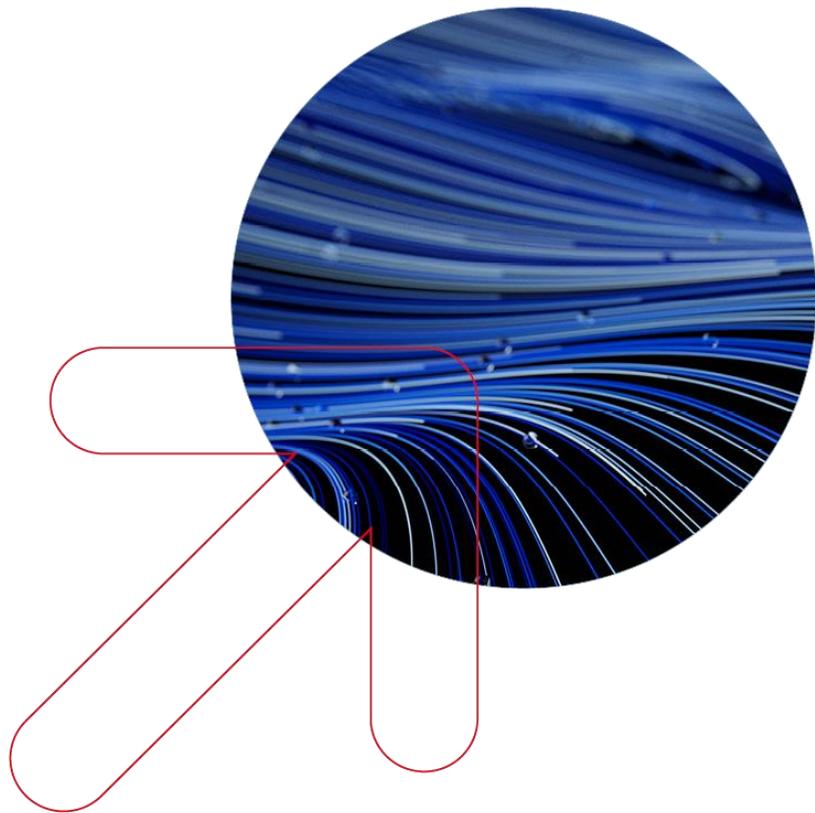


WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 494



Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen

Autoren:
Martin Ockenfels
Dr. Gabriele Kulenkampff

Bad Honnef, Dezember 2022

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

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

Stand: Dezember 2022

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

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungen	IV
Zusammenfassung	V
Summary	VI
1 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	1
2 Modellbeschreibung	3
2.1 Grundlegende Modellannahmen	4
2.2 Angenommene Topologie – Verzweigerbereich und Anschlussbereich	5
2.3 Backhaul / Uplink	6
2.4 Anschlüsse und Gebäude	8
2.5 Berücksichtigte Investitionen	9
2.5.1 Verzweigerkabelsegment (VZK)	11
2.5.2 Faserverzweiger (FVZ)	12
2.5.3 Hauptkabelsegment (HK)	12
2.5.4 Hauptverteiler (MPoP)	13
2.5.5 Uplink und Backhaul (BH)	14
2.6 Auswertungsblatt	16
3 Grundlegende Analysen der Investitionswertmodellierung (FTTH PtP)	17
3.1 Verzweigerkabelsegment (VZK)	19
3.1.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?	19
3.1.2 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigendem Gebäudeabstand?	21
3.1.3 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Gebäudegröße?	22
3.2 Faserverzweiger (FVZ)	23
3.2.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?	23
3.3 Hauptkabelsegment (HK)	24
3.3.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?	24
3.3.2 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Hauptkabellänge (Offset)?	27
3.4 Hauptverteiler (MPoP)	28

3.5	Backhaul	29
3.5.1	Wie verändern sich die Investitionen bei Zusammenlegung von Verteilerstandorten?	29
3.5.2	Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Backhaul-Länge?	30
4	Übergreifende Analysen der Investitionswertmodellierung (FTTH PtP)	31
4.1	Variationen der Anschlussdichte bei veränderter und gleichbleibender räumlicher Erstreckung – Beschreibung der ausgewählten Szenarien	31
4.2	Investitionsstrukturen der ausgewählten Szenarien	33
4.2.1	Investitionsanteile	33
4.2.2	Investitionen pro Anschluss	34
4.2.3	Erklärungsansätze für die beobachteten Phänomene	36
4.2.3.1	Sende- und Empfangseinrichtungen	36
4.2.3.2	Investitionsanteile FVZ und MPoP	37
4.2.3.3	Anschluss- und Gebäudedichte	37
4.2.3.4	Investitionsanteile Tiefbau	37
4.2.3.5	Relevanz der MPoP/ODF-Investitionen	40
4.3	Ökonomische Grenzen der Auflösung von MPoP	41
4.4	Bedeutung für die räumliche Erstreckung von FTTH PtP Anschlussnetzen	45
5	Fazit: Technische Leistungsfähigkeit versus ökonomische Restriktionen	47
6	Literatur	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Räumliche Erstreckung von Anschlussbereichen und Varianten ihrer Ausweitung	1
Abbildung 2: Struktur eines Verzweigerbereichs und seiner Vervielfachung	6
Abbildung 3: Backhaul: Anschlussbereich und Versorgung über einen entfernten MPoP	7
Abbildung 4: Parametrisch gesteuerte Verlängerung der HK-Trasse („Offset“)	8
Abbildung 5: Investitionskategorien der modellierten Segmente des Anschlussnetzes	10
Abbildung 6: Invest pro Anschluss Verzweigerkabelsegment mit steigender Anschlusszahl	19
Abbildung 7: Erstreckung des Verzweigerbereichs mit steigender Anschlusszahl	20
Abbildung 8: Ausdehnung des Verzweigerbereichs bei steigender Anschlusszahl (ceteris paribus)	20
Abbildung 9: Invest pro Anschluss Verzweigerkabel bei steigendem Gebäudeabstand	21
Abbildung 10: Investitionen pro Anschluss Verzweigerkabel über Anschlüsse pro Gebäude	22
Abbildung 11: Investitionen pro Anschluss Faserverzweiger über Anschlüsse	23
Abbildung 12: Invest pro Anschluss Hauptkabelsegment mit steigender Anschlusszahl	24
Abbildung 13: Invest pro Anschluss Hauptkabelsegment mit steigender Anschlusszahl konstanter räumlicher Erstreckung des Anschlussbereichs	25
Abbildung 14: Steigende Hauptkabellänge mit zunehmender Anschlusszahl	26
Abbildung 15: Investitionen pro Anschluss Hauptkabel über Abstand FVZ-MPoP	27
Abbildung 16: Investitionen pro Anschluss MPoP über Anschlüsse	28
Abbildung 17: Backhaul-Invest pro Anschluss mit steigender Anschlusszahl	29
Abbildung 18: Backhaul-Invest pro Anschluss mit steigender Backhaul-Länge	30
Abbildung 19: Investitionsanteile und Investitionen pro Anschluss	34
Abbildung 20: Skalierung ASB-Erstreckung durch Erhöhung des Gebäudeabstands	35
Abbildung 21: Änderung von Anschluss- u. Gebäudedichte bei unveränderter räumlicher Erstreckung des ASB	36
Abbildung 22: Investitionen pro Anschluss über steigender Gebäudeanzahl	38
Abbildung 23: Invest pro Anschluss bei steigender Gebäudeanzahl bei verschiedenen Gebäudegrößen	39
Abbildung 24: Auflösung eines bestehenden Anschlussbereichs und Anbindung an einen benachbarten ASB	42
Abbildung 25: Break-Even bei Ersatz MPoP durch Backhaul-Lösung	43
Abbildung 26: Break-Even für ein kleines Dorf und eine mittelgroße Stadt	44
Abbildung 27: Einsparpotenzial durch die Zusammenlegung von Anschlussbereichen	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenhang zwischen Parametrisierung und Topologie	17
Tabelle 2:	Parametrisierung für Fragestellungen	18
Tabelle 3:	Parametrisierung für Analyse Investitionsanteile (Skalierung der ASB-Erstreckung)	32
Tabelle 4:	Parametrisierung für Analyse Investitionsanteile (unveränderte ASB-Erstreckung bei Variation der Anschluss und Gebäudedichte)	33
Tabelle 5:	Investitionsminimum bei vergleichsweise geringer Gebäudezahl (Gebäudeabstand 30 m)	40
Tabelle 6:	Investitionsrelationen MPoP	40

Abkürzungen

Ansl	Anschluss
ASB	Anschlussbereich
BH	Backhaul
EVZ	Endverzweiger
FTTH	Fiber to the home
HK	Hauptkabelsegment
FVZ	Faserverzweiger
MPoP	Metropolitan point of presence
NGA	Next generation access
ODF	Optical distribution frame
PIU	Plug in unit
PtP	Point to point
SFP	Small form-factor pluggable
TAL	Teilnehmeranschlussleitung
VBA	Microsoft Visual Basic
VZB	Verzweigerbereich
VZK	Verzweigerkabelsegment

Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Glasfasertechnologie entfallen die technischen Längenrestriktionen eines Kupferanschlussnetzes und es ist eine deutliche Ausweitung von Verzweiger- und Anschlussbereichen möglich. Die Beschränkungen, insbesondere durch verschiedene Dämpfungseffekte bei Kupfer-Doppeladern, entfallen bei den Glasfasern.

Nachdem die technischen Bestimmungsfaktoren für die Reichweite von glasfaserbasierten Anschlusslinien im WIK Diskussionsbeitrag Nr. 493 herausgearbeitet wurden, wird in dem hier vorliegenden Diskussionsbeitrag der Frage nach den ökonomischen Bestimmungsfaktoren einer räumlichen Erstreckung von Anschlussbereichen nachgegangen.

Die Untersuchung bedient sich eines einfachen, für diesen Zweck entwickelten Kostenmodells zur Ermittlung der Investitionen pro Anschluss. Gegenstand der Modellierung ist ein stilisierter, abstrakter FTTH PtP Anschlussbereich, der anhand weniger Parameter hinsichtlich seiner Größe und Dichte beschrieben wird. Die Anzahl von Anschlüssen sowie auf Durchschnittswerten basierenden Kennziffern zum Gebäudeabstand und zur Anzahl Anschlüsse pro Gebäude stellen die zentralen Eingangsparameter dar. Es werden Szenariorechnungen anhand verschiedener Parameterkonstellationen durchgeführt und die Auswirkungen auf Investitionsstrukturen und von Größendegressionen untersucht, um Aussagen über die ökonomischen Treiber bzw. beschränkende Faktoren ableiten zu können.

Aus ökonomischer Sicht zeigen sich die längenabhängigen Investitionen in Kabel- und Gräben als limitierender Faktor für die räumliche Erstreckung bzw. Ausweitung von Anschlussbereichen. Es ist stets günstiger, den Zuschnitt der Verzweigerbereiche eher klein auszulegen. Hierbei ist die Anzahl der Gebäude wesentlich, weniger die absolute Anzahl der Anschlüsse. Gleiches gilt für die Hauptkabeltrassen oder auch Backhaul-Anbindungen. Eine Zusammenfassung von benachbarten Anschlussbereichen über Backhauling ist in bestimmten Fällen möglich und sinnvoll. Dies gilt vor allem für kleine Anschlussbereiche und kurze Backhaul-Strecken von nicht mehr als 10 bis 15 Kilometer.

Allgemein bekannte Ausbauregeln, den Zuschnitt von Verzweigerbereichen beispielsweise an den Kapazität von Faserverzweigern auszurichten, konnten nicht bestätigt werden. Vielmehr wurde gezeigt, dass die längenabhängigen Investitionen diese Überlegungen klar dominieren.

Die hier vorgestellten, modellbasierten Analysen zeigen, dass die Leistungsfähigkeit von FTTH PtP Anschlusslinien bzgl. der technisch erzielbare Reichweite (räumlichen Erstreckung) durch die ökonomischen Zusammenhänge in der Regel nicht ausgeschöpft werden sollten. Nur in Fällen vereinzelter Anschlüsse oder kleiner Siedlungen ist der Verzicht auf einen eigenständigen Anschlussbereich ökonomisch vorteilhaft.

Summary

The use of fibre optic technology overcomes the technical length restrictions of a copper based access network and allows a significant expansion of distribution segments and overall access areas. The restrictions, which in particular are due to various attenuation effects of copper twisted pairs, do not apply to optical fibres. Therefore, it would be technically possible to spatially expand distribution areas and to enlarge access areas significantly. Such considerations are also often discussed in the context of merging access areas and resolving MPoP.

The technical aspects of spatial enlargement of access areas through fibre deployment have already been analysed in the WIK Discussion Paper No.493. In this paper, the analysis now focuses on the economic aspects.

The study uses a simple cost model developed for this purpose to determine the investments per access line. The model is designed in order to define a stylised, abstract FTTH PtP access area, which is described on the basis of a few parameters with regard to its size and density. The number of access lines as well as key figures based on average values for the distance between buildings and the number of connections per building represent the key input parameters. Scenario calculations are carried out using various parameter constellations. The effects on investment structures and economies of scale are examined in order to derive statements about the economic drivers and limiting factors with regard to an spatial enlargement of access areas.

From an economic point of view, the length-dependent investments in cables and trenches constitute the major limiting factor for the spatial enlargement of access areas. The findings show that it is always more favourable to design the distribution area rather small. Actually, the number of buildings is more important than the absolute number of connections. The same applies to the feeder cable segment or backhaul connections. In certain cases, it is possible and sensible to combine neighbouring connection areas via backhauling. This is especially true for small access areas and short backhaul distances of no more than 10-15km.

Generally acknowledged design rules for the spatial scope of access areas, that suggest to align the layout of distribution areas with the capacity of the cabinet, could not be confirmed. Rather, it was shown that the length-dependent investments clearly dominate these considerations.

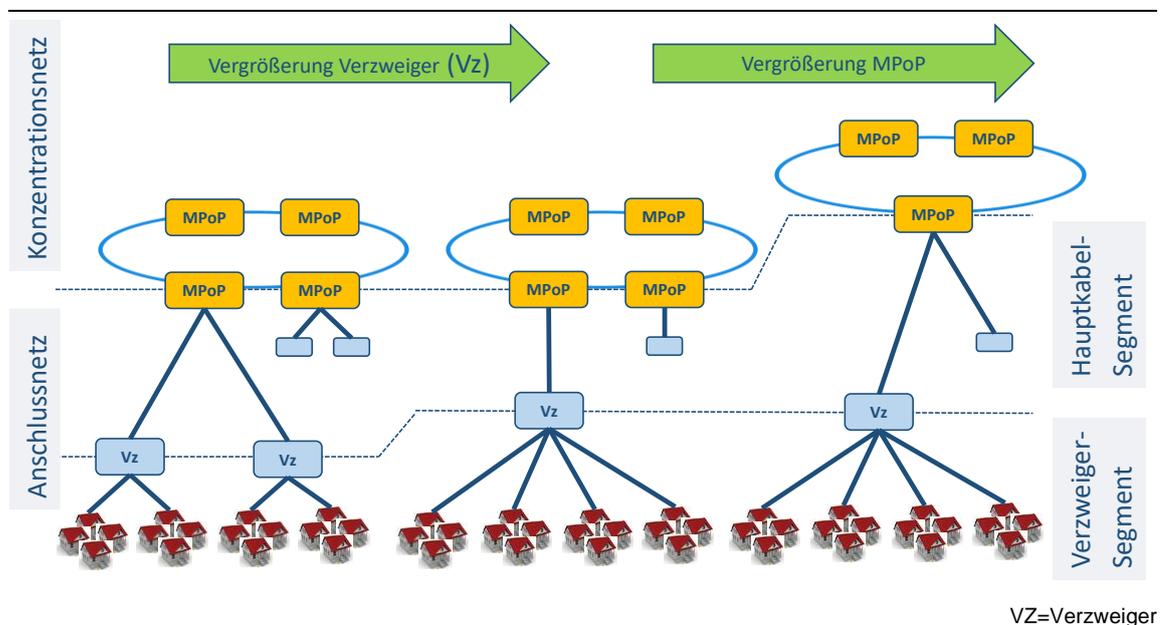
The model-based analyses presented here show that the performance of FTTH PtP access lines with regard to the technically achievable range (spatial extension) should generally not be exhausted due to economic considerations. Only in cases of isolated locations of end users or small settlements it is economically advantageous to merge an independent access area with a neighbouring one in order to reduce the total number of MPoP and thus access areas.

1 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Die Studie geht der Fragestellung nach, ob es ein Optimierungspotential für Investitionen im Netzaufbau von FTTH PtP gibt, bedingt durch den Wegfall der Längenbeschränkungen aus der Zeit der Kupfernetze durch die Verwendung von Glasfasern. Kernfrage ist hierbei, ob sich durch den Einsatz von Glasfasertechnologien bezüglich der MPoP-Größe bzw. der Zahl der MPoP Standorte oder der Größe der Verzweigerbereiche Möglichkeiten ergeben, die im Vergleich zu Kupferanschlussnetzen eine räumlich weitere Erstreckung von Anschlussbereichen erlauben.

Die ökonomische Analyse fokussiert auf die Bestimmungsfaktoren der räumlichen Erstreckung, die einen Anschlussbereich über die Anzahl von Anschlüssen sowie durch den durchschnittlichen Gebäudeabstand und die Anzahl Anschlüsse pro Gebäude charakterisieren. Abbildung 1 illustriert Varianten einer räumlichen Ausweitung von Anschlussbereichen. Dazu werden Szenariorechnungen für einen stilisierten Anschlussbereich mit einer Punkt-zu-Punkt Glasfasertopologie (FTTH PtP Ethernet) auf der Basis eines vereinfachten Kostenmodells durchgeführt. Die Bewertung erfolgt anhand der berechneten Investitionswerte. Potentielle technische Restriktionen der Reichweite von Anschlusslinien finden bei der Modellierung keine Berücksichtigung.¹ Dieses Vorgehen erlaubt es, ökonomische von technischen Bestimmungsfaktoren abgrenzen zu können.

Abbildung 1: Räumliche Erstreckung von Anschlussbereichen und Varianten ihrer Ausweitung



Quelle: WIK

¹ Mit den technischen Aspekten der Reichweite von Anschlusslinien beschäftigt sich der folgende Beitrag: Zulogaga, G., et al (2022): Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag, Bad Honnef.

Zielgröße der Modellierung sind die Investitionen pro Anschluss.

Im ersten Teil der Analyse (Abschnitt 3) werden die einzelnen Segmente bzw. Komponenten des Anschlussnetzes über parametrisch kontrollierte Anschlussbereiche als Szenarioanalyse betrachtet:

- Verzweigerkabelsegment
- Faserverzweiger (FVZ)
- Hauptkabelsegment
- Hauptverteiler (MPoP)
- Backhaul-Verbindung

In der daran anschließenden, ganzheitlichen Betrachtung (Abschnitt 4) werden dann Aussagen dazu abgeleitet, wie sich die Investitionen pro Anschlussleitung für die EVz-MPoP-Relation verändern, wenn parametergesteuert die

- Anzahl Anschlüsse
- Anzahl Anschlüsse pro Gebäude
- der durchschnittliche Gebäudeabstand

verändert werden. Auf Basis der modellgestützten Analyse werden die Investitionsstrukturen des FTTH PtP Anschlussnetzes, sowie die ökonomischen Grenzen der Auflösung eines MPoP näher betrachtet.

Die eigentliche Modellbeschreibung ist den Analysen vorangestellt (Abschnitt 2). Der Diskussionsbeitrag schließt mit einer zusammenfassenden Darstellung der Erkenntnisse (Abschnitt 5).

2 Modellbeschreibung

Für die Zwecke der Untersuchung wurde ein Excel-basiertes Kostenmodell erstellt, welches eine Investitionswertermittlung für einen stilisierten Anschlussbereich erlaubt.

Das Modell soll eine systematische Analyse der ökonomischen Zusammenhänge von Anschlussbereichen ermöglichen. Dabei stehen nicht die Bestimmung der absoluten Investitionen im Vordergrund, sondern die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen hinsichtlich Größe und Dichte, die sich mit einer zunehmenden Ausdehnung der räumlichen Erstreckung des Anschlussbereichs ergeben. Der Vergleich der Szenario-basierten Berechnungen wird anhand der Investitionen pro Anschluss vorgenommen.

Gegenstand der Modellierung ist ein stilisierter Anschlussbereich, dessen Topologie anhand weniger, auf Durchschnittswerten beruhenden Parameter beschrieben wird, mit Hilfe derer Gebäudeanschlüsse, korrespondierende durchschnittliche Anschlusszahlen und Trassenlängen abgeleitet werden können. Auf die Berücksichtigung georeferenzierter Informationen wird vollständig verzichtet.

Für die Investitionswertbestimmung wurden die Erfahrungen aus den Modellierungen des WIK-TAL-Kostenmodells² und des WIK-NGA-Kostenmodells³ herangezogen und soweit erforderlich in das vereinfachte Modell übersetzt.

Das Modell wurde in Excel unter überwiegender Verwendung von Formeln entwickelt. Wenige Optimierungsfunktionen wurden als Excel-Makro (VBA Funktion) realisiert. Das Auswertungsblatt basiert weitestgehend auf einem Excel Makro (VBA Sub), um bestimmte Fragestellungen automatisiert durchführen zu können.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen, die für die Analyse wichtigen Eingangsparameter sowie die eingebauten Algorithmen erläutert.

-
- 2 Kulenkampff G., Plückerbaum, T. Zoz, K. 2019: Analytisches Kostenmodell für das Anschlussnetz AKM-AN Version 3.0
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Anschluss-netz/20190114_AKM_AN_RefDokpdf.pdf?jsessionid=CCCD37618540AB44BACBAE0C21EFE52E?blob=publicationFile&v=2
 - 3 Das erste NGA-Modell hat das im Zuge einer Studie für ECTA entwickelt. WIK Elixmann, D. Ilic, D. Neumann, K. Plückerbaum, T. (2009): The Economics of Next Generation Access - Study for the European Competitive Telecommunication Association (ECTA); https://www.wik.org/uploads/media/ECTA_NGA_Study_2008.pdf
 Dieses Ursprungsmodell wurde seitdem stetig weiterentwickelt und angewendet. So unter anderem auch in folgendem Forschungsprojekt zu den Kosten von Breitbandzugangsnetzen.
 Kulenkampff, G. Ockenfels, M. Zoz, K., Zuloaga, G. 2020: Kosten von Breitband-Zugangsnetzen
https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_473.pdf

2.1 Grundlegende Modellannahmen

Das Modell ist ausschließlich auf FTTH PtP ausgelegt. Die Hauszuführung, die Gebäudeeinführung, die gebäudeinterne Verkabelung und die CPE werden investitionsseitig nicht berücksichtigt, da diese unabhängig von der räumlichen Verteilung der Anschlüsse in der Fläche und unabhängig von der Größe und dem Zuschnitte der Anschlussbereiche entstehen.

Jeder Endkunde wird mit einer Faser angeschlossen und für jedes Gebäude wird ein Endverzweiger (EVZ) und ein eigenes, entsprechend dimensioniertes Glasfaserkabel berücksichtigt, das die Endkunden an den Verzweiger anbindet (Verzweigerkabel).⁴

Für das Verzweigerkabel wird angenommen, dass dieses in Erdverlegung ausgeführt wird, es also weder Rohre, noch Schächte benötigt. Auch wird eine durchgehende Verlegung angenommen, weshalb keine Muffen/Spleiße angenommen werden.

Wird die Kapazität eines Faserverzweigers aufgrund der Anzahl der Anschlüsse überschritten, so wird ein weiterer Faserverzweiger am gleichen Standort aufgestellt. Es werden dabei zwei mögliche Größen Faserverzweiger berücksichtigt. Jeder Faserverzweiger wird dann mit einem eigenen Hauptkabel mit dem MPoP verbunden.

Jeder Faserverzweigerstandort wird über eine eigene Hauptkabeltrasse mit dem MPoP verbunden. Aus Vereinfachungsgründen wird keine gemeinsame Auslegung der individuellen HK-Anbindungen berücksichtigt.

Es kann eine gemeinsame Verlegung von Haupt- und Verzweigerkabel angenommen werden. Hierbei werden die Investitionen des Hauptkabelgrabens um 50% für den angenommenen Anteil der gemeinsamen Verlegung reduziert.

Im MPoP werden Investitionen für die benötigte Fläche (Grundfläche plus Flächenbedarfe für ODF-Racks und Switch-Racks) sowie die ODF-Belegung angenommen (ODF = Optical Distribution Frame).

Für Szenarien, in welchen ein aktiver MPoP deaktiviert wird und die ankommenden Fasern über eine Backhaul-Verbindung zu einem anderen, benachbarten, aber weiter entfernt liegenden aktiven MPoP weitergeführt werden, wird ein entsprechend dimensioniertes Kabel unterstellt. Sollte die größte Kabelgröße nicht ausreichend sein, werden modellendogen zusätzliche Kabel angenommen. Investitionswerte für den Uplink in das Kern- und Konzentrationsnetz, bestehend aus PIU, Linecards, Layer1 Equipment, Layer0 Transmission Link können ebenfalls berücksichtigt werden.

⁴ Anstelle vom Verzweigerkabel kann hier auch vom sog. Endkabel (Dropcable) gesprochen werden. Aufgrund der bei Glasfaseranschlüssen gewählten Verlegetechnik wird i.d.R. auf Spleiße im Verzweigerbereich verzichtet, weswegen die aus dem Kupfer-Anschlussnetz bekannte Trennung in Verzweigerkabel und Endkabel (Dropcable) obsolet ist.

2.2 Angenommene Topologie – Verzweigerbereich und Anschlussbereich

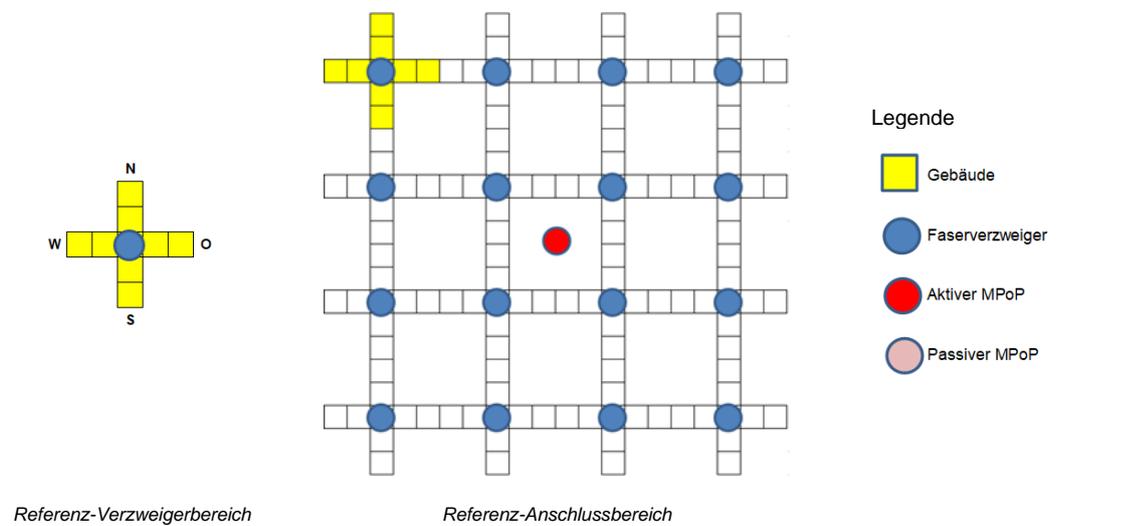
Die Investitionswertmodellierung verzichtet auf die Verwendung GIS-basierter Informationen zu Endkundenstandorten und Netzknoten (MPoP bzw. Faserverzweiger). Stattdessen leitet sich die Topologie des Anschlussbereichs ausschließlich aus der parametergesteuerten Modellierung eines stilisierten Verzweigerbereichs ab (Referenz-Verzweigerbereich). Dieser wird für die Investitionswertermittlung vervielfacht, um den zu untersuchenden Anschlussbereich szenariospezifisch zu erzeugen. Der den Modellanalysen zugrunde liegende Anschlussbereich besteht dabei immer aus 16 identischen Verzweigerbereichen.

Um mit dem Modell unterschiedliche räumliche Erstreckungen in der Fläche abbilden zu können, wird – in Analogie zu einem Koordinatenkreuz – ausgehend vom Faserverzweigerstandort (Ursprung) eine Trassenführung in alle vier Himmelsrichtungen unterstellt, wobei die Trassenlänge jeweils eine Funktion der Anschlüsse im Verzweigerbereich, der durchschnittlichen Anzahl Anschlüsse pro Gebäude und dem durchschnittlichen Gebäudeabstand ist. Für jede dieser vier Trassen wird angenommen, dass sich diese nicht weiter verzweigen.

Die Verzweigerbereichsbildung kann an folgendem Beispiel illustriert werden. Für eine gegebene Parameterkonstellation werden Gebäude und Anschlüsse nach folgender Regel ausgelegt: Das erste angeschlossene Gebäude befindet sich auf der Nord-Achse. Kommt ein weiteres Gebäude hinzu, so wird dies auf der Ost-Achse angenommen. Das nächste Gebäude befindet sich dann auf der Süd-Achse. Der erste „Ring“ Gebäude (je ein Gebäude je Richtung) hat jeweils einen Abstand zum Faserverzweiger in Höhe des parametrisierten „Gebäudeabstands“. Der zweite „Ring“ Gebäude hat dann einen Abstand zum Faserverzweiger in Höhe des zweifachen Gebäudeabstands, usw.

Die Größe der Gebäude, im Sinne von Anzahl der darin enthaltenen Wohnungen, kann über einen Parameter „Anschlüsse pro Gebäude“ eingestellt werden. Aus der Kombination aus Anzahl Anschlüsse und Anschlüsse pro Gebäude ergibt sich dann die Anzahl der Gebäude.

Abbildung 2: Struktur eines Verzweigerbereichs und seiner Vervielfachung



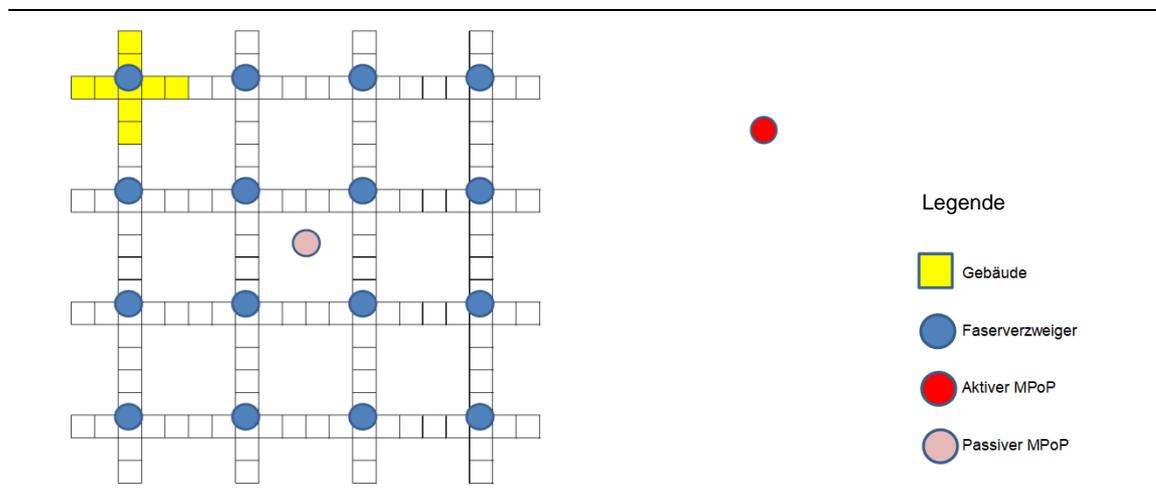
Quelle: WIK

Eine Vergrößerung des Referenz-Verzweigerbereichs entweder durch eine Erhöhung der Anzahl Anschlüsse oder des Gebäudeabstands führt aufgrund der gewählten Modellarithmetik zu einem „Aufblähen“ des gesamten Anschlussbereichs.

2.3 Backhaul / Uplink

Neben der eigentlichen Modellierung der Investitionen für den Anschlussbereich bietet das Modell die Möglichkeit, die Uplink bzw. Backhaul-Investitionen zu berücksichtigen. Dies wird durch die Berücksichtigung eines weiteren, topologierelevanten Parameters „Backhaul-Länge“ erreicht, welcher angibt, um wieviel Meter der benachbarte MPoP vom Standort des MPoP im Basis-Szenarios entfernt liegt. In der nachfolgenden Abbildung 3 ist dies durch den rechts vom Anschlussbereich positionierten MPoP (roter Kreis) illustriert.

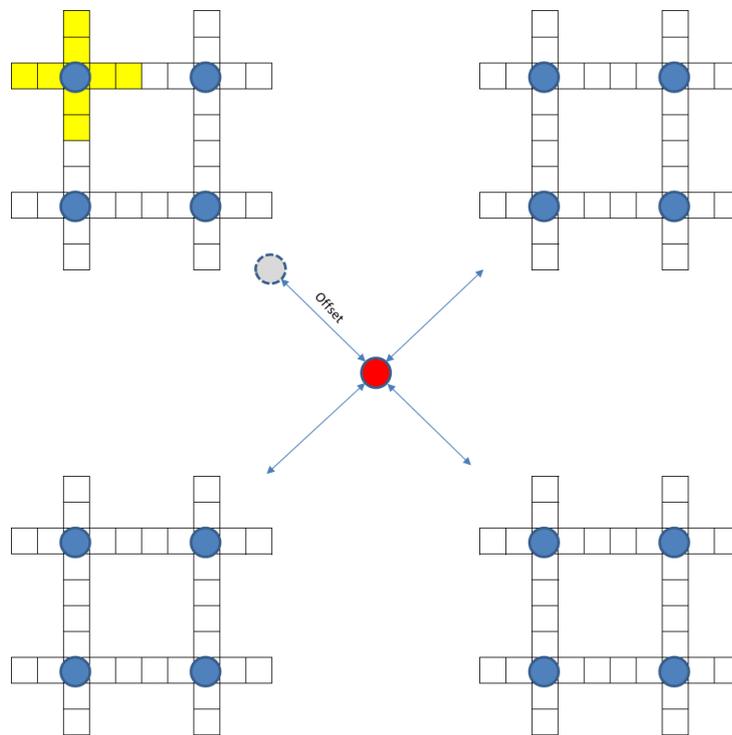
Abbildung 3: Backhaul: Anschlussbereich und Versorgung über einen entfernten MPoP



Quelle: WIK

Eine zweite, im Modell implementierte Variante der Ausweitung der Hauptkabeltrasse ist mit dem Eingangsparameter „Offset“ angelegt. Im Unterschied zu der Backhaul-Variante, wird hier der Anschlussbereich als Ganzes „aufgebläht“ (in Abbildung 4 durch die Pfeile „Offset“ illustriert). Dieser Parameter bewirkt eine Verlängerung der HK-Trasse für jede individuelle Faserverzweigeranbindung nach Maßgabe der für den Offset-Parameter festgelegten Länge.

Abbildung 4: Parametrisch gesteuerte Verlängerung der HK-Trasse („Offset“)



Quelle: WIK

2.4 Anschlüsse und Gebäude

Die zentralen Modelleingangsparameter, über die die Topologie des Referenz-Verzweigerbereichs gesteuert wird, sind

- die Anzahl Anschlüsse pro Verzweigerbereich
- die Anzahl Anschlüsse pro Gebäude
- der durchschnittliche Gebäudeabstand

Dabei kann mit der Anzahl Anschlüsse pro Gebäude die Dichte des betrachteten Verzweiger- und damit Anschlussbereichs erhöht werden. Die beiden anderen Parameter haben gemeinsam, dass ihre sukzessive Erhöhung zu einer räumlichen Ausdehnung des Anschlussbereichs führt.

Bei gegebener Anzahl von Anschlüssen pro Gebäude geht das Modell mit einer steigenden Anschlusszahl wie folgt um:

Jeder zusätzliche Anschluss wird im Uhrzeigersinn auf die vier Achsen zugeteilt, wobei zunächst für die Gebäude nur ein Anschluss unterstellt wird. Dann werden, weiterhin im Uhrzeigersinn die Anschlüsse weiter auf die Gebäude verteilt, bis die Gebäude

vollständig „befüllt“ sind. Erst dann wird mit dem nächsten Anschluss wieder ein weiteres Gebäude angenommen.⁵

2.5 Berücksichtigte Investitionen

Die Investitionswertberechnung erfolgt für die einzelnen Komponenten des Anschlussnetzes. Dazu werden im Modell die folgenden Segmente unterschieden:

- Verzweigerkabelsegment⁶
- Faserverzweiger
- Hauptkabelsegment
- MPoP
- Backhaul/Uplink

Aus Abbildung 5 geht hervor, welche Investitionskategorien durch das Modell abgebildet werden.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird erläutert, auf welchen Annahmen die Investitionswertermittlung für die jeweiligen Komponenten beruht.

⁵ Darüber hinaus sind im Modell noch zwei weitere Varianten angelegt, die sich hinsichtlich der Verteilungsregel bzgl. der Anschlüsse voneinander unterscheiden. Diese sind im Anhang dargestellt, fanden aber für die hier durchgeführten Untersuchungen keine Anwendung.

⁶ Die Unterteilung der Investitionen des Verzweigerkabelsegments in die Kategorien Nord, Ost, Süd, West erklärt sich aus dem Modelldesign und der gewählten, stilisierten Topologie des Verzweigerbereichs. Siehe hierzu auch nochmal Abbildung 2.

Abbildung 5: Investitionskategorien der modellierten Segmente des Anschlussnetzes

Verweigerkabelsegment				Faserverweiger	Hauptkabel	MPoP	Backhaul (inkl. MPoP inkrementell)
Nord	Ost	Süd	West				
EVZ [€]	EVZ [€]	EVZ [€]	EVZ [€]	Fixinvestitionen [€]	Kabel [€]	Fixkosten ODF [€]	Kabel [€]
Kabel [€]	Kabel [€]	Kabel [€]	Kabel [€]	Variable Investitionen [€]	Rohre [€]	Variable Kosten ODF [€]	Rohre [€]
Rohre [€]	Rohre [€]	Rohre [€]	Rohre [€]		Graben [€]	Kosten Floorspace [€]	Graben [€]
Graben [€]	Graben [€]	Graben [€]	Graben [€]		Schächte [€]	Basis Floorspace [€]	Schächte [€]
					Muffen [€]	SFP Module (Anschl. & MPoP) [€]	Schacht für passiven MPoP [€]
						Kosten PIU/LC/L1-Equipment [€]	Muffen [€]
						Kosten L0 Transmission Link [€]	SFP Module (Anschl. & MPoP) [€]

Quelle: WIK

2.5.1 Verzweigerkabelsegment (VZK)

Das Verzweigerkabelsegment wird aus vier Achsen gebildet. Jede Achse bildet eine Reihe von Gebäuden ab, deren einheitlicher Abstand zueinander parametrisch gesteuert wird („durchschnittlicher Gebäudeabstand“).⁷

Jedes Gebäude wird mit einem individuellen Kabel an den Faserverzweiger angeschlossen, wobei für jeden Endkunden eine Faser vorgesehen wird. Die Größe des Kabels (Anzahl Fasern) wird danach bemessen, wie viele Anschlüsse pro Gebäude zu versorgen sind.⁸

Für die Investitionswertbestimmung stehen im Modell insgesamt 13 verschiedene Kabelgrößen mit unterschiedlichen Faserzahlen zur Verfügung. Es wird jeweils das kleinste⁹ Kabel ausgewählt, welches die Nachfrage am Gebäude bedienen kann.

Hiernach wird auch für jedes Gebäude der EVZ investitionsseitig bemessen.

Für jedes Kabel ist ein Preis hinterlegt, der die Kosten für Material und Verlegung bzw. Installation beinhaltet. Die Länge der gebäudeindividuellen Kabel bemisst sich nach dem Abstand des jeweiligen Gebäudes zum Faserverzweiger.

Die Grabeninvestitionen sind ebenso wie die Kabelinvestitionen durch ihre Länge und Größe bestimmt. Die Länge wird für den Referenz-Verzweigerbereich über die Trassenerstreckung auf den vier Achsen bestimmt. Dabei determiniert das am weitesten vom Faserverzweiger entfernte Gebäude die Grabenlänge pro Trasse (Nord-, Süd-, West- bzw. Ost-Achse).

Die Größe des Grabens (Breite und Tiefe) richtet sich nach dem Platzbedarf der auf der jeweiligen Trasse verlegten Kabel. Dazu wird vom Modell abschnittsweise¹⁰ bestimmt, wie groß der Graben sein muss. Dies richtet sich danach, wie viele Kabel jeweils parallel im Graben liegen.

Für die Bestimmung des Raumbedarfs der Kabel im Graben wird auf das Konzept der Zugäquivalente zurückgegriffen, welches auch im Analytischen Kostenmodell für das Anschlussnetz Version 3.0 des WIK Anwendung findet. Dabei drücken die Zugäquivalente den Raumbedarf eines Glasfaserkabels (verlegt in einem Mikrorohr) in Relation zu dem Platzbedarf eines (Rohr-)Zugs aus. Mit diesem Ansatz kann aus der Anzahl unterschiedlich großer Kabel ermittelt werden, wie viele Rohrzüge oder Züge erdverlegter

⁷ Präzise ausgedrückt ist damit der Abstand der Punkte im Graben gemeint, von denen aus die Hauszuführung abzweigt.

⁸ Dies ist dem Grunde nach durch den Eingangsparameter „Anzahl Anschlüsse pro Gebäude“ festgelegt. Da aber die Anzahl der Anschlüsse nicht zwingend ein ganzzahliges Vielfaches der Anschlusszahl pro Gebäude ist, kann es hier zu leichten Abweichungen kommen.

⁹ „Kleinste“ ist hier in Bezug auf die Faserzahl zu verstehen.

¹⁰ Die Trasse von einem Gebäude bis zum nächsten konstituiert einen Abschnitt.

Mikrorohrverbände insgesamt benötigt werden, damit daraus auch die Größe des hierfür benötigten Graben abgeleitet werden kann.

Dem Modell stehen insgesamt 8 Grabengrößen zur Verfügung.¹¹ Aufgrund des Betrachtungsfokus der von uns im weiteren durchgeführten Analysen, spielt dies für die Investitionswertermittlung jedoch keine Rolle.¹²

Zugäquivalente und Grabendimensionierung am Beispiel

Annahmen:

3 Kabel mit wenigen Fasern, von denen jeweils 50 in einen Rohrzug passen würden > Zugäquivalent 50

7 Kabel mit vielen Fasern, von denen jeweils 4 in einen Rohrzug passen würden > Zugäquivalent 4

Rechnung:

$$3/50 + 7/4 = 0,06 + 1,75 = 1,81$$

Ergebnis:

Es werden (aufgerundet!) 2 Rohrzüge für diese 10 Kabel benötigt und ein entsprechender Graben, welcher für 2 Rohrzüge geeignet ist.

2.5.2 Faserverzweiger (FVZ)

Die Dimensionierung der Faserverzweiger richtet sich nach der Anzahl Anschlüsse im Verzweigerbereich. Die benötigten Investitionen setzen sich aus einem Fixkostenanteil für das Gehäuse und einem variablen Anteil je angeschlossener Faser zusammen. Es ist parameterseitig erfasst, wie viele Fasern bzw. Anschlüsse ein Faserverzweiger aufnehmen kann. Es stehen zwei verschieden große Faserverzweiger zur Verfügung. Wird diese Anzahl Fasern überschritten, so wird am gleichen Standort ein weiteres Gebäude benötigt. Die Auswahl der Größe des Gehäuses erfolgt durch das Modell. Überschreitet die Anschlusszahl des Referenz-Verzweigerbereichs die Kapazität des Faserverzweigers, wird ein zweiter daneben gestellt.

2.5.3 Hauptkabelsegment (HK)

Das Hauptkabelsegment umfasst die linientechnische Anbindung der Faserverzweiger an die MPoP. Für die Investitionswertbestimmung werden neben Kabel und Gräben auch Rohre, Schächte und Muffen berücksichtigt.

¹¹ Dieser Ansatz orientiert sich am Analytischen Kostenmodell für das Anschlussnetz, Version 3.0. Kulenkampff G., Plückebaum, T. Zoz, K. (2019): Analytisches Kostenmodell für das Anschluss-netz AKM-AN Version 3.0.

¹² Für die in der Analyse hier dargestellten Szenarien kommt im VZB ausschließlich der kleinste Grabentyp zur Anwendung.

Für die Anbindung eines Faserverzweigerstandorts an den MPoP wird das hierfür benötigte Kabel durch das Modell passend ausgewählt. Jeder Faserverzweiger erhält ein eigenes Kabel. Aus der Anzahl und Größe der Kabel pro FVz-MPoP-Relation wird auch hier über die Zugäquivalente die Anzahl der benötigten Rohre, die Grabengröße und deren Länge bestimmt.

Die Länge von Kabeln und Trasse bestimmt darüber hinaus die Investitionen in Schächte und Muffen. Dafür kommen zusätzliche Modelleingangsparameter zur Anwendung, die den durchschnittlichen Muffen- bzw. Schachtabstand vorgeben. Die Höhe der jeweiligen Muffen- bzw. Schachtinvestitionen richtet sich dabei nach der jeweils dimensionierten Faserzahl des Hauptkabels bzw. der Zugzahl.

Ergänzend besteht im Modell die Möglichkeit, eine gemeinsame Verlegung von Verzweiger- und Hauptkabel anzunehmen, um Kosteneinsparungen durch gemeinsame Verlegung zu berücksichtigen. Bei den für diese Studie durchgeführten Berechnungen wurde unterstellt, dass sich dadurch die Kosten für HK-Trasse und HK-Schächte um 50% reduzieren. Es wurde darauf verzichtet, die Vorteile aus gemeinsamer Verlegung auf HK- und VZK-Segment aufzuteilen.

Weiterhin besteht im Modell die Möglichkeit, eine Verlängerung der Hauptkabeltrasse parametrisch zu steuern. Dieser Wertansatz wird dann zu der modellendogen berechneten Länge hinzuaddiert. Diese Variante wurde in der Modellbeschreibung (Abschnitt 2.1) als „Offset“ bezeichnet.

2.5.4 Hauptverteiler (MPoP)

Die Dimensionierung des MPoP erfolgt auf der Basis der dort ankommenden Fasern aus den insgesamt 16 Verzweigerbereichen. Es finden folgende Investitionskategorien Berücksichtigung:

- Gebäudefläche (fixe und variable Kosten)
- ODF (fixe und variable Kosten in Abhängigkeit der Anschlussnachfrage im ASB)
- Kosten für die SFP-Module

Investitionsseitig wird eine parametrisierbare Grundfläche, sowie die benötigten Flächen für ODF-Racks und Switch-Racks berücksichtigt.

Für den ODF entstehen pro Gestell mit parametrisch festgelegter Kapazität sprungfixe Kosten. Die variablen Kosten decken das Spleißen ab, welches pro installierter Anschlusslinie erforderlich ist.

Darüber hinaus berücksichtigen wir in der Kategorie MPoP die für die Glasfaseranschlusslinie erforderlichen SFP-Module.¹³ Bei diesen handelt es sich um Sende- bzw. Empfangsmodule, die sowohl auf Seiten des Endkunden als auch MPoP-seitig vorzusehen sind. Da sich die Leistungsfähigkeit von SFP-Modulen – ausgedrückt in Reichweite – unterschieden kann, berücksichtigen wir verschiedene Typen mit unterschiedlichen Reichweiten und Kosten. Die modellendogene Auswahl des SFP-Modul-Typs richtet sich dabei nach der längsten Erstreckung einer Anschlusslinie (weitest entfernten Gebäude) bis zum MPoP.¹⁴

Die Investitionen skalieren hier linear mit der Anzahl Anschlüsse, wobei für jeden Anschluss zwei SFP-Module zum Ansatz kommen.

2.5.5 Uplink und Backhaul (BH)

Das Modell berücksichtigt neben den Investitionen für die linientechnische Anbindung der Endkunden an den MPoP in einem zusätzlichen Modul auch die Investitionen für den sogenannten Uplink oder Backhaul. Mit beiden Begriffen wird im allgemeinen die Anbindung an die nächst höhere Netzebene bezeichnet.

Mit Hilfe des Modells soll untersucht werden, ob, und wenn ja, unter welchen Voraussetzungen es ökonomisch vorteilhaft ist, benachbarte Anschlussbereiche zusammenzulegen, um von der Schließung eines MPoP-Standorts zu profitieren.¹⁵ Die Erwägung, MPoP-Standorte zu reduzieren, ist durch den Einsatz von Glasfasertechnologien im Anschlussnetz motiviert, die anders als kupferbasierte Technologien, keine relevanten Reichweitenbeschränkungen unterliegen. Um die ökonomische Vorteilhaftigkeit zu beurteilen, werden mit dem Modell die Uplink-Kosten eines eigenständigen MPoP mit den Backhaul-Kosten verglichen, die entstehen, wenn der betrachtete MPoP aufgelöst wird und die Teilnehmer direkt an den benachbarten Standort (MPoP) angeschlossen werden. Daher verwenden wir für die modellgestützte Analyse den Begriff Uplink, wenn es sich um eine über das Konzentrationsnetz realisierte Anbindung handelt, den Begriff Backhaul, wenn die glasfaserbasierten Anschlusslinien über den bisherigen MPoP verlängert und bis zum benachbarten MPoP geführt werden.

Für die Modellierung der Investitionen im Backhaul-Fall wird wie folgt vorgegangen: Der MPoP wird als passiver Standort angenommen, die Investitionsrechnung beinhaltet nur die standortunabhängigen inkrementellen Investitionen, die virtuell auf den aktiven,

¹³ Siehe hier den Kurzbericht des WIK, Zuloaga, G., et al (2022): Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 493, Bad Honnef

¹⁴ Über weitere Eingangsparameter wird hierbei die (ebenfalls durchschnittliche) Strecke gebäudeinterne Verkabelung–Hauszuführung in der für das SFP-Modul relevanten Länge berücksichtigt.

¹⁵ Für die Bestimmung der Backhaul- bzw. Uplink-Investitionen wurde auf der methodischen Umsetzung des NGA-Modells aufgesetzt. Siehe hierzu unter anderem Hoernig, S.; Jay, S.; Neumann, K.-H.; Peitz, M.; Plückebaum, T.; Vogelsang, I. (2010): Architectures and competitive models in fibre networks, Bad Honnef, Dezember 2010 oder auch Ilic, D.; Neumann, K.-H.; Plückebaum, T. (2009): Szenarien einer nationalen Glasfaserausbaustrategie in der Schweiz, Bad Honnef, Dezember 2009.

entfernten MPoP verlagert werden. Am Standort des passivierten MPoP wird stattdessen ein Schacht vorgesehen, in welchem die Zusammenführung der Hauptkabel zum Backhaulkabel erfolgt. In diesem Fall wird dann auch die Backhaul-Verbindung berücksichtigt. Die Standortinvestitionen entfallen entsprechend.

Die Dimensionierung der Backhaultrasse erfolgt auf der Basis der am passiven MPoP ankommenden Fasern. Der Abstand zwischen passiven und aktiven MPoP kann parameterseitig erfasst werden. Die hierfür benötigten Kabel werden durch das Modell passend ausgewählt. Aus der Anzahl und Größe der Kabel kann über die Zugäquivalente die Anzahl der benötigten Rohre und deren Länge bestimmt werden. Hieraus kann dann wieder der benötigte Grabentyp bestimmt werden. Zusätzlich werden in einem parametrisierbaren Abstand Schächte vorgesehen, deren Größe sich aus dem Grabentyp ergibt. Weiterhin werden an den Schachtstandorten auch Muffen vorgesehen, deren Typ sich aus den verwendeten Kabelgrößen ableitet. Auf der Basis der Gesamtkabellänge vom weitest entfernten Gebäude und dem aktiven MPoP, also über die Strecke Inhausverkabelung-Hauszuführung-Verzweigerkabel-Hauptkabel-Backhaulkabel, wird die Qualitätsklasse der benötigten SFP Module bestimmt und zweifach je Anschluss berücksichtigt.

Ebenfalls können mit dem Modell die Investitionen für den Uplink berücksichtigt werden, die die Investitionen für die linientechnische Anbindung an die nächst höhere Netzebene (Transmission Link Layer 0)¹⁶ sowie das für die Übertragung erforderliche Equipment berücksichtigen. Diese Investitionskomponente findet nur für die ökonomische Bewertung der Backhaul-Variante Berücksichtigung. Dieser Fokus wird in der Abbildung 5 durch die blau schattiert dargestellten Investitionskomponenten zum Ausdruck gebracht.

¹⁶ Hierbei wird als Strecke die Einstellung für das Backhaul verwendet.

2.6 Auswertungsblatt

Das Auswertungsblatt bietet die Möglichkeit der automatisierten Durchführung von 100 parallelen Modellrechnungen. Hierzu können die folgenden variablen Parameter je Einzel-Rechnung festgelegt werden:

- Anzahl Anschlüsse
- Abstand Gebäude
- Anschlüsse pro Gebäude
- Anzahl Faserverzweiger (4 für Standardfall und 2 bzw. 1 für Varianten)
- Zusätzlicher Abstand Faserverzweiger bis MPoP als Offset
- Anzahl MPoP (2 für Standardfall und 1 für Variante)
- Abstand passiver – aktiver MPoP (Backhaul-Länge)

Nach Durchführung der Berechnungen werden folgende Ergebnisse je Einzelrechnung ausgewiesen:

- Gesamtinvestitionen
- Investitionen bis Faserverzweiger (Verzweigerkabelsegment + Faserverzweiger)
- Gesamtinvestitionen pro Anschluss
- Investitionen bis Faserverzweiger pro Anschluss
- Investitionen pro Anschluss für Verzweigerkabelsegment
- Investitionen pro Anschluss für Faserverzweiger
- Investitionen pro Anschluss für Hauptkabelsegment
- Investitionen pro Anschluss für MPoP
- Investitionen pro Anschluss für Backhauling
- Maximale Kabellängen für Verzweigerkabelsegment, Hauptkabelsegment und Backhaul

3 Grundlegende Analysen der Investitionswertmodellierung (FTTH PtP)

In den grundlegenden Analysen werden die einzelnen Komponenten des Anschlussnetzes einzeln hinsichtlich ihrer Reaktion auf verschiedene Konstellationen bezüglich der Topologie des Anschlussbereichs betrachtet. Hierbei geht es vornehmlich um die Parameter gesteuerte Variation der Anzahl Anschlüsse, des Gebäudeabstands, der Gebäudegröße (ausgedrückt durch die Anzahl Anschlüsse pro Gebäude). Hierzu wurden abschnittsweise Fragen an das Modell gestellt, welche in den folgenden Unterkapiteln beleuchtet werden. Eingangs wird die Parametrisierung des jeweiligen Szenarios aufgeführt, wobei der variable Parameter *kursiv* dargestellt ist und später auf der X-Achse in der graphischen Ergebnisdarstellung des Modells ausgewiesen ist.

Die wesentlichen Parameter „Anzahl Anschlüsse“, „Anzahl Anschlüsse pro Gebäude“ und der „Gebäudeabstand“ haben einen wesentlichen Einfluss auf die Topologie eines Anschlussbereichs. Dabei spielt deren kombinatorische Betrachtung eine besondere Rolle:

Beispielsweise vergrößert sich die Erstreckung eines Anschlussbereichs, wenn bei konstanter Anzahl Anschlüsse pro Gebäude entweder die Anzahl Anschlüsse oder der Gebäudeabstand vergrößert werden. Bei Variation der Anzahl Anschlüsse bleibt aber die Anschlussdichte gleich, während bei Vergrößerung des Gebäudeabstands die Anschlussdichte und die Gebäudedichte sinkt.

Wird jedoch die Anzahl Anschlüsse und der Gebäudeabstand als konstant angenommen, so bewirkt eine Vergrößerung der Anzahl Anschlüsse pro Gebäude („Gebäudegröße“) eine Verkleinerung der Erstreckung des Verzweigerbereichs bei gleichzeitiger Erhöhung der Anschlussdichte, aber gleichbleibender Gebäudedichte. Die nachfolgende Tabelle 1 illustriert die im Modell verankerten Wirkungszusammenhänge der Modelleingangsparameter in Bezug auf die räumliche Erstreckung des Anschlussbereichs, die Anschlussdichte sowie die Gebäudedichte.

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Parametrisierung und Topologie

Parametrisierung			Auswirkung			Legende
Anschlüsse	Gebäudeabstand	Gebäudegröße	Erstreckung	Anschlussdichte	Gebäudedichte	
↑	-	-	↑	-	-	↑ Erhöhung
-	↑	-	↑	↓	↓	- Konstant
-	-	↑	↓	↑	-	↓ Reduktion

In den nachfolgenden Kapiteln werden nun abschnittsweise einzelne Fragen an das Modell gestellt. Hierzu wird das Modell entsprechend parametrisiert, wobei immer nur ein

Parameter variiert wird, während die übrigen Parameter konstant gehalten werden. Dies ist in der folgenden Tabelle schematisch dargestellt.

Tabelle 2: Parametrisierung für Fragestellungen

	Parametrisierung				
	Anschlüsse	Gebäude- abstand	Gebäude- größe	Zusammen- legung	Kabellänge
VZK	↑	-	-	-	-
	-	↑	-	-	-
	-	-	↑	-	-
FVZ	↑	-	-	-	-
HK	↑	-	-	-	-
	-	-	-	-	HK ↑
MPoP/BH	↑	-	-	-	-
	-	-	-	MPoP	-
	-	-	-	-	BH ↑

Legende: HK-Hauptkabelsegment, BH-Backhaul

3.1 Verzweigerkabelsegment (VZK)

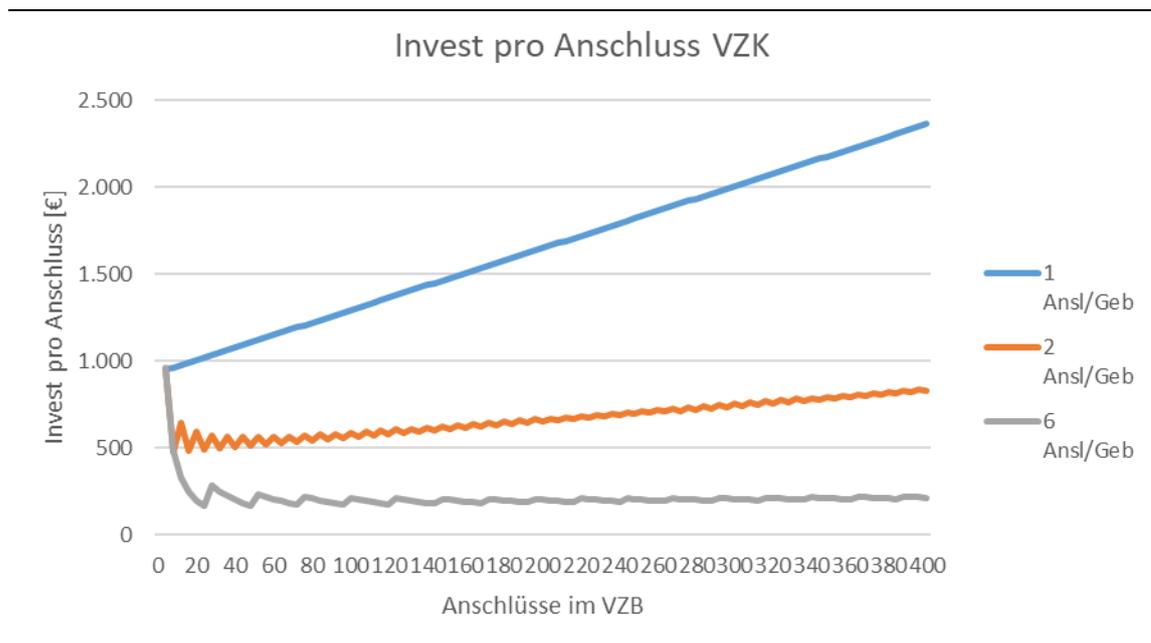
3.1.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?

Die ansteigende Anzahl Anschlüsse bei konstantem Gebäudeabstand und konstanter Anzahl Anschlüsse pro Gebäude bewirkt eine Ausdehnung der Erstreckung des Verzweigerbereichs.

Parametrisierung:

- 15m Gebäudeabstand
- X Anschlüsse pro Gebäude
 - 1 Anschluss pro Gebäude
 - 2 Anschlüsse pro Gebäude
 - 6 Anschlüsse pro Gebäude
- 4 bis 400 Anschlüsse

Abbildung 6: Invest pro Anschluss Verzweigerkabelsegment mit steigender Anschlusszahl

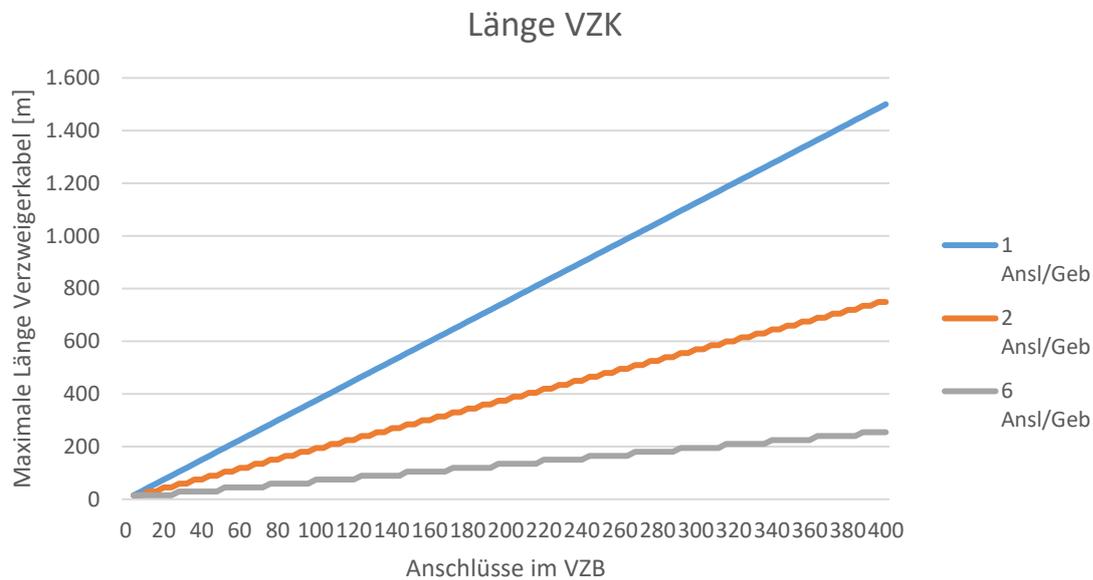


Quelle: WIK

Es ergibt sich für den Fall „ein Anschluss pro Gebäude“ (blaue Kurve) ein stetiger, nahezu linearer Anstieg. Mit steigender Anzahl Anschlüsse steigen auch die Investitionen pro Anschluss. Für die Fälle mit einer größeren Anzahl Anschlüsse pro Gebäude ergeben sich nach einem zunächst stark abfallenden Kurvenverlauf wieder ein nahezu stetiger und linearer Verlauf mit steigenden Investitionen pro Anschluss mit zunehmender Anzahl Anschlüsse im Verzweigerbereich. Aus der Kurvenschar wird ersichtlich, dass mit

steigender Anzahl Anschlüsse pro Gebäude der Kurvenverlauf weiter mit der Anzahl Anschlüsse im VZB ansteigt, aber diese Steigung insgesamt geringer wird.

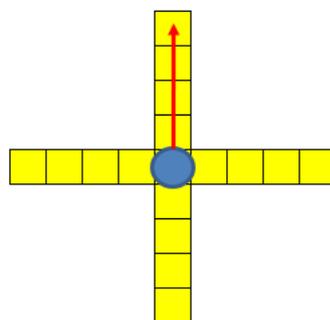
Abbildung 7: Erstreckung des Verzweigerbereichs mit steigender Anschlusszahl



Quelle: WIK

Abbildung 7 zeigt die maximale Länge des Verzweigerkabels und damit die Erstreckung des Verzweigerbereichs mit steigender Anzahl Anschlüsse für die 3 untersuchten Fälle mit einem, zwei und sechs Anschlüssen pro Gebäude. Die nachfolgende Abbildung 8 illustriert durch den roten Pfeil, dass bei sonst konstanten Eingangsparametern (Gebäudeabstand und Anzahl Anschlüsse pro Gebäude) die Trassenlänge im Verzweigerbereich steigt (und damit auch im gesamten ASB).

Abbildung 8: Ausdehnung des Verzweigerbereichs bei steigender Anschlusszahl (ceteris paribus)



Quelle: WIK

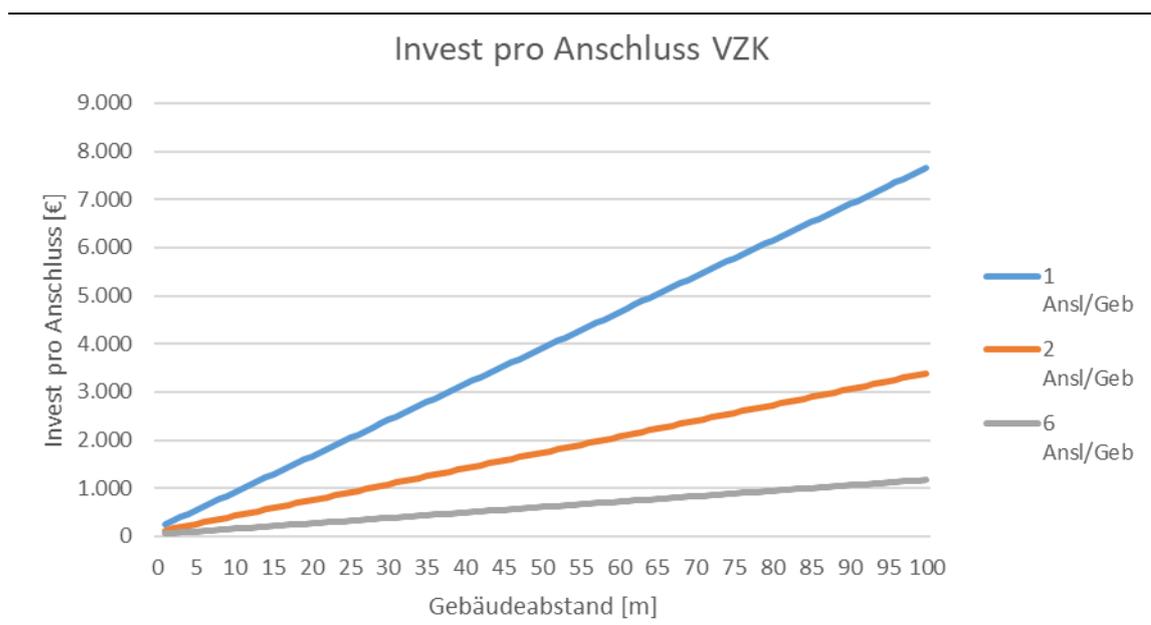
3.1.2 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigendem Gebäudeabstand?

Der ansteigende Gebäudeabstand bei konstanter Anzahl Anschlüsse und konstanter Anzahl Anschlüsse pro Gebäude bewirkt eine Ausdehnung der Erstreckung des Verzweigerbereichs bei gleichzeitiger Verringerung von Anschluss- und Gebäudedichte.

Parametrisierung:

- X Anschlüsse pro Gebäude
 - 1 Anschluss pro Gebäude
 - 2 Anschlüsse pro Gebäude
 - 6 Anschlüsse pro Gebäude
- 100 Anschlüsse
- 1-100 Meter Gebäudeabstand

Abbildung 9: Invest pro Anschluss Verzweigerkabel bei steigendem Gebäudeabstand



Quelle: WIK

Es ergibt sich stets ein stetiger, nahezu linearer Anstieg. Mit steigendem Gebäudeabstand steigen auch die Investitionen pro Anschluss. Für die Fälle mit mehreren Anschlüssen pro Gebäude ergibt sich ein Kurvenverlauf mit geringerer Steigung.

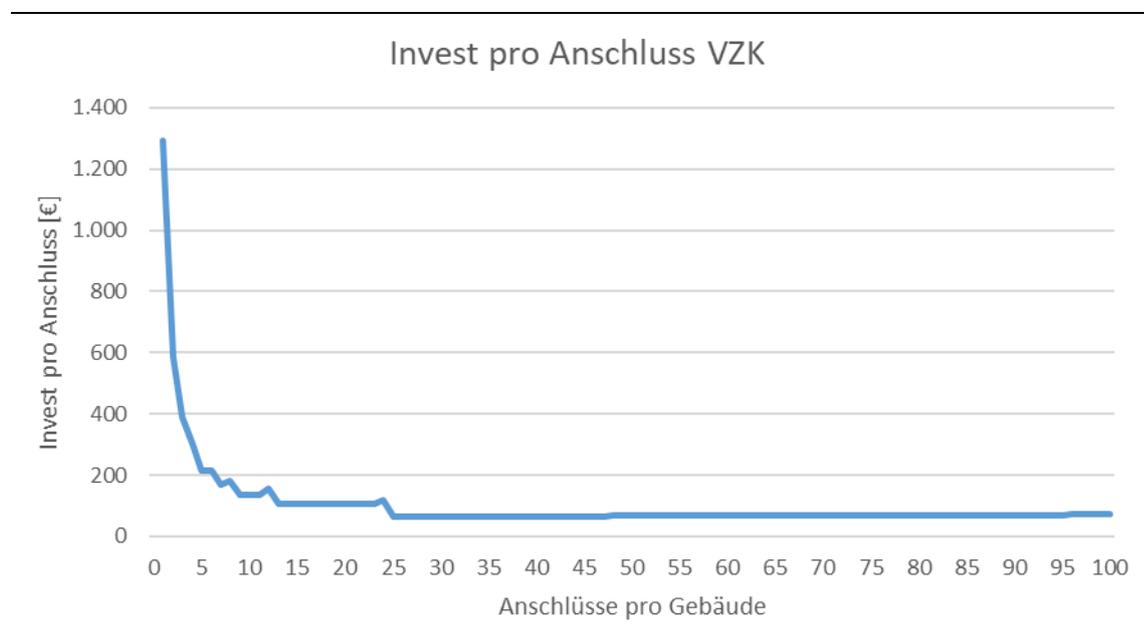
3.1.3 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Gebäudegröße?

Die ansteigende Gebäudegröße bei konstanter Anzahl Anschlüsse und konstantem Gebäudeabstand bewirkt eine Erhöhung Anschlussdichte.

Parametrisierung:

- 100 Anschlüsse
- Gebäudeabstand 15m
- *1-100 Anschlüsse pro Gebäude*

Abbildung 10: Investitionen pro Anschluss Verzweigerkabel über Anschlüsse pro Gebäude



Quelle: WIK

Wie zu erwarten, zeigt sich bei der Analyse der Investitionen pro Anschluss bei steigender Anzahl von Anschlüssen pro Gebäude eine starke Degression bis etwa 25 Anschlüsse pro Gebäude. Obwohl in diesem Szenario die (konstante Anzahl) Anschlüsse auch über die 25 hinaus stetig auf weniger Gebäude zusammengeführt werden, ist danach nahezu keine weitere Veränderung beobachtbar.¹⁷ Es kommt zu einem leichten Anstieg der Investitionen pro Anschluss.

Weitere Reaktionen der Investitionen pro Anschluss auf die Gebäudegröße sind in den beiden vorangegangenen Kapitel durch die jeweiligen Kurvenscharen dargestellt.

¹⁷ Im Randszenario sind sämtliche 100 Anschlüsse in einem Gebäude angesiedelt.

3.2 Faserverzweiger (FVZ)

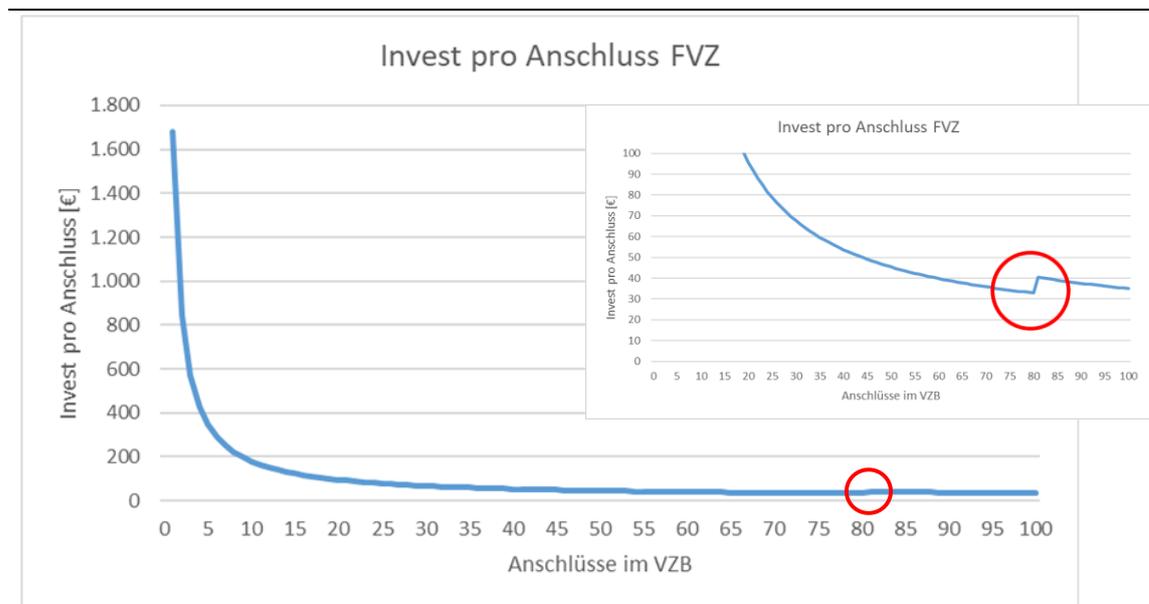
3.2.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?

Die ansteigende Anzahl Anschlüsse bewirkt eine ansteigende Belegung der Faserverzweiger bis zu den Punkten, an denen am gleichen Standort ein zusätