. Jeder Migrationsschritt bedeutet Ineffizienzen in der Investition

¹ Vgl. [Ecorys 2020]

und das Entstehen gestrandeter Investitionen, die zu Restbuchwertabschreibungen führen. Diese sind signifikant und können zu mehr als dem doppelten der direkten Investition in die Zielarchitektur FTTH PtP führen. Auch ließen sich komplexe Vorleistungsprodukte wie VULA vermeiden, für das eine Vielzahl von Parametern vertraglich ausgehandelt bzw. festgelegt und überwacht werden muss. Dies erhöht den Komplexitätsgrad der Regulierung und führt zu zeitlichen Verzögerungen und hohen Transaktionskosten.

Die Ergebnisse zeigen für einen **direkten** Migrationsweg von FTTN (Kupfer ab HVt) zu FTTH PtP in Deutschland Investitionen von 61 Mrd. €, je Homes Passed (HP) 1.379,- €.

Für einen **mittleren**, in der Realität beobachtbar angelegten Migrationsweg von FTTN über FTTC zu FTTB und anschließend zu FTTH PtP kommen bereits 114,8 Mrd. € an Investitionen zusammen und es entstehen zudem Restwertabschreibungen in Höhe von 6,4 Mrd. €. Dies bedeutet zusammen einen Betrag von 2.741,- € je Home Passed. Würden die Arbeitsschritte im Abstand von 42 Monaten (3,5 Jahren) durchgeführt, wären zumindest mehr als 10,5 Jahre verstrichen.

Ein mit 5 Schritten noch **längerer** Weg, der jedoch durchaus beobachtbare Plausibilität aufweist, ist der von FTTN über FTTC zu FTTS, dann FTTB PtMP und anschließend zu FTTH PtP. Auf diese Weise ergeben sich Investitionen von in der Summe 128,3 Mrd. € und zusätzliche Restwertabschreibungen von 20,3 Mrd. €. Die Investitionen pro home passed betragen bei dieser schrittweisen Vorgehensweise 3.361,- € incl. Restwertabschreibungen. Nicht betrachtet, jedoch im Einzelfall dennoch relevant, wären mögliche Zwischenstufen innerhalb der G-PON Architekturkette, bei denen nochmals Investitionen für OLTs und ONUs anfallen würden.

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

Im Kontext der Förderung ergeben sich aus den Ergebnissen der Modellierung wesentliche Konsequenzen. Das Fördern intermediärer Technologieplattformen führt zu deutlich höheren Förderbedarfen als die einmalige Förderung der Zielarchitektur, die im einzelnen Schritt zwar geringer aussehen, in der Summe bis zum Ziel jedoch deutlich höher ausfallen. Da mit jedem Schritt verlorene, gestrandete Investitionen entstehen, werden diese mit subventioniert. Dies lässt sich nur vermeiden, wenn die Zielarchitektur unmittelbar und ohne Umwege über andere Technologien ausgebaut wird. Dabei berücksichtigt der gewählte Modellansatz bereits die weitgehende Mitnutzung der passiven Netzkomponenten für den jeweils nächsten Schritt, verwirft also bereits gelegte Leerrohre, Kabel und Verteiler nicht.

Summary

While 10 years ago the question was prominent what the appropriate future fixed network architecture will be todays' core question is how to satisfy the permanently increasing user demand for residential and business in a performant manner regarding quality and bandwidth. Starting with the traditional copper pair based network from the local exchange over the cabinet to the customer premises techniques had been discussed either based on a rest of the copper pairs like VDSL, VDSL2 Vectoring, G.fast, XG.fast, or based on fibre in a point-to-multipoint (PtMP) topology like FTTB or FTTH with G-PON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, TWDM-PON OR simply based on FTTH with a point-to-point (PtP) topology transparently connecting each end customer directly to the Local Exchange.

In the meantime it is widely agreed that for the future fibre PtP is the most future proof infrastructure for telecommunications, offering a high level of customer individual flexibility together with highest possible quality. It is even capable transmitting future terabit capacity not only between High Performance Computing Centres (HPC) (or clouds) but providing terabit access to users located somewhere in the country. In order to provide a European wide platform for high innovation potentials the users may be even located somewhere in a Garage.²

This discussion paper shortly summarises the characteristics of the most relevant transmission techniques and defines several meaningful migration paths towards the goal of a fibre PtP architecture. These migrations paths become investment evaluated with WIK's NGA model tool. Since there is overall not the time to run these architectures over their components' complete lifetimes before replacing them by the next steps' components we have assumed two migration cycles of either 3.5 or 7 years, resulting in rest book values of the not fully depreciated and not reusable components. This way of considering concatenated migration steps is new for telecommunication access networks and had not been taken in the past as far as we are aware. 10 years ago the dominating philosophy was to determine the appropriate technology for a longer future satisfying my users demand, and the demand estimations differed widely. WIK's demand models support a rather demanding development looking at 5 and 10 years from now.

Our calculations clearly demonstrate that there is not much time left stepping over several migration steps towards the 2030 goal. Each migration steps has inefficiencies regarding investments and stranded investments. They are of significant height and can lead to the double investment compared to the direct migration path toward fibre PtP. A direct migration also would allow for avoiding regulating complex VULA products leading to delay and high transaction and monitoring cost.

² [Ecorys 2020]

The results for a **direct** migration path from FTTN (copper at LEX) to FTTH PtP in Germany are investments of 61.- bn. €, per home passed (HP) of 1,379.- €.

For a **medium** path, observable in reality, from FTTN over FTTC and FTTB to FTTH PtP the investments sum up to 114.8 bn. € and the stranded investment sums up to 6.4 bn. €. This results in an amount of 2,741.- € per home passed. If the 3 migration steps would be made after 42 month (3.5 years) each, the total time will be longer than 10.5 years minimum.

A **longer** path consisting of 5 steps with observable plausibility would be starting again with FTTN, using next FTTC, then FTTS and proceeding towards FTTB PtMP, ending in FTTH PtP as before. Its invest sums up to 128.3 bn. €, the accumulated stranded invest to 20.3 bn. € and the invest per home passed to 3,361.- €. Not considered, but however relevant in some cases, are additional interim steps in the GPON architecture family for PtMP fibre topologies, causing additional investments into OLTs and ONUs, additional delay and may be stranded investment once again. Such considerations are far beyond the user time expectations.

Migration path from FTTN to FTTH PtP	Invest total	add. total stranded investment	Invest total per home passed
direct	61.- bn. €	0.- €	1,379.- €
3 steps	114.8 bn. €	6.4 bn. €	2,741.- €
5 steps	128.3 bn. €	20.3 bn. €	3,361.- €

The results include any possible reuse of passive access network components for the next migration step so that the already existing ducts, cables and distribution frames are not stranded.

In a state aid context the model results imply significant consequences. Subsidisation of intermediary technology platforms results in significantly higher subsidy demand than a direct subsidy in the final architecture. The subsidies look smaller for each single step, but in total are significantly higher. The inherently occurring stranded investments for each step are also subsidized. This can be avoided only by only subsidising the final and future proof architecture without any deviations.

1 Einführung

Der Ausbau einer breitbandigen Infrastruktur in Europa und anderswo ist immer noch ein virulentes Thema, auch mehr als 25 Jahre nach der Gründung der ersten glasfaserbasierten City Carrier in Deutschland.

Er wird begleitet von regulatorischen Maßnahmen und staatlicher Beihilfe in den Gebieten, in denen sich der Ausbau eigenwirtschaftlich nicht trägt. Während man sich in einigen Ländern bereits vor mehr als 20 Jahren Gedanken dazu machte, dass auch die Infrastrukturen in den Gebäuden entsprechend ausgelegt sein müssen um eine Breitbandversorgung jenseits der klassischen Telefonverkabelung sicherzustellen, ist Deutschland nicht nur diesbezüglich im Vergleich zu den Europäischen Partnern eher im Hintertreffen.

Es gibt Indikationen³, dass die Nachfrage nach Bandbreiten in den kommenden Jahren schneller steigen wird, als dies vom führenden Netzbetreiber erwartet wurde oder wird. Er setzte mit dem FTTC-Ausbau, verbunden mit VDSL Vectoring auf einen stufenweisen Ausbau der Glasfaserinfrastruktur, die immer näher zu den Endkunden reicht. Über das kürzere kupferbasierte Anschlusskabel werden mit dieser Ausbaustategie schrittweise höhere Bandbreiten erreicht.

Während bei ausreichender Dimensionierung der Glasfaserstrecken (Trassen, Leerrohre und Kabel, Standorte und Verteiler) späterer Ausbau ggf. die Vorinvestitionen mitnutzen kann, wird doch auch vieles überflüssig, muss als Restwert abgeschrieben werden und führt somit zu sogenannten gestrandeten Investitionen.

In diesem Diskussionsbeitrag wollen wir uns schwerpunktmäßig den Aspekten eines schrittweisen Ausbaus widmen, den wir mit dem hierfür angepassten WIK NGA-Modell auch modellieren, um unsere Untersuchungen mit quantitativen Werten zu belegen.

Der Diskussionsbeitrag steht in einer Reihe von Untersuchungen des WIK über den Breitbandausbau, auch zu Fragen des Infrastrukturlwettbewerbs, des Ausbaus von Infrastrukturen im Gebäude, zur Kostensenkung beim Ausbau durch Mitnutzung bestehender Infrastrukturen und zu Methoden und Verfahren, den Wechsel von Kupferanschlussnetzen auf Glasfasern zu unterstützen oder zu beschleunigen. Der Diskussionsbeitrag ist eingebettet in diese Arbeiten und bezieht sich an geeigneter Stelle wiederholt auch auf die anderen Arbeiten.

Ein schrittweiser Ausbau der Breitbandinfrastrukturen ist in vielerlei Hinsicht kompliziert, teuer und zeitlich aus dem Rahmen fallend, wie wir zu belegen versuchen.

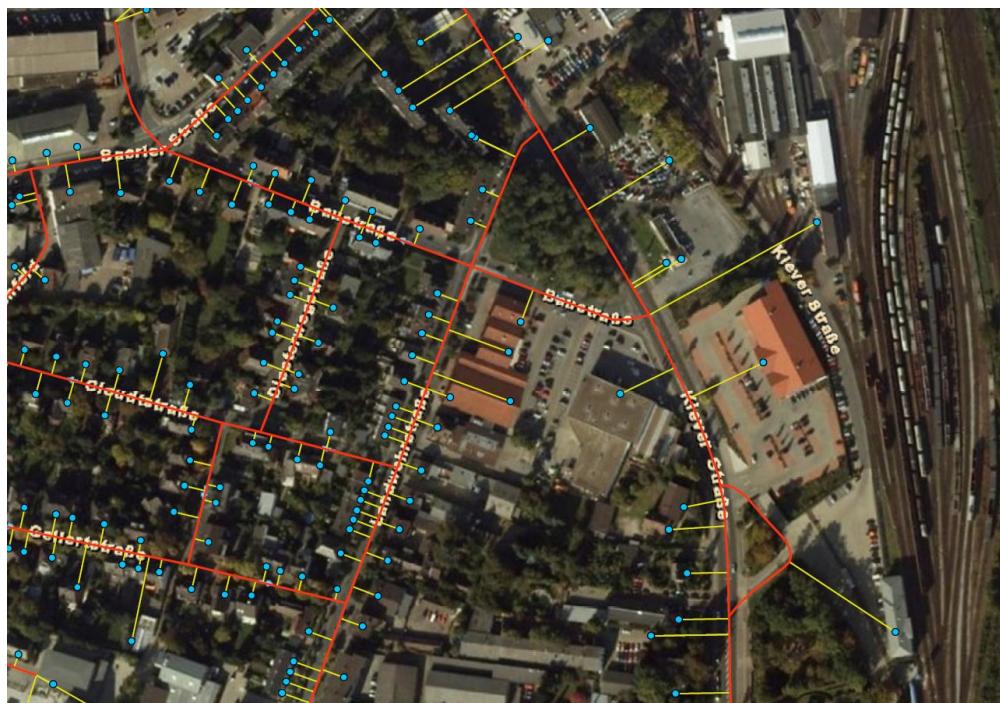
³ [Ecorys 2020], [Strube Martins 2017]

Ausgehend von der Beschreibung der Ausgangssituation und den technisch verfügbaren Möglichkeiten (Kapitel 2) leiten wir eine Zielarchitektur ab, die aus dem Bedarf der Endkunden getrieben ist (Kapitel 3), und beschreiben verschiedene Migrationswege dorthin, beziffert mit den Kosten (Kapitel 4). Das Resümee ziehen wir in Kapitel 5, verbunden mit einigen wesentlichen Empfehlungen.

2 Ausgangssituation

Ein Telekommunikationsanschlussnetz muss alle Gebäude und die dort angesiedelten Haushalte und Unternehmen erschließen. Es wird typischerweise entlang der diese Gebäude erschließenden Straßen errichtet.

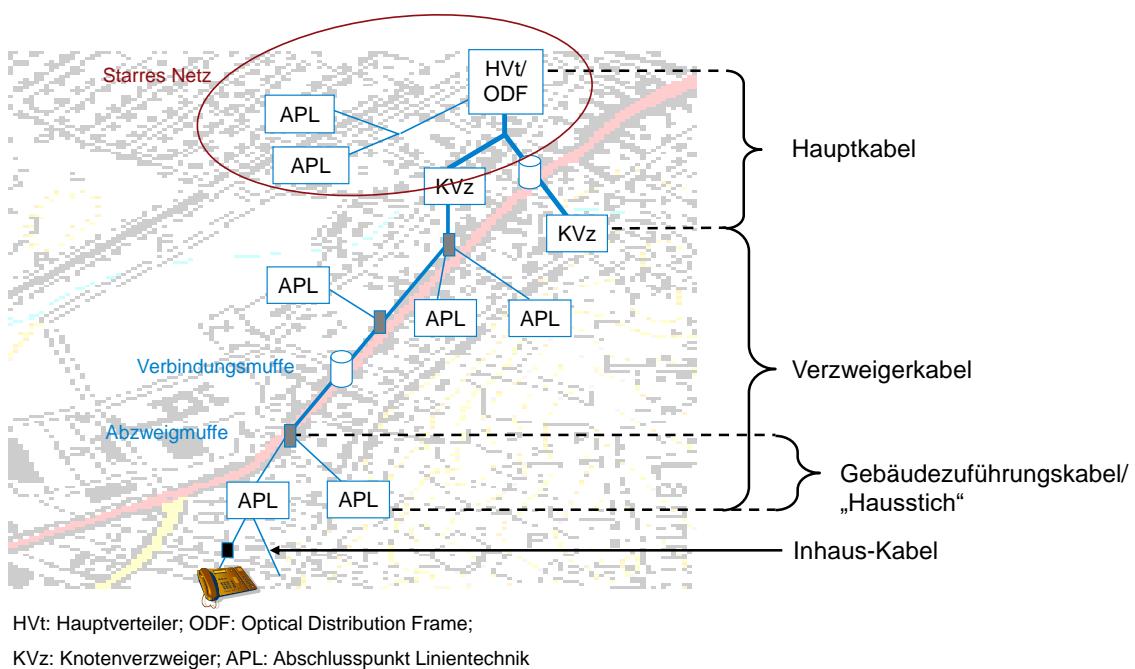
Abbildung 2-1: Ausschnitt eines Anschlussnetzes in Deutschland



Quelle: WIK

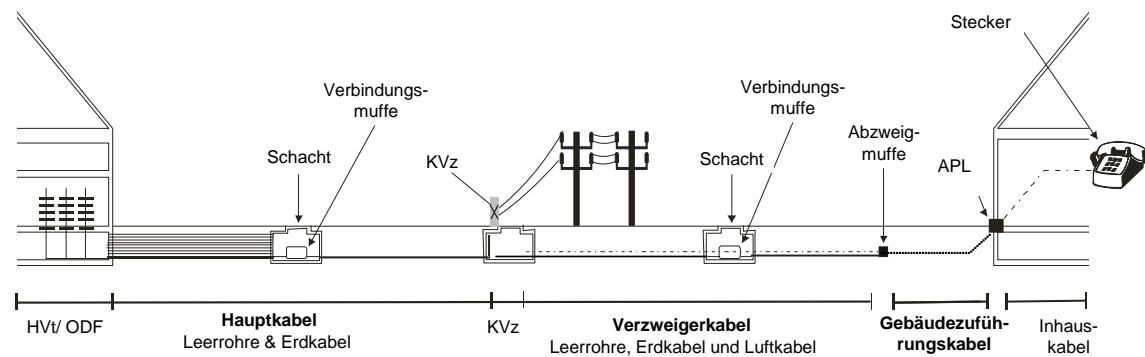
Der Ausbau der Telekommunikationsanschlussnetze in Deutschland ist ganz überwiegend geprägt von einer sternförmig von den Hauptverteilerstandorten ausgehenden Punkt-zu-Punkt Verkabelung mit Kupferdoppeladern. Von den Haushalten ausgehend werden die einzelnen Kabel in Muffen zu dicker werdenden Kabeln zusammengefasst, bis sie den ihnen zugeordneten Kabelverzweiger (KVz) erreichen. Der Kabelverzweiger enthält einen Verteilerrahmen, auf dem jede von den Hausanschlüssen kommende Doppelader aufgelegt und mit jeder Doppelader verbunden werden kann, die auf der anderen Seite des Verteilerrahmens aufgeschaltet ist und im Hauptkabel vom KVz zu den Hauptverteilerstandorten führt. Dies erlaubt zum Einen eine möglichst hohe Flexibilität in der Verschaltung zwischen Verzweigerkabeln und dem weiterführenden Hauptkabel. Zum Anderen erlaubt es eine hohe Auslastung des Hauptkabels, das dadurch seine Reserven auf alle Verzweigerkabel flexibel aufteilen kann. Das Hauptkabel wird im Hauptverteiler im zentralen Netzknotenstandort aufgelegt und von dort flexibel auf die jeweils weiterführenden Systeme aufgeschaltet.

Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Anschlussbereiches



Quelle: WIK

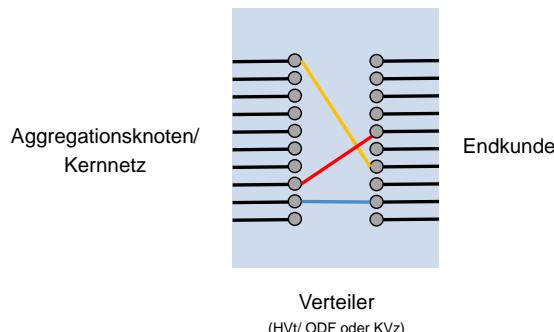
Abbildung 2-3: Komponenten eines klassischen Kupfer-Anschlussnetzes in Deutschland



Legende: HVt - Hauptverteiler, KVz – Knotenverzweiger (street cabinet), APL – Abschlusspunkt Linientechnik, ODF – Optical Distribution Frame

Quelle: WIK

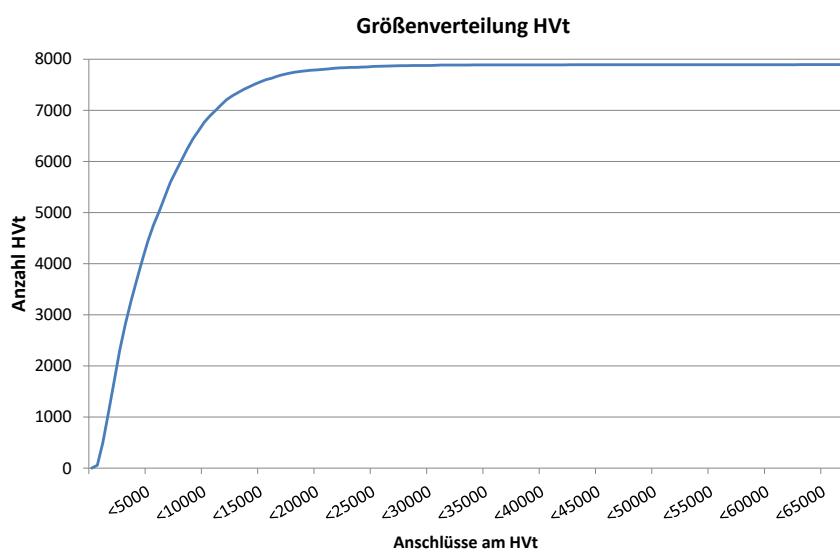
Abbildung 2-4: Verteiler im Anschlussnetz (z.B. im KVz oder als Hauptverteiler/ Optischer Verteiler)



Quelle: WIK

Man kann für Deutschland von ca. 7.900 Hauptverteilerstandorten ausgehen, die je nach Besiedlungsdichte und –struktur in ihrer Größe von ca. 40.000 Teilnehmern bis ca. 800 Teilnehmern variieren. Die Zahl der HVt ist über die Zahl der Teilnehmer je HVt nicht gleichverteilt, sondern es gibt nur wenige große HVt und eine Vielzahl kleiner. Man sagt, dass mit ca. 4.000 HVt 80% der Anschlüsse abgedeckt sind, aber erst 1/3 der Fläche, während sich die übrigen HVt auf 2/3 der Fläche verteilen. Diese sind typischerweise kleiner als ca. 4.500 Teilnehmer.

Abbildung 2-5: Größenverteilung der Anschlussbereiche (HVt) in Deutschland



Quelle: WIK

Die wachsende Nachfrage nach Bandbreite und die Übertragungscharakteristika der Kupferdoppeladern⁴ haben in Deutschland dazu geführt, dass einige regionale Wettbewerber Glasfasernetze bis in die Kundengebäude hinein ausgebaut haben (insgesamt weniger als 2,5% der Teilnehmer⁵). Zudem haben die Kabelnetzbetreiber ihre Netze hin zu höherer Kapazität (DOSSIS 3.0) aufgerüstet (footprint ca. 64% homes passed)⁶ und der marktbeherrschende Anbieter im Festnetz Deutsche Telekom (DT) derzeit ganz überwiegend FTTC ausbaut. Man kann davon ausgehen, dass die dicht besiedelten Gebiete derzeit bereits weitgehend mit FTTC ausgebaut sind und die dort in den KVz aufgebauten aktiven aggregierenden Netzkomponenten (DSLAM, MSAN) den Verkehr durch die Hauptverteilerstandorte durch über optische Verbindungen unmittelbar auf ca. 900 sogenannte BNG-Standorte führen.⁷ Dies wird begleitet von einer Strategie, die Sprachübertragung von der alten PSTN/ISDN Technologie auf VoIP umzustellen, was bei den Kunden einen Internetzugang (bzw. einen IP-basierten Anschluss mit zumindest einigen 100 Kbit/s Bandbreite) voraussetzt. Das erklärte Ziel der Deutschen Telekom, diese VoIP Umstellung bis Ende 2018 bundesweit abgeschlossen zu haben, wurde auch Ende 2019 noch nicht vollständig erreicht.⁸ Insgesamt (DT AG und Wettbewerber) verbleiben noch ca. 700.000 Anschlüsse auf PSTN/ISDN. Insbesondere in den dünn besiedelten Bereichen⁹ wird die Umstellung jedoch noch einige Zeit benötigen, da die Deutsche Telekom diese Gebiete mit staatlichen Fördermitteln angehen will.

