

---

FTTH  
Punkt-zu-Multipunkt vs. Punkt-zu-Punkt –  
ein Vergleich aus einzelwirtschaftlicher und  
gesamtwirtschaftlicher Perspektive

Autoren:  
Dr. Thomas Plückebaum  
Dr. Gabriele Kulenkampff  
Martin Ockenfels  
Fabian Eltges

## 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](mailto:info@wik.org)  
[www.wik.org](http://www.wik.org)

### Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

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

Stand: Juli 2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Unterschiede FTTH PtP und PtMP</b>	<b>2</b>
2.1 Infrastrukturelle Unterschiede	3
2.1.1 Ethernet PtP	3
2.1.2 xPON über PtMP	4
2.1.3 xPON über PtP	7
2.2 Funktionale Unterschiede	8
<b>3 Unterschiede aus betriebsökonomischer Sicht</b>	<b>9</b>
3.1 Kosten von FTTH PtP	10
3.2 Kosten von FTTH PtMP	13
3.3 Vergleich	14
<b>4 Unterschiede aus Volkswirtschaftlicher Sicht</b>	<b>15</b>
<b>5 Strategien der Stakeholder</b>	<b>17</b>
<b>6 Hochbreitbandstrategie der Schweiz 2023</b>	<b>19</b>
<b>7 Fazit</b>	<b>20</b>
<b>Literatur</b>	<b>21</b>



## 1 Einführung

Der FTTH-Glasfaserausbau in Europa hat erheblich Fahrt aufgenommen, und auch in Deutschland ist er nach einem frühen, aber verhältnismäßig langsamen Start mit den ersten City-Carriern in Düsseldorf und Köln 1994<sup>1</sup> nun in Schwung gekommen. Aufgehalten wurde die Entwicklung in Deutschland<sup>2</sup> durch das Aufrüsten der Kupferanschlussnetze auf DSL und später VDSL Vectoring und parallel dazu der TV-Kabelnetze um DOCSIS in den verschiedenen Generationen, um schnell Zwischengeschwindigkeiten (NGA: Next Generation Access) anbieten zu können. Mittlerweile hat die EU-Kommission das VHCN-Ziel mit 1 Gbps für letztlich alle Haushalte (und Geschäftskunden) ausgerufen. Einen Überblick über die für NGA bis VHCN einsetzbaren Technologien gibt der Diskussionsbeitrag 498 des WIK.<sup>3</sup>

Diese Kurzstudie befasst sich mit einem speziellen Aspekt des Glasfaserausbaus, der schon fast religiös diskutiert werden kann, nämlich mit der Frage, welche Glasfasertopologie denn für die Entwicklung des FTTH-Ausbaus die geeignetere sei. Eine, bei der die Glasfasern sternförmig von den Wohnungen zu den zentralen Punkten des Anschlussnetzes (MPoP)<sup>4</sup> an die dort angesiedelte aktive Breitband-Aggregationstechnik unmittelbar und optisch transparent mit Hilfe eines Glasfaserpaares oder nur einer einzelnen Faser für beide Übertragungsrichtungen angeschlossen wird (Punkt-zu-Punkt, PtP), oder eine, bei der die Glasfasern von den Wohnungen auf der Strecke (im Feld) bereits über sogenannte optische Splitter gruppenweise auf einer einzelnen Faser weitergeführt werden (Punkt-zu-Multipunkt, PtMP). Derartige Splitter fassen je nach Technik typischerweise zwischen 32 und 256 Fasern zusammen. Die Splitter sind passive Bauelemente, die das Licht aus den Fasern nur von den Wohnungen kommend zur Zentrale auf einer Faser weiterführen und in der anderen Richtungen hin die zentral generierten Signale auf alle angeschlossenen Fasern gleichermaßen verteilen. Ein Netz, das ohne aktive Netzkomponenten im Feld auskommt, wird als PON (Passives Optisches Netz) bezeichnet. Beide hier zur Diskussion stehenden Netze, die mit und die ohne Splitter, sind PON. Dennoch reklamieren die Netze mit Splittlern den Begriff für sich. Netze mit Splittlern benötigen eine spezielle aktive Technik, die den Zugriff der Endkunden in den Wohnungen auf die einzelne konzentrierende Glasfaser administriert, denn gleichzeitiges Senden des Lichts auf einer einzelnen Faser überlagert die Signale bis zur Unkenntlichkeit. Hierfür haben sich über die Zeit unterschiedliche Technik-Generationen entwickelt, die wir als Sammelbegriff mit xPON bezeichnen und dann differenzieren, wenn es nötig wird. Die Punkt-zu-Punkt (PON) Topologie, die an beiden Enden der Fasern direkt mit Ethernet Ports beschaltet wird, nennen wir PtP Ethernet.

Die infrastrukturellen und funktionalen Unterschiede beschreiben wir über das oben Ausgeführte in Kapitel 2, um das Verständnis für die ökonomischen Betrachtungen in den beiden folgenden Kapiteln 3 und 4 (betriebs- und volkswirtschaftliche Sichten) zu legen. Dabei greifen wir auf umfassende Untersuchungen der WIK-Consult für die Kosten eines Glasfasernetzausbaus in verschiedenen Topologien und mit unterschiedlichen Technologien in der Schweiz zurück, dessen Ergebnisse das BAKOM im Sommer 2023 veröffentlicht hat.<sup>5</sup> Anschließend versuchen wir die Strategien der verschiedenen Stakeholder zu beschreiben, deren Motivation dafür zu beschreiben und die Auswirkungen auf den Markt abzuschätzen (Kapitel 5).

---

1 ISIS Multimedienet für den Regierungsbezirk Düsseldorf und NetCologne für den Regierungsbezirk Köln.

2 Aber auch z.B. in den Niederlanden, Großbritannien, Belgien und Österreich.

3 Plückerbaum (2023).

4 MPoP: Metropolitan Point of Presence, identisch oder vergleichbar mit den Hauptverteilerstandorten (HVT) der Deutschen Telekom in Deutschland.

5 Hochbreitbandstrategie des Bundes, Bericht des Schweizer Nationalrates (2023), Begleitstudie: Modellierung des Investitions- und Förderbedarfs verschiedener Breitband-Ausbauziele in der Schweiz.

Der Nationalrat der Schweiz hat im Sommer 2023<sup>6</sup> für die Schweiz eine neue Hochbreitbandstrategie für die Schweiz und Rahmenbedingungen für ein Förderprogramm entwickelt, die auch auf Ergebnisse der hier zusammengefassten Überlegungen aufbauen und hier (Kapitel 6) kurz zusammengefasst werden. Für den flächendeckenden Ausbau in der Schweiz zielt das Konzept auf Glasfaser Punkt-zu-Punkt ab. Ähnliches ergibt sich beim Blick über die Grenze auf die FTTH Ausbaustrategien einiger weiterer Nachbarländer (Belgien, Luxemburg) und auf die EU State Aid Guideline 2023.<sup>7</sup>

Kapitel 7 zieht ein Fazit aus den Überlegungen.

## 2 Unterschiede FTTH PtP und PtMP

Wir beobachten im Ausbau im Markt Glasfaser Punkt-zu-Punkt Netze (PtP) mit individuellen, transparenten und ungeteilten Faserverbindungen von den Wohnungen der Kunden bis zum MPoP und dem dort angesiedelten Ethernet-Switch. Diese Topologie und Technologie<sup>8</sup> bezeichnen wir mit Ethernet PtP.

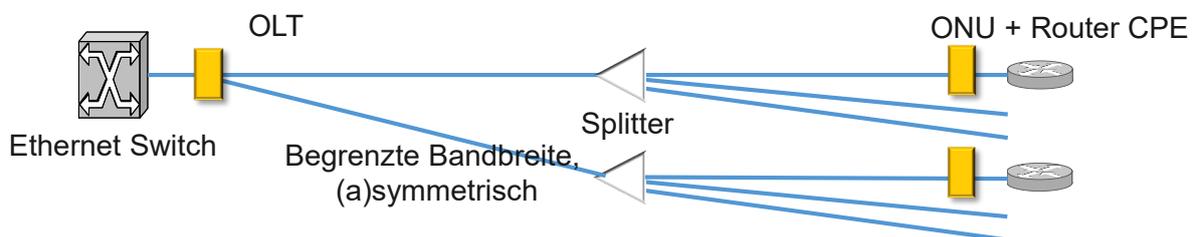
Abbildung 2-1: Ethernet PtP



Quelle: WIK

Werden die Glasfasern des Anschlussnetzes mit passiven Kopplern (Splitter) auf eine Faser aggregiert, sprechen wir von einer Punkt-zu-Multipunkt Topologie (PtMP), die zur Administration der Zugriffsrechte für die gemeinsam geteilte Faser vom Splitter spezielle Übertragungssysteme braucht, die aus der xPON Familie stammen.

Abbildung 2-2: xPON über PtMP



Quelle: WIK

Da eine Glasfaser PtP Topologie grundsätzlich offen ist für den Betrieb mit jeder Glasfaser Übertragungstechnik kann man sie als technologieneutral bezeichnen. Umgekehrt ist eine PtMP Glasfaser-

<sup>6</sup> Hochbreitbandstrategie des Bundes, Bericht des Schweizer Nationalrates (2023).

<sup>7</sup> EU Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen (2023).

<sup>8</sup> Mit Topologie bezeichnen wir die Faserstrukturen im Anschlussnetz, mit Technologie die eingesetzte Übertragungstechnik. Beides zusammen bildet die Anschlussnetz-Architektur.

topologie nicht technologieneutral, weil sie zum Betrieb immer eine xPON Technologie benötigt. Aber natürlich kann man eine Glasfaser PtP Topologie mit xPON Systemen beschalten, wenn man die Splitter ausschließlich im MPoP ansiedelt. So kann man die Eigenschaften beider Ansätze auch miteinander kombinieren.

Abbildung 2-3: xPON über PtP



Quelle: WIK

Wir werden diese drei Architekturen im Folgenden genauer vergleichen. Allen Architekturen ist gemeinsam, dass sie mit einer Faser bidirektional für beide Übertragungsrichtungen ausgestattet sein können, oder mit richtungstrennten Fasern. Die Unterschiede liegen in dem Aufwand für die optischen Übertragungskomponenten. Beide Richtungen auf eine Faser zu bringen ist aufwändiger. Die doppelte Faserzahl braucht mehr Fasern im Kabel und bei PtMP auch mehr Splitter. Wir detaillieren dies im Folgenden nicht weiter. In der Kostenmodellierung wurden Einfasersysteme unterstellt.

## 2.1 Infrastrukturelle Unterschiede

### 2.1.1 Ethernet PtP

Die PtP-Fasern sind transparent zwischen dem zentralen Switch am MPoP und dem Kundenrouter und übertragen das, was beide Seiten der Verbindung vorgeben, nämlich Ethernet mit 1 – 10 Gbps symmetrisch, ggf. auch höhere Geschwindigkeiten. Die Ethernet Ports sind Standard-Interfaces aus dem Massenmarkt. Gleiches gilt für die CPE-Router. Sie sind Massenware.

Ggf. unterstützen die Ethernetports einen Sleep-Mode, d.h. sie betreiben die Leitung nur bei Übertragungsbedarf auf eben dieser Verbindung. Dies ist im Kontext des Green Deal der EU ein nicht unerheblicher Faktor.

Die Bandbreite auf der Anschlusslinie steht dem Endkunden ungeteilt zur Verfügung, in beiden Richtungen in derselben Bandbreite. Natürlich findet auf der Ebene des MPoP eine Aggregation des Verkehrs auf dem Ethernet-Switch in Richtung des Kernnetzes statt. Der Betreiber kann und muss dort für eine ausreichende Dimensionierung der Netzelemente sorgen. Engpässe sind dort eher nicht zu erwarten.

Die Anschlussgeschwindigkeit des Kunden kann kundenindividuell bedient werden. Neben dem derzeitigen Standardinterface mit 1 Gbps, das auch niedrigere Bandbreiten unterstützt, sind 10 Gbps im Markt verfügbar, auch 25 und 100 Gbps werden angeboten und eine infrastrukturelle Begrenzung nach oben ist nicht absehbar. Ggf. kann der Switch für den Massenmarkt für spezielle Kundenwünsche nicht ausreichen und der Betreiber verbindet die Anschlusslinie mit einem leistungsfähigeren System, z.B. für Geschäftskunden.

Für entfernt liegende Kunden können auch Schnittstellen mit höherer optischer Leistung eingesetzt werden, so dass Anschlussleitungen mit Längen unter 80 km keine Herausforderungen darstellen.

### 2.1.2 xPON über PtMP

Die Fasern des Anschlussnetzes von jeder FTTH erschlossenen Wohnung werden auf dem Weg zum MPoP über passive optische Bauelemente, Splitter genannt, auf eine weiterführende Faser aggregiert.

Die Splitter haben genormte Baugrößen, in Schritten von 1:2 bis 1:16, 1:32, oder 1:64. Neuere Bauformen gehen abhängig von der eingesetzten Übertragungstechnik auch bis 1:256. Derzeit marktüblich ist ein Splittingfaktor von 1:32.

Es können mehrere Splitter hintereinandergeschaltet werden, auch an unterschiedlichen Orten auf dem Weg (z.B. Keller des Mehrfamilienhauses, Faserverweiger am Straßenrand, MPoP-Standort). Dabei darf die Gesamtsumme des Technologie-abhängigen zugelassenen Splittingfaktors nicht überschritten werden (z.B. kaskadiert 1:8 mit 1:8 ergibt 1:64).

Der Zugriff auf die gemeinsame Faser wird von einem zentralseitigen **OLT** (Optical Line Terminator) administriert, der sich mit den ONU (Optical Network Unit) auf der anderen Seite des Fasernetzes bei den Endkunden koordinieren muss, welcher Kunde wann senden darf, damit sich die Farben auf der gemeinsamen weiterführenden Faser nicht überlagern. In der anderen Richtung muss der OLT die ONU adressieren, für dessen Endkunden die Nachricht gedacht ist – und die anderen ONU hören weg, wenn sie nicht gemeint sind.

OLT und ONUs sind im Prinzip permanent aktiv, um zu erkennen, wann Nachrichten an sie adressiert werden und wann man Zeitschlitze zum Upstream-Senden bekommt. Ein Sleep Mode ist schwer umzusetzen.

Der OLT aggregiert die weiterführenden Fasern mehrerer Splitter und gibt den aggregierten Verkehr an einen Ethernet-Switch der nächsten Aggregationsstufen. So hat ein xPON Netz bereits im Faseranschluss zwei Aggregationsstufen.

Es gibt derzeit 5 wesentliche **xPON Generationen** mit jeweils anderer, leistungsfähigerer Technologie (Abbildung 2-4). Wenn heute ein Betreiber x.PON ausbaut, wählt er zumeist XGS.PON. Die neueren xPON Versionen arbeiten mit mehreren Wellenlängen.

Abbildung 2-4: xPON Technologien im Überblick

System	Standard	Jahr	Up [Gbps]	Down [Gbps]	Sym.	Splitter (max)
GPON	ITU-T G.984	2003	1,25	2,5	asym	1:64
XG-PON	ITU-T G.987	2010	2,5	10	asym	1:128
XGS-PON	ITU-T G.9807.1	2016	10	10	sym	1:128
TWDM PON/ NG-PON2	ITU-T G.989	2015	4-8 x 10	4-8 x 10	sym	1:256
MW-PON	ITU-T G9802 u 9804	2021	N x 25 bzw. 50	25 bzw. 50	sym	1:256

Quelle: Plückebaum (2023)

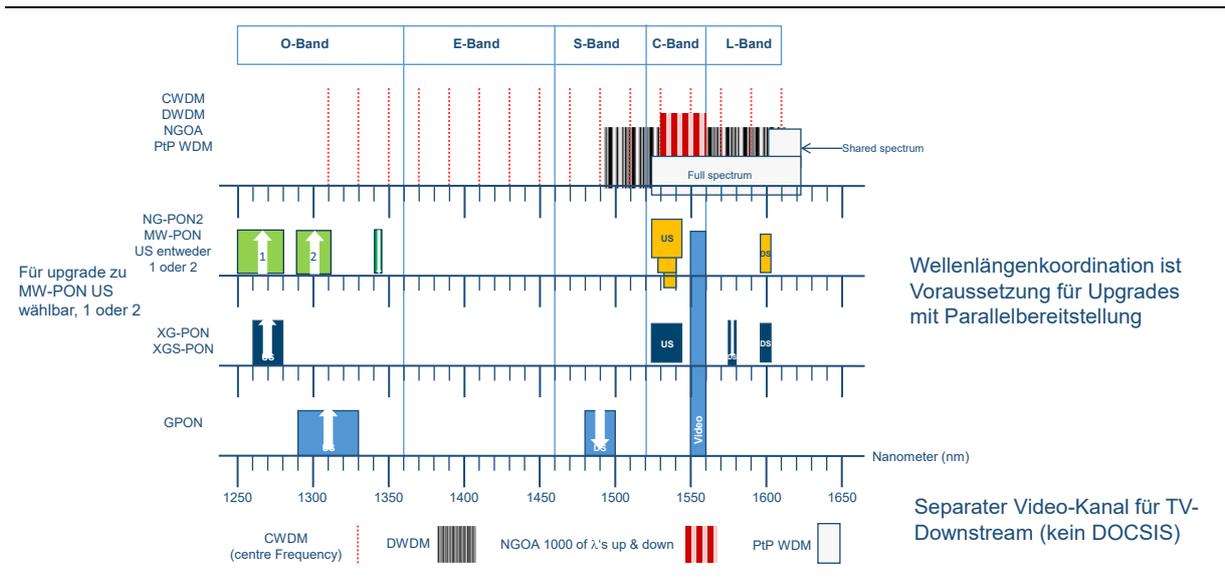
Die Bandbreiten je Wellenlänge steigen von 10 auf 25 bzw. 50 Gbps, hängen damit quasi der Entwicklung bei Ethernet hinterher. Zudem wird bei xPON dieser Übertragungskanal immer gemeinsam von den am Splitter aufgeschalteten Kunden genutzt (geteilt), ist damit faktisch netto für den Endkunden geringer.

Das Einfügen von Splitttern bedeutet zusätzliche Dämpfungen im Dämpfungsbudget des xPON Anschlussnetzes. Daher sieht der Standard für MW-PON aktive Verstärkerkomponenten im Feld vor (Reach Extender)<sup>9</sup>. Aktives Equipment im Feld verstößt jedoch im Prinzip dem PON Gedanken, nur passive Komponenten im Feld einzusetzen, und bedeutet zusätzliche Kosten in der Stromversorgung und in der Pflege (Außendienst).

Der Wechsel von einer xPON Technologie zu einer anderen mit dem Ziel, der wachsenden Bandbreitennachfrage gerecht zu werden, muss die für xPON und andere Techniken im Anschlussnetz belegten optischen Frequenzen (Farben) berücksichtigen. Manche Upgrade-Wege sind für eine Parallelbereitstellung blockiert (z.B. XG.PON und XGS.PON nutzen dieselben Farben, bei MW.PON muss darauf geachtet werden, von wo migriert wird).

<sup>9</sup> Quelle ITU-T [G.9807.2](#).

Abbildung 2-5: Wellenlängen-Plan für die xPON Generationen, CWDM, DWDM und Video



Quelle: WIK, Plückebaum (2023)

**Upgrades** bedeuten in der Regel (ggf. über die Zeit einer Parallelbereitstellung) den Austausch aller OLT und ONU, und wenn die ONU im CPE-Router integriert ist auch des CPE-Routers. Dies bedeutet erhebliche versunkene Investitionen, wenn dieser Austausch vor der vollständigen Abschreibung der Netzelemente geschieht (vgl. Abbildung 2-2).<sup>10</sup>

Eine **ONU** hat eine zum xPON passende wellenlängengenaue Optik (SFP) oder sich an die Wellenlänge automatisch anpassbare tunable Laser (teuer) (z.B. bei NG-PON2 oder MW-PON sinnvoll).

Der **CPE-Router** (Customer Premise Equipment) ist in Deutschland vom Endkunden frei wählbar (Routerfreiheits-Gesetz). Er aggregiert den Verkehr der Endkunden im Gebäude und leitet ihn ins TK-Netz weiter und verteilt ihn umgekehrt an die angeschlossenen Endgeräten (z.B. per Inhaus-LAN oder WLAN)

Verfügbare Schnittstellen zum Netz sind klassischerweise DSL, VDSL bis Vectoring, DOCSIS, und Ethernet (auch optisch für Ethernet oder elektrisch, z.B. für xPON ONU), es gibt aber auch einige Router mit integrierter ONU-Funktion. Weitere integrierte Funktionen eines solchen Routers sind z.B. Media-Server, PSTN-Nebenstellen und DECT-Telefonie, Anrufbeantworter und Firewall. Der Austausch der Router ist immer ein Eingriff in die interne IT-Hoheit der Endkunden und bedeutet für den Kunden nicht unerhebliche Kosten (~ 200,-€).

**Splitter** teilen das (Downstream-)Signal der einen Feeder-Faser auf alle angeschlossenen Verzweigerfasern (distribution fibres, drop fibres, gemeinsam genutzte Weiterleitungsfaser) in gleichem Maße auf. Alle Verzweigerfasern erhalten dieselbe Info mit einer durch den Splittingfaktor geteilten optischen Leistung.

Im Upstream wird das Signal des Endkunden über die Verzweigerfaser und den Splitter auf die Feederfaser weitergeführt. Die Einfügedämpfung wirkt in beide Richtungen, die Verzweigerdämpfung nur downstream.

<sup>10</sup> Plückebaum und Ockenfels (2020).

Gleichzeitig gesendete Upstream-Signale überlappen sich optisch. Eine Steuerung solchen Verhaltens ist auf der optischen Signalebene nicht möglich, sondern muss durch Kommunikation von OLT und allen angeschlossenen ONU gesteuert werden (Kollisionsvermeidung durch Zuteilung von Senderechten).

Unautorisiertes Senden (Fehlerfall oder Absicht) kann die Kommunikation auf dem Feeder-Strang (Splitter) stören oder eher noch vollständig verhindern.

Grundsätzlich kann die Downstream Kommunikation auf allen Verzweigerfasern mitgesehen (abgehört) werden. (Die ONU sollte das verhindern.)

Splitter sind keine Farbfilter, sondern verteilen und sammeln das gesamte optische Spektrum auf der Faser, d.h. auch WDM-Signale oder Wellenlängen spezifischer xPON oder TV-Signale (vgl. Abbildung 2-5).

### 2.1.3 xPON über PtP

In dieser Topologie gibt es nur Splitter im MPoP. Diese können dort prinzipiell auch kaskadiert werden, jedoch bieten größere Splitter Dämpfungsvorteile, weil Einfügedämpfungen z.T. entfallen. Die Glasfasern im Anschlussnetz sind dadurch transparent in beide Richtungen und individuell für den einzelnen Anschluss zu nutzen

Die zentralen Splitter können kundenaufwuchsgenau beschaltet werden, können einen Kundenmix aufnehmen, der dem allgemeinen Durchschnitt der ausgebauten Region entspricht und so zu einer gleichmäßigen Lastverteilung beitragen (vgl. Sharing, Abschnitt 2.2). Das Splittingverhältnis kann prinzipiell nahezu optimal ausgeschöpft werden, ohne wesentlichen Leerstand, insbesondere in der Phase des Kundenaufwuchses. Es kann auch nachträglich reduziert werden, um das Ausmaß der Teilung der Bandbreiten zu reduzieren.

Die PtP Fasern können für Kunden mit einem Bedarf jenseits der durch Splitting geteilten Bandbreiten (z.B. Geschäftskunden, breitbandige symmetrische Mietleitungen mit besonderen zeitlichen Qualitäten oder garantierten Bandbreiten) anders und kundenindividuell beschaltet werden

PtP ermöglicht grundsätzlich die physische Entbündelung der Glasfaser-TAL. Die mag von den Betreibern der Anschlussnetze eher nicht gewünscht sein.

### Vergleich von Ethernet PtP, xPON über PtMP und PtP

Tabelle 2-1 fasst die Unterschiede zwischen den FTTH Architekturen zusammen:

Tabelle 2-1: FTTH Glasfaser-Netzarchitekturen im Vergleich

Aspekt	PtP (Ethernet)	PtMP (xPON)	xPON über PtP
Glasfaserzahl	Höhere Glasfaserzahl im Feeder	Zahl Verzweigerfasern sind identisch	Höhere Glasfaserzahl im Feeder
Equipment im Feld	Nein	Splitter	Nein
Spezifische Elektronik	Einheitlich Ethernet mit weniger anderen Systemen	G.PON...	G.PON..., andere
Bandbreite pro Anschlussleitung	Unbegrenzt	Begrenzt durch Technologie	Unbegrenzt
Individuelle Lösung pro Kunde	Sehr individuell	Nein	Sehr individuell
Zukunftssicher	+++ , individuelle Upgrades pro Kunde	Geringer, wiederholte upgrades	+++ , individuelle Upgrades pro Kunde
Zahl zentralseitiger Schnittstellen	Pro Kunde	geringer, je Feeder	Geringer und noch effizienter, je Feeder
Splittereffizienz	Kein Splitter	Gering	Optimiert

Quelle: WIK, Plückebaum (2023)

## 2.2 Funktionale Unterschiede

Ein wesentlicher funktionaler Unterschied besteht in der gemeinsamen Nutzung der Feederfaser in der xPON Technologie, bei der alle am Splitter angeschlossenen Endkunden sich die von der eingesetzten Technologie bestimmte maximalen Bandbreite für Downstream und Upstream teilen. Im Grundsatz kann die Bandbreite solange voll einem Nutzer zugeteilt werden, wie er der einzige Nachfrager nach Bandbreite zu einem Zeitraum ist. Wenn mehrere Nutzer gleichzeitig Kapazität nachfragen, kann diese Nachfrage soweit befriedigt werden, wie sie innerhalb der Gesamtbandbreite zur Verfügung steht. Andernfalls kann dem Einzelnen nur eine geringere Bandbreite zur Verfügung gestellt werden. Sind in dem gemeinsam genutzten Anschlusssegment Intensivnutzer unterwegs so beeinflussen diese das Bandbreitenergebnis der anderen Kunden mit, auch wenn Sie selbst vielleicht nicht die volle angefragte Bandbreite erhalten. Ähnliche Sharing-Probleme sind auch in anderen Netzarchitekturen zu beobachten, z.B. bei den DOCSIS Netzen, die zum einem von der Grundbandbreite der Up- und Downstreamkanäle, aber auch von der Zahl der Kunden am Fibre Node abhängen.<sup>11</sup>

Es gibt u.W.n. keine regulatorischen Regeln, wie derartige Netze zu dimensionieren sind.<sup>12</sup> Eine Ausnahme bilden die EU-State-Aid-Guidelines (2023), die für die Förderung geteilt nutzbarer Netze die Zielbandbreite (VHCN) vorgeben, die bei gleichzeitiger Nutzung von 10% der Kunden zur Hauptverkehrszeit erreicht werden können, bezogen auf die maximale Zahl an ein geteilt genutztes Netzsegment anschließbarer Endkunden. Diese Voraussetzung haben wir in Tabelle 2-2 dargestellt. Die Grundbandbreite und der Splitting-Faktor spielen eine entscheidende Rolle für das Bandbreitenerlebnis der

<sup>11</sup> Plückebaum (2023).

<sup>12</sup> Die TKMV gibt für die Mindestversorgung eine Bandbreite vor, deren nicht-erreichen im konkreten Fall über Messungen belegt werden muss.

Endkunden. Dies ist bei Ethernet PtP nicht der Fall. Der Endkunde erhält die Bandbreite seines Ethernet-Ports ungeteilt und unabhängig von dem Nutzungsverhalten seiner „Nachbarn“, und dies planbar/garantiert und nur limitiert durch Überbelastungen des Backbone und Kernnetzes.

Tabelle 2-2: Effektive Bandbreiten bei den xPON Technologien

	Nominale Bb down [Gbit/s]	Nominale Bb up [Gbit/s]	Anzahl Nutzer auf gemeinsamer Infrastruktur	% simultan aktive Nutzer	Bb down je Nutzer [Gbit/s]	Bb up je Nutzer [Gbit/s]
G.PON	2,5	1,25	32	10%	0,78125	0,390625
XG.PON	10	2,5	32	10%	3,125	0,78125
XGS.PON	10	10	32	10%	3,125	3,125
NG-PON2	10	10	32	10%	3,125	3,125
MW-PON	50	50	32	10%	15,625	15,625

Quelle: Plückebaum (2023)

Eine PtP Glasfasertopologie erlaubt die physische Entbündelung der einzelnen Glasfaser zum Endkunden, während PtP mit Splittern im Feld erst auf der Ebene des Bitstroms Vorleistungsprodukte anzubieten erlaubt. Dies schränkt den Produktgestaltungsspielraum für Wholesale Nachfrager in den FTTH PtMP-Netzen gegenüber der Faserentbündelung erheblich ein.

FTTH PtP ist wirklich technologieneutral und erlaubt das Ausschöpfen des vollen Potentials einer transparenten Glasfaser-Anschlussleitung. Es könnte an jede Glasfaser im Prinzip eine andere Übertragungstechnik angeschlossen werden (z.B. Terrabit-Kanäle für HPC, Quanten-Links, Low Latency LAN)<sup>13</sup>

### 3 Unterschiede aus betriebsökonomischer Sicht

Analysen und Rechnungen von Ausbaurkosten der zwei möglichen Ausbautopologien von PtP und PtMP, die das WIK beispielhaft für die Schweiz durchgeführt hat<sup>14</sup>, zeigen die Investitionen, die jeweils für einen Ausbau entstehen. Grundlage des Vergleichs ist die Modellierung eines flächendeckenden Ausbaus des Gebiets der Schweiz, für den keine bereits vorhandenen VHCN-Infrastrukturen oder Leerrohre berücksichtigt werden (sog. Greenfield-Ansatz). Nur eine solche Betrachtung ermöglicht einen unverfälschten Blick auf die Investitionen in neu zu schaffende Infrastrukturen. Auf Basis gebäudegenauer Daten wurde mithilfe des WIK-NGA-Kostenmodells eine Trassenplanung entlang der Straßeführung durchgeführt. Vorhandene Netzkonzentrationspunkte des Incumbents wurden hierbei als sog. scorched nodes betrachtet, also ihre Standorte als gegeben hingenommen. Das gesamte Ausbaugesbiet der Schweiz wurde in 16 Cluster nach fallender Besiedlungsdichte unterteilt, um Gebiete mit ähnlichen Ausbaurkosten in Gruppen zusammenzufassen. Diese Clusterung ist in u.a. Ergebnisdarstellung

<sup>13</sup> Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team (2020), Godlovitch, Eltges, Plückebaum (2023).

<sup>14</sup> Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023).

(Tabelle 3-1 bis Tabelle 3-4) ersichtlich. Unterschieden werden die Investitionen für den Ausbau in vier verschiedenen Szenarien:

1. PtP-Topologie in einem Einfaser-Ausbau,
2. PtP-Topologie in einem Vierfaser-Ausbau,
3. PtP-Topologie mit XGS.PON sowie
4. PtMP-Topologie mit XGS.PON.

In der PtMP-Topologie wird der Splitterstandort im Feld (zwischen MPoP und Endverzweiger im Kundengebäude) angenommen, für die Modellierung von XGS.PON in der PtP-Topologie, wird der Splitterstandort im MPoP modelliert. Es wird jeweils ein Splittingfaktor von 1:32 unterstellt.<sup>15</sup> In beiden XGS.PON-Fällen wird ein Einfasermodell unterstellt. Für die Berechnungen werden zunächst wie beschrieben die Investitionen je Infrastruktur ermittelt und diese anhand einer Verzinsung von 5,5 %<sup>16</sup> und ökonomischen Lebensdauern von 5-7 Jahren für aktives und 20-40 Jahre für passive Netzelemente<sup>17</sup> in monatliche Kosten transformiert. Zu den annualisierten Investitionen sind für den Betrieb des Netzes außerdem OPEX hinzuzuaddieren, um die Gesamtheit monatlicher Kosten darzustellen<sup>18</sup>.

### 3.1 Kosten von FTTH PtP

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Modellergebnisse der Investitions- und Kostenrechnungen einer FTTH PtP-Versorgung der Schweiz in einem Greenfield, scorched node-Ansatz.<sup>19</sup> Verglichen werden der Einfaser- und der Vierfaser-Ausbau.

Die durchschnittlichen Investitionen je Anschluss bei einer FTTH PtP-Topologie im Einfaserfall belaufen sich für einen Vollausbau der Schweiz auf 7.293 CHF oder 7.740 €<sup>20</sup>. Dieser Durchschnitt unterliegt über die 16 Cluster hinweg einer deutlichen Spreizung zwischen 2.408 – 20.713 CHF (2.555 - 21.981 €), beginnend bei den am dichtesten besiedelten Clustern. Die Gesamtinvestitionen belaufen sich in diesem Ausbauszenario gem. Berechnungen auf 45,65 Mrd. CHF (48,45 Mrd. €). Die OPEX und somit auch die Gesamtkosten wachsen mit diesen Ausbauminvestitionen über die Cluster hinweg. Im Gesamtmittel lassen sich annualisierte Kosten und OPEX in durchschnittliche monatliche Kosten je Anschluss i.H. von 84,74 CHF oder 89,99 € übersetzen.

---

<sup>15</sup> Ein solches Splitting-Verhältnis ist in vielen Installationen in Mitteleuropa marktüblich. Höhere Splittingverhältnisse können durch kaskadierte ergänzende Splitter im MPoP erreicht werden.

<sup>16</sup> Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023), S. 31.

<sup>17</sup> Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023), S. 32.

<sup>18</sup> Die genauen OPEX Mark-ups nach Netzelementen sind der Studie Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023) auf S. 32 zu entnehmen.

<sup>19</sup> Scorched Node bedeutet, dass die Standorte der Schaltzentralen (MPoP) als gegeben angesehen werden.

<sup>20</sup> Alle Umrechnungen von CHF in Euro wurden zum Wechselkurs des 07.12.2023 angestellt und auf ganze Werte gerundet.

Tabelle 3-1 Ergebnisse der WIK-Berechnung eines flächendeckenden Ausbaus der Schweiz in einer FTTH PtP 1 Faser-Topologie im Greenfield

Cluster	FTTH PtP 1 Faser				FTTH Ethernet		Greenfield				
	Anschlüsse	Ansl. Kum.	Market Share	Subscriber	Subs. Kum.	Invest [CHF]	Invest/Subscriber [CHF]	Invest/Anschluss [CHF]	OPEX [CHF/Monat]	Kosten/Subscriber [CHF/Monat]	Kosten [CHF/Monat]
1	150.832	2%	83%	125.191	3%	363.214.216	2.901	2.408	1.672.265	46,35	5.803.025
2	370.408	8%	82%	303.735	9%	1.113.816.864	3.667	3.007	3.967.829	49,63	15.073.610
3	349.118	14%	82%	286.277	15%	1.252.928.369	4.377	3.589	3.972.989	53,95	15.444.824
4	409.333	20%	80%	327.466	22%	1.645.763.615	5.026	4.021	4.680.537	57,46	18.817.245
5	406.313	27%	79%	320.987	29%	1.942.843.468	6.053	4.782	4.895.513	63,26	20.306.601
6	406.382	33%	78%	316.978	36%	1.960.202.694	6.184	4.824	4.913.330	64,23	20.358.806
7	459.634	41%	78%	358.515	43%	2.521.512.208	7.033	5.486	5.829.269	69,01	24.742.472
8	399.771	47%	77%	307.824	50%	2.327.243.174	7.560	5.821	5.218.296	72,32	22.262.720
9	276.649	52%	77%	213.020	54%	1.713.075.743	8.042	6.192	3.756.469	75,41	16.063.649
10	439.550	59%	76%	334.058	61%	2.948.040.746	8.825	6.707	6.158.319	80,10	26.757.200
11	367.943	64%	76%	279.637	67%	2.691.707.119	9.626	7.316	5.399.409	84,86	23.731.302
12	514.441	73%	73%	375.542	75%	3.880.463.570	10.333	7.543	7.636.258	89,60	33.649.520
13	516.006	81%	71%	366.364	83%	4.470.854.428	12.203	8.664	8.064.991	100,11	36.676.211
14	545.244	90%	69%	376.218	91%	6.050.984.289	16.084	11.098	9.759.488	123,00	46.276.648
15	391.625	96%	68%	266.305	96%	5.446.579.016	20.452	13.908	7.882.669	147,00	39.145.719
16	257.033	100%	68%	174.782	100%	5.323.907.633	30.460	20.713	6.820.745	205,20	35.864.745
<b>Σ Ø</b>	<b>6.260.282</b>			<b>4.732.898</b>		<b>45.653.137.151</b>	<b>9.646</b>	<b>7.293</b>	<b>90.628.377</b>	<b>84,72</b>	<b>400.974.296</b>

Quelle: Plückerbaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023), Cluster 1 ist am dichtesten besiedelt, Cluster 16 am wenigsten dicht.

Im Vergleich zum Ausbau im Einfaserfall, erhöhen sich die Investitionen im nachfolgenden Vierfaserfall im Drop- und Feedersegment sowie im MPoP. Grundsätzlich wird der Mehrinvest durch die Investitionen für die Kabel selbst bestimmt, wobei eine Mehrzahl an Kabeln auch zur Notwendigkeit größer dimensionierter Tiefbauarbeiten führen kann. Daher sind die Effekte auf die Investitionen zwischen Ein- und Vierfaserfall in den am dichtest besiedelten Clustern am höchsten. Die nachfolgende Tabelle 3-2 stellt die Ergebnisse der PtP-Rechnung im Vierfaserfall im Greenfield dar. Wie Tabelle 3-2 zu entnehmen ist, liegen die durchschnittlichen Investitionen ja Anschluss mit 8.038 CHF (8.536 €) ca. 10 % höher als jene des Einfaserfalls. Die Spannweite der Investitionen über die Cluster beläuft sich dabei auf 2.408 – 20.713 CHF (2.557 – 21.997 €). Die Investitionen belaufen sich somit in diesem Fall auf insgesamt 50,32 Mrd. CHF oder umgerechnet 53,44 Mrd. €.

Tabelle 3-2 Ergebnisse der WIK-Berechnung eines flächendeckenden Ausbaus der Schweiz in einer FTTH PtP 4 Faser-Topologie im Greenfield

Cluster	FTTH PtP 4 Faser				FTTH Ethernet		Greenfield		OPEX [CHF/Monat]	Kosten/ Subscriber [CHF/Monat]	Kosten [CHF/Monat]
	Anschlüsse	Ansl. Kum.	Market Share	Subscriber	Subs. Kum.	Invest [CHF]	Invest/ Subscriber [CHF]	Invest/ Anschluss [CHF]			
1	150.832	2%	83%	125.191	3%	406.719.414	3.249	2.697	1.722.629	49,37	6.180.670
2	370.408	8%	82%	303.735	9%	1.238.266.182	4.077	3.343	4.107.896	53,03	16.107.698
3	349.118	14%	82%	286.277	15%	1.389.637.868	4.854	3.980	4.121.099	57,72	16.522.521
4	409.333	20%	80%	327.466	22%	1.827.460.780	5.581	4.464	4.873.235	61,69	20.201.587
5	406.313	27%	79%	320.987	29%	2.159.878.587	6.729	5.316	5.118.412	68,17	21.883.167
6	406.382	33%	78%	316.978	36%	2.176.253.243	6.866	5.355	5.135.762	69,19	21.931.067
7	459.634	41%	78%	358.515	43%	2.797.257.461	7.802	6.086	6.106.279	74,42	26.681.606
8	399.771	47%	77%	307.824	50%	2.579.175.732	8.379	6.452	5.471.699	78,07	24.030.713
9	276.649	52%	77%	213.020	54%	1.896.211.064	8.902	6.854	3.938.450	81,35	17.329.977
10	439.550	59%	76%	334.058	61%	3.263.717.549	9.770	7.425	6.471.677	86,55	28.912.123
11	367.943	64%	76%	279.637	67%	2.978.173.931	10.650	8.094	5.680.215	91,74	25.654.105
12	514.441	73%	73%	375.542	75%	4.284.524.989	11.409	8.329	8.033.461	96,80	36.354.294
13	516.006	81%	71%	366.364	83%	4.938.495.979	13.480	9.571	8.531.543	108,60	39.788.927
14	545.244	90%	69%	376.218	91%	6.618.112.504	17.591	12.138	10.323.712	132,82	49.967.945
15	391.625	96%	68%	266.305	96%	5.990.470.764	22.495	15.296	8.465.447	160,40	42.716.219
16	257.033	100%	68%	174.782	100%	5.776.780.892	33.051	22.475	7.395.203	222,44	38.878.646
Σ Ø	6.260.282			4.732.898		50.321.136.940	10.632	8.038	95.496.718	91,52	433.141.265

Quelle: Plückerbaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023)

In einer dritten Ausbauf orm der PtP-Topologie werden in Tabelle 3-3 Modellergebnisse dargestellt, in denen XGS.PON über eine PtP-Infrastruktur realisiert wird. In dieser Ausbauf orm wird jeder Anschluss vom MPoP mit einer eigenen Glasfaser versorgt, jedoch im MPoP mithilfe eines Splitters (qua Model-lannahme wie im PtMP-Fall im Splitting-Verhältnis 1:32) aggregiert. Netzseitig wird dann ein XGS.PON-Signal weiterverarbeitet, anstelle Ethernet wie in den zwei zuvor beschriebenen Szenarien. In der in Kapitel 3.2 beschriebenen Szenariorechnung der PtMP-Topologie steht der Splitter im Feld, also an einem Standort zwischen Endverzweiger und MPoP<sup>21</sup>. In beiden Varianten bedarf es Investitionen in aktives Netzequipment von OLT und ONU, die es bei einer PtP-Topologie mit Signalübermittlung über Ethernet nicht braucht. Einsparpotenziale der XGS.PON-Variante gegenüber dem Ethernet-Ausbau hin-gegen resultieren daraus, dass eine andere Aggregation am Ethernet Switch im MPoP erfolgt: Während in einer PtP-Ethernet-Variante für jeden Anschluss eine Glasfaser und schließlich ein Ethernet-Port im MPoP belegt wird, erfolgt die Aggregation bei XGS.PON (wie auch bei anderen PON-Varianten) über den Splitter und OLT hin zum Ethernet Switch, sodass entsprechend dem Splittingfaktor und der OLT-Aggregation weniger Ports am Switch im MPoP vorgehalten werden müssen.

Wie Tabelle 3-3 zu entnehmen ist, liegen die Investitionen einer PtP XGS-PON-Infrastruktur nah bei jenen der PtP-Ethernet-Infrastruktur. Die Investitionen je Anschluss belaufen sich im Mittel über die 16 Cluster auf 7.301 CHF (7.755 €) mit einer Spreizung von 2.328 – 30.930 CHF (2.473 – 32.852 €). Die Gesamtinvestitionen liegen in diesem Szenario bei 45,7 Mrd. CHF oder 48,5 Mrd. € und somit 0,1 % oberhalb jenen der PtP-Ethernet-Infrastruktur im Einfaserfall. Im Ergebnis zeigt sich somit, dass sich die

<sup>21</sup> Der Diskussionsbeitrag „Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen“ des WIK aus 2022 behandelt die aus ökonomischer Sicht optimale Position des Splitters im Feld, siehe: Ockenfels und Kulenkampff (2022), Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK Diskus-sionsbeitrag Nr. 494.

Einsparpotenziale der PtP-XGS.PON-Variante am Ethernet Switch im MPoP durch Investitionen in zusätzliches Netzequipment von Splittern, OLTs und ONUs aufheben.

Tabelle 3-3 Ergebnisse der WIK-Berechnung eines flächendeckenden Ausbaus der Schweiz in einer FTTH PtP-Topologie mit zentralem Splitter im Greenfield

Cluster	FTTH PtP 1 Faser PON				FTTH XGS.PON		Greenfield				
	Anschlüsse	Ansl. Kum.	Market Share	Subscriber	Subs. Kum.	Invest [CHF]	Invest/Subscriber [CHF]	Invest/Anschluss [CHF]	OPEX [CHF/Monat]	Kosten/Subscriber [CHF/Monat]	Kosten [CHF/Monat]
1	150.832	2%	83%	125.191	3%	351.097.765	2.805	2.328	1.583.969	43,59	5.456.722
2	370.408	8%	82%	303.735	9%	1.089.400.083	3.587	2.941	3.796.232	47,37	14.387.567
3	349.118	14%	82%	286.277	15%	1.235.441.600	4.316	3.539	3.823.305	51,82	14.835.323
4	409.333	20%	80%	327.466	22%	1.620.092.442	4.947	3.958	4.470.595	54,90	17.978.514
5	406.313	27%	79%	320.987	29%	1.922.645.253	5.990	4.732	4.712.609	60,93	19.557.198
6	406.382	33%	78%	316.978	36%	1.945.518.044	6.138	4.787	4.748.562	62,03	19.662.244
7	459.634	41%	78%	358.515	43%	2.496.424.954	6.963	5.431	5.580.475	66,22	23.742.591
8	399.771	47%	77%	307.824	50%	2.317.868.424	7.530	5.798	5.055.418	70,06	21.566.612
9	276.649	52%	77%	213.020	54%	1.702.423.048	7.992	6.154	3.606.144	72,50	15.444.127
10	439.550	59%	76%	334.058	61%	2.939.711.046	8.800	6.688	5.922.041	77,19	25.785.362
11	367.943	64%	76%	279.637	67%	2.684.615.288	9.600	7.296	5.185.371	81,73	22.855.678
12	514.441	73%	73%	375.542	75%	3.893.210.195	10.367	7.568	7.383.890	86,84	32.612.237
13	516.006	81%	71%	366.364	83%	4.488.413.062	12.251	8.698	7.782.498	97,29	35.641.891
14	545.244	90%	69%	376.218	91%	6.111.001.249	16.243	11.208	9.509.882	121,17	45.585.860
15	391.625	96%	68%	266.305	96%	5.502.909.732	20.664	14.051	7.588.967	145,39	38.717.405
16	257.033	100%	68%	174.782	100%	5.406.056.367	30.930	21.033	6.560.494	206,20	36.040.952
<b>Σ Ø</b>	<b>6.260.282</b>			<b>4.732.898</b>		<b>45.706.828.554</b>	<b>9.657</b>	<b>7.301</b>	<b>87.310.452</b>	<b>82,37</b>	<b>389.870.284</b>

Quelle: Plückerbaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023)

### 3.2 Kosten von FTTH PtMP

Im Szenario der FTTH PtMP-Berechnung liegen die Investitionen je Anschluss im Mittel bei 6.457 CHF (6.857 €) und somit unterhalb jener des PtP-Ausbaus. Die Investitionen nach Clustern spreizen sich zwischen 1.886 – 19.219 CHF (2.003 – 20.410 €). Investitionsmindernde Effekte der PtMP-Topologie sind geringere Investitionen für die Glasfaserkabel im Feeder-Segment (Strecke vom Splitter-Standort zum MPoP), da nicht jeder Anschluss auf diesem Abschnitt eine eigene Glasfaser erhält. Neben den Einsparungen der Glasfaserkabel können auch indirekte Einsparungen in den Tiefbauarbeiten dadurch entstehen, dass u.U. kleinere Gräben vonnöten sind, da weniger Glasfasern verbaut werden. Darüber hinaus müssen durch die beschriebene Aggregation im Anschlussnetz über Splitter und OLTs weniger Ethernet Ports am MPoP vorgehalten werden, was Investitionen in den MPoP gegenüber der Ethernet PtP-Topologie mindert. Ein gegenläufiger Effekt indes ist die Notwendigkeit von Investitionen in weiteres aktives Netzequipment von OLT und ONU. Der saldierte Effekt erzeugt am Beispiel der Schweiz eine insgesamt Investitionsminderung von 11,5 % gegenüber der PtP-Topologie im Einfaserfall.

Tabelle 3-4 Ergebnisse der WIK-Berechnung eines flächendeckenden Ausbaus der Schweiz in einer FTTH PtMP-Topologie mit Splitter im Feld im Greenfield

Cluster	FTTH PtMP 1 Faser PON				FTTH XGS.PON		Greenfield				
	Anschlüsse	Ansl. Kum.	Market Share	Subscriber	Subs. Kum.	Invest [CHF]	Invest/Subscriber [CHF]	Invest/Anschluss [CHF]	OPEX [CHF/Monat]	Kosten/Subscriber [CHF/Monat]	Kosten [CHF/Monat]
1	150.832	2%	83%	125.191	3%	284.444.793	2.272	1.886	1.526.184	40,14	5.024.869
2	370.408	8%	82%	303.735	9%	798.284.468	2.628	2.155	3.592.130	41,94	12.738.892
3	349.118	14%	82%	286.277	15%	889.300.357	3.106	2.547	3.573.224	45,03	12.890.786
4	409.333	20%	80%	327.466	22%	1.146.696.636	3.502	2.801	4.060.544	46,22	15.136.510
5	406.313	27%	79%	320.987	29%	1.536.101.612	4.786	3.781	4.377.707	53,68	17.232.139
6	406.382	33%	78%	316.978	36%	1.566.526.993	4.942	3.855	4.478.262	55,37	17.549.845
7	459.634	41%	78%	358.515	43%	2.073.055.064	5.782	4.510	5.214.032	59,07	21.176.729
8	399.771	47%	77%	307.824	50%	1.910.607.533	6.207	4.779	4.702.414	62,12	19.121.947
9	276.649	52%	77%	213.020	54%	1.477.827.737	6.938	5.342	3.455.725	66,66	14.199.687
10	439.550	59%	76%	334.058	61%	2.607.954.935	7.807	5.933	5.708.986	71,74	23.966.303
11	367.943	64%	76%	279.637	67%	2.467.356.264	8.823	6.706	5.054.337	77,44	21.656.268
12	514.441	73%	73%	375.542	75%	3.664.491.351	9.758	7.123	7.280.739	83,62	31.401.392
13	516.006	81%	71%	366.364	83%	4.295.128.430	11.724	8.324	7.701.768	94,48	34.614.975
14	545.244	90%	69%	376.218	91%	5.884.226.387	15.640	10.792	9.311.683	117,03	44.027.090
15	391.625	96%	68%	266.305	96%	4.881.198.189	18.329	12.464	7.190.890	133,20	35.470.778
16	257.033	100%	68%	174.782	100%	4.939.852.872	28.263	19.219	6.298.254	192,47	33.640.953
Σ Ø	6.260.282			4.732.898		40.423.053.620	8.541	6.457	83.526.881	76,03	359.849.163

Quelle: Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023)

### 3.3 Vergleich

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Investitionssummen und Kosten der vier beschriebenen Szenarien im Vergleich und mit dem Ausbau der PtP-Ethernet-Topologie im Einfaserfall als Basisfall. Wie beschrieben liegen die Investitionen für die PtP-Ethernet-Infrastruktur nah bei jenen für die PtP-XGS.PON-Infrastruktur. Im Vierfaserfall der PtP-Topologie sorgen höhere Investitionen in Kabel und an der Grenze in größer dimensionierte Tiefbauarbeiten zu einem Mehr an Investitionen in Höhe von ca. 10 %. Das günstigste Szenario ist die PtMP-Topologie, welche in ihren Investitionen insgesamt 11,5 % unterhalb jenen der PtP-Einfaser-Topologie liegt.

Tabelle 3-5 Übersicht der Modellergebnisse zum Investitionsbedarf verschiedener Glasfasertopologien am Beispiel der Schweiz

Architektur	Technologie	PON Splitter 1:x	Fasern Distribution	Fasern Feeder	Invest [Mrd. CHF]	Kosten pro Monat [Mio. CHF]	Vergleich zu FTTH PtP Ethernet 1-Faser Invest	Vergleich zu FTTH PtP Ethernet 1-Faser Kosten
FTTH PtP 1 Faser	FTTH Ethernet		1	1	45,65	400,97	100,0%	100,0%
FTTH PtP 4 Faser	FTTH Ethernet		4	4	50,32	433,14	110,2%	108,0%
FTTH PtMP 1 Faser	FTTH XGS.PON	32	1	1	40,42	359,85	88,5%	89,7%
FTTH PtP 1 Faser	FTTH XGS.PON	32	1	1	45,71	389,87	100,1%	97,2%

Quelle: Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023)

Relevant sind in jedem Fall auch die Vergleiche auf Kostenbasis, weil langfristige Investitionen in Feeder-Fasern (PtP) im PtMP Fall durch kurzlebigeren Investitionen in aktives Equipment (OLT, ONU)

substituiert werden. Die zuvor beschriebenen Investitionsunterschiede werden daher beim Vergleich der Kosten um 1-2 % geringer.

Obschon sich im Ausbau einer PtMP-Topologie gegenüber einem PtP-Ausbau Einsparungen in Investitionen erreichen lassen und sich daher aus betriebsökonomischer Sicht die Wahl zu einer PtMP-Topologie begründen ließe gibt es sowohl aus einzelwirtschaftlicher wie auch aus volkswirtschaftlicher Sicht weitere Kriterien, die zu einer Auswahl einer der beiden Topologien herangezogen werden können.

Weiterreichende Argumente zur Entscheidung für den Ausbau einer PtMP-Topologie aus einzelökonomischer Sicht indes können ein technisches Foreclosure oder ein potenziell schnellerer Ausbau sein. Unter technischer Foreclosure ist zu verstehen, dass der Ausbau einer PtP-Topologie das wahrgenommene Risiko mit sich bringt, eine physisch entbündelbare Anschlussstopologie hergestellt zu haben. Bei einer PtMP-Topologie ist eine physische Entbündelung der Verbindung zwischen MPoP und Endverzweiger technologisch nicht möglich. Der Verkehr auf der Feederfaser muss von einem OLT administriert werden. Eine Trennung der Verkehre kann nur auf der aktiven Ebene erfolgen. Eine Entbündelung der Glasfaser zwischen Splitter und Endverzweiger ist darüber hinaus aufgrund zu geringer Skalen im Drop-Segment wirtschaftlich nicht sinnvoll.<sup>22</sup> Der Zugang zu einem PtMP-Anschlussnetz ist daher auf eine virtuelle Entbündelung beschränkt.

Weiterhin kann die physische Implementierung einer PtMP-Topologie aufgrund pfadabhängiger Vorteile schneller als bei einer PtP-Topologie sein. Bereits bestehende freier Leerrohrkapazitäten (z.B. für FTTC) können das Einziehen weniger PtMP Feederfasern eher ermöglichen als die Nutzung durch dickere PtP Feeder Kabel. Der Ausbau einer PtMP-Topologie kann folglich die Position im Wettbewerb durch schnelleren Ausbau und damit schnellere Vermarktung fördern.

Aus einzelwirtschaftlicher Sicht lassen sich als Argumente für einen PtP-Ausbau Zukunftssicherheit der sowie eine potenziell höhere Zahlungsbereitschaft von Endkunden für eine höherwertige Anslusstechologie heranzuführen. Durch die hinreichende Dimensionierung je Anschluss über eine eigene Glasfaser ist die PtP-Topologie als technologisch überlegen anzusehen und dürfte auch Datenanforderungen und Breitbandnachfragen der Zukunft standhalten.<sup>23</sup>

Das nachfolgende Kapitel soll neben den einzelwirtschaftlichen Argumenten weiterhin volkswirtschaftliche Implikationen der Auswahl zwischen beiden Topologien untersuchen.

## 4 Unterschiede aus Volkswirtschaftlicher Sicht

Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist die PtP-Topologie aufgrund seiner technologischen Nachhaltigkeit und Technologieneutralität als überlegen und zukunftssicher anzusehen. Getätigte Investitionen in diese Topologie sind auch bei steigenden Bandbreitennachfragen durch Endkunden gesichert. Nachinvestitionen in die Infrastruktur sind wenig wahrscheinlich. Jeder Anschlusspunkt kann mit einer Anschlussinfrastruktur entsprechend dem Bedarf des Endkunden beschaltet werden. Die PtP Glasfaser ist diesbezüglich transparent.

---

<sup>22</sup> Frankreich bildet diesbezgl. für die ländlicheren Regionen eine Ausnahme, weil dort eine Mindestgröße für die Splitter-Standorte von ca. 1.000 Wohnungen vorgegeben ist, die bis dahin PtP ausgebaut sind. In Deutschland sind eher 90 Wohnungen an Splitterstandorten zusammengefasst.

<sup>23</sup> Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team (2020), Kapitel 5.

Die PtMP-Infrastruktur ist als sog. Shared Medium, also die (teilweise) gemeinsame Nutzung derselben Infrastruktur durch Endkunden in ihren maximalen Bandbreitenkapazitäten technologisch beschränkt. Zwar wurden in der Vergangenheit Weiterentwicklungen der PON-Technologie vorangebracht, jedoch liegen die maximalen Übertragungsraten bei PtMP durch die benötigten OLT und ONU sowie durch das Teilen von Infrastrukturen stets unter jenen einer PtP-Topologie. Bei einem PtMP-Ausbau kann bei steigenden Bandbreiten und technologischer Grenzen der PON-Technologien unter Umständen ein späterer Ausbau hin zu einer PtP-Infrastruktur ggf. notwendig werden. Wenn die PtP-Topologie als Endstufe des Ausbaupfades angesehen wird, übersteigen zudem die Investitionen eines stufenweisen Ausbaus über PtMP diejenigen eines direkten Ausbaus einer PtP-Topologie<sup>24</sup>. Diesem Effekt kann aus einzelwirtschaftlicher Sicht entgegengehalten werden, dass die kurzfristigen wettbewerblichen Vorteile eines PtMP-Ausbaus und erreichbare Marktanteile die Nachteile erhöhter Gesamtinvestitionen über den Ausbaupfad u.U. ausgleichen könnten.

Weiterhin bietet die PtP-Technologie die Möglichkeit der physischen Entbündelung, die aus den in Abschnitt 3.3 erläuterten Gründen für eine PtMP-Topologie nicht gegeben ist<sup>25</sup>. Was aus betriebswirtschaftlicher Sicht des einzelnen Unternehmens ein Grund für die Entscheidung zum Ausbau der PtMP-Topologie sein kann, ist aus volkswirtschaftlicher Sicht ein Vorteil der PtP-Topologie. Nur die physische Entbündelung der Glasfaserinfrastruktur bietet dem Zugangssuchenden ein technologieneutrales Produkt, welches ihm eine eigene Produktausgestaltung ermöglicht. Somit könnte sich ein Zugangsnachfrager nicht nur über den Preis sondern auch über individuelle Leistungsmerkmale vom Produkt des Infrastruktureigentümers/-betreibers unterscheiden. Auf dem Endkundenmarkt würde dies zu einer größeren Produktvielfalt und Innovation führen.

Im Rahmen des Green Deals der EU spielen die Aspekte des Energieverbrauches der verwendeten Technologien eine deutliche Rolle. Die kupferbasierten Technologien arbeiten erheblich energieintensiver als die glasfaserbasierten Technologien, aber auch zwischen PtP und PtMP Glasfasertopologien und mit Ihnen verbundenen Übertragungssystemen gibt es erkennbare Unterschiede. Bezogen auf übertragenen Bandbreiten schneidet die PtP-Topologie wegen der geringeren Zahl elektronischer Systeme (die zentralen OLT und ONU bei jedem Endkunden entfallen, dafür werden mehr Ethernet-Schnittstellen im MPoP benötigt, die jedoch nur dann Energie brauchen, wenn über sie kommuniziert wird (Sleep Mode)) und der geringeren Sendeleistung auf den Glasfasern (keine Splitterverluste, zumeist nur 1 Gbps Schnittstellen anstelle 2,5 bzw. 10 Gbps, die zum Monitoren der gemeinsamen Faser dauerhaft aktiv sind) besser ab als PtMP mit xPON.<sup>26</sup>

Abschließend lässt sich sagen, dass aus eigenwirtschaftlicher Betrachtung der Unternehmen Vorteile aus dem Ausbau einer PtMP-Topologie insbesondere durch Investitionseinsparungen und wettbewerbspolitische Gründe erwachsen können. Als technologisch überlegen muss die PtP-Topologie angesehen werden, die nachhaltig auch wachsenden Bandbreitennachfragen standhalten wird. Zudem erlaubt sie durch die physische Entbündelbarkeit einzelner Fasern als Vorleistungsprodukt Vorteile für den Wettbewerb und höheren Produktausgestaltungsspielraum für alle Marktakteure.

---

<sup>24</sup> Plückebaum und Ockenfels (2020).

<sup>25</sup> Der Zugang zu PtMP-Netzen kann statt einer physischen Entbündelung demnach nur über eine virtuelle Entbündelung (VULA) oder einen Bitstrom stattfinden. Dies Vorleistungsprodukte werden durch den Zugangsgewährenden technisch definiert und Produktausgestaltungsspielräume sind entsprechend limitiert.

<sup>26</sup> Obermann (2022).

## 5 Strategien der Stakeholder

In Deutschland wählen Netzbetreiber verschiedene Ansätze für ihren Glasfaserausbau. Da die Deutsche Telekom als Incumbent eines flächendeckend verfügbaren Kupferanschlussnetzes und einem weitgehend abgeschlossenen FTTC-Ausbau<sup>27</sup> vermeintlich spät mit dem Ausbau von FTTH, und zwar in einer PtMP-Topologie, begonnen hat, war der FTTH-Ausbau in den letzten Jahren in Deutschland vor allem durch alternative Netzbetreiber getrieben<sup>28</sup>. Diese alternativen Netzbetreiber unterscheiden sich wiederum in ihrem wirtschaftlichen Hintergrund bzw. in ihrem Geschäftsvorhaben der geschaffenen Infrastruktur: Während FTTH-Investoren oftmals auf den Ausbau von PtP-Topologien bauen und damit vor allem auf rurale und suburbane Regionen fokussieren und Dienste über Ethernet oder GPON realisieren, verfolgen bspw. Deutsche Glasfaser und etablierte Regionalnetzbetreiber (wie etwa M-Net, Netcologne oder EWE-Tel) heterogene Strategien und bauen sowohl PtP als auch PtMP aus, teilweise auch FTTB<sup>29</sup>. Daneben baut die Vodafone, als weit verbreiteter Anbieter eines Koaxial-Anschlussnetzes parallel ihr DOCSIS3.1-Netz aus. Dieser Ausbau besteht in einem konsekutiven Heranführen der Glasfaserinfrastruktur hin zu den Haushalts- und Unternehmensstandorten, was die Anteile der reinen Koaxialabschnitte im Anschlussnetz verringert und den Einsatz höherwertiger DOCSIS-Standards ermöglicht. Solche sog. HFC (Hybric Fiber Coax)-Netze können bis in die Wohnungen hinein geführt werden, was zur Endstufe dieser Topologie, des Radio Frequency over Glas (RFoG) führt.

Um eine Übersicht über den Ausbaustand verschiedener Anslusstechologien zu schaffen, zeigt die nachfolgende Abbildung 5-1 die Verfügbarkeit von FTTC, CATV (Koax) sowie FTTH nach Clustern (20) in Deutschland mit dem Stand 2018, dessen Datengrundlage dem Breitbandatlas entspringt. Aufteilung des gesamtdeutschen Ausbauggebietes erfolgt nach Anschlusskosten je Anschluss: Die Anschlüsse mit geringsten Ausbauskosten befinden sich in Cluster 1, jene mit den höchsten in Cluster 20. Jedes Cluster spiegelt hierbei jeweils 5 % der Anschlüsse wieder.

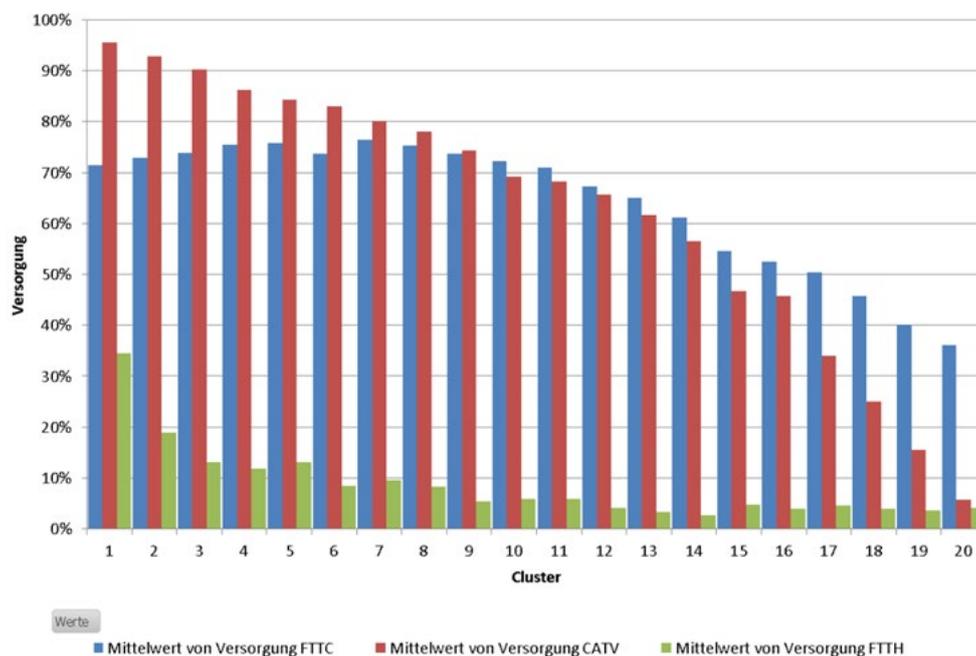
---

<sup>27</sup> Siehe Golem.de (2020).

<sup>28</sup> Siehe BREKO (2023); wie der BREKO ermittelt, liegen die Investitionen der Wettbewerber seit 2018 in den Breitbandmarkt über jenen der DTAG und lagen 2022 bei einem insgesamten Anteil von 64 %.

<sup>29</sup> Siehe hierzu u.a. M-Net (2022) oder Golem (2019); Der Ausbau zu FTTB statt zu FTTH kann entweder strategisch motiviert sein oder einer Herausforderung geschuldet sein, bestehende gebäudeinterne Infrastrukturen für sich nutzbar machen zu können, um Breitband in die Wohnungen zu bringen. Laut einer Marktumfrage des WIK in 2023, die unter FTTH/B ausbauenden Unternehmen durchgeführt wurde (siehe Braun, Wernick, Knips, Tenbrock (2023)) verfolgten lediglich rund 1/5 der teilnehmenden Unternehmen eine FTTB-Strategie mit entsprechend nur wenigen Fasern je Gebäude.

Abbildung 5-1 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial nach Anslusstechologien nach Clustern in Deutschland



Quelle: Kulenkampff et al. (2020)

Die Höhe der Balken bringt in Abbildung 5-1 zum Ausdruck, welcher Anteil der Anschlüsse mit einer jeweiligen Anslusstechologie zu 2018 bereits erschlossen war. Diese Darstellung zeigt, dass die höchste Durchdringung mit Glasfaseranschlüssen einer FTTH-Architektur in denjenigen Clustern erreicht wurde, die je Anschluss die geringsten Ausbaurkosten ausweisen. Insgesamt war der FTTH-Ausbau in Deutschland 2018 noch in einem frühen Stadium. Ebenfalls zeigt die Darstellung, dass eine Verfügbarkeit mit CATV über Ausbaurkosten stetig abnimmt und in den teuersten Clustern stark abfällt. Die Existenz von FTTH-Anschlüssen in diesen Clustern ist zu einem relevanten Teil der Förderung zuzuschreiben.

Wie zuvor beschrieben, ist der FTTH-Ausbau in sich heterogen zu betrachten, da er in verschiedenen Topologien vollzogen wird. Wie eine Marktumfrage des WIK in 2023 zeigte, setzt eine Mehrheit von Unternehmen die FTTH/B ausbauen auf eine Punkt-zu-Punkt Topologie (42 %). Etwa ein Viertel gab an sowohl in PtP als auch in PtMP-Topologien, also gemischt auszubauen, während lediglich rund ein Drittel ausschließlich auf eine PtMP-Topologie setzte. Nur ein Drittel setzt also auf eine wenig zukunfts-sichere Topologie, plus einem Teil der gemischt ausbauenden Unternehmen.

Von denjenigen Unternehmen, die auf eine PtP Topologie setzten, gab weiterhin eine große Mehrheit von rund 70 % an, auf ihrer Infrastruktur Ethernet zum Einsatz zu bringen.<sup>30</sup> Dieses Ergebnis könnte darauf hinweisen, dass Investoren und Netzbetreiber die technologischen Vorteile einer PtP-Topologie

<sup>30</sup> Braun, Wernick, Knips, Tenbrock (2023).

Die Umfrage bei 41 Glasfaser ausbauenden Unternehmen zeigt nur eine leichte Bevorzugung von G.PON gegenüber Ethernet, allerdings auch einen relevanten Anteil von G.PON über PtP-Glasfasertopologie: Die bevorzugte Glasfasertopologie ist PtP (42% plus 24% Gemischtausbau, 34% nur PtMP). Von den PtP Unternehmen setzen ca. 72% auf Ethernet-Technologie, 24% nutzen G.PON (über PtP). Die 34% PtMP Unternehmen müssen eine G.PON Technologie nutzen, so dass mehr als  $34\% + 0,24 \cdot 72\% = 51,3\%$  G.PON Technologien nutzen, denn die gemischt (PtP und PtMP) ausgebauten Gebiete werden teilweise auch mit G.PON beschaltet.

erkannt haben, die sie teilweise mit G.PON beschalten (vgl. Kapitel 2). Gerade die Möglichkeit des Beschaltens einer PtP Topologie mit beiden Technologien (Ethernet und xPON) zeigt, dass PtP technologieneutral ist, PtMP jedoch nicht.

Der Blick ins Ausland, das in seinem FTTH Roll-out weiter ist als Deutschland, zeigt auf welche künftigen Entwicklungen auch in Deutschland in Bezug auf das Stakeholder-Verhalten auftreten könnten:

In Luxemburg begannen Betreiber früh mit dem Roll-out einer FTTH PtMP-Infrastruktur mit GPON. Mittlerweile rüsten die Betreiber das Feedersegment nach, um zu einer PtP-Infrastruktur zu gelangen. Sie behalten sich hierbei die Option auf xPON über PtP.

In Belgien beherrschen fünf Investoren den Glasfasermarkt und investieren in die neue Infrastruktur. Vier dieser Investoren bauen PtP-Topologien aus und bieten passiven Zugang zu ihrem Glasfasernetz an.

In den Niederlanden begann Reggefiber früh mit dem Ausbau einer FTTH PtP-Infrastruktur. Reggefiber verkaufte schrittweise an den Kupfer-Incumbent KPN, der 2014 die letzten Unternehmensanteile erwarb<sup>31</sup>. In der Folge baute KPN ebenfalls Glasfaserinfrastrukturen, allerdings in einer PtMP-Topologie.

Die Hochbreitbandstrategie der Schweiz, die ganz wesentlich auf eine PtP Topologie setzt, wird im folgenden Kapitel gesondert betrachtet.

## 6 Hochbreitbandstrategie der Schweiz 2023

Ursprünglich begann der Glasfaserausbau in der Schweiz in verschiedenen Städten durch die örtlichen Energieversorger. Im Jahr 2008 wurde am BAKOM moderierten „Runden Tisch“ eine von der Swisscom vorgeschlagene 4-Faser-Ausbaustrategie vereinbart. Das Angebot, 4 Fasern bis zum Endkunden auszubauen und die Fasern entbündelt am MPoP den Wettbewerbern zugänglich zu machen erfolgte auch mit dem Ziel, durch ein freiwilliges Wholesale Glasfaserangebot eine Erweiterung des Schweizer Fernmeldegesetzes auf Glasfaser-Anschlussnetze zu vermeiden. Dies gelang. Es entwickelten sich auch Kooperationen mit kommunalen Energieversorgern in den Ballungsräumen. Etwa ab 2014 wich die Swisscom vom Ausbaustandard ab und baute FTTH nur noch mit einer Einfaser PtMP Topologie aus. Beschwerden im Markt und Verfahren vor der Schweizer Wettbewerbskommission (WEKO) und dem Bundesverwaltungsgericht führten dazu, dass die Swisscom einem finalen Spruch des Gerichtes und der WEKO zuvorkommend freiwillig den PtMP Ausbau aufgab und die derart ausgebauten Gebiete im Feeder selbstverpflichtend weitgehend auf PtP nachrüstete will.<sup>32</sup> Derzeit ist die Schweiz über DOCSIS Netze und FTTH sowie FTTS und FTTC verhältnismäßig gut versorgt. Im Sommer 2023 wurde die Mindestversorgung auf 80 Mbps angehoben.

Der Schweizer Nationalrat hat in den Jahren 2022-2023 eine neue Hochbreitbandstrategie entwickelt und im Juni 2023 publiziert.<sup>33</sup> Ihr Zufolge ist das Ausbauziel eine Versorgung mit 1 Gbps symmetrisch und flächendeckend. Für die Gebiete, in denen öffentliche Mittel zum Ausbau zu Hilfe genommen werden wird festgestellt, dass eine PtMP-Topologie nicht technologieneutral ist und den Produktgestaltungsspielraum der Wholesale Nachfrager durch die resultierenden Bitstromangebote deutlich reduziert. Die Mehrkosten für eine PtP-Topologie sind gering und mit den gebotenen Vorteilen gerechtfertigt. Der

---

<sup>31</sup> KPN (2014).

<sup>32</sup> Künzler (2023).

<sup>33</sup> Hochbreitbandstrategie des Bundes, Bericht des Schweizer Nationalrates (2023).

Ausbau einer Vier-Faser-Struktur und die damit verbundenen Mehrkosten sind nicht erforderlich, da bisher die Nachfrage nach mehr als eine Faser je Wohnung sehr limitiert war. Eine Faser je Anschluss ist daher ausreichend. Diese muss am MPOp (Schaltzentrale) zur Entbündelung zugänglich sein. Eine Entbündelung tiefer im Feld ist unökonomisch.

Die Glasfaser-PtP-Topologie ist einzig zukunftssicher. Diese rechtfertigt den Eingriff in den Wettbewerbsmarkt, wo dieser den Ausbau nicht eigenwirtschaftlich schafft. Verantwortlich für die Koordination vor Ort sind die Gemeinden. Derzeit wird ein entsprechender gesetzlicher Förderrahmen entworfen für die kommenden sieben Jahre. Es sind etwa 750 Mio. CHF an Fördermitteln vorgesehen, die aus Verteigerungen von Mobilfunkfrequenzen erlöst werden sollen.

Damit ist die Schweiz bisher klarer in ihren infrastrukturellen Vorgaben und kompromissloser als die EU, sowohl was die Zahl der auszubauenden Fasern angeht als auch deren Übergabepunkt. Die passive Faser bleibt die verpflichtende Vorleistung, ein VULA<sup>34</sup> war bisher und wird voraussichtlich nicht regulatorisch vorgegeben.

## 7 Fazit

Statische Kostenanalysen zeigen einen relativen Vorteil von PtMP Glasfasertopologien. Dieser ist umso größer, wenn bestehende Leerrohrinfrastrukturen zwar für PtP Feederkabel (zwischen Splitter und OLT) mitgenutzt werden können, nicht jedoch für eine PtP Topologie. Einzelwirtschaftliche Kosten haben daher einen relevanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit der Topologiewahl. Relevante einzelwirtschaftliche Aspekte sind u.a.:

- Die Anfangsausstattung des Investors in Bezug auf
  - die physische wiederverwendbare/mitnutzbare Infrastruktur
  - seine relative Wettbewerbs-/Marktposition und sein Marktanteil
- das Nachfrageverhalten der Endkunden (Bandbreitenbedarf und Zahlungsbereitschaft)
- die ggf. bestehende Unsicherheit über die Durchsetzung von Zugangsverpflichtungen und der angedachte Marktengang diesbzgl.

Diese einzelwirtschaftlichen Aspekte und deren Ausgangssituation ist situationsabhängig. Sie unterscheiden sich von Land zu Land, und von Region zu Region. Ihre Aufzählung hier ist nur indikativ und kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben.

Relevant ist jedoch auch die Langfristigkeit der Ausbauperspektive. Wenn die Überzeugung geteilt wird, dass langfristig und zukunftssicher einzig eine Glasfaser-PtP-Topologie sein wird, dann müssen die ggf. entstehenden Nachrüstkosten in die passive Faserinfrastruktur in das Kalkül mit einbezogen werden. Zudem ist PtP die einzig technologieneutrale Infrastruktur-Topologie. PtP zu forcieren gilt umso mehr, wenn zum Ausbau Fördermittel in die Hand genommen werden. Es sollte dazu ein regulatorische Rahmen gewählt werden, der die volkswirtschaftlichen Kosten dieses Zieles minimiert.

---

<sup>34</sup> Virtual Unbundled Local Access: Ein Layer 2 Bitstrom Vorleistungsprodukt mit besonderen qualitativen Leistungsmerkmalen, die mehr Produktgestaltungsspielraum ermöglichen sollen und so der physischen Entbündelung einer Glasfaser möglichst nahe kommen sollen, gedacht für die Fälle, in denen eine physische Entbündelung technisch oder ökonomisch nicht möglich sind.

## Literatur

- Braun, M., Wernick, C., Knips, J., Tenbrock, S. (2023), Ergebnisse der WIK-Befragung unter den FTTH/H-ausbauenden Unternehmen in Deutschland, WIK Diskussionsbeitrag in Vorbereitung, Dezember 2023, [www.wik.org](http://www.wik.org)
- BREKO (2023), BREKO Marktanalyse 2023  
[https://www.brekoverband.de/site/assets/files/37980/breko\\_marketanalyse\\_2023-1.pdf](https://www.brekoverband.de/site/assets/files/37980/breko_marketanalyse_2023-1.pdf)
- Ecorys, Idate, VVA, CBO, WIK author team (2020), Supporting the implementation of CEF2 Digital – SMART 2017/0018, European Commission, Brussels/Luxembourg, January 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8947e9db-4eda-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-116100663>
- EU Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen (2023), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2023/C 36/01)  
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0131(01))
- Godlovitch, Eltges, Plückebaum (2023), Neutral Fiber as a platform for Innovation, study for Stockab, Sweden, Bad Honnef November 2023, to be published
- Golem (2019), Ewe gewährt keine Endgerätefreiheit für Glasfasermodem, abgerufen am 08.12.2023  
<https://www.golem.de/news/ont-ewe-gewaehrt-keine-endgeraetefreiheit-fuer-glasfasermodem-1909-143635.html>
- Golem.de (2020), Telekom hat Vectoring-Ausbau abgeschlossen, abgerufen am 08.12.2023  
<https://www.golem.de/news/tim-hoettges-telekom-hat-vectoring-ausbau-abgeschlossen-2012-152665.html>
- Hochbreitbandstrategie des Bundes, Bericht des Schweizer Nationalrates (2023), Bericht des Bundesrates zum Postulat 21.3461, KVF-N, Bern, 28. Juni 2023,  
[https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaefte/hochbreitbandnetz\\_schweiz.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaefte/hochbreitbandnetz_schweiz.html)
- KPN (2014), KPN acquires remaining 40% stake in Reggefiber, abgerufen am 08.12.2023  
<https://www.overons.kpn/nieuws/en/kpn-acquires-remaining-40-stake-in-reggefiber/>
- Kulenkampff, Ockenfels, Zoz und Zuloaga (2020), Kosten von Breitband-Zugangsnetzen Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up Modellierung und statistische Analyse, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 473  
[https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_473.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_473.pdf)
- Künzler (2023), Glasfaserstreit, Vortrag beim OFAA Austrian Fiber Summit, Salzburg, 7. November 2023
- M-Net (2022), M-net bringt Glasfaser in die Gewerbegebiete Oberpfaffenhofen und Neugilching, abgerufen am 08.12.2023  
<https://www.m-net.de/ueber-m-net/presse/artikel/news/m-net-bringt-glasfaser-in-die-gewerbegebiete-oberpfaffenhofen-und-neugilching/>
- Obermann (2022), Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangstechnologien, Technische Hochschule Mittelhessen, 3. März 2022,  
[https://www.brekoverband.de/site/assets/files/18892/gutachten\\_thm\\_nachhaltigkeit\\_zugangstechnologien.pdf](https://www.brekoverband.de/site/assets/files/18892/gutachten_thm_nachhaltigkeit_zugangstechnologien.pdf)

Ockenfels und Kulenkampff (2022), Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 494

[https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_494.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_494.pdf)

Plückebaum (2023), Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von NGA-Technologien, wik Diskussionsbeiträge Nr. 498, Bad Honnef, Mai 2023, [https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_498.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2023/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_498.pdf)

Plückebaum und Ockenfels (2020), Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 457

[https://www.wik.org/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK\\_Diskussionsbeitrag\\_Nr\\_457.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_457.pdf)

Plückebaum, Neumann, Zoz und Ockenfels (2023), Modellierung des Investitions- und Förderbedarfs verschiedener Breitband-Ausbauziele in der Schweiz, WIK-Consult Bericht für BAKOM

[https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/de/dokumente/bakom/das\\_bakom/rechtliche\\_grundlagen/Gesch%C3%A4fte%20des%20Bundesrates/nachhaltiges\\_mobilfunknetz/modellierung\\_des\\_investitions\\_und\\_foerderbedarfs\\_verschiedener\\_breitband\\_ausbauziele\\_in\\_der\\_schweiz.pdf.download.pdf/Modellierung%20des%20Investitions-%20und%20F%C3%B6rderbedarfs%20verschiedener%20Breitband-Ausbauziele%20in%20der%20Schweiz%20-%20Studie%20vom%2027102022.pdf](https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/de/dokumente/bakom/das_bakom/rechtliche_grundlagen/Gesch%C3%A4fte%20des%20Bundesrates/nachhaltiges_mobilfunknetz/modellierung_des_investitions_und_foerderbedarfs_verschiedener_breitband_ausbauziele_in_der_schweiz.pdf.download.pdf/Modellierung%20des%20Investitions-%20und%20F%C3%B6rderbedarfs%20verschiedener%20Breitband-Ausbauziele%20in%20der%20Schweiz%20-%20Studie%20vom%2027102022.pdf)