Das hier beschriebenen Kupferanschlussnetz zwischen HVt und Endkunden wird derzeit immer noch (in abnehmenden Ausmaß) von den Wettbewerbern für den entbündelten Teilnehmeranschluss genutzt¹⁰, insbesondere in den dicht besiedelten Gebieten (ca. 4.000 HVts).

Der Vollständigkeit halber und weil die Aspekte miteinander verknüpft sind: Die Umstellung des vermittelnden Sprachnetzes auf IP ist eine notwendige Voraussetzung für den Aufbau eines glasfaserbasierten Anschlussnetzes, um die beim Endkunden als VoIP Übertragung beginnende (und endende) Sprachkommunikation zusammen mit der Datenkommunikation einheitlich ins NGN-Kernnetz zu übertragen. Andernfalls müssten auf der unteren Netzebene die Sprach- und Datensignale weiterhin getrennt werden, die Sprachsignale dort in die klassische PSTN-Übertragung konvertiert und dann wieder beim Übergang ins Kernnetz in VoIP gewandelt werden. Dies würde zu unnötigen

⁴ [Plückebaum 2013]

⁵ FTTH Council 2018, FTTB/H European Ranking September 2018

⁶ Vgl. auch [Plückebaum 2019]

⁷ Die BNG-Standorte sind i.d.R. eine Teilmenge der HVt Standorte, die neben Ihrer Aufgabe als Sternpunkte des Kupferkabelnetzes Aufgaben einer höheren, verkehrsaggregierenden Netzebene erfüllen. Sie sind Teil des sogenannten Konzentrationsnetzes, denen das sogenannte Kernnetz als nationales Verbindungsnetz überlagert ist. Vgl. [Hackbarth 2016]

⁸ Nach [BNetzA 2019] S. 32 ff waren bei der DT AG Ende 2019 noch ca 1% der Anschlüsse nicht umgestellt, bei den Wettbewerbern, die dieses Ziel nicht erklärt hatten, noch ca. 2%

⁹ Ausnahme: HVt Nahbereiche, die nach einer Selbstverpflichtung der DT (und anderer) im Rahmen des Regulierungsverfahrens über Vektoring im Nahbereich zumindest mit FTTC ausgebaut werden müssen.

¹⁰ Nach [BNetzA 2019] S. 38 werden von den Wettbewerbern Ende 2019 noch 4,5 Mio. entbündelte Teilnehmeranschlussleitungen genutzt, davon ca. 1,3 Mio ab dem KVz (KVz-TAL). Gerade auch die DT nutzt für ihre Kundenanschlüsse noch ganz überwiegend Kupferdoppeladern.

Kosten und Qualitätsverlusten führen.¹¹ Diese Voraussetzung ist in Deutschland weitgehend erfüllt und kein Thema dieses Diskussionsbeitrages.

2.1 Startpunkt

Startpunkt der in dieser Studie angestellten Überlegungen ist die zuvor dargestellte klassische Verkabelung des Teilnehmeranschlussnetzes mit Kupferdoppeladern. Dies bedeutet, dass die Hauptverteilerstandorte für die höheren Netzebenen bereits mit Glasfasern erschlossen sind, die Endkunden typischerweise jedoch noch nicht. Ein solche Architektur wird auch FTTN oder FTTE (Fibre to the Node oder Exchange) genannt.

- Wir gehen entsprechend der realen Lage in Deutschland davon aus, dass die Kupferkabel des Anschlussnetzes nur teilweise in Leerrohren verlegt sind, die einen einfacheren Austausch der Kabel durch Herausziehen und Neueinziehen erlauben.
- Wir gehen davon aus, dass sich Leerohre schwerpunktmäßig in den Hauptkabelsegmenten finden, dort aber auch nicht überall, und zu einem geringeren Maß in den Verzweigerkabel-Bereichen. Im Übrigen sind Erdkabel verlegt. Für das Verlegen neuer (Glasfaser)Kabel werden daher Erdarbeiten erforderlich, in beiden Netzsegmenten in unterschiedlichem und auch regional verschiedenen Ausmaß. In Deutschland kommt die Trassenführung über Luftkabel entlang von Masten verhältnismäßig selten und nur in dünn besiedelten Bereichen für das Verzweigerkabel-Segment vor. Diese Bauform ist zwar verhältnismäßig preiswert, wird aber von den Gemeinden in Deutschland im Bereich geschlossener Bebauung eher nicht toleriert und daher in die hier angestellten Untersuchungen nicht einbezogen.¹²

2.2 NGA Architekturen im Lösungsraum

Die Kupferdoppeladern des Anschlussnetzes waren nicht für eine hochfrequente und breitbandige Übertragung ausgelegt, sondern ursprünglich für die analoge Übertragung eines Telefonsignals mit einer Bandbreite von 3,6 KHz. Und auch dieses Signal war bereits längenbeschränkt bis maximal ca. 7 km. Auf diese maximale Anschlussleitungslänge hin wurde das Telefonnetz der Vergangenheit ausgelegt und auch die Lage der Hauptverteilerstandorte festgelegt. Zur Übertragung höherer Bandbreiten über Kupferdoppeladern könnte man einerseits die Kabel durch geeignete Kabel¹³ austauschen, die aber einen größeren Platzbedarf hätten, oder aber man verkürzt die Länge der Kupferstrecke und überbrückt ein Stück mit einem Glasfaserkabel. Zweckmäßigerweise beginnt man dabei am Hauptverteiler, weil der Bau neuer Hauptkabel deutlich kosten-

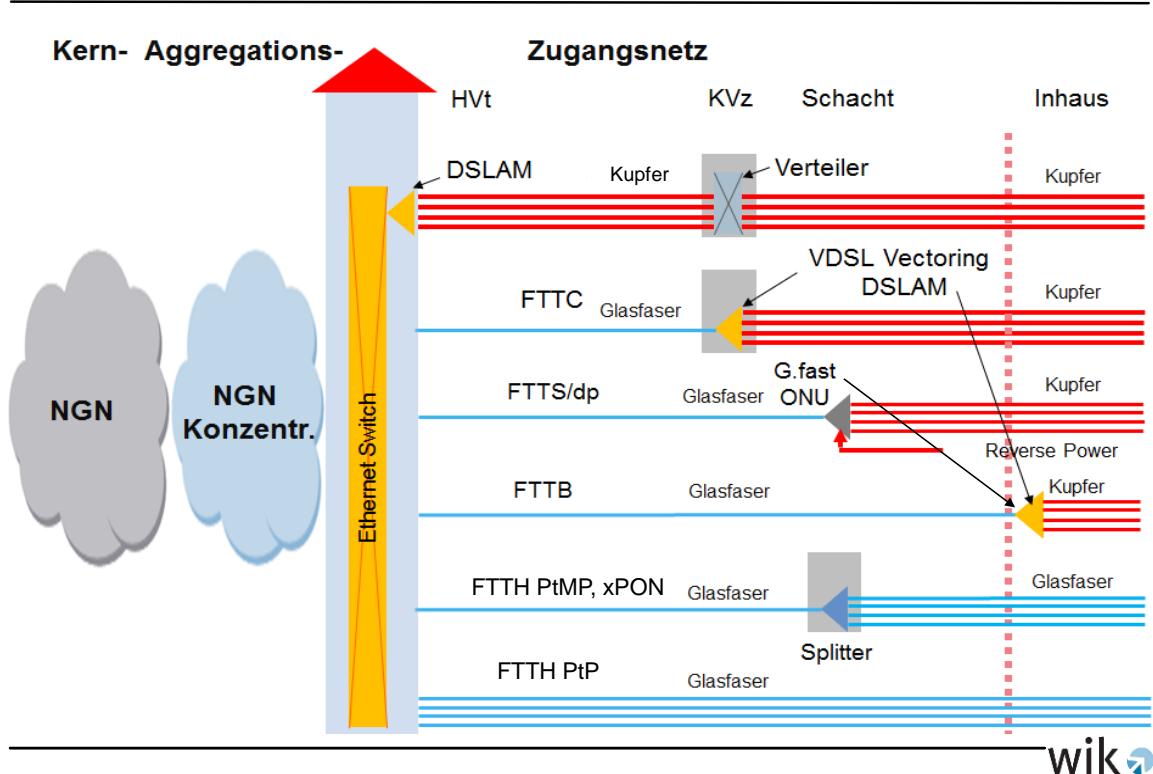
11 [Marcus 2015]

12 Zur Problematik von Mitnutzung von Masten (Luftverkabelung) vgl. [Godlovitch 2017]

13 Z.B. Geschirmte Doppeladern, Koaxial-Kabel, oder aber gleich durch Glasfasern

günstiger ist als der Austausch des Verzweigerkabel-Netzes. Die heute übliche erste derartige Ausbaustufe endet am KVz, die nächste folgt dem Netz zum Kunden zum Straßenrand, die übernächste in den Keller der Gebäude, bis die Glasfaser die Wohnungen der Kunden erreicht. Eine Übersicht gibt die nachfolgende Darstellung.

Abbildung 2-6: NGA Architekturen in ihrem strukturellen Aufbau



Quelle: WIK, Vgl. auch¹⁴, hier nicht dargestellt sind Kabel-TV Netze (s. Abschnitt 2.2.6)

Der hier im HVt angesiedelte aggregierende Ethernet Switch kann funktional auch an weniger Standorten auf höherer Netzebene –im Netz der DT AG als BNG-Standorten bezeichnet – angesiedelt sein.

Die Anforderungen einer Anbindung verstreut in der EU liegender Kundenstandorte an eine High Performance Computing Cloud mit Exascale Leistung über ein Terabit Netzwerk, wie sie in den Planungen der EU-Kommission für den Zeitraum bis 2030 aktuell skizziert wurde, kann aus heutiger Sicht nur durch eine FTTH PtP Topologie mit neuartigen Aggregations- und Kernnetzkomponenten erfüllt werden.¹⁵ Diese Topologie ist als Zielarchitektur damit hinreichend zukunftssicher.

¹⁴ [Plückebaum 2013]

¹⁵ [Ecorys 2020]

2.2.1 FTTC

Bei Fibre to the Curb (FTTC) oder Fibre to the Cabinet werden die den Verkehr aggregierenden DSLAMs/MSANs quasi vom Hauptverteiler-Standort in die Knotenverzweiger verschoben und zwischen HVt und KVz mit einer Glasfaser angeschlossen, während die Anschlussleitungen zum Kunden, die sogenannten Subloops¹⁶, aus den vorhandenen Kupferdoppeladern am KVZ bestehen. Dies Vorgehen verkürzt die relevante Kupferleitungslänge um das Hauptkabel und erlaubt so höhere Bandbreiten zu den Kunden. Die verbleibenden Leitungslängen können jedoch in manchen Fällen länger als 2 km sein, sodass auch hier keine nennenswerte Bandbreite mehr für den Kunden zur Verfügung steht. Durch die Verkürzung und den Einsatz von VDSL 2, das speziell für kürzere Leitungslängen optimiert wurde, erhöht sich das Bandbreitenniveau gegenüber dem bis da üblichen ADSL2+ ab dem HVt. Generell jedoch fällt die Bandbreite mit wachsender Anschlussleitungslänge. Über die Zeit wurden noch weitere Verbesserungen zu den VDSL2 Übertragungsverfahren entwickelt, die die Reichweite und Bandbreite der Übertragungsbandbreiten vergrößern. Zu nennen sind hier insbesondere die Erhöhung der Übertragungsfrequenzen von 8 über 12 auf 17 MHz (Profil 17a), zudem auf 30 (Profil 30a) und 35 MHz (Profil 35b). Ergänzt und begleitet wurde diese Kapazitätserweiterung durch die Entwicklung des Vectoring, einem Fehlerkorrekturverfahren, das das typische Nebensprechen benachbarter Kupferdoppeladern nahezu eliminiert.

Für den Aufbau von FTTC braucht es ein Glasfaserkabel mit (mindestens) 2 Fasern je DSLAM/ MSAN zwischen HVt und KVz im Hauptkabelsegment. Zudem muss am KVz ein Gehäuse zur Aufnahme eines oder mehrerer DSLAMs/ MSANs aufgestellt und mit elektrischer Netzspannung versorgt werden. Ggf. muss auch für die Abfuhr der Wärme gesorgt werden. Der Standort sollte zudem gegen Vandalismus geschützt sein.¹⁷

Während zunächst VDSL2 Ports unterschiedlicher Profile eingesetzt wurden, konzentrierte sich nachfolgend zunächst alles auf des Profil 17a. Ältere Portkarten mussten ggf. ausgetauscht werden. Später kam die Vectoring-Funktion hinzu, für die der DSLAM/MSAN um eine Vectoring-Prozessor-Baugruppe für die Hochleistungs-Korrekturrechnung ergänzt werden muss(te). Ggf. muss(te) dazu der DSLAM gegen einen getauscht werden, der diese Baugruppe aufnehmen und nutzen kann. Auch müssen die Portkarten u.U. getauscht werden, sofern sie das Vectoringverfahren nicht bereits unterstützen können. In einem weiteren Schritt müssen u.U. die Portkarten und die Vectoring-Prozessor-Baugruppe auf den erweiterten Frequenzbereich für das Profil 35b und das sogenannte Supervectoring aufgerüstet werden. Dies gelingt entweder durch entsprechende Parametrierung, sofern die Komponenten vorgerüstet waren, oder durch Kartentausch.

¹⁶ In der Deutschen Regulierung KVz-TAL genannt

¹⁷ z.B. mit Schutzbügeln

2.2.2 FTTS/dp

Fiber to the Street oder Fiber to the distribution point verwendet kleinere ONUs, auch Distribution Point Units (DPU) genannt, die über ca. 250m Kupferleitungslänge bis zu 1 Gbit/s mit dem Verfahren G.fast übertragen können. Dies jedoch als Summenbandbreite, die sich beliebig auf die beiden Richtungen up- und downstream aufteilen lässt und mit 500 Mbit/s symmetrisch arbeiten kann. Diese Bandbreite wird typischerweise nur unter Verwendung von Vectoring (speziell für G.fast) erreicht. Die DPU ist über eine Glasfaser mit dem HVt verbunden und unterstützt maximal 48 Ports. G.fast verwendet auf der Kupferdoppelader-Seite für den Kundenanschluss in einem ersten Implementierungsschritt den Frequenzbereich bis 106 MHz und kann dabei seine volle Performance noch nicht erreichen. Diese wird erst mit einer Aufrüstung auf 212 MHz, die ggf. mit einem Kartentausch und einem Tausch der Vectoring-Prozessor-Baugruppe einhergeht, erlangt.

Noch in der Entwicklung befindet sich mit XG.fast ein nächster Schritt, dessen Bandbreite auf eine Summenkapazität von 10 Gbit/s zielt, bei einer Übertragungsfrequenz entlang der Kupferdoppeladern von bis zu 500 MHz und einer maximalen Länge von ca. 70m. Bei größeren Längen wäre Supervectoring die leistungsfähigere Lösung. Die DPU würde sich damit zwangsläufig nahe oder im Gebäude der Kunden befinden (s. auch FTTB).

Die Notwendigkeit, Vectoring einzusetzen, richtet sich nach der Struktur der Verkabelung zum und im Gebäude. Kann dort eine Kat 5 oder höher klassifizierte geschirmte Doppelader in Sternstruktur verwendet werden, geschieht kein Nebensprechen und das aufwändige Vectoring-Verfahren erübrigts sich.

Eine G.fast DPU benötigt neben der Faserverbindung, die vom HVt über den KVz hinaus zum DPU-Standort reichen muss, eine Spannungsversorgung, die nicht über die Glasfaser erfolgen kann. Ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz erscheint sehr teuer, sodass der Standard für G.fast ein Reverse Powering vorsieht, eine Spannungsversorgung über die Kupferdoppeladern aus den Gebäuden der Endkunden¹⁸. Eine DPU ist entweder in einem kleinen Schaltschrank oder in einem kleinen Schacht¹⁹ am Straßenrand untergebracht, der typischerweise zu diesem Zweck errichtet werden muss.

¹⁸ In Italien erfolgt die Energieversorgung auch über die verbleibenden Kupferdoppeladern des Kupferanschlussnetzes aus den HVt Standorten.

¹⁹ Im Englischen auch Handhole genannt

2.2.3 FTTB

Bei Fiber to the Building (FTTB) reicht die Glasfaser vom HVt bis in das Kundengebäude und wird dort durch eine ONU abgeschlossen. Hierfür stehen eine Reihe von Systemen zur Verfügung. Dies sind:

- VDSL2 DSLAMs, z.B. auch mit dem Profil 30a
- Ethernet Switch
- G.fast und XG.fast DPU
- G.PON ONU

Allen gemeinsam ist die Nutzung der bestehenden Inhouse-Infrastruktur. Die Bandbreite auf der Kupferdoppelader zum Kunden ist von der Technologie der ONUs abhängig. Auch spielt die Struktur und der Aufbau der Inhouse-Gebäudeverkabelung eine Rolle. Handelt es sich um ungeschirmte einfache Telefondrähte in einem Sammelkabel zumindest für den oder die Steigeschäfte in einem Gebäude, drohen Performance-Einbußen durch Nebensprechen. Diese kann man jedoch bei den VDSL und G.fast Übertragungsverfahren durch Vectoring beheben, sofern die Leitungen alle an dieselbe DPU/ denselben DSLAM angeschlossen sind. Dies gilt auch für G.PON, abhängig vom Übertragungsverfahren auf der Kupferseite der ONU. Sollte die Inhouse-Verkabelung modernen, seit 30 Jahren bestehenden Standards mit Kat 5 geschirmten Kupferkabeln oder höherwertiger entsprechen, sind Probleme durch Nebensprechen nicht zu erwarten.²⁰

Die Verwendung von Ethernet-Switches ist eine der Urformen von FTTB und bereits seit dem Ende der 1990er Jahre in Gebrauch, stammt also aus der Vor-DSL Zeit. Im Inhouse-Bereich werden die Ethernet-Signale auf ungeschirmten oder geschirmten Kupferdoppeladern mit 2 – 100 Mbit/s übertragen. Auch 1 Gbit/s sind heute im Privathaushalt üblich, bei geeigneter Inhausverkabelung. Im Geschäftskundesegment werden auch höhere Übertragungsraten in den Inhausnetzen verwendet.

Beim Einsatz von G.PON bieten viele Systemhersteller neben der klassischen bidirektionalen Kommunikation zudem noch den Downstream der klassischen Kabel-TV Signale auf einer separaten Wellenlänge an, die in der ONU auf einem Koaxialstecker terminiert und von dort in eine bestehende Inhouse-Koaxialverkabelung eingespeist werden können.

Neben der Glasfaserverbindung vom HVt zu jedem Gebäude muss aktive, die Glasfaser terminierende Technik im Keller aufgebaut werden, die typischerweise aus dem Stromnetz des Gebäudes versorgt wird. Der Platz für dieses Equipment sollte vor unberechtigtem Zugriff und vor Sabotage geschützt sein (verschlossen), jedoch für den Ser-

²⁰ Zur Problematik des Nebensprechens vgl. auch [Plückebaum 2013], [Schäfer 2018]

vice Techniker des Netzbetreibers einfach zugänglich sein, um schnell entstören zu können.

2.2.4 FTTH PtMP

Bei FTTH reicht ein Glasfaserweg und die optische Übertragung durchgehend vom HVt bis in die optischen Anschlussdosen in jeder Wohnung. Bei FTTH PtMP sind die Glasfaserverbindungen von den Wohnungen aus gesehen an einem intermediären Punkt auf dem Weg zum HVt über einen sogenannten optischen Splitter auf eine einzige weiterführende Glasfaser gespleißt. Dies spart Glasfasern auf dem weiteren Weg zum HVt ein und reduziert die Zahl elektronische Schnittstellen in den aggregierenden Systemen im HVt. Auf der anderen Seite wird diese weiterführende Glasfaser zu einem shared Medium, dessen Kapazität sich die einzelnen Endkunden teilen. Die Signale von den Endkunden überlagern sich auf dieser Glasfaser, wenn sie gleichzeitig gesendet werden, und werden so unverständlich. In der anderen Richtung vom HVt zu den Endkunden muss die Kommunikation eindeutig den Empfänger bezeichnen und die anderen Empfangseinheiten dürfen nicht mithören, was gesendet wird, um das Telekommunikationsgeheimnis zu wahren. Es braucht daher zusätzliche vorgeschaltete Komponenten, die das PtMP Glasfasernetz administrieren. Der OLT (Optical Line Terminator) im HVt vergibt an die ONU (Optical Network Unit) beim Endkunden Senderechte, um Kollisionen seiner Nachrichten mit denen anderer Endkunde zu verhindern (s. Abbildung 2-7). Gleichfalls adressiert er die Nachrichten vom HVt aus an die Endkunde-ONU, die nur die für sie bestimmten Nachrichten vom Netz nehmen und die anderen ignorieren.²¹

Die ersten intermediären technischen Systeme wurden als G.PON (Gigabit Passive Optical Network²²) bezeichnet. Das „passive“ kennzeichnet auch, dass die eingesetzten Splitter keine aktiven Komponenten aufweisen und keine Spannungsversorgung benötigen. Das Optische Signal vom HVt wird am Splitter einfach auf alle angeschlossenen weiterführen Fasern (bzw. deren Anschaltepukte) zu gleichen Teilen aufgeteilt, d.h. die Sendeleistung auf den weiterführenden Fasern ist gegenüber der zuführenden Faser deutlich reduziert. Dies beeinflusst die Reichweite der PON Systeme, die allerdings mit ursprünglich 20 km ausreichend hoch ausgelegt ist. Je nach Wahl und Zahl der optischen Komponenten kann die Reichweite jedoch auch darunter liegen. Auch die Zahl der an einen Splitter anschließbaren Endteilnehmer ist daher begrenzt, im ursprünglichen Standard auf maximal 64. Netzbetreiber beschalten häufig die Splitter mit nicht mehr als 1:32, um noch Reserven zu haben.

²¹ Diese shared medium Architektur steht daher in der Kritik, nicht vollständig abhörsicher zu sein. Dazu und für weitere Vergleiche s. auch [Jay 2011a], [Hoernig 2010]

²² Die Bezeichnung Passives Optisches Netz (PON) ist im Prinzip irreführend belegt mit der Punkt-zu-Multipunkt Topologie. Auch eine Punkt-zu-Punkt Glasfasertopologie ist passiv vom Endkunden bis zum HVt, mehr noch, sie benötigt keine intermediäre G.PON Technologie zur Administration von der shared Glasfaser.

Die Verwendung intermediärer optischer Systeme begrenzt immer die Übertragungskapazität des Anschlussnetzes. So stehen im G.PON 2,5 Gbit/s downstream und 1,25 Gbit/s upstream zur Verfügung, die sich die Teilnehmer auf dem shared medium teilen müssen.²³ Seit 2003 sind mehrere Technikgenerationen entwickelt und standardisiert worden, die ab XGS.PON mit symmetrischer Übertragung arbeiten. Eine Übersicht gibt Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: G.PON-Familie, Charakteristika und Entwicklungspfad

System	Standard	Jahr	Up [Gbit/S]	Down [Gbit/S]	Sym.	Splitter
G.PON	ITU-T G.984	2003	1,25	2,5	asym.	1:64
XG.PON	ITU-T G.987	2010	2,5	10	asym.	1:128
XGS.PON	ITU-T G.9807.1	2016	10	10	sym.	1:128
TWDM-PON	ITU-T G.989	2015	4 - 8 x 10	4 - 8 x 10	sym.	1:256
TWDM-PON2		2020	Ergänzt um 10G individuell	GK	sym.	1:256
DWDM-PON		> 2020	Ergänzt um 10G individuell	PK	sym.	1:1000

Quelle: WiK²⁴

Im Prinzip können die Technologien im selben Glasfaseranschlussnetz nebeneinander existieren, weil sie auf verschiedenen Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereichen arbeiten. Die Technologien ab TWDM-PON (auch NG-PON2 genannt) nutzen mehrere Wellenlängen, die auch entbündelt verschiedenen Netzbetreibern jeweils als XGS.PON Netz zur Verfügung gestellt werden können.

Um das Anschlussnetz zu höheren Bandbreiten zu entwickeln müssen im Prinzip die OLT und ONU jeweils ausgetauscht bzw. umgerüstet werden, schon um sie auf die neuen Wellenlängen einzustellen, die jede der Generationen nutzt.²⁵ Will man die Fähigkeiten der größeren optischen Budgets und des dadurch größeren Splittingfaktors oder der dadurch größeren Reichweiten nutzen, müssten gegebenenfalls auch im Fasernetz die Splitter umgebaut werden. Dies erscheint ökonomisch wenig sinnvoll. Eher sinnvoll ist die Verwendung weiterer, kaskadierter Splitter im HVt.²⁶

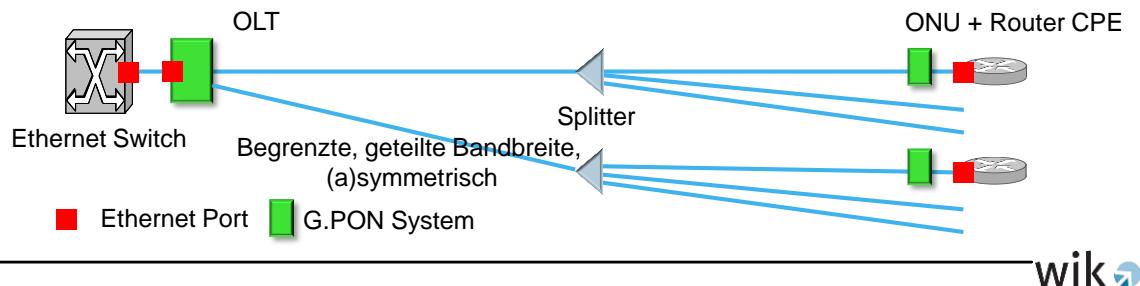
²³ 2,5 Gbit/s / 64 Teilnehmer ergibt 39 Mbit/s je Teilnehmer gleichzeitig parallel. Es ist nicht anzunehmen, dass alle Teilnehmer gleichzeitig senden werden, so dass sich die effektive Bandbreite zur Busy Hour erhöht. Dennoch: G.PON bewegt sich damit im Bereich moderner Supervectoring Systeme.

²⁴ S. auch [Plückebaum 2016]

²⁵ S. auch [Plückebaum 2016]

²⁶ Es lassen sich beispielsweise 4 Splitter mit 1:64 mit einem ergänzenden 1:4 Splitter zu 1:256 zusammenfassen.

Abbildung 2-7: Upgrade von G.PON, Austausch intermediärer Systeme (grün. ggf. auch rot)



Quelle: WIK

Natürlich kann man auch auf den Bau der Splitter im Feld verzichten, die Glasfasern PtP bis zum HVt ausbauen und die Splitter dort ansiedeln. Dies erlaubt ein hohes Maß an Flexibilität, Splitterauslastung und -erweiterung sowie eine Anpassung an die Reichweiten/Anschlussleitungslängen. Es reduziert die Zahl der benötigten OLT und lastet diese besser aus, insbesondere in der Ausbau und Anlaufphase, d.h. während der Marktpenetration. Ein solches Vorgehen erlaubt auch, die Glasfasern für Kunden aus der shared medium Topologie auszukoppeln, die einen höheren Bandbreitenbedarf haben, als die G.PON Architekturen bieten können, oder die andere Protokolle übertragen sollen/ müssen, als G.PON bieten kann. Die besonders latenzarme Übertragungen/ Anbindungen für den Mobilfunk etc. sind hierfür ein Beispiel. Aufgrund der hohen Dämpfungen der eingefügten Splitter, die mit wachsendem Splitting-Faktor signifikant steigen, kann man bei einer derartigen Topologie die Anschlussleitungen flexibel in Abhängigkeit von ihrer Länge (und damit verbundenen Dämpfung) in Splittern verschiedener Splitting-Faktoren und/oder Qualitätsklassen zusammenfassen und dadurch Kosten senken.

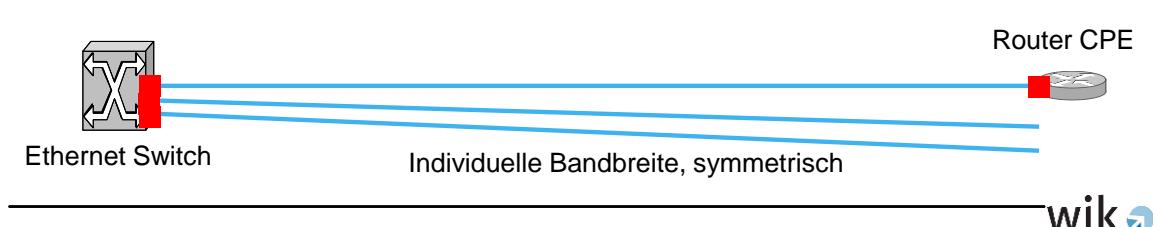
2.2.5 FTTH PtP

Bei FTTH PtP (Fibre to the Home Punkt-zu-Punkt) wird jede Wohnung oder Geschäftsstätte mit einer separaten Glasfaser vom HVt aus angeschlossen. Hier ersetzt sozusagen die Glasfaser strukturell und funktional die alte Kupferdoppelader des Anschlussnetzes. Auf der Seite des HVt steht ein den Verkehr aggregierender Ethernet Switch, beim Kunden wie gewohnt ein Router, der nun mit seinem optischen Ethernet Port direkt an den Ethernet Switch der Gegenseite angeschlossen ist, statt über ONU und OLT. Derartige Ports unterstützen heute schon standardmäßig 1 Gbit/s. Sollten einzelne Kunden einen höheren Bandbreitenbedarf haben, so werden die Ethernet Interfaces auf beiden Seiten individuell nach Bedarf auf 10 oder gar 100 Gbit/s hochgerüstet (Abbildung 2-8). Dies sind Geschwindigkeiten, die keine der G.PON Architekturen für individuelle Kundenanschlüsse derzeit transparent und ungeteilt unterstützt.

Der Unterschied zu einer FTTC, FTTS, FTTB oder FTTH PtMP Architektur ist zum einen der etwas höhere Faserbedarf im Hauptkabelsegment, zum anderen werden je nach Architektur noch Glasfasern anstelle der Kupferkabel bis zum Endkunden benötigt. Einzig im Vergleich mit FTTH PtP ist der Faserbedarf zu den Wohnungen ab dem letzten Splitter mit FTTH PtP gleich. Ein weiterer Unterschied zwischen FTTH PtP und den anderen Architekturen liegt im Bedarf an aktiven Komponenten und Schnittstellenkarten, insbesondere auf der HVt Seite. Bei FTTH PtP benötigt jeder Endkunde einen eigenen Port im Ethernet Switch. Der G.PON OLT aggregiert viele Teilnehmer auf einen Port höherer Bandbreite und benötigt davon entsprechend weniger. Dies spart Ethernet Ports, kostet aber auch OLTs, ONUs und Splitter. Bei den anderen Architekturen wird die geringere Zahl Ethernet Ports im Switch des HVt durch die DSLAMs/MSANs/DPUs oder ONUs und deren Ports mehr als aufgewogen.

Der dominante Unterschied bei den Architekturen liegt im Ausmaß des Glasfaserausbau (nur bis zum Kabinett (KVz), Distribution Point oder Keller) und deren Einsparungen durch die Nutzung bestehender Kupferkabel. Diese Mitnutzung mindert die benötigten Investitionen, reduziert den Cash Flow und beschleunigt den Breitbandausbau erheblich, weil nur ein kleiner Teil Tiefbau erfolgen muss. Allerdings wird demzufolge nur das Problem der final bis zum Haushalt benötigten Glasfaser in die Zukunft verschoben. Die Fachwelt ist sich jedoch weitgehend einig. Ein flächendeckender Glasfaserausbau in Deutschland braucht länger als ein Jahrzehnt. Es wird bei einer reinen Investitionsbe trachtung leicht übersehen, dass die Mitnutzung der bestehenden Infrastruktur in jedem Fall auch operative Kosten verursacht, begonnen mit der Monatsmiete für den Subloop oder die entsprechend kürzeren Kupfersegmente.

Abbildung 2-8: Upgrade von Ethernet PtP, individuelles Upgrade einzelner Ports nach Kundenbedarf (ggf. incl. CPE Routertausch)



Quelle: WIK

Kombiniert man die Vorteile von FTTH PtP mit denen von FTTH PtMP, indem man auf eine PtP Fasertopologie erst im HVt die Splitter installiert und unmittelbar mit dem OLT verbündet, kommt man auf einen Kostenunterschied zwischen beiden Ansätzen von nur ca. 1% zugunsten von PtP²⁷. Dabei wurden die G.PON Systemupgrades entlang des wachsenden Bandbreitenbedarfs nicht mit berücksichtigt.

²⁷ [Jay 2011a], [Hoernig 2010]

Bei einem Vergleich der PTMP und der PTP Glasfasertopologien wird deutlich, dass nur eine Glasfaser PTP Topologie wirklich technologieneutral ist und nur diese auch bzgl. der Entbündelungs-Möglichkeiten ein vollwertiger Ersatz für die physisch entbündelte Kupferdoppelader darstellt²⁸.

2.2.6 Kabel-TV

Kabel-TV Netze basieren historisch betrachtet auf einem Koaxialkabelstrang von einem Verteilerstandort, der in etwa mit einem HVt Standort vergleichbar ist, zu den Endkundengebäuden hin. Ein solcher Strang versorgte in der Vergangenheit durchaus mehrere 1.000 Wohnungen. Ein Koaxialkabel ist im Gegensatz zu einer Kupferdoppelader gut geeignet, hohe Frequenzen zu übertragen (bis 2,5 GHz). Zur Überbrückung größerer Entfernungen (mehrere 100 m) werden Verstärker eingesetzt. Von diesem Kabelstrang werden die einzelnen Kundenanschlüsse abgegriffen. Insofern ist der Kabelstrang ein shared Medium, auf dem ursprünglich nur breitbandige analoge TV-Signale zu den Endkunden übertragen wurden.

Um diese Infrastruktur im Wettbewerb zum marktbeherrschenden TK-Anbieter für Telekommunikation nutzen zu können, wurde ergänzend zur bereits standardisierten TV- und Radio Signalübertragung DOCSIS (Data over Cable Service Interface Specification) entwickelt, das neben die Frequenzbereiche für die Rundfunkübertragung (downstream) Kanäle für die Sprach- und Datenübertragung in beide Richtungen gelegt hat. Diese Kanäle sind wie die Rundfunkübertragung naturgemäß ein shared medium, weil der Koaxialkabelstrang mit allen Abzweigpunkten elektrisch ein gemeinsame Medium nutzt. Der Zugriff auf dieses Medium wird für die Daten- und Sprachübertragung in beiden Übertragungsrichtungen durch eine zentral koordinierende Instanz, das CMTS (Cable Modem Termination System), administriert. Zusammen mit den Cable Modems (CM) stimmt dieses ab, wer wann in die zentrale Richtung senden darf und addressiert das jeweils empfangende CM. Die anderen CMs hören so lange weg.

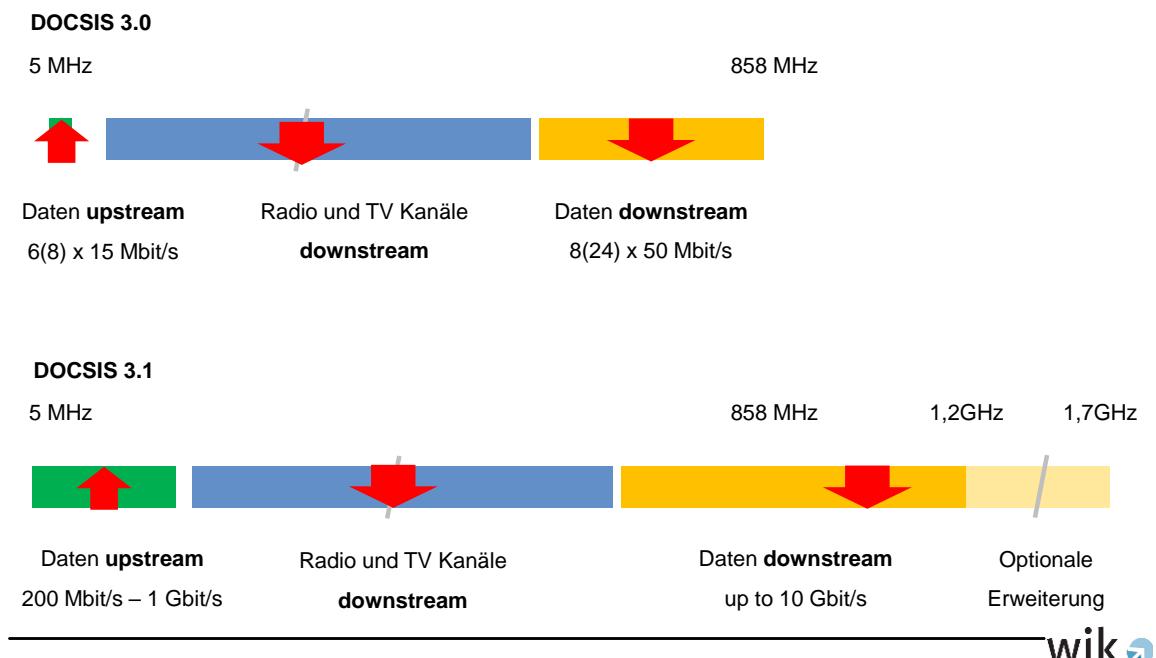
Die Kapazität eines DOCSIS Systems ist einerseits von der Bandbreite des shared mediums bestimmt, andererseits von der Zahl der Nutzer, die gleichzeitig das Medium - den Kommunikationskanal - zu nutzen beabsichtigen. Die Bandbreite des Kommunikationskanals ist einerseits von der Gesamtkapazität des Breitbandübertragungs-Systems bestimmt, andererseits auch von den Frequenzbereichen, die für die Rundfunkübertragung reserviert sind. Mit der Digitalisierung der Rundfunkübertragung ist grundsätzlich eine Verkleinerung des benötigten Frequenzbereiches möglich²⁹, andererseits könnten jedoch auch neue Programminhalte den freien Platz einnehmen. Mit einer Vergrößerung des Frequenzbandes auf dem Koaxialkabel müssen die Sender (CMTS) und Empfänger (CM) sowie die Verstärker entsprechend angepasst bzw. erneuert werden.

²⁸ So gesehen auch von der Commerce Commission Neuseeland, Commerce Commission New Zealand, Final Pricing Review Determination for Chorus Unbundled Local Loop Service, 2015, Rn. X21.3

²⁹ Dieser Einspareffekt wird auch Digitale Dividende" genannt.

Dies gilt auch für die bereits bei der Einführung von DOCSIS eingeführten Verstärker für die Rückrichtung. Ggf. sind auch die Kabel und Abzweigdosen auszutauschen. Die Erweiterung der Übertragungskapazität für die Datenkommunikation ist also einerseits durch Einsparungen bei den TV-Frequenzbereichen möglich, andererseits aber auch durch eine Vergrößerung des Frequenzbereiches. DOCSIS 3.1 geht den Weg der Frequenzbereichserweiterung und überlässt Veränderungen im Rundfunk- Und TV-Bereiche den Anforderungen der Netzbetreiber (und deren Kunden).

Abbildung 2-9: DOCSIS Frequenzbelegung in einer Kabel-TV Architektur, vereinfachte Prinzipdarstellung



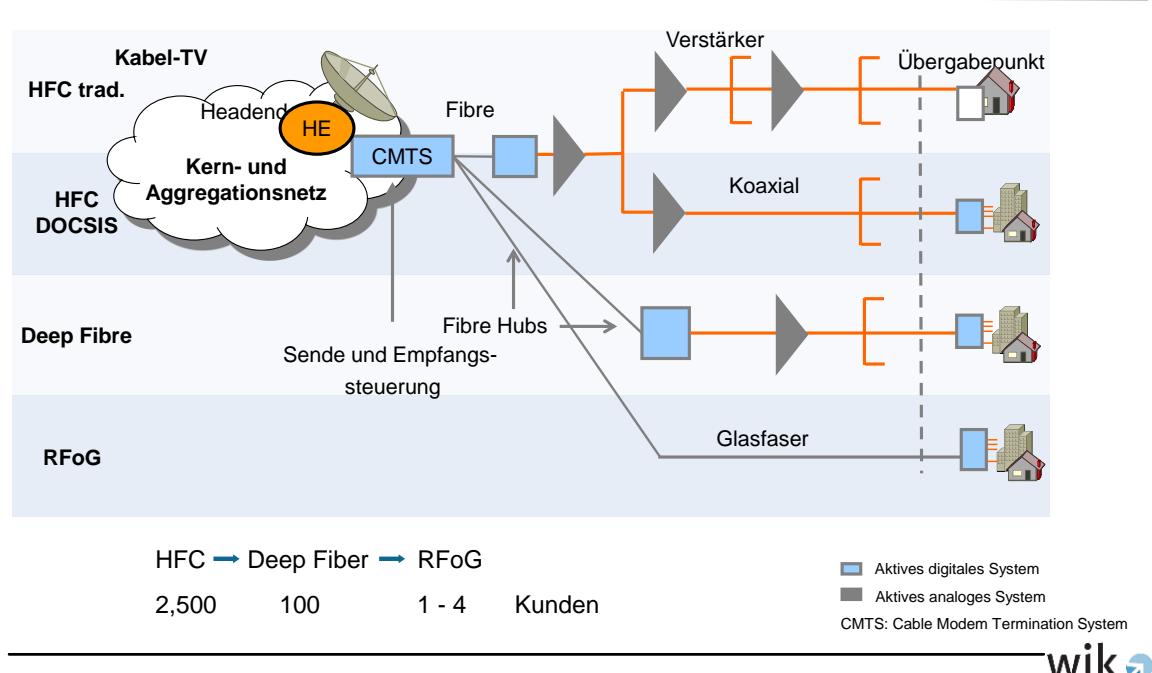
Quelle: WIK

Eine wichtige Alternative zur Neuordnung und Erweiterung des Frequenzbereiches ist die Verkleinerung der Koaxialstränge hinsichtlich der Zahl der Teilnehmer, die sich die Kommunikationskanäle teilen. Das Sharing im gemeinsamen Medium wird verkleinert.. Beide Ansätze finden in der Praxis gleichzeitig und überlappend statt. Dem CMTS werden über Glasfasern angeschlossene sogenannte Fibre Nodes vorgeschaltet, die die verkürzten und in der Zahl der Teilnehmer verkleinerten Koaxialstränge betreiben. Die Vermehrung der Zahl der Fibre Nodes und die Verkleinerung der Zahl der Kunden je Fibre Node nennt man Fibre Node Splitting. Die DOCSIS Architektur mit ca. 100 Teilnehmern nennt man Deep Fibre, eine Architektur mit nur noch 1 – 4 Teilnehmern RFoG (Radio Frequency over Glas). Sie entspricht im Grenzfall (1 Wohnung je fibre node) einer FTTH Architektur mit einer Faser je Wohnung zum CMTS. Hier mögen sich für

den zukünftigen Netzausbau Synergiepotentiale der gemeinsamen Nutzung von Glasfaserkabeln oder gar Glasfasern³⁰ nutzen lassen.

In der Standardisierung und Entwicklung befindet sich eine Erweiterung für DOCSIS 3.1, die die symmetrische Übertragung von 10 Gbit/s auf den shared Medium ermöglichen soll, um aus der strengen und starren Asymmetrie von 1:10 (up- und downstream) der bisherigen DOCSIS Standards herauszukommen und sich der Nachfrageentwicklung besser anzupassen. Diese Erweiterung wird inzwischen auch als DOCSIS 4.0 bezeichnet. Die Verfahren, Full Duplex (Cable Labs) und XG-Cable (Nokia) genannt, erlauben die Unterdrückung (das Herausrechnen) des Echoes der nahe beieinanderliegenden Cable Modems und der damit verbundenen Störungen. Beide Ansätze setzen voraus, dass die Menge der miteinander über einen Koax-Kabelstrang interferierenden Cable Modems gering ist, d.h. dass die Fibre Nodes nahe bei den Endkunden angesiedelt sind. Eine solche Architektur wird auch als FTTLA (fibre to the last amplifier) genannt.

Abbildung 2-10: Prinzip des Fibre Node Splitting, von der traditionellen Größe über Deep Fibre zu RFoG (Radio Frequency over Glas)

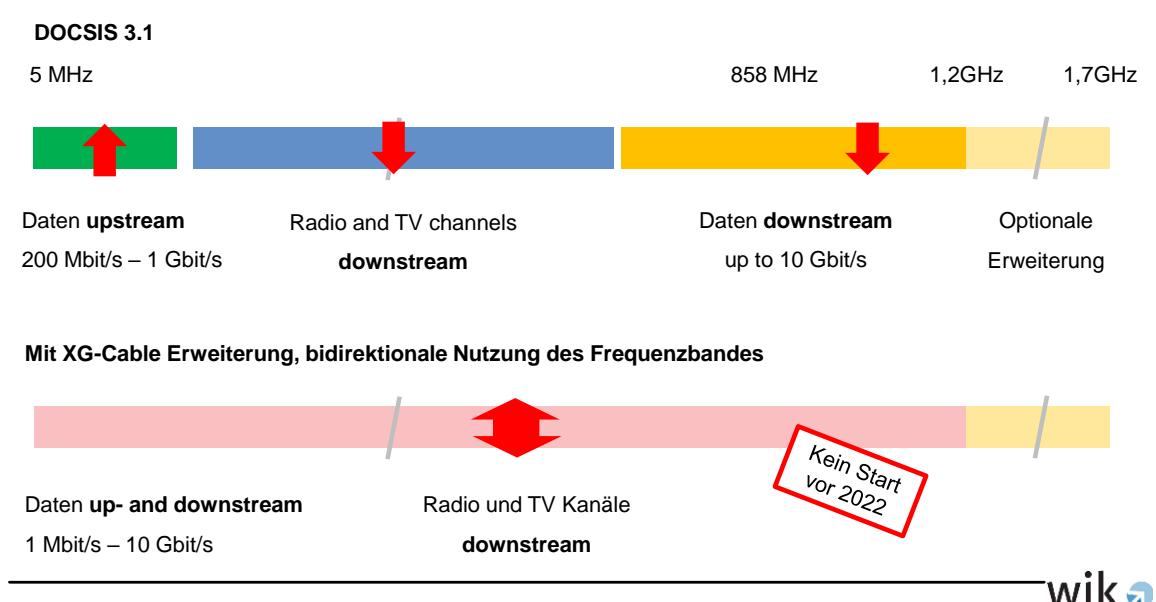


Quelle: WIK³¹

³⁰ Für die Radio- und TV-Signalübertragung ist im Rahmen der Standardisierung der Frequenznutzung im Glasfaserzugangsnetz der Bereich 1550 – 1560 nm zugewiesen worden. Dies ermöglicht grundsätzlich eine gemeinsame Nutzung von Glasfaseranschlussleitungen.

³¹ [Plückebaum 2016], [Kroon 2017], [Plückebaum 2019]

Abbildung 2-11: DOCSIS 3.1 mit Full Duplex Erweiterung (DOCSIS 4.0)



Quelle: WIK

Spätestens die DOCSIS 3.1 Full Duplex Architektur setzt einen deutlich weitergehenden Glasfaserausbau auch für die Kabel-TV Netze voraus als dies heute in Deutschland gegeben ist.

Kabel-TV Netze bieten heute in Deutschland für ca. 2/3 der Haushalte eine auf eigener Infrastruktur basierte Alternative. Eine Migration von einem auf Kupferdoppeladern basierten Anschlussnetz auf ein Koaxialkabel basiertes Anschlussnetz ist eher nicht üblich.³² Insofern werden wir eine derartige Migrationsüberlegung in dieser Studie auch nicht anstellen. Nützlich für die Kapazitätserweiterung eines DOCSIS Netzes durch eine Verringerung des Sharing und/ oder durch eine Migration auf das Release 3.1, ggf. mit Full Duplex, ist jedoch die Existenz von Glasfaserkabeln.

Wir sehen daher für die Zukunft Kabel-TV Unternehmen, die Ihre Netze auf Glasfaser (FTTLa) mit eigener Glasfaserinfrastruktur umrüsten, ggf. in Kooperation oder durch Mitverlegen, und glasfaserbasierte Unternehmen, die das klassische Kabel-TV Angebot (über eine eigene Wellenlänge) auch selbst anbieten oder im Rahmen ihres IP-TV Produktpportfolios und so in den Unmittelbaren Wettbewerb mit den Kabelnetzbetreibern eintreten.³³ Hybride Netzbetreiber, die Glasfasernetze ausbauen und DOCSIS Netze betreiben, neigen dazu, sich zukünftig auf Glasfasernetze zu konzentrieren und die

³² Eine Ausnahme stellt in Deutschland Vodafone dar, die durch den Kauf von Kabel-Deutschland und Unity Media in den Kabel-TV Gebieten sukzessive von ihrer TAL Anmietungsinfrastruktur auf DOCSIS migrieren, aber auch nur in diesen Gebieten.

³³ Die Glasfasernetze sind aufgrund ihrer höheren Bandbreiten für Individualverkehr insbesondere für Streaming Dienste besser geeignet als die DOCSIS Netze.

DOCSIS Welt abzubauen.³⁴ Insofern würde dann auch hier eine Migration von Kupfer (Koaxialkabel) auf Glasfaser stattfinden können, die auch die Inhaus-Infrastruktur bis hin zu RFoG umfasst, oder dann den Schwerpunkt auf die klassischen TK-Produkte aus allgemeinen All-IP-Netzen legt und die DOCSIS Protokollwelten ausklingen lässt. Letzteres (nur Glasfaser-TK Architektur bleibt) halten wir nur dann für wahrscheinlich, wenn die klassische TK-Produktwelt durch etablierte leistungsfähige BSS und OSS Prozesse unterstützt wird. Sofern die BSS und OSS Prozesse aus der DOCSIS und Kabel-TV Betriebsorganisation des gemischten Betreibers die Prozesse des anderen Teils übertreffen, wird das geschaffene Glasfasernetz voraussichtlich mit RFoG terminieren. Beide Welten parallel zu betreiben macht aus betriebswirtschaftlicher Sicht keinen Sinn. Wir schätzen allerdings die Zukunftsperspektiven eines All-IP Glasfaser PtP Ethernet Netzes für höherwertiger, technologienutraler, leistungsfähiger und damit zukunftssicherer ein.

³⁴ S. Wilhelm.tel: <https://www.golem.de/news/kein-docsis-3-1-stadtnetzbetreiber-baut-sein-koaxialkabel-lieber-ab-1804-133933.html>

2.3 Die NGA-Technologien im Überblick

Einen zusammenfassenden Überblick über die in Deutschland relevanten existierenden oder diskutierten NGA-Technologien und Netze gibt die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 2-2: Die NGA Festnetzarchitekturen im Vergleich

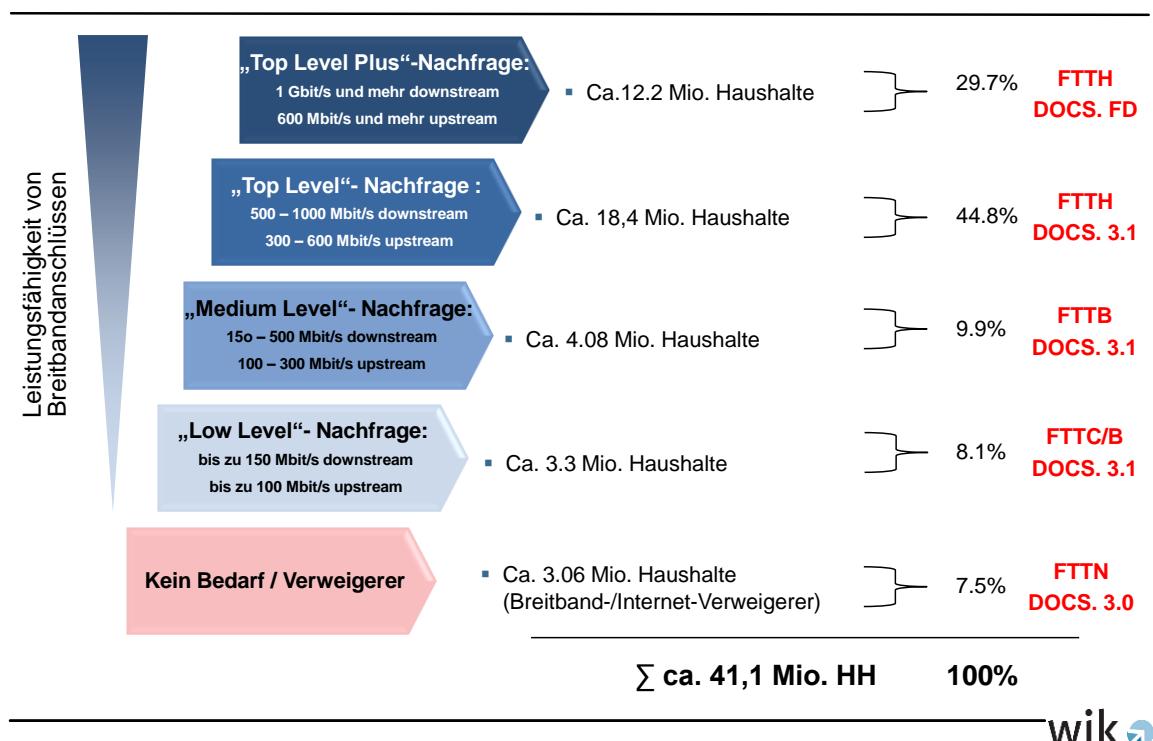
Übertragungstechnik	FTT...	Bandbreite down	Bandbreite up	Längenbeschränkung	individuell/ shared	symmetr./ asymmetr.	Ultrafast BB	Standard	ODF entbündelbar	VULA (l2)
Kupfer-DA										
ADSL2+	FTTC	0.01	0.004	2.600	i	a	n	2003	y	j
VDSL2	FTTC	0.05	0.015	400	i	a	n	2006	y	j
VDSL2 Vectoring	FTTC	0.09	0.04	400	i	a	n	2010	n	j
VDSL2 Supervect.	FTTC	0.25	0.1	300	i	a	n	2015	n	j
G.fast	FTTS/dp	2x0,5	0,5	250	i	a	n	2014	n	j
XG.fast	FTTB	2x5	5	50	i	a	y	2016	n	j
Koax										
Docsis 3.0	fibre node	1.2	0.12	160,000	s	a	?	2006	n	n
Docsis 3.1	fibre node	10	1	160,000	s	a	y	2013	n	n
Docsis 3.1 FD/XG-Cable	deep fibre	10	10	160,000	s	s	y	2020	n	n
Glasfaser										
GPON (PtMP)	FTTB/H	2.5	1.25	20,000	s	a	?	2003	n	j
XG.PON (PtMP)	FTTB/H	10	2.5	40,000	s	a/s	y	2008	n	j
XGS.PON (PtMP)	FTTB/H	10	10	40,000	s	s	y	2015	n	j
TWDM GPON (PtMP)	FTTB/H	4 - 8 x 10	4 - 8 x 10	40,000	s	a/s	y	2013	4 - 8 Ops	j
Ethernet PtP	FTTH	n x 100	n x 10,000	150,000	i	s	y	1998	j	j

Quelle: WIK

3 Zielarchitektur

Gleicht man den prognostizierten Bandbreitenbedarf für die Privatkunden mit den technischen Möglichkeiten der NGA Festnetzarchitekturen ab wird schnell offenbar, dass der Bedarf ab dem Jahr 2015 nur mit einer FTTH Architektur zu decken sein wird. Hier schließen wir die DOCSIS 3.1 FD Architektur mit ein.

Abbildung 3-1: Abgleich Breitbandnachfrage 2025 in Deutschland mit NGA Architekturen



Quelle: WIK (Die Nachfrageschätzungen für Unternehmen (ca. 3,6 Mio.) wurden nicht aktualisiert, sondern ohne neue Berechnungen in die Ergebnisse der Fortschreibungen für Privathaushalte integriert.)

Zu der bisher nur beschriebenen Beschränkung der Kommunikation über shared media bzgl. der geteilten und immer irgendwie begrenzten Bandbreite kommen noch Probleme niedrigerer Qualität durch höhere Latenzen (Verzögerungen), Jitter und der größeren Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten hinzu. Hingegen ist eine Glasfaser PtP Verbindung im Anschlussnetz frei von derartigen Defiziten und in ihrer Bandbreite faktisch nicht begrenzt.³⁵ Daher ist das langfristige Ziel eines Glasfaserausbau für diese Studie ein FTTH PtP Glasfaseranschlussnetz.³⁶

³⁵ Auf einer Glasfaser können nach dem heutigen Stand der Technik 192 Wellenlängen mit je 200 Gbit/s = 38,4 Tbit/s übertragen werden. Die technische Entwicklung ist hiermit noch nicht am Ende der Möglichkeiten. Dabei sind die Bandbreiten je Wellenlänge noch nicht vollständig ausgereizt. Pilotversuche belegen derzeit bis zu 400 Gbit/s je Wellenlänge (Nokia Bell-Labs, Ciena).

³⁶ Den langfristigen Bedarf derartiger Netze belegen auch die Absichten der Europäischen Kommission, den Zugang zu sogenannten High Performance Computing Centres (HPC) mit Exa-Scale Rechenleistung von im Prinzip jedem Standort in der EU sicherzustellen. Vgl. [Ecorys 2020]

4 Migrationswege

Die Migration eines Anschlussnetzes sollte so erfolgen, dass die neue Anschlussnetz-Infrastruktur parallel bereitgestellt wird und zum Zeitpunkt der Umstellung der Anschluss möglichst unterbrechungsfrei bzw. mit möglichst kurzer Betriebsunterbrechung umgeschaltet werden kann. D.h.: Die neue Anschlussnetzstruktur sollte möglichst parallel bereitgestellt werden, um später dann nur noch den Anschluss von der einen auf die andere Technologie umstellen zu können. Ein Ausziehen eines Kupferkabels und das anschließende Einziehen eines Glasfaserkabels dauert lange und die Dauer ist abhängig von der Anzahl der Anschlüsse, die von einer solchen Vorgehensweise betroffen wären. Der Austausch eines Hausanschlusses mit einer oder wenigen Wohnungen ist noch in einer überschaubaren Zeit (wenige Stunden) zu bewältigen. Der Austausch eines Hauptkabels mit mehreren hundert Anschlüssen braucht jedoch Tage, bis alle Kabel bis zu den Anschlüssen hin getauscht sind. In jedem Fall muss jedoch eine durchgängige Konnektivität über Glasfaser vom HVt zum Aggregationsknoten (DSLAM, MSAN, DPU, ONU) geschaffen werden, bevor der Betrieb umgeschaltet werden kann.

Wenn mit der Umstellung des Anschlusses auch auf eine grundsätzlich andere Protokollwelt umgestellt wird, wie dies z.B. bei der derzeit oft zeitgleich stattfinden Migration von PSTN auf VoIP geschieht, müssen ggf. auch auf der Endkundenseite größere Vorbereitungen (z.B. Austausch von Endgeräten, Neuverkabelungen, Austausch von Nebenstellensystemen – auch im Privathaushalt) vorgenommen werden, die auf den Umschalttermin hin koordiniert erfolgen müssen.

Wenn denn der Ausbau von NGA, wie in Deutschland zuweilen argumentiert, bereits mit FTTC beginnt und die dafür geschaffenen Infrastrukturen für einen Zielausbau reichen sollen, dann muss die Leerrohrinfrastruktur und das Glasfaserkabel vom HVT zum KVz bereits so dimensioniert sein, dass es für den Zielausbau ausreicht. Auch hier gilt, Kupferkabel können in diesem Netzsegment nur herausgezogen werden, wenn alle nachgelagerten Anschlüsse umgestellt sind. Dann könnte ggf. ein freiwerdender Rohrzug als eine neue Reserve verplant werden, wenn zuvor eine alte Reserve vorübergehend³⁷ durch neue Glasfasern belegt wurde. Insofern kann ggf. eine Einsparung erreicht werden. Zur Erinnerung sei noch mal erwähnt, dass bei weitem nicht alle Kupferhauptkabel in Leerrohren verlegt sind. Dies mag je nach Gegebenheiten in Deutschland nur für einen Teilabschnitt des Netzsegmentes der Fall sein.

Grundsätzlich ist die Frage nach der Parallelbereitstellung auch eine Frage nach der Migrationsstrategie des Netzbetreibers bzgl. der Kundenanschlüsse. Werden alle Kunden, sobald ein Gebiet parallel mit einer neuen, breitbandigeren Infrastruktur versorgt ist, auf die neuen Anschlusstechniken umgestellt, auch ohne, dass sie ihren Vertrag

³⁷ Vorübergehend bedeutet nicht über längere Zeiträume, z.B. mehr als ein Jahr. Der Zeitraum wird aber in dem beschriebenen Fall von der Migrationsstrategie (schneller oder langsamer Übergang) bestimmt, d.h. die Nutzung der Reservekapazitäten für die Parallelbereitstellung ist nur begrenzt im Rahmen der vorgegebenen Randbedingungen möglich.

wechseln oder upgraden. So dass sie ihren alten Dienst über die neue Plattform (zum selben Entgelt) beziehen? Oder müssen sie ein neues Produkt nehmen?

Der typischerweise empfohlene Weg ist dreigeteilt und wird auch bei der PSTN – VoIP Migration von der DT eingeschlagen:³⁸

1. Freiwillige Migration auf höherwertiges Produkt zum neuen Entgelt, beworben durch Aktionen nach dem Ausbau
2. Beenden/Kündigen auslaufender Verträge unter Anbieten eines angepassten neuen Vertrages ähnlicher Art
3. Zwangsmigration auf die neue Plattform unter Beibehalten des alten Dienstes zum alten Preis, d.h. ohne Vertragswechsel.

Ein derartiger Plan braucht natürlich seine Zeit, bei Vertragslaufzeiten von 2 Jahren zumindest diesen Zeitraum. Eine Verkürzung bedeutet zu guter Letzt eine Zwangsmigration der restlichen Kunden, ohne einen mehrwertigen Anschluss verkaufen zu können. Dieser Schritt ist häufig mit einem Sonderkündigungsrecht des Kunden verbunden. Auch Schritt 2 birgt das Risiko des Churn, d.h. des Wechsels des Kunden zu einem anderen Anbieter (wobei oft ein Teil des Umsatzes beim Infrastrukturbetreiber als Wholesale-Umsatz verbleibt). Dies legt nahe, nicht allzu oft Netzmumstellungen vorzunehmen, denn jede Migration, sei sie noch so gut geplant, birgt ein Fehlerrisiko.

Jede Migration braucht begleitend auch eine automatisierte Unterstützung der Bereitstellungs- und Kündigungsprozesse sowie deren Anpassung an die neue Systemplattform. Dies muss sauber geplant und in die Betrieblichen Abläufe eingebracht werden, rechtzeitig vorbereitet durch die zuständigen IT-Abteilungen. Dies ist oft eine zusätzliche Hürde bereits zeitlich kapazitiver Art. Hinzu kommen die hierfür benötigten Finanzmittel. Auch dies legt nahe, so wenig Zwischenschritte wie möglich einzuplanen.

4.1 Physische Migration

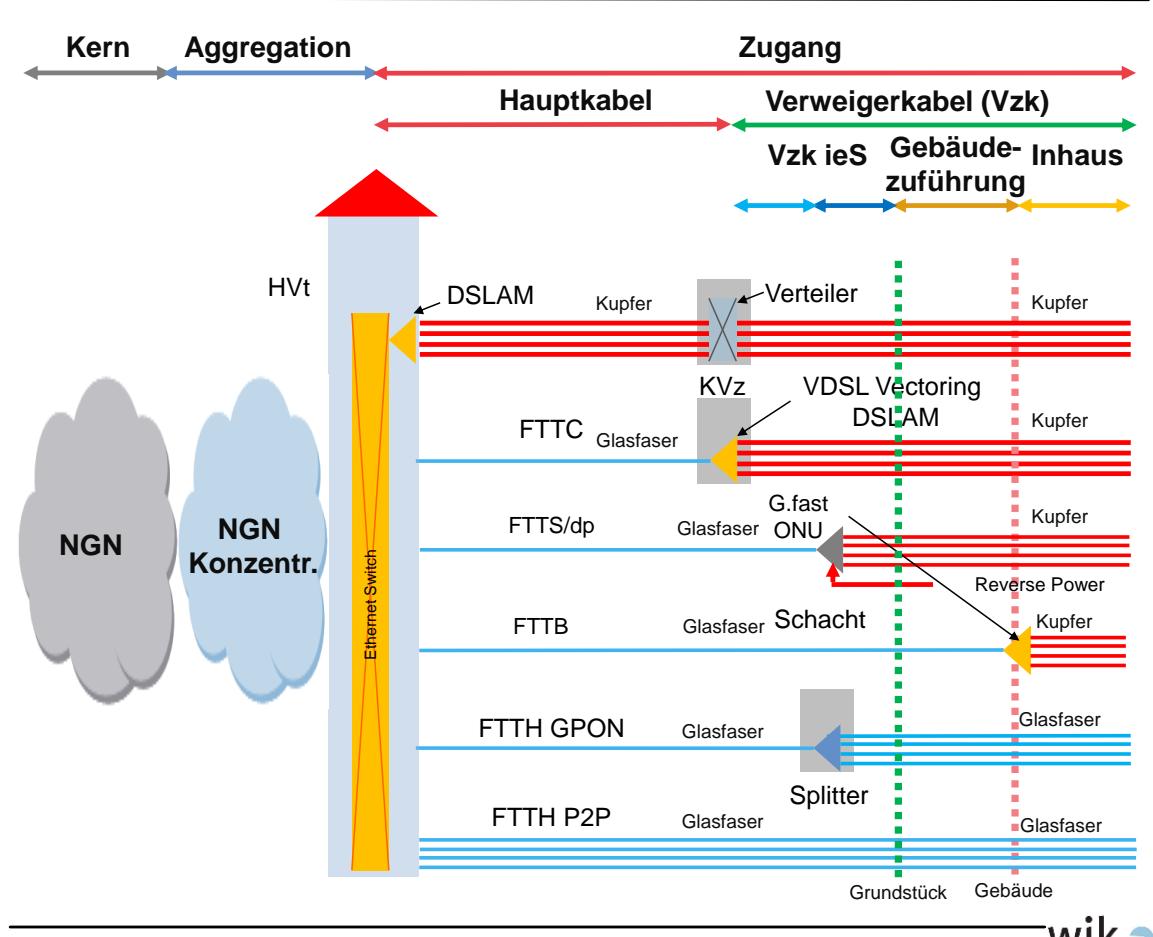
Die folgenden Abschnitte beschreiben die physische Migration vom Ausgangszustand FTTN, bei dem das Glasfasernetz im HVt endet und die Kunden über DLAM/MSAN angeschaltet werden.³⁹ Sie beschreiben typische erwartbare Migrationswege bzw. Wegabschnitte, die man ggf. mehrstufig zusammensetzen kann, die aber nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Wir beschränken uns in den nachfolgenden Beschreibungen auf eine Migration innerhalb der bestehenden klassischen All-IP TK-Architekturen und klammern eine Migration von Koax-Kabeln auf Glasfaserkabel explizit aus. Hierfür verweisen wir auf die Ausführungen zuvor (Abschnitt 2.2.6).

³⁸ [Dornheim 2015]

³⁹ Ggf. Sind die Sprachanschlüsse auch noch über sogenannte DLU (Digital Line Units) geführt. Alle derartigen und fallbezogenen Details werden hier der Übersichtlichkeit halber vernachlässigt.

Wir gehen davon aus, dass die Verbindungen des Kern- und des Aggregationsnetzes bereits seit geraumer Zeit aus Glasfaserstrecken aufgebaut sind. Abbildung 4-1 beschreibt die Netzsegmente des Zugangsnetzes, die sukzessive durch Glasfaserkabel ersetzt werden, beginnend mit dem Hauptkabelsegment. Die dort für das Verzweigerkabel vorgenommene weitere Untergliederung muss nicht zwingend in einzelnen Schritten durchlaufen werden, sondern die Untersegmente können im Prinzip auch in einem Schritt ersetzt werden (FTTC – FTTH PtP). Ein noch größerer Migrationsschritt kann gleich das Hauptkabel mit einschließen (FTTN – FTTH PtP). Die aus unserer Sicht möglichen Migrationswege sind in den nachfolgenden Abschnitten in ihren wesentlichen Aspekten erläutert.

Abbildung 4-1: Netzsegmente einer sukzessiven Kupfer – Glasfaser Migration



Quelle: WIK

4.1.1 FTTN – FTTC

Für diesen Schritt muss der KVz für die Aufnahme aktiven elektronischen Equipments (DSLAM, MSAN) aufgerüstet werden. Diese erfolgt, indem entweder das alte Gehäuse entfernt und ein neues, größeres über den alten Verteiler gestülpt wird, das die zusätzlichen Geräte und Funktionen aufzunehmen erlaubt, oder es wird ein neues Gehäuse daneben oder in der Nähe aufgebaut. Benötigt wird zudem eine Spannungsversorgung/ ein Stromanschluss, zumeist vom örtlichen EVU (oder z.B. vom Betreiber der öffentlichen Beleuchtung), mit einer Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) und Ventilatoren oder einer Kühlanlage zur Abführung der Wärme.⁴⁰

Der Anschluss des DSLAM/MSAN an den HVt erfolgt mit einem Glasfaserkabel, das so dimensioniert sein sollte, dass es auch die Fasern für eine FTTH PtP Glasfasertopologie bereitstellen kann. Typischerweise werden die Glasfaserkabel in Leerrohren verlegt. Vorhandene freie Rohrzüge könnten genutzt werden. Existieren keine freien Leerrohre, müssen diese verlegt werden. Hierfür sind teure Tiefbauarbeiten⁴¹ erforderlich. Die Nutzung von Reserverohrzügen ist nur unter den oben genannten Randbedingungen (kurz vorübergehend) möglich.

Im HVt können die vorhandenen DSLAM/MSAN (incl. DLU) für die Direktanschlüsse⁴² weitergenutzt werden. Die frei werdenden Ports und Systeme sind versunkene Investitionen, d.h. vollständig abzuschreiben.

4.1.2 FTTC – FTTS/dp

Bei der Migration von FTTC zu FTTS/dp müssen Distribution Points (DP) zur Aufnahme der DPU geschaffen werden, entweder als kleine Kabinette am Straßenrand oder als kleine Schächte auf den Verzweigerkabeln. Während in einigen Ländern solche Schächte bereits aus der Kupfernetzarchitektur zur Verfügung stehen (z.B. in der Schweiz) und in anderen Ländern die KVz näher an den Endkunden stehen (z.B. in U.K. und Italien), sind derartige Voraussetzungen in Deutschland eher nicht gegeben. D.h. vorhandene Standorte könnten i.d.R. nicht mitgenutzt werden. Dort werden nun neu beschaffte DPU incl. der Stromversorgung⁴³ installiert.

Das Glasfaserkabel muss nun als erster Teil eines Verzweigerkabels vom KVz zum DP verlängert werden. Dies setzt voraus, dass das Kabel zum KVz ausreichend groß ausgelegt wurde. Andernfalls muss hier nun nachinvestiert werden, ggf. durch Einziehen eines zusätzlichen Kabels in einem weiteren Rohrzug. Gibt es diese freie Rohrkapazität nicht, müsste im Hauptkabelsegment noch einmal neu gegraben werden. Auch für den

⁴⁰ Insbesondere im Sommer in Sonnenlagen von Bedeutung.

⁴¹ Auf die Methoden und Verfahren des Leitungs-Tiefbaus und ihrer Kosten geht dieser Diskussionsbeitrag nicht ein.

⁴² Sogenannte A₀ Anschlüsse

⁴³ Revers Power (s. Abschnitt 2.2.2)

neuen Netzabschnitt im Verzweigerkabel-Segment gilt, dass hier der Bedarf an Fasern für den Zielausbau (FTTH PtP) ausgelegt sein sollte. Auch hier erfolgt der Ausbau typischerweise im Leerrohr. Hierfür verweisen wir auf die einschlägigen Ausführungen im Abschnitt 4 zuvor.

Das Kabinett und seine Ausrüstung einschließlich des DSLAMs/MSANs sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

4.1.3 FTTC – FTTB

In Gegensatz zu zuvor müssen bei der Migration von FTTC zu FTTB keine DP für die Aufnahme elektronischen Equipments (vgl. zur Vielzahl der technischen Lösungen Abschnitt 2.2.3) geschaffen werden, sondern dieses wird in den Gebäuden der Kunden, typischerweise in Deutschland im Keller, installiert. Das Equipment muss dort eine gebäudeseitig gestellte Spannungsversorgung vorfinden. Auch sollte der Zugang nur für autorisierte Personen zugelassen sein.

Das Glasfaserkabel muss nun als Teil eines Verzweigerkabels vom KVz zum Gebäude verlängert⁴⁴ werden. Dies setzt voraus, dass das Kabel vom HVt zum KVz ausreichend groß ausgelegt wurde. Andernfalls muss hier nun nachinvestiert werden, ggf. durch Einziehen eines zusätzlichen Kabels in einem weiteren Rohrzug. Gibt es diese freie Rohrkapazität nicht, müsste im Hauptkabelsegment noch einmal neu gegraben werden. Auch für den neuen Netzabschnitt im Verzweigerkabel-Segment bis zum Gebäude gilt, dass hier der Bedarf an Fasern für den Zielausbau (FTTH PtP) ausgelegt sein sollte. Auch hier erfolgt der Ausbau typischerweise im Leerrohr. Hierfür verweisen wir auf die einschlägigen Ausführungen im einleitenden Abschnitt 4 zuvor.

Die Umstellung der Kunden von FTTC auf FTTB muss in jedem Fall vollständig je Gebäude erfolgen, weil sich die Signale auf den Kupferdoppeladern im Gebäude durch Nebensprechen derart stören können, dass FTTC nicht mehr zuverlässig arbeiten kann.⁴⁵ Andernfalls kann die volle Bandbreite des FTTB nicht genutzt werden und auch die FTTC-angeschlossenen Kunden erhalten u.U. nur eine reduzierte Bandbreite.

Das Kabinett und seine Ausrüstung einschließlich des DSLAMs/MSANs sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

⁴⁴ Im Vergleich zu FTTS/dp muss die Faserzahl höher sein, weil ein DP mehrere Gebäude erschließen kann.

⁴⁵ Das Nebensprechen kommt vor allem dort vor, wo ungeschirmte Telefonleitungen im Gebäude in Baumstruktur weitgehend parallel geführt werden – eine typische Form in Mehrfamilienhäusern. Vgl. auch [Schäfer 2018], [Obermann 2017]

4.1.4 FTTC – FTTH PtMP

Bei der Migration von FTTC zu FTTH PtMP ist die Frage nach dem Ort, wo der Splitter oder im Fall der Kaskadierung die Splitter aufgebaut werden von nicht unerheblicher Bedeutung. Wir unterscheiden hier nur zwei Fälle, die sich ein wenig an die Lösung in Frankreich anlehnen:

1. Die Splitter befinden sich am Ort des KVz und
2. Die Splitter befinden sich im Keller des Gebäudes

Die 1. Variante bietet sich zum einen an, wenn weniger große Gebäude im Einzugsbereich liegen oder zum anderen auch, wenn man einen entbündelten Zugang zu den Glasfaserendleitungen der Kunden über die Kollokation am KVz erreichen will.⁴⁶ In der Variante 1 wird ein Punkt-zu-Punkt Glasfasernetz im Verzweigernetz-Segment von den Wohnungen in den Gebäuden bis zu den Splittern an der KVz Lokation aufgebaut. Etwa vorhandene freie Kapazitäten oder Reserven in einem Leerrohrsystem können unter den bereits zuvor aufgeführten Randbedingungen mitgenutzt werden.⁴⁷ Diese Verzweigernetz ist bereits auch für eine FTTH PTP Versorgung ausgebaut. Nur im Hauptkabelsegment mag es noch Unterschiede zu dieser Topologie geben.

Die 2. Variante hat zumindest den letzten Splitter im Kundengebäude und aggregiert dort bereits die Kunden auf eine shared Glasfaser. Weitere vorgelagerte kaskadierte Splitter können in bestehenden oder neuen Schächten des in jedem Fall aufzubauenden neuen Leerrohrsystems des Glasfaseranschlussnetzes im Verzweigerkabel-Segment untergebracht werden. Auch die alte KVz Lokation bietet sich an. Gleichfalls erinnern wir an die Möglichkeit, Splitter auf der HVt-Seite aufzubauen. Die Glasfasern in den Kabeln werden zumindest am Faserbedarf der Splitterverteilung im Feld dimensioniert, sollten jedoch im Hinblick auf einen späteren Ausbau einer FTTH PtP Topologie entsprechende Faser- oder zumindest Leerrohrreserven aufweisen.

Gegenüber der bisher bestehenden FTTC Faserversorgung für die DSLAM/MSAN werden bei FTTH PtMP für die Versorgung der Splitter mehr Fasern im Hauptkabel benötigt. Entweder sind entsprechende Reserven, u.U. gar für eine FTTH PtP Versorgung, bereits aufgebaut oder sie müssen nachgerüstet werden. Ohne ausreichende Leerrohrreserven kann das neuen Tiefbau erfordern.

Sobald Teile des Glasfasernetzes durchgängig vom HVt zu den Kunden aufgebaut und eingemessen sind, können diese durch Aufbau der intermediären Elektronik (OLT auf der HVt Seite und ONU beim Endkunden; der Endkunde stellt auch den Stromanschluss für die ONU) in Betrieb genommen werden. Im Fall des Parallelbetriebes von

⁴⁶ In den weniger dicht besiedelten Gebieten Frankreichs (80% der Bevölkerung) werden derartige Mutualisierungspunkte mit 1000 Teilnehmern vorgegeben.

⁴⁷ Der Anteil Leerrohre im Verzweigerbereich ist in Deutschland eher geringer. In ländlichen Gebieten können ggf. Masten einer bestehenden Luftverkabelung (für Telekommunikation oder Stromversorgung) mitgenutzt werden.

FTTH PtMP und FTTC besteht die Gefahr von Störungen durch Nebensprechen, die eine Migration vollständiger Gebäude erfordert, nicht, weil die Glasfasern gegen derartige Störungen unempfindlich sind.

Das Gehäuse des KVz kann u.U. als rein passives Gehäuse weitergenutzt werden, wenn ausreichend Reserveplatz für die Splitter in der Phase des Parallelbetriebes während der Migration vorhanden ist. Die Ausrüstung des Kabinetts (Stromversorgung, Abluft etc.) einschließlich des DSLAMs/MSANs sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

4.1.5 FTTC – FTTH PtP

Bei einer Migration von FTTC auf FTTH PtP muss das Glasfasernetz wie in der Variante 1 der PtMP Lösung zuvor im Verzweigerkabel-Segment vollständig vom KVz bis in die Wohnungen hinein ausgebaut werden. Auch das Hauptkabelsegment muss entsprechend der Zahl der zu versorgenden Wohnungen mit ergänzenden Fasern ausgebaut werden, sofern diese Kapazitäten nicht schon als Reserven⁴⁸ vorgesehen waren.

Der Ethernet Switch auf der HVt-Seite muss um Ports für die Aufnahme der Kundenanschlüsse aufgerüstet werden. Ebenso benötigen die Router bei den Endkunden nun Glasfaser-Ports. Intermediäre G.PON Systeme sind in diesem Fall nicht erforderlich.

Die Migration kann Kunde für Kunde erfolgen, weil es eine Wechselwirkung (Nebensprechen) von der bisher genutzten Kupferverkabelung im Gebäude und der nun neu genutzten Glasfaser nicht gibt.

Das Kabinett und seine Ausrüstung einschließlich des DSLAMs/MSANs sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten. U.U. kann der Standort des KVz für einen Schacht für den Faserverteiler an der Schnittstelle zwischen Hauptkabel und Verzweigerkabel(n) genutzt werden.

4.1.6 FTTS/dp – FTTB

Die Migration von FTTS/dp zu FTTB ist nur ein kleines Inkrement ohne eine signifikante Verbesserung der Bandbreite für die Endkunden. Letztlich würde nur der Hausstich, die Zuführung vom Straßenrand in das Gebäude, auf Glasfaser umgerüstet. Da in Deutschland Schächte für die FTTS/dp DPU in der Regel nicht vorhanden sind gehen wir davon aus, dass eher direkt FTTB als FTTS/dp ausgebaut wird. Insofern gehen wir davon aus, dass ein solcher Fall in der Praxis nicht vorkommen wird.

⁴⁸ Als Fasern oder zumindest als Rohrzüge.

Sollte ein solcher Migrationsschritt dennoch vorgenommen werden sollen, muss auf eine gebäudeweite Migration zum selben Zeitpunkt abgestellt werden wegen des nicht zu kompensierenden Nebensprechens auf den Kupferdoppeladern im Gebäude. U.U. könnten die DPU dann auch weiterverwendet werden,⁴⁹ allerdings müssten diese entsprechend der gegenüber der Zahl distribution points höheren Zahl an Gebäuden nachgerüstet werden. Die DPU würden dann im Gebäude neu aufgebaut, mit neuer Spannungsversorgung und Zugangsschutz wie bei FTTB üblich.

4.1.7 FTTS/dp – FTTH PtMP

Wie bei der Migration von FTTC zu FTTH PtMP würde bei der Migration ab DP in einer Variante 1 der Splitter am DP aufgebaut und vor dort die Wohnungen mit dem weiterführenden Glasfasernetz Punkt-zu-Punkt verbunden. In einer Variante 2 könnte auch ein Splitter bereits im Gebäude die Kunden auf eine oder wenige Glasfaser(n) konzentrieren.

Insgesamt könnte der Glasfaserhaushalt von FTTS/dp im Hauptkabel- und Verzweigerkabel-Segment bis zum DP in etwa ausreichen, um auch die Splitter für die PtMP Installation zu versorgen, denn eine DPU unterstützt maximal 48 Kundenports und ein typischer PtMP Splitter in kaskadierter Summe maximal 64 Kundenanschlüsse. Durch den Ausbau zu FTTH muss jedoch das bisher die bestehenden Kupferdoppeladern in die Wohnungen hinein nutzende Netzsegment durch Glasfasern ersetzt werden. Dies kann in Parallelbereitstellung erfolgen. Ein Nebensprechen zwischen den Kupferdoppeladern und den Glasfasern gibt es nicht, so dass kundenweise migriert werden kann.

Die Migration zu einer PtMP Glasfasertopologie erfordert das Aufrüsten des Glasfasernetzes um die entsprechenden Netzkomponenten der G.PON Familie (OLT, ONU).

Der DP und seine Ausrüstung (z.B. Reverse Power) einschließlich der DPU sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden könnten. U.U. kann der Standort des DP für die Aufnahme des Splitters genutzt werden.

4.1.8 FTTS/dp – FTTH PtP

Wie in Variante 1 der vorhergehenden Migration zu PtMP werden in diesem Fall der Hausstich und der Wohnungsstich, d.h. die Gebäudezuführung und die Verkabelung im Gebäude, durch Glasfasern Punkt-zu-Punkt ersetzt.

⁴⁹ Eine Parallelbereitstellung würde es dann für ein Gebäude nicht geben und die Umstellung würde fallbezogen etwas länger dauern.

Es werden erweiterte Glasfaserkapazitäten im bis zum DP reichenden Hauptkabel- und Verzweigerkabel-Segment benötigt. Sofern diese nicht bereits im vorhergehenden Ausbau berücksichtigt wurden, müssen sie nun nachgerüstet werden.

Der Ethernet Switch auf der HVt-Seite muss um Ports für die Aufnahme der Kundenanschlüsse aufgerüstet werden. Ebenso benötigen die Router bei den Endkunden nun Glasfaser-Ports. Der Aufbau einer intermediären G.PON Technologie erübrigtsich.

Die Migration kann Kunde für Kunde erfolgen, weil es eine Wechselwirkung (Nebensprechen) von der bisher genutzten Kupferverkabelung im Gebäude und der nun neu genutzten Glasfaser nicht gibt.

Der DP und seine Ausrüstung (z.B. Reverse Power) einschließlich der DPU sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

4.1.9 FTTB – FTTH PtMP

Die Migration von FTTB zu FTTH PtMP erfolgt im Grundsatz durch Austausch der für FTTB im Keller der Gebäude aufgebauten elektronischen Systeme durch Splitter und durch die Installation einer Glasfaser Inhausverkabelung in die Wohnungen. Zusätzlich müssen die für eine PtMP Topologie erforderlichen G.PON Systeme (OLT und ONU) aufgebaut werden. Eine Migration von FTTB macht vor allem dann Sinn, wenn die den Endkunden angebotenen Bandbreiten höher sind als zuvor. Dies bedingt im Grundsatz, dass zumindest XGS.PON anstelle FTTB eingesetzt wird. Ein weiterer Grund kann die höhere Qualität und Unempfindlichkeit der Glasfasern gegen elektromagnetische Störungen sein, die es erlauben lassen, die Kupferleitungen im Gebäude durch Glasfasern zu ersetzen

Sofern keine Parallelbereitstellung von Glasfasern auf der Strecke vom HVt zum Gebäude (parallel zum FTTB Fasernetz) erfolgen kann, weil der installierte Faserhaushalt dies nicht hergibt, müssen die Kunden in einem Gebäude dann auf einmal migriert werden, wenn die Faser aus dem FTTB-System im Gebäude herausgezogen und auf einen Splitter umgespleißt wird.

Der FTTB Abschlussknoten im Gebäude einschließlich des für ihn errichteten Stromanschlusses und der Zugriffskontrolle sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

4.1.10 FTTB – FTTH PtP

Bei der Migration von FTTB zu FTTH PtP sind keine Splitter und intermediären G.PON Systeme erforderlich. Allerdings muss das Glasfasernetz vom HVt in das Gebäude hinein um die für eine Punkt-zu-Punkt Verbindung erforderliche Zahl von Fasern aufgerüstet werden, sofern diese Kapazitäten nicht bereits im Erstausbau berücksichtigt wurden.

Der Ethernet Switch auf der HVt-Seite muss um Ports für die Aufnahme der Kundenanschlüsse aufgerüstet werden. Ebenso benötigen die Router bei den Endkunden nun Glasfaser-Ports. Die Migration der Kunden von FTTB auf FTTH kann sukzessive erfolgen und muss nicht je Gebäude koordiniert werden. Die FTTB Faser kann dann umgeschwenkt werden, wenn der letzte Kunde im Gebäude migriert wird.

Der FTTB Abschlussknoten im Gebäude einschließlich des für ihn errichteten Stromanschlusses und der Zugriffskontrolle sind als versunkene Investitionen zu betrachten, wenn sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden könnten.

4.1.11 FTTN – FTTH PtMP

Wenn unmittelbar von FTTN zu FTTH PtMP migriert werden soll sind die Kupferkabel in allen Netzsegmenten unmittelbar und ohne Zwischenschritte durch Glasfaserkabel zu ersetzen. Dies kann Hauptkabelstrang für Hauptkabelstrang erfolgen, in jedem Fall aber im Rahmen einer Parallelbereitstellung. Ein derartiger Ausbau vom HVt zu den Endkunden ist immer etwas zeitintensiver als nur der Austausch einzelner Segmente oder Teilabschnitte davon. Allerdings gibt es Synergieeffekte im Kontext der Rüstzeiten und –kosten für die Baustellen. Im Prinzip kann die Kundenmigration in derartigen – zunächst als Overlay ausgebauten - Gebieten getrieben durch die Kundennachfrage nach höherwertigen Produkten erfolgen.

Vorhandene Leerrohr Infrastrukturen können nur in dem Maß mitgenutzt werden, wie sie bereits existieren. Das ist beim bestehenden Kupfernetz aber nur begrenzt der Fall. Wichtiger ist eine Vorausschau für den ggf. weiteren Ausbau zu einer PtP Verkabelung. Zumindest die Leerrohrkapazitäten sollten schon jetzt mitberücksichtigt werden, um spätere Aufgrabungen zu vermeiden. Anstatt die Splitter im Feld auszulegen sollte geprüft werden, ob nicht eine PtP Glasfasertopologie mit Splittern am HVt eine zukunftsweisendere Investition ist. Zusätzlich müssen die für eine PtMP Topologie erforderlichen G.PON Systeme (OLT und ONU) aufgebaut werden.

Sofern die Investitionen in das alte Kupferanschlussnetz noch nicht vollständig abgeschrieben sind, sind sie verloren (stranded, sunk). Dies kann auch bei Leerrohren gelten, die wegen der Parallelbereitstellung nicht von den Kupferkabeln freigezogen werden konnten und nach dem Schwenk auf das Glasfasernetz nicht mehr wiederverwendbar sind, sondern leer bleiben. Stranded sind sicher auch die nicht mehr benötig-

ten DSLAM/MSAN am HVt, soweit sie noch nicht abgeschrieben sind. Die Ethernet Switches hingegen können im Prinzip wiederverwendet werden. Ggf. bedürfen sie einer Aufrüstung. Die Router-CPE beim Endkunden müssen zumindest bzgl. Ihrer Anschlüsse an die ONUs geprüft und u.U. aufgerüstet werden, um von der höheren Leistungsfähigkeit zu profitieren. Die DSL-Modems sind nutzlos und müssen zu Null abgeschrieben werden, sofern sie das nicht bereits sind.

4.1.12 FTTN – FTTH PtP

Bei einer unmittelbaren Migration von FTTN zu FTTH PtP gilt im Grundsatz das zuvor gesagte (Abschnitt 4.1.11) mit wenigen, aber relevanten Abweichungen. Natürlich muss für jeden Netzabschlusspunkt Punkt-zu-Punkt verkabelt werden und die Leerohre und Kabel sind von vorneherein entsprechend auszubauen. Eine Reservehaltung für zukünftige Bandbreiterweiterungen sind nicht erforderlich. Je nach Ausbauphilosophie des PtMP Netzes bzgl. der Reserven und des Splitterkonzeptes besteht jedoch kein Unterschied im Faserausbau. Ausgebaut wird im Overlay für eine Parallelbereitstellung zur Migration. Der Zeitbedarf für den Ausbau ist naturgemäß gegenüber einem Teilausbau größer (s. zuvor).

Die G.PON Systeme (OLT und ONU) sowie die Splitter werden nicht benötigt. Die Ethernet Switches auf der HVt Seite und deren Ports müssen in der Zahl signifikant aufgerüstet werden, schließlich werden alle Kundenanschlüsse nun im Switch aggregiert. Auch benötigen die Endkunden-Router (CPE) nun Ethernet Glasfaserschnittstellen, entweder durch Umrüstung oder Ersatz.

Wie zuvor gilt: Sofern die Investitionen in das alte Kupferanschlussnetz noch nicht vollständig abgeschrieben sind, sind sie verloren (stranded, sunk). Dies kann auch bei Leerohren gelten, die wegen der Parallelbereitstellung nicht von den Kupferkabeln freigezogen werden konnten und nach dem Schwenk auf das Glasfasernetz nicht mehr wiederverwendbar sind, sondern leer bleiben. Stranded sind sicher auch die nicht mehr benötigten DSLAM/MSAN am HVt, soweit sie noch nicht abgeschrieben sind. Die Ethernet Switches hingegen könnten u.U. weiterverwendet werden, bedürfen jedoch einer Aufrüstung. Soweit die CPE getauscht werden müssen, sind die Investitionen in sie in dem Maße verloren, wie sie noch nicht vollständig abgeschrieben sind. Dies mag jedoch die Endkunden treffen, die für die CPE-Beschaffung verantwortlich sind.

4.1.13 FTTH PtMP – FTTH PtP

Bei einer Migration von FTTH PtMP zu PtP sind die Glasfasererverbindungen im Grundsatz bereits errichtet. Die Verkabelung im Gebäude bleibt unverändert. Abhängig von den Splitterlokationen müssen die Glasfaserkapazitäten ab dem letzten Splitter vor den Endkunden bis zum HVt entsprechend der Zahl der anzuschließenden Kunden hochge-

rüstet werden, sofern diese nicht bereits im vorhergehenden Ausbau berücksichtigt wurden. Die Splitter werden entsprechend abgebaut.

Die intermediäre G.PON Systeme werden dann obsolet, wenn sie nicht zusammen mit den alten oder mit neuen Splittern am HVt weiterverwendet werden sollen.⁵⁰ Diese sind, wenn sie nicht weiterverwendet werden, als versunkene Investitionen zu betrachten, sofern sie nicht über die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer vollständig abgeschrieben werden konnten.

Die Migration der Kunden kann beim langfristigen Abschalten von G.PON Anschluss für Anschluss erfolgen. Die Glasfasern im Gebäude stören sich nicht untereinander. Auch beim Umbau von dezentralen Splittern auf zentrale Splitter am HVt kann durch Parallelbereitstellung von Splittern im HVt Standort die Migration sukzessive Kunde für Kunde erfolgen und muss nicht gruppenweise koordiniert werden.

Der Ethernet Switch auf der HVt-Seite muss um Ports für die Aufnahme der Kundenanschlüsse aufgerüstet werden, sofern das G.PON Equipment nicht mehr weiterverwendet wird. Dann benötigen auch die Router bei den Endkunden nun Glasfaser-Ports.

Diese Migration macht insbesondere dann Sinn, wenn die G.PON Systeme den Kundenbedarf nicht ausreichend befriedigen können, sei es bzgl. individueller und garantierter Bandbreite, oder qualitativ (Delay, Jitter, Packet Loss).

4.1.14 Gemeinsamkeiten der Migrationsschritte

Den Migrationsschritten gemeinsam ist die Gefahr von Stranded Investment für die technologiespezifischen Systemkomponenten auf der zentralen Seite des Netzes am HVt und auf der Kundenseite. Dies tritt immer dann auf, wenn der nächste Migrationsschritt vollzogen wird, bevor die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer (i.d.R. 7 Jahre, für passive Komponenten auch länger) abgelaufen ist.

In nahezu allen Fällen der Migration müssen bis zu einem Zielausbau für FTTH PtP ergänzende Glasfasern in den einzelnen Netzsegmenten nachgerüstet werden. Dies gilt insbesondere für das Hauptkabelsegment und die entsprechenden Abschnitte des Verzweigerkabel-Segmentes. Eine Ausnahme bildet die Migration von FTTS/dp zu FTTH PtMP, bei der die installierte Faseranzahl ausreichen könnte, den Migrationsschritt zu tun (s. Abschnitt 4.1.7). In Übrigen sind derartige Nachrüstungen insbesondere dann nicht mehr so investmentsrelevant, wenn bei den ersten Ausbauschritten die erforderlichen Leerrohrkapazitäten oder auch die Verkabelung bereits errichtet wurde.

Für alle Migrationsschritte, die den erstmaligen Ausbau von Glasfaser bis in die Gebäude hinein vorsehen (FTTB, FTTH) ist in der Praxis ein Nutzungsvertrag mit dem Grundstückseigentümer abzuschließen. Insbesondere bei Eigentümergemeinschaften (WEG,

⁵⁰ Zu den Vorteilen einer solchen Architektur vgl. Abschnitte 2.2.5 (FTTH) und 2.2.4 (FTTH PtMP)

Erbengemeinschaften) kann dies mit viel Aufwand verbunden sein und zu einem Hindernis werden.⁵¹

Ein Quantensprung in der Anschlussinfrastruktur ist der Ausbau von FTTH, der auch in der o.a. Ausnahme (FTTS/dp – FTTH PtMP) gemacht werden muss. Sofern hier die Glasfasern im Gebäude sternförmig zum Hausübergabepunkt verkabelt werden und keine Splitter auf einer Etagenebene verbaut werden, ist die Infrastruktur für beide Glasfasertopologien nutzbar und eine Umrüstung nicht erforderlich.⁵²

Jeder Migrationsschritt hat auch Änderungen in den Produkten, den Vertriebs-, Bereitstellungs- und Betriebsprozessen zur Folge, sowie in den diese unterstützenden IT-Systemen (s. auch einleitend in Kapitel 4.). Dieser Änderungsaufwand mag sich im Zuge der Umstellung der Netzsteuerung auf SDN und NFV Architekturen verringern, dennoch werden hier ergänzende Anstrengungen, Investitionen und Aufwände entstehen. Gerade die Änderungen von IT-Systemen (BSS: Business Support Systems/ OSS: Operational Support Systems) müssen i.d.R. in die Releaseplanungen der IT-Produktionssysteme der Netzbetreiber eingephast werden. Derartige Rahmenbedingungen bestimmen die Zeitabläufe von Migrationsschritten mit oder können wegen des hohen Aufwandes Migrationszwischenschritte verhindern.

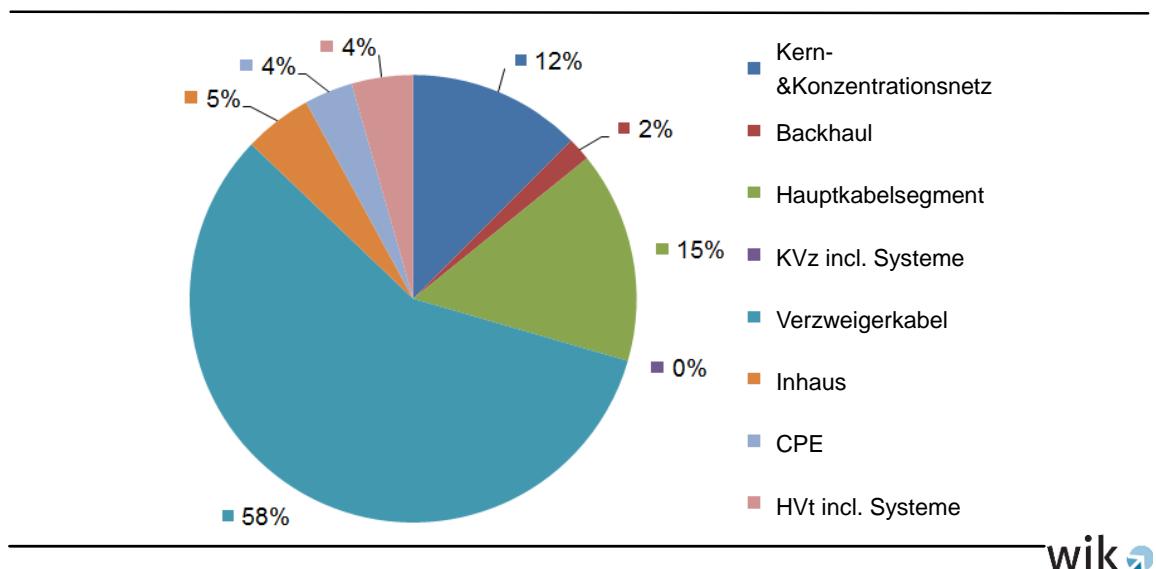
4.2 Kostenaspekte

Die Kosten eines Telekommunikationsnetzes sind im ganz überwiegenden Teil von den Kosten des Zugangsnets geprägt. Nur 12% entfallen im Beispiel von Abbildung 4-2 auf das zentrale Netz (Kern- und Aggregationsnetz). Das Inhausnetz hat etwa 5%, Haupt- und Verzweigerkabel 75%, das Backhaulnetz (2%) ist hier ein Bestandteil des Hauptkabelnetzes. Die Komponenten HVt (4%), CPE (4%) und KVz (hier 0%) beinhalten neben aktiven Komponenten und -systemen auch passive Komponenten (z.B. den Verteiler und die Räume bzw. das Kabinett). Im Fall FTTH ist die Position KVz leer, weil weder ein Kabinett errichtet wird noch an dieser Stelle weitere Komponenten gebraucht werden. Allenfalls werden hier Kabel in einer Muffe miteinander verbunden (gespleißt).

⁵¹ Hier unterstützt das TKG 77k Abs. 1ff (DigiNetzG von 2017). Auswirkungen auf die Praxis konnten bisher noch nicht belegt werden. [Schäfer 2018], [Godlovitch 2018]

⁵² Die Frage, wer die Glasfaser im Gebäude ausbaut und betreibt (Betreiber, Gebäudeeigentümer, Mieter) und wem sie gehört wird in diesem Diskussionsbeitrag nicht untersucht. Wir verweisen dazu auf [Schäfer 2018]

Abbildung 4-2: Typische Kostenstruktur eines Telekommunikationsnetzes (auf Basis FTTH PtP)



Quelle: WIK

wikt

Weil passive Investitionen i.d.R. eine lange Lebensdauer haben⁵³ ist es sinnvoll, Tiefbauinvestitionen nicht vor der Zeit zu wiederholen. Dies ist wegen des höheren Kostenanteils des Verzweigerkabel-Bereiches hier noch wichtiger als im Hauptkabelbereich.

Jeder Zwischenschritt braucht sein Equipment. Jeweils zu warten, bis dies abgeschrieben ist, um dann den nächsten Schritt zu beginnen, kann nach der vorliegenden Bedarfsprognose den Kunden und dem Bedarf des Wirtschaftsstandortes Deutschland nicht gerecht werden. Typischerweise dauert eine derartige Abschreibungsperiode 7 Jahre. Es werden also Zwischenlösungen übersprungen oder aber Sunk Investments in Kauf genommen werden müssen, die sich nur schwer amortisieren lassen. Diese Sunk Investments sind in den bisher bekannten Business Cases, auch in denen des WIK, nicht eingepreist. Für die im Abschnitt 4.3 beschriebenen Modellierungsergebnis haben wir daher die folgenden Annahmen für die Bildung von Restbuchwerten und für die Ergänzungsinvestitionen getroffen:

- Systemgruppen: MSAN, DPU, FTTB, G.PON, Annahme AfA 7 Jahre, etc. Stranding-Restbuchwert nach 3.5 Jahren, nach 7 Jahren voll abgeschrieben.
- KVz Gehäuse: AfA 20 Jahre, Stranding-Restbuchwert nach 3,5 und 7 Jahren
- Nachrüstungen im MPoP, ODF und ggf. Splitter, Hauptkabelsegment und Verzweigerkabel-Segment erfolgen in dem Ausmaß, wie Ergänzungen erforderlich werden. Die bestehenden Installationen werden weiterverwendet. Trassen- und Kabelabschnitte, die noch nicht mit Glasfasern ausgebaut waren, werden voll-

⁵³ Z.B. Leerrohre 35 Jahre, Glasfaserkabel 35 Jahre

ständig nachgerüstet. Die Afa beträgt 35 Jahre, Restbuchwerte fallen wegen der Weiterverwendung nicht an.

Grundsätzlich entstehen für jeden Migrationsschritt zusätzliche Aufwendungen für die Anpassung der die Vertriebs- und Betriebsprozesse unterstützenden IT-Systeme. Diese Aufwendungen hängen stark von der gegebenen Situation (und der Historie) der einzelnen Unternehmen ab und können nur im Rahmen spezieller Einzelfalluntersuchungen quantifiziert werden. In den hier bestimmten Investitionsrechnungen sind diese Kosten nicht enthalten. Auch dies ist im Sinne der Ergebnisse eine konservative Annahme.

4.3 Investitionen der verschiedenen Migrationsschritte und –wege

Für die in den Unterabschnitten des Abschnittes 4.1 beschriebenen Migrationsschritte wurde das bewährte WIK NGA-Modell⁵⁴ jeweils durch entsprechende Parametrierung angepasst. Zudem wurden die Investitionen derart bestimmt, dass weiternutzbare Infrastrukturen, insbesondere die Leerohre und Glasfaserkabel, wiederverwendet werden konnten und für diesen Zweck gleich von vorneherein ausreichend dimensioniert wurden. Dies ist ein Best Case, bei dem die Kapazitäten (Faserzahl) z.B. des Hauptkabels und der Leerohre dafür beim Ausbau von FTTC bereits so dimensioniert wurden, dass sie auch für den Ausbau einer Glasfaser Punkt-zu-Punkt (PtP) Netztopologie ausreichen und nicht noch einmal neu gegraben werden muss. Angenommen wird für die erste Investition der Ausbau für Deutschland mit einer Flächendeckung von 100% homes passed. Die Kosten für eine Inhausverkabelung, sofern sie nicht weiter verwendet werden kann, sind nicht berücksichtigt, weil sie den Eigentümer oder Wohnungsnutzer angelastet werden.⁵⁵ Die Ergebnisse dieser Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 4-1):

⁵⁴ Z.B. beschrieben in: [Jay 2011b], [Hoernig 2010], [Neumann 2017]

⁵⁵ [Schäfer 2018]

Tabelle 4-1: Investitionen der verschiedenen Migrationsschritte

Migrationspfad	Invest	Invest/ Anschluss	Sunk Cost 42 Monate	Sunk Cost 42/ Anschluss	Sunk Cost 84 Monate	Sunk Cost 84/ Anschluss
1 FTTN - FTTC	5.662.813,974 €	128,08 €	0 €	0,00 €	0 €	0,00 €
2 FTTC - FTTS	35.472.422,074 €	802,29 €	743.285.265 €	16,81 €	110.555.752 €	2,50 €
3 FTTC - FTTB	62.166.970.930 €	1.406,06 €	743.285.265 €	16,81 €	110.555.752 €	2,50 €
4 FTTC - FTTH PtMP	52.762.202.772 €	1.193,34 €	688.007.389 €	15,56 €	0 €	0,00 €
5 FTTC - FTTH PtP	52.906.273.998 €	1.196,60 €	743.285.265 €	16,81 €	110.555.752 €	2,50 €
6 FTTS - FTTB	23.646.138.087 €	534,81 €	7.034.045.722 €	159,09 €	755.959.475 €	17,10 €
7 FTTS - FTTH PtMP	16.479.122.943 €	372,71 €	7.034.045.722 €	159,09 €	755.959.475 €	17,10 €
8 FTTS - FTTH PtP	18.162.873.929 €	410,80 €	7.034.045.722 €	159,09 €	755.959.475 €	17,10 €
9 FTTB - FTTH PtMP	51.157.569.412 €	1.157,05 €	5.637.462.314 €	127,50 €	0 €	0,00 €
10 FTTB - FTTH PtP	46.961.446.931 €	1.062,15 €	5.637.462.314 €	127,50 €	0 €	0,00 €
11 FTTN - FTTH PtMP	60.935.080.092 €	1.378,19 €	0 €	0,00 €	0 €	0,00 €
12 FTTN - FTTH PtP	60.970.505.968 €	1.378,99 €	0 €	0,00 €	0 €	0,00 €
13 FTTH PtMP - FTTH PtP	12.376.405.504 €	279,92 €	6.871.403.941 €	155,41 €	0 €	0,00 €

Quelle: WIK

Eine erste Investition kostet den in der Spalte Invest ausgewiesenen Betrag, der sich auch in einen Invest je homes passed umrechnen lässt. Eine Anschlussinvestition für den weiteren Upgrade kostet wieder die entsprechend der Technologie in der Spalte Invest ausgewiesenen neuen Investitionen, die Nutzung der weiterverwendbaren Infrastrukturen bereits berücksichtigt. Hinzu kommt zumindest der Buchverlust für die Restwerte, die noch nicht vollständig abgeschrieben sind. Die Tabelle weist hierfür zwei Zeitpunkte für die Anschlussinvestitionen aus, 42 Monate (3,5 Jahre) und 84 Monate (7 Jahre). Grundsätzlich müsste man die Investitionen in der Zukunft aufzinsen und für eine Barwertbetrachtung wieder abzinsen. Gleiches gilt im Prinzip für die Restbuchwerte. Auf diese Betrachtung wird hier wegen der offensichtlichen Ergebnisse verzichtet.

Beispiel 1: FTTN > FTTC > FTTS > FTTB > FTTH PtMP > FTTH PtP

Für das Beispiel einer sehr schrittweisen Investition (Worst Case) nach jeweils 42 Monaten von zunächst FTTC, anschließend FTTS, dann FTTB, dann FTTH PtMP und schließlich FtH PtP ergäben sich Investitionen von 128,3 Mrd. €⁵⁶ und zusätzliche Restwertabschreibungen von 20,3 Mrd. €⁵⁷, gegenübergestellt einer Investition von ca. 61 Mrd. € ohne Restwertabschreibungen. Die Investitionen pro home passed betragen bei der schrittweisen Vorgehensweise 3.361,- € incl. Restwertabschreibungen, bei der direkten Migration „nur“ 1.379,- €. Die hier betrachtete schrittweise Investition über 5 Schritte benötigt mindestens 17,5 Jahre, würde erst jeweils nach 7 Jahre reinvestiert, um die Restwertabschreibungen zu verringern, wäre es das Doppelte. Das geht mit den Ausbauzielen der EU-Kommission und der Bundesregierung nicht einher. Eine derartige Ausbaufolge ist daher zeitlich wie ökonomisch realitätsfern. Dennoch gibt es hier nicht evaluierte Schritte innerhalb der GPON Architekturkette, die zu durchlaufen noch einmal Investitionen in die OLT und ONU erfordern und den Pfad zeitlich noch einmal deutlich verlängern würde.

⁵⁶ Investitionen aus den Zeilen 1, 2, 6, 9 und 13 aus Tabelle 4-1

⁵⁷ Restwerte 42 Monate aus den Zeilen 2, 6, 9, und 13 aus Tabelle 4-1

Beispiel 2: FTTN > FTTC > FTTB > FTTH PtP

Bei diesem Beispiel aus 3 Schritten kommen wir „nur“ auf Investitionen von 114,8 Mrd. €⁵⁸ und Restwertabschreibungen von 6,4 Mrd. €⁵⁹ gegenüber der zuvor schon genannten Direktinvestition von ca. 61 Mrd. € ohne Restwertabschreibungen. Die 3 Schritte dauern zusammen mindestens 10,5 Jahre, wenn die hier unterstellte minimale Dauer von 42 Monaten zwischen ihnen eingehalten wird. Die Investitionen incl. Restbuchwerte je homes passed betragen für die drei Schritte 2.741,- €, bei der direkten Migration die zuvor bereits genannten 1.379,- €. Das Beispiel kommt der beobachteten Realität vieler ausbauender Unternehmen schon recht nahe und ließe sich theoretisch auch zeitlich mit den Ausbauzielen von EU und Bundesregierung eher in Einklang bringen.

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

Die Zeitabstände sind nur theoretische Werte, weil der Ausbau in der Realität natürlich nicht überall gleichzeitig geschieht. Wenn immer erst 42 Monate nachdem der vorhergehende Ausbau abgeschlossen ist, erneut ausgebaut wird, verschleppt sich der Ausbau entsprechend und dies kann die Lebensdauer veralteter Netztechnologien über die verschiedenen Schritte hinweg entsprechend vergrößern.

Aus unseren Untersuchungen ist bekannt⁶⁰, dass der Ausbau von Breitband in den ländlicheren Regionen nicht profitabel ist, sondern Subventionen benötigt. Diese können immer dann beantragt werden, wenn sich zum einen eine Wirtschaftlichkeitslücke beim Ausbau ergibt (nur die reinen Investitionen ohne den Verlust durch die Restwertabschreibungen betrachtet) und zum anderen mit der neuen Architektur mindestens eine Verdoppelung der zuverlässig beim Kunden erzielbaren Bandbreiten einhergeht.⁶¹ Nur so wären wiederholte Subventionen für dasselbe Ausbaugebiet zu erwarten oder zumindest vorstellbar. Dies wäre nur zu vermeiden, wenn das definierte Ausbauziel nur noch Netze fördert, die zumindest im Anschlussbereich symmetrisch 1 Gbit/s unüberbucht (zuverlässig) bereitstellen.

⁵⁸ Investitionen aus den Zeilen 1, 3 und 10

⁵⁹ Restwerte 42 Monate aus den Zeilen 3 und 9

⁶⁰ Vgl. [Jay 2011b]

⁶¹ S. [EC State aid 2013], [EC SA Bavaria 2019]

4.4 Zeitabläufe

Der Ausbau eines Glasfasernetzes und das Ersetzen der bestehenden Kupferverkabelung durch ein Glasfasernetz braucht Zeit. Je näher das Glasfasernetz zum Endkunden ausgerollt wird, desto länger werden die auszubauenden Trassenkilometer, d.h. umso umfangreicher sind die Grabungsarbeiten. Bei einer Migration von FTTN zu FTTH sind die Baumaßnahmen eines Schrittes am umfangreichsten. Dies wird zunehmend Ressourcen am Markt binden, die nicht einfach zu vervielfältigen sind. Diese Ressourcenbindung wird umso stärker, je mehr Regionen parallel zueinander ausgebaut werden, und dies nicht nur in regionaler, sondern auch aus europäischer Sicht (Dienstleistungen aus Nachbarländern). Die Ressourcenknappheit bzw. die Tatsache, dass die einschlägigen Tiefbauunternehmen ausgelastet sind, wird sich voraussichtlich auch auf das Preisniveau auswirken.⁶²

Auch das Vermeiden von Sunk Investment oder jeder technisch mögliche Zwischen-schritt verzögern den zum Ziel genommenen Glasfaserausbau bis in die Wohnungen hinein. Diese Verzögerungen werden umso mehr verstärkt, wenn durch Tiefbaumaßnahmen oder durch das Nachziehen von Glasfaserkabeln die Kapazitäten des Fasernetzes aufgerüstet werden müssen, anstatt sie von Beginn an ausreichend zu dimensionieren. Dies gilt mehr noch für die Leerrohrkapazitäten, aber auch für die Glasfaserkabel selbst.

Eine schrittweise Migration bedingt die wiederholte Einrichtung von Baustellen im selben Gebiet. Dies kostet zusätzliche Zeit und Geld, belästigt die Anwohner mehrfach hintereinander und verunsichert den Markt durch wiederholte Migrationsschritte. Eine dadurch bedingte intensive Kundenkommunikation kann vermieden werden, indem man den Kunden auf einer leistungsfähigeren Infrastruktur nicht sofort das Maximum des technisch Möglichen verkauft, sondern dies sukzessive in einer Marketingstrategie mit immer neuen Inhalten und Mehrwerten tut – und das individuell je Kunde. Die Early Adaptors⁶³ können so schon vorneweg mit hochwertigen Produkten bedient werden, die bei kleinteiligen Migrationsschritten noch außerhalb des technisch Möglichen gelegen hätten, und erlauben so eine schnellere Markterschließung.

4.5 Aspekte der physischen Entbündelung

Bis wo geht eine Physische Entbündelung noch?

Die verschiedenen Netzarchitekturen aggregieren den Endkundenverkehr an unterschiedlichen Stellen im Netz. Der Aggregationspunkt ist in aller Regel bei den Bezeichnungen mit FTTx durch das „x“ bezeichnet, d.h. bei FTTC durch das „C“. Am Kabinett (KVz) kann man weiterhin auf die entbündelte Kupferdoppelader zugreifen. Bei FTTB ist

⁶² Vgl. [Wernick 2018]

⁶³ Technologie affine Kunden, die immer die neuesten, besten und leistungsfähigsten Produkte haben wollen und nachfolgende Kunden zur Nachahmung animieren. Sie ziehen den Markt.

das erst im Gebäude möglich. Bei FTTH hilft die kleine Regel nicht mehr weiter. Hier kann in keinem Fall mehr auf eine physisch entbündelte Kupferfesteleitung zugegriffen werden, weil kein Kupfer mehr im Spiel ist. Im Fall der FTTH PtP Topologie ist, wie bei FTTN, der entbündelte Zugriff am ODF (d.h. im Hauptverteilerstandort) möglich. Bei PtMP ist der physisch entbündelte Zugriff auf eine Glasfaser nur am letzten Splitter vor dem Endkunden möglich, d.h. ggf. erst im Kundengebäude.

Natürlich ist der Übergabepunkt für den entbündelten Zugang in einem Wettbewerbsmarkt entscheidend für den ökonomischen Erfolg eines Wettbewerbers, der eine solche Vorleistung einkaufen will. Je näher er zum Endkunden muss, um zu kollegieren und den Verkehr auf das eigene Netz zu übernehmen, desto höher werden seine Aufwendungen für die eigene Infrastruktur und desto kleiner werden die erschlossenen Übergabepunkte und desto kleiner werden erzielbare Skaleneffekte. Die Kundenunabhängigen Fixkosten steigen dramatisch und verhindern einen Marktzutritt. Die Beobachtungen im Markt der vergangenen 20 Jahre Infrastrukturtwettbewerb zeigen deutlich, schon eine Kollokation am HVt rechnet sich nur für die großen HVts (s. Abschnitt 2, nur die 4.000 größten). Eine Kollokation am KVz findet allenfalls dort statt, wo bestehende Infrastrukturen durch EVU-nahe Mitbewerber mitgenutzt werden konnten. VULA (am KVz) wird gar nicht nachgefragt. Grundsätzlich ist die Physische Entbündelung unterhalb der Ebene der HVt ökonomisch irrelevant.⁶⁴ Ausnahmen bilden sehr dicht besiedelte Gebiete.⁶⁵ Die beiden großen nationalen infrastrukturbasierten Festnetz-Wettbewerber zur DT Vodafone und Telefonica Deutschland geben selbst die weit ausgebauten Kollokation am HVt auf, weile sie, um im Wettbewerb um die Bandbreite mithalten zu können, auf VULA Produkte zurückgreifen müssten, die in Deutschland eine Kollokation am KVz voraussetzen. Diese ist für sie unökonomisch. Stattdessen haben sie Kontingentverträge⁶⁶ über den Bitstromzugang abgeschlossen.⁶⁷

Eine Mitnutzung bestehender Inhaus-Infrastrukturen gibt es insbesondere in den FTTB Regionen. Hier handelt es sich aber nicht mehr um ein Wholesale-Geschäft des marktbeherrschenden Anbieters, sondern des Gebäudeeigentümers, der ein großes Interesse an einem wettbewerblichen Markt für seine Bewohner im Gebäude haben muss, um die Attraktivität (und den Wert) der Immobilie zu steigern. Im Grundsatz kann man sagen, der FTTB-Anbieter hat die Mitbewerber im Wettkampf um die leistungsfähigste Infrastruktur geschlagen und erlangt dadurch Marktanteile über der kritischen Schwelle zum Gewinn, eine ausreichend dichte Besiedlung vorausgesetzt.⁶⁸ Hier ergeben sich ggf.

⁶⁴ S. [Plückebaum 2013]

⁶⁵ In Frankreich ist in den sehr dicht besiedelten Gebieten, die ca. 20% der Bevölkerung beherbergen, der Übergabepunkt zur Glasfaser zum Endkunden im oder am Gebäude vorgegeben. Hier werden in den Gebäuden auch Mehrfaserstrukturen vorgeschlagen, die durch mehrere Wettbewerber finanziert werden. In den weniger dicht besiedelten Gebieten (80% der Bevölkerung) sollen ca. 1000 Teilnehmer an derartigen Übergabepunkten zusammengefasst werden. Hier gibt es nur 1 Faser je Haushalt, die den Wettbewerbern physisch entbündelt angeboten werden muss.

⁶⁶ Diese Verträge enthalten Abnahmeverpflichtungen und Preisnachlässe und sind von der BNetzA genehmigt.

⁶⁷ Offensichtlich wiegen aus Sicht dieser Wettbewerber die qualitativen Nachteile des Bitstrom im Vergleich zum VULA die ökonomischen Nachteile des VULA nicht auf.

⁶⁸ [Jay 2011a], [Jay 2011b]

„Frequenzüberschneidungen“ entlang der Kupferdoppeladern, die die Signale des einen und/anderen Wettbewerbers im selben Gebäude stören können.⁶⁹

Es ist bekannt, dass sich die physische Entbündelung auf Kupferdoppeladern ab FTTC i.d.R. aus technischen Gründen verbietet, wenn zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Übertragung das gegenseitige Wechselsprechen der Kupferdoppeladern durch den Einsatz des Vectoring-Verfahrens unterdrückt werden soll.⁷⁰ Vectoring wird typischerweise bei FTTC, FTTS und FTTB (mit G.fast, XG.fast) eingesetzt. So ist eine physische Entbündelung bei vielen der Übergangsmigrationsschritte aus technischen Gründen nicht möglich, aber sie verbietet sich auch aus ökonomischen Gründen.

Anforderungen an die Virtuelle Entbündelung:

Im Rahmen der Märkteempfehlungen der EU-Kommission⁷¹ wurde daher für den Markt 3a⁷² für den Fall, dass eine physische Entbündelung technisch oder ökonomisch nicht umsetzbar ist, eine virtuelle Entbündelung zugelassen mit der Auflage, dass diese im Hinblick auf den Produktgestaltungsspielraum für die Wettbewerber der physischen Entbündelung möglichst nahe komme. Diese Anforderung wird in dem Fall, dass staatliche Beihilfen fließen sollen, von der EU-Kommission als besonders wichtig beim Eingriff in den Wettbewerb erachtet. Für den Fall der staatlichen Beihilfe im FTTC Vectoring Netzausbau wurde von der Kommission ein Kriterienkatalog festgelegt, der eingehalten werden muss (Tabelle 4-2). Auch für die anderen Fälle von NGA-Technologien mit einer möglicher physischer Entbündelung von Kupfer- oder Glasfaserleitungen auf den Ebenen unterhalb des Hvt ergeben sich i.d.R. sowohl die technische als auch die ökonomische Unmöglichkeit der physischen Entbündelung.⁷³ D.h. in vielen Fällen muss das Alternativangebot zur physischen Entbündelung, ein VULA auferlegt, definiert und im Prinzip auch geprüft werden. Diese Prüfungen gestalten sich teilweise sehr aufwändig und zeitraubend.

⁶⁹ S. [Schäfer 2018], [Obermann 2017]

⁷⁰ Technisch exakter: korrigiert. Vgl. [Plückebaum 2013]

⁷¹ [EC Märkte 2014]

⁷² Markt für den lokalen Zugang an festen Standorten (physische Entbündelung und ersatzweise VULA, wenn technisch oder ökonomisch nicht anders möglich)

⁷³ Dies gilt zumindest für FTTS/dp mit G.fast, für FTTB mit G.fast oder XG.fast, FTTH PtMP mit Splittern im Feld (zumindest ökonomische Unmöglichkeit). TWDM-PON könnte auf der Ebene der 4 verwendeten Wellenlängen entbündelt werden, vgl. Garcia Plückebaum ComReg 2017.

Tabelle 4-2: VULA-Kriterien im Fall staatlicher Beihilfen

Eigenschaften	Implementierung nach bestem Stand der Technik und betrieblichen Praxis
Übergabepunkt	<ol style="list-style-type: none"> 1. Der VULA sollte zumindest auf der HVt-Ebene der Netzhierarchie zugänglich sein, sofern dies nicht möglich ist, auf einer höheren (regionalen) Ebene. 2. Die Anzahl der Zugangsnachfrager je Übergabepunkt darf nicht begrenzt werden. 3. Die Größe und Zahl der Übergabe-Ports sollte nur durch die Kapazität bestimmt werden, die die Endkunden jedes Zugangsnachfragers fordern. 4. Der Zugang zum VULA sollte über ein einziges gemeinsames Interface für alle existierenden und zukünftigen VULA Techniken erfolgen und es sollte eine für alle Techniken gemeinsame VULA Produktfamilie definiert werden.
Generischer Zugang	<ol style="list-style-type: none"> 5. Der VULA sollte über ein Layer 2 (Ethernet) Protokoll erfolgen. 6. Ein unüberbuchbarer VULA sollte angeboten werden. Dies lässt sich am einfachsten bei einer Übergabe am HVt erreichen. Wenn ein VULA am BNG übergeben wird, so sollte er auch unüberbuchten konfiguriert werden können,⁷⁴ 7. 10Gbit/s Schnittstellen sollten auf Wunsch bereitgestellt werden können, um Überbuchungen an der Übergabeschnittstelle zu vermeiden. 8. VLAN tagging sollte eingesetzt werden. Es sollte zumindest 4 VLANs pro Endkunde geben, mit dem Möglichkeit, diese auf 8 für weitere Produktdifferenzierungen zu erweitern. 9. Die Größe der MTU (Message Transfer Unit) sollte mindestens 1580 Bytes betragen. 10. Es sollte mindestens eine logische Verbindung je Kunde zwischen dem Übergabepunkt und dem Kundenendgerät (CPE) geben, und eine eindeutige Kunden-ID, die zwischen Zugangsnachfrager und –Anbieter genutzt wird. 11. Eine Multicast Rahmen Replizierung is auf der Ebene der Kabinetts (KVz) nicht erforderlich, sollte aber auf jeder höheren Ebene angeboten werden.
Steuerung/ Kontrolle durch den Zugangsnachfrager	<ol style="list-style-type: none"> 12. Die Wahl des Kundenendgerätes sollte frei erfolgen können, z.B. aus einer Weißen Liste zugelassener Geräte, mit der Möglichkeit, weitere Geräte zulassen zu können. 13. Der Zugangsnachfrager sollte die volle Kontrolle über die technisch mögliche Kapazität der Anschlussleitung haben – Bandbreitenkontrolle und Verkehrs-priorisierung sollten vom Zugangsnachfrager allein vorgenommen werden. 14. Idealerweise sollte der Zugangsnachfrager die Zugangsschnittstellen seiner Kunden im MSAN betreiben und steuern können. 15. Zugangsnachfrager sollten alle Sicherheitsmaßnahmen auf Schicht 3 oder höher anwenden können. 16. Zugangsnachfrager sollten Fehler-Management Möglichkeiten durch Zugang zu Echtzeit-Status Informationen der Anschlussverbindungen und durch monatliche Anschlussstatistiken erhalten. Es sollten ein Verfügbarkeitskriterium und eine eindeutige Fehlerdefinition vorhanden sein. 17. Die Einhaltung der vereinbarten Dienstgüte (SLA) für Bereitstellung und Reparatur sollte durch KPI Überwachung mit automatisch gezahlter Entschädigung im Fall der Nichteinhaltung erreicht werden. 18. Zugangsnachfrager sollten die betrieblichen und geschäftlichen Abläufe auch mit dem Zugansanbieter automatisiert steuern können.

⁷⁴ Z.B.: Das österreichische VULA Produkt wird mit einer Kombination aus garantierter Kapazität für den einzelnen Nutzer und Spitzenkapazität angeboten, die unter den Nutzern gemeinsam nach fairen Bedingungen und bestem Bemühen (best effort) geteilt wird.

Migration	<p>19. Eine Migration sollte frühzeitig angekündigt werden und im Rahmen eines gegenseitig abgestimmten Plans erfolgen.</p> <p>20. Für eine Massenmigration sollte ein automatisiertes Verfahren zur Verfügung stehen.</p> <p>21. Für eine Massenmigration sollten spezifische KPI definiert und überwacht werden, mit automatisch gezahlter Entschädigung im Fall der Nichteinhaltung.</p> <p>22. Im Fall einer erzwungenen Migration sollten verlorene Investitionen in der Höhe ihres Netto-Buchwertes zum Migrationszeitpunkt ersetzt werden.</p>
Pricing	<p>23. Der FTTC VULA Preis sollte auf den Kosten basieren und durch ein BU-LRIC+ Verfahren bestimmt werden.</p> <p>24. Für einen unüberbuchten VULA sollte ein einfacher Preis berechnet werden, der auf der unbeschränkten Kapazität der Anschlussleitung beruht (begrenzt nur durch die technischen Möglichkeiten).</p> <p>25. Der Preis für einen überbuchten VULA sollte sich an aus einem kostenorientierten Anteil an dem Preis eines unüberbuchten VULA orientieren.</p>

Quelle: Europäische Kommission, GD Wettbewerb (2018)⁷⁵

In Deutschland entsteht die Situation, dass der definierte VULA zwar technisch möglich wird, aber ökonomisch faktisch nicht, sodass sich die Frage stellt, ob es sich im Sinne der Marktdefinition überhaupt um einen VULA handelt. Diese Frage hat die EU-Kommission im Kontext der State Aid VULA Entscheidung⁷⁶ bei der Förderung von Vectoring jedoch so entschieden, dass der Übergabepunkt am KVz näher beim Endkunden liegt und daher dem Ideal der Infrastrukturduplizierung bis nahe zum Endkunden eher entspricht als ein Übergabepunkt an zentralerer Stelle, der im Markt eher angenommen wird.⁷⁷ Mit dem neuen Layer 2 Bitstrom mit Übergabe am BNG hat sich nun auch in Deutschland 2019 das Blatt gewendet.

Untersuchungen des WIK mit dem auch für diese Studie verwendeten NGA Modell⁷⁸ haben ergeben, dass für den Fall des Infrastrukturwettbewerbes der Ausbau von mehreren Fasern zu jedem Endteilnehmer ökonomisch sinnvoller ist als das Vorsehen mehrerer Rohrzüge für parallele Kabel, wie dies teilweise die Regeln für die staatliche Förderung vorsehen.⁷⁹

⁷⁵ [Plückebaum 2018]

⁷⁶ [EC SA Germany 2017]

⁷⁷ S. [Plückebaum 2018]. Auch in Frankreich wurden in den weniger dicht besiedelten Gebieten zumindest 1000 Teilnehmer Punkt-zu-Punkt an sogenannten Mutualisierungspunkten sternförmig zusammengefasst und dort entbündelt an die Betreiber übergeben.

⁷⁸ [Braun 2019]

⁷⁹ S. [EC SA Bavaria 2019]

5 Bewertung und Empfehlung

Der Schrittweise Ausbau einer Breitbandinfrastruktur über mehrere Technologieschritte hinweg bis zu einem vollständigen, zukunftssicheren FTTH PtP Ausbau ist erheblich teurer als der direkte Ausbau. Dies gilt umso mehr, wenn man die ggf. durch Restwertabschreibungen verlorenen, gestrandeten Investitionen mit einbezieht.

Betrachtet man diese schrittweise Investitionen auf der Zeitachse wird offensichtlich, dass sich mit Ihnen die gesteckten zeitlichen Breitbandziele nicht werden erreichen lassen.

Verzögerungen entstehen auch durch die Prüfungen und Genehmigungen für die Eignung der Ersatzprodukte zur physischen Entbündelung, den VULA (Virtual Unbundled Local Access), die im Prinzip nicht nur für die Kupfernetze (FTTC), sondern auch für die durch viele Nutzer gemeinsam genutzten Einfaserstruktur (shared medium) der PtMP Glasfasernetze erfolgen muss. Im Fall des Förder-VULA waren derartige Prüfungen wegen der spezifischen Anforderungen des geförderten Eingriffs in den Wettbewerb besonders aufwändig. Auf derartige Ersatz-Produkte und deren Prüfungen kann jedoch verzichtet werden, wenn auf der Basis von PtP Glasfasertopologien eine physische Entbündelung nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch möglich wird.

Es erscheint weder volkswirtschaftlich noch fiskalisch sinnvoll, diese mit Ineffizienzen versehenen Zwischenschritte des Ausbaus staatlich zu fördern, sondern es scheint an der Zeit und ist auch bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten technisch machbar, direkt in eine zukunftssichere Glasfaser PtP Topologie zu investieren.

Literatur

[Braun 2019]

Braun, M. R.; Wernick, C.; Plückebaum, T.; Ockenfels, M.; Parallele Glasfaserausbauten auf Basis von Mitverlegung und Mitnutzung gemäß DigiNetzG als Möglichkeiten zur Schaffung von Infrastrukturwettbewerb, wik Diskussionsbeiträge Nr. 456, Bad Honnef, Dezember 2019, https://www.wik.org/index.php?id=meldungendetails&tx_ttnews%5BbackPid%5D=85&tx_ttnews%5Btt_news%5D=2276&cHash=a97dee95eb6b68fe2afefb61d487c806

[BNetzA 2019]

Bundesnetzagentur, Tätigkeitsbericht 2018/2019, Bonn, Dezember 2019, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2019/TK_20182019.html

[Dornheim 2015]

Dornheim, Sandra (DT): Managing the PSTN Transformation, CRC Press, Boca Raton, 2015

[EC Märkte 2014]

Europäisch Kommission, EMPFEHLUNG DER KOMMISSION über relevante Produkt- und Dienstmärkte des elektronischen Kommunikationssektors, die aufgrund der Richtlinie 2002/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über einen gemeinsamen Rechtsrahmen für elektronische Kommunikationsnetze und -dienste für eine Vorabregulierung in Betracht kommen, C(2014) 7174 final, Brüssel, 09.10.2014, <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/?fuseaction=list&cotid=3&year=2014&number=7174&language=de>

[EC SA Bavaria 2019]

Europäische Kommission C(2019) 8529 final, SA.54668, 29.11.2029, Bayerische Gigabitrichtlinie, https://ec.europa.eu/competition/elojade/isef/case_details.cfm?proc_code=3_SA_54668

[EC SA Germany 2017]

Europäische Kommission C(2017) 5572 final, SA.46805, 11.08.2017, VULA-Product, https://ec.europa.eu/competition/elojade/isef/case_details.cfm?proc_code=3_SA_46805

[EC State aid 2013]

Europäische Kommission 2013/C 25/01, 26.01.2013, Leitlinien der EU für die Anwendung der Vorschriften über staatliche Beihilfen im Zusammenhang mit dem schnellen Breitband, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2013:025:0001:0026:DE:PDF>

[Ecorys 2020]

Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team; Supporting the implementation of CEF2 Digital – SMART 2017/0018, European Commission, Brussels/Luxembourg, January 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8947e9db-4eda-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-116100663>

[Godlovitch 2017]

Godlovitch, I.; Plückebaum, T.; Held, C.; Kiesewetter, W.; Sabeva, D.; Strube Martins, S.; Best practice for infrastructure access, Bad Honnef, 19. April 2017, <http://www.vodafone.com/content/dam/vodafone-images/public-policy/reports/pdf/best-practice-passive-infrastructure-access-050517.pdf>

[Godlovitch 2018]

Godlovitch, I.; Plückebaum, T.; Kroon, P.; Wissner, M.; Batura, O.; Hausemer, P.; Vincze, M.; Study on Implementation and monitoring of measures under Directive 61/2014 – Cost Reduction Directive (SMART 2015/0066), Europäische Kommission, Brüssel, 27. Juni 2018, <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/study-implementation-and-monitoring-measures-under-broadband-cost-reduction-directive>

[Hackbarth 2016]

Hackbarth, K.; Kulenkampff, G.; Plückebaum, T.; Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Version 2.3, Bad Honnef/ Bonn, 15. August 2016, incl. Anlagen, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/massstaeben_methoden/kostenmodelle/breitbandnetz2x/breitbandnetz2x-node.html

[Hoernig 2010]

Hoernig, S.; Ilic, D.; Neumann, K.-H.; Peitz, M.; Plückebaum, T.; Vogelsang, I.: Architectures and competitive models in fibre networks, Bad Honnef, Dezember 2010, http://www.wik.org/uploads/media/Vodafone_Report_Final_WIKConsult_2011-01-10.pdf

[Jay 2011a]

Jay, S.; Neumann, K-H.; Plückebaum, T.; Comparing FTTH access networks based on P2P and PMP fibre topologies, Conference on Telecommunications, Media and Internet Tecno-Economics (CTTE) 2011, Berlin, 16. - 18. May 2011, contribution to conference and workshop

[Jay 2011b]

Jay, S.; Neumann, K-H.; Plückebaum, T.; Implikationen eines flächendeckenden Glasfaserausbaus und sein Subventionsbedarf, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 359, Bad Honnef, Oktober 2011, www.wik.org

[Jay 2012]

Jay, S.; Neumann, K-H.; Plückebaum, T.; The Cost of a Nationwide Fibre Access in Germany, Communications & Strategies No 85, 1 Q. 2012, S. 169 - 188, März 2012

[Jay 2013]

Jay, S.; Neumann, K-H.; Plückebaum, T.; Comparing FTTH access networks based on P2P and PMP fibre topologies, Journal on Telecommunications Policy (JTPO), 8. Juli 2013

[Jay 2014]

Jay, S., Plückebaum, T.: Kostensenkungspotenziale für Glasfaseranschlussnetze durch Mitverlegung mit Stromnetzen, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 390, September 2014, www.wik.org

[Kroon 2017]

Kroon, P.; Plückebaum, T.; Sanchez Gracia, J.; Sabeva, D.; Zoz, K.; Study into current and future technological access options to all fixed telecommunications infrastructures in the Netherlands, den Haag, 21. June 2017, <https://www.acm.nl/nl/publicaties/publicatie/17463/Onderzoek-toegang-tot-vaste--telecommunicatiennetwerken/>

[Marcus 2015]

Marcus, S.; Elixmann, D.; Plückebaum, T.: VoIP Interconnection in führenden Industrienationen, 9. ITG Fachkonferenz Breitband-Versorgung in Deutschland, Berlin, 21.April 2015

[Neumann 2017]

Neumann, K.-H.; Ockenfels, M.; Plückebaum, T.: Modellierung der Kosten eines flächendeckenden Hochbreitbandnetzes in der Schweiz, Bad Honnef, 5. Oktober 2017, <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesgesetze/fmg-revision-2017.html>

[Obermann 2017]

Obermann, K., Aschenbrenner, K.: Untersuchung von G.fast-Übertragungssystemen in realen Einsatzszenarien, VDE dialog 01/2017, S. 15-17

[Plückebaum 2013]

Plückebaum, T.: VDSL Vectoring, Bonding und Phantoming: Technisches Konzept, marktliche und regulatorische Implikationen, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 374, Bad Honnef, Januar 2013, www.wik.org

[Plückebaum 2014]

Plückebaum, T.; Jay, S.; Neumann, K.-H.: Investment requirements for VDSL vectoring in Germany, Digiworld Economic Journal, no. 93, 1st Q. 2014, pp. 141

[Plückebaum 2016]

Plückebaum, T.; Sanchez Garcia, J.E.; GPON and TWDM-PON in the context of the wholesale local access market, WIK-report for ComReg, 9. Juni 2016, <https://www.comreg.ie/publication/gpon-twdm-gpon-context-wholesale-local-access-market/>

[Plückebaum 2018]

Plückebaum, T.; Godlovitch, I.; Assessment of the technicalities of VULA products in the context of a state aid investigation, Expert opinion, Version 2, EC, Brussels, March 2018, ISBN 978-92-79-79903-7, <http://ec.europa.eu/competition/publications/reports/kd0418126enn.pdf>

[Plückebaum 2019]

Plückebaum, T., Elges, F., Ockenfels, M.; Potentiell anzunehmende Vorleistungsprodukte in Kabelnetzen auf der Basis von DOCSIS, Studie im Auftrag der BNetzA, Bad Honnef, 4. Februar 2019, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1_GZ/BK1-GZ/2019/2019_0001bis0999/2019-0001bis0099/BK1-19-0001_WIK-Kabelgutachten_BA.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[Queder 2018]

Queder, F.; Ockenfels, M.; Wernick, C.; Plückebaum, T.; Flächendeckende Glasfasernetze für Bayern, Bad Honnef, 1. Dezember 2017, https://www.gruene-fraktion-bayern.de/fileadmin/baybay-user_upload/download_dateien_2018/WIK_Studie_fuer_Buendnis_90_Glasfaserausbau_sent_1.12.2017.pdf

[Schäfer 2018]

Schäfer, Saskia; Kulenkampff, Gabriele; Plückebaum, Thomas; Zugang zu gebäudeinterner Infrastruktur und adäquate Bepreisung, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 426, Bad Honnef, April 2018, www.wik.org

[Strube Martins 2017]

Strube Martins, S.; Wernick, C.; Plückebaum, T.; Henseler-Unger, I.: Die Privatkundennachfrage nach hochbitratigem Breitbandinternet im Jahr 2025, WIK-Bericht, Bad Honnef, März 2017, <http://www.wik.org/index.php?id=871>

[Wernick 2018]

Wernick, C.; Tenbrock, S.; Gries, C; Henseler-Unger, I.; Plückebaum, T.; unter Mitarbeit von Model, L. (2018): Tiefbaukapazitäten als Engpass für den FTTB/H-Ausbau? Empfehlungen zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung für den Markt und die öffentliche Hand, Studie für den Bundesverband Breitbandkommunikation e. V. (BREKO), Bad Honnef, November 2018, <https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2018/WIK-Tiefbaustudie.pdf>

Als "Diskussionsbeiträge" des Wissenschaftlichen Instituts für Infrastruktur und Kommunikationsdienste sind zuletzt erschienen:

Nr. 379: Marcus Stronzik:

Investitions- und Innovationsanreize:
Ein Vergleich zwischen Revenue Cap
und Yardstick Competition, September
2013

Nr. 380: Dragan Ilic, Stephan Jay, Thomas
Plückebaum, Peter Stamm:

Migrationsoptionen für Breitbandkabel-
netze und ihr Investitionsbedarf, August
2013

Nr. 381: Matthias Wissner:

Regulierungsbedürftigkeit des Fern-
wärmesektors, Oktober 2013

Nr. 382: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke,
Petra Junk, Sonja Thiele:

Netzzugang im Briefmarkt, Oktober
2013

Nr. 383: Andrea Liebe, Christine Müller:

Energiegenossenschaften im Zeichen
der Energiewende, Januar 2014

Nr. 384: Christian M. Bender, Marcus Stronzik:

Verfahren zur Ermittlung des sektora-
len Produktivitätsfortschritts - Internatio-
nale Erfahrungen und Implikationen
für den deutschen Eisenbahninfrastruk-
tursektor, März 2014

Nr. 385: Franz Büllingen, Annette Hillebrand,
Peter Stamm:

Die Marktentwicklung für Cloud-Dienste
- mögliche Anforderungen an die Net-
zinfrastruktur, April 2014

Nr. 386: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:

Smart Metering Gas, März 2014

Nr. 387: René Arnold, Sebastian Tenbrock:

Bestimmungsgründe der FTTP-Nach-
frage, August 2014

Nr. 388: Lorenz Nett, Stephan Jay:

Entwicklung dynamischer Marktszena-
rien und Wettbewerbskonstellationen
zwischen Glasfasernetzen, Kupfernet-
zen und Kabelnetzen in Deutschland,
September 2014

Nr. 389: Stephan Schmitt:

Energieeffizienz und Netzregulierung,
November 2014

Nr. 390: Stephan Jay, Thomas Plückebaum:

Kostensenkungspotenziale für Glasfa-
seranschlussnetze durch Mitverlegung
mit Stromnetzen, September 2014

Nr. 391: Peter Stamm, Franz Büllingen:

Stellenwert und Marktperspektiven öf-
fentlicher sowie privater Funknetze im
Kontext steigender Nachfrage nach
nomadischer und mobiler hochbitratiger
Datenübertragung, Oktober 2014

Nr. 392: Dieter Elixmann, J. Scott Marcus,
Thomas Plückebaum:

IP-Netzzusammenschaltung bei NGN-
basierten Sprachdiensten und die Mig-
ration zu All-IP: Ein internationaler Ver-
gleich, November 2014

Nr. 393: Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:

Implikationen der Internationalisierung
von Telekommunikationsnetzen und
Diensten für die Nummernverwaltung,
Dezember 2014

Nr. 394: Rolf Schwab:

Stand und Perspektiven von LTE in
Deutschland, Dezember 2014

Nr. 395: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke,
Petra Junk, Antonia Niederprüm:

Produktive Effizienz von Postdienstleis-
tern, November 2014

Nr. 396: Petra Junk, Sonja Thiele:

Methoden für Verbraucherbefragungen
zur Ermittlung des Bedarfs nach Post-
Universaldienst, Dezember 2014

Nr. 397: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:

Analyse des Preissetzungsverhaltens
der Netzbetreiber im Zähl- und Mess-
wesen , März 2015

Nr. 398: Annette Hillebrand, Martin Zauner:

Qualitätsindikatoren im Brief- und Pa-
ketmarkt , Mai 2015

- Nr. 399: Stephan Schmitt, Marcus Stronzik:
Die Rolle des generellen X-Faktors in verschiedenen Regulierungsregimen, Juli 2015
- Nr. 400: Franz Büllingen, Solveig Börnsen:
Marktorganisation und Marktrealität von Machine-to-Machine-Kommunikation mit Blick auf Industrie 4.0 und die Vergabe von IPv6-Nummern, August 2015
- Nr. 401: Lorenz Nett, Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Ein Benchmark neuer Ansätze für eine innovative Ausgestaltung von Frequenzgebühren und Implikationen für Deutschland, November 2015
- Nr. 402: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk:
Zur Marktabgrenzung bei Kurier-, Paket- und Expressdiensten, November 2015
- Nr. 403: J. Scott Marcus, Christin Gries, Christian Wernick, Imme Philbeck:
Entwicklungen im internationalen Mobile Roaming unter besonderer Berücksichtigung struktureller Lösungen, Januar 2016
- Nr. 404: Karl-Heinz Neumann, Stephan Schmitt, Rolf Schwab unter Mitarbeit von Marcus Stronzik:
Die Bedeutung von TAL-Preisen für den Aufbau von NGA, März 2016
- Nr. 405: Caroline Held, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum:
Entgelte für den Netzzugang zu staatlich geförderter Breitband-Infrastruktur, März 2016
- Nr. 406: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:
Kapazitätsmechanismen – Internationale Erfahrungen, April 2016
- Nr. 407: Annette Hillebrand, Petra Junk:
Paketshops im Wettbewerb, April 2016
- Nr. 408: Tseveen Gantumur, Iris Henseler-Unger, Karl-Heinz Neumann:
Wohlfahrtsökonomische Effekte einer Pure LRIC - Regulierung von Terminierungsentgelten, Mai 2016
- Nr. 409: René Arnold, Christian Hildebrandt, Martin Waldburger:
Der Markt für Over-The-Top Dienste in Deutschland, Juni 2016
- Nr. 410: Christian Hildebrandt, Lorenz Nett:
Die Marktanalyse im Kontext von mehrseitigen Online-Plattformen, Juni 2016
- Nr. 411: Tseveen Gantumur, Ulrich Stumpf:
NGA-Infrastrukturen, Märkte und Regulierungsregime in ausgewählten Ländern, Juni 2016
- Nr. 412: Alex Dieke, Antonia Niederprüm, Sonja Thiele:
UPU-Endvergütungen und internationaler E-Commerce, September 2016 (in deutscher und englischer Sprache verfügbar)
- Nr. 413: Sebastian Tenbrock, René Arnold:
Die Bedeutung von Telekommunikation in intelligent vernetzten PKW, Oktober 2016
- Nr. 414: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Big Data und OTT-Geschäftsmodelle sowie daraus resultierende Wettbewerbsprobleme und Herausforderungen bei Datenschutz und Verbraucherschutz, November 2016
- Nr. 415: J. Scott Marcus, Christian Wernick:
Ansätze zur Messung der Performance im Best-Effort-Internet, November 2016
- Nr. 416: Lorenz Nett, Christian Hildebrandt:
Marktabgrenzung und Marktmacht bei OTT-0 und OTT-1-Diensten, Eine Projektstudie am Beispiel von Instant-Messenger-Diensten, Januar 2017
- Nr. 417: Peter Kroon:
Maßnahmen zur Verhinderung von Preis-Kosten-Scheren für NGA-basierte Dienste, Juni 2017
- Nr. 419: Stefano Lucidi:
Analyse marktstruktureller Kriterien und Diskussion regulatorischer Handlungsoptionen bei engen Oligopolen, April 2017

- Nr. 420: J. Scott Marcus, Christian Wernick, Tseveen Gantumur, Christin Gries:
Ökonomische Chancen und Risiken einer weitreichenden Harmonisierung und Zentralisierung der TK-Regulierung in Europa, Juni 2017
- Nr. 421: Lorenz Nett:
Incentive Auctions als ein neues Instrument des Frequenzmanagements, Juli 2017
- Nr. 422: Christin Gries, Christian Wernick:
Bedeutung der embedded SIM (eSIM) für Wettbewerb und Verbraucher im Mobilfunkmarkt, August 2017
- Nr. 423: Fabian Queder, Nicole Angenendt, Christian Wernick:
Bedeutung und Entwicklungsperspektiven von öffentlichen WLAN-Netzen in Deutschland, Dezember 2017
- Nr. 424: Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Sonja Thiele:
Wirksamkeit sektorspezifischer Verbraucherschutzregelungen in Deutschland, Januar 2018
- Nr. 425: Bernd Sörries, Lorenz Nett:
Frequenzpolitische Herausforderungen durch das Internet der Dinge - künftiger Frequenzbedarf durch M2M-Kommunikation und frequenzpolitische Handlungsempfehlungen, März 2018
- Nr. 426: Saskia Schäfer, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum unter Mitarbeit von Stephan Schmitt:
Zugang zu gebäudeinterner Infrastruktur und adäquate Bepreisung, April 2018
- Nr. 427: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Marktbeobachtung in der digitalen Wirtschaft – Ein Modell zur Analyse von Online-Plattformen, Mai 2018
- Nr. 428: Christin Gries, Christian Wernick:
Treiber und Hemmnisse für kommerziell verhandelten Zugang zu alternativen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, Juli 2018
- Nr. 429: Serpil Taş, René Arnold:
Breitbandinfrastrukturen und die künftige Nutzung von audiovisuellen Inhalten in Deutschland: Herausforderungen für Kapazitätsmanagement und Netzneutralität, August 2018
- Nr. 430: Sebastian Tenbrock, Sonia Strube Martins, Christian Wernick, Fabian Queder, Iris Henseler-Unger:
Co-Invest Modelle zum Aufbau von neuen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, August 2018
- Nr. 431: Johanna Bott, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Die Nutzung von Daten durch OTT-Dienste zur Abschöpfung von Aufmerksamkeit und Zahlungsbereitschaft: Implikationen für Daten- und Verbraucherschutz, Oktober 2018
- Nr. 432: Petra Junk, Antonia Niederprüm:
Warenversand im Briefnetz, Oktober 2018
- Nr. 433: Christian M. Bender, Annette Hildebrand:
Auswirkungen der Digitalisierung auf die Zustelllogistik, Oktober 2018
- Nr. 434: Antonia Niederprüm:
Hybridpost in Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 436: Petra Junk:
Digitalisierung und Briefsubstitution: Erfahrungen in Europa und Schlussfolgerungen für Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 437: Peter Kroon, René Arnold:
Die Bedeutung von Interoperabilität in der digitalen Welt – Neue Herausforderungen in der interpersonellen Kommunikation, Dezember 2018
- Nr. 438: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Auswirkung von Bündelprodukten auf den Wettbewerb, März 2019
- Nr. 439: Christian M. Bender, Sonja Thiele:
Der deutsche Postmarkt als Infrastruktur für europäischen E-Commerce, April 2019
- Nr. 440: Serpil Taş, René Arnold:
Auswirkungen von OTT-1-Diensten auf das Kommunikationsverhalten – Eine nachfrageseitige Betrachtung, Juni 2019

- Nr. 441: Serpil Taş, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Sprachassistenten in Deutschland, Juni 2019
- Nr. 442: Fabian Queder, Marcus Stronzik, Christian Wernick:
Auswirkungen des Infrastrukturwettbewerbs durch HFC-Netze auf Investitionen in FTTP-Infrastrukturen in Europa, Juni 2019
- Nr. 443: Lorenz Nett, Bernd Sörries:
Infrastruktur-Sharing und 5G: Anforderungen an Regulierung, neue wettbewerbliche Konstellationen, Juli 2019
- Nr. 444: Pirmin Puhl, Martin Lundborg:
Breitbandzugang über Satellit in Deutschland – Stand der Marktentwicklung und Entwicklungsperspektiven, Juli 2019
- Nr. 445: Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Sebastian Tenbrock, Christian Wernick, Matthias Wissner:
Die ökonomische Relevanz und Entwicklungsperspektiven von Blockchain: Analysen für den Telekommunikations- und Energiemarkt, August 2019
- Nr. 446: Petra Junk, Julia Wielgosch:
City-Logistik für den Paketmarkt, August 2019
- Nr. 447: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Entwicklung des Effizienzvergleichs in Richtung Smart Grids, September 2019
- Nr. 448: Christian M. Bender, Antonia Niederprüm:
Berichts- und Anzeigepflichten der Unternehmen und mögliche Weiterentwicklungen der zugrundeliegenden Rechtsnormen im Postbereich, September 2019
- Nr. 449: Ahmed Elbanna unter Mitwirkung von Fabian Eltges:
5G Status Studie: Herausforderungen, Standardisierung, Netzarchitektur und geplante Netzentwicklung, Oktober 2019
- Nr. 450: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Internationale Vergleichsstudie bezüglich der Anwendung und Umsetzung des Nachbildungbarkeitsansatzes, Dezember 2019
- Nr. 451: Matthias Franken, Matthias Wissner, Bernd Sörries:
Entwicklung der funkbasierten Digitalisierung in der Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft und spezifische Frequenzbedarfe, Dezember 2019
- Nr. 452: Bernd Sörries, Lorenz Nett:
Frequenzmanagement: Lokale/regionale Anwendungsfälle bei 5G für bundesweite Mobilfunknetzbetreiber sowie für regionale und lokale Betreiber unter besonderer Betrachtung der europäischen Länder sowie von China, Südkorea und den Vereinigten Staaten von Amerika, Dezember 2019
- Nr. 453: Martin Lundborg, Christian Märkel, Lisa Schrade-Grytsenko, Peter Stamm:
Künstliche Intelligenz im Telekommunikationssektor – Bedeutung, Entwicklungsperspektiven und regulatorische Implikationen, Dezember 2019
- Nr. 454: Fabian Eltges, Petra Junk:
Entwicklungstrends im Markt für Zeitungen und Zeitschriften, Dezember 2019
- Nr. 455: Christin Gries, Julian Knips, Christian Wernick:
Mobilfunkgestützte M2M-Kommunikation in Deutschland – zukünftige Marktentwicklung und Nummerierungsbedarf, Dezember 2019
- Nr. 456: Menessa Ricarda Braun, Christian Wernick, Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:
Parallele Glasfaserausbauten auf Basis von Mitverlegung und Mitnutzung gemäß DigiNetzG als Möglichkeiten zur Schaffung von Infrastrukturwettbewerb, Dezember 2019
- Nr. 457: Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:
Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfaser- netze, Februar 2020

ISSN 1865-8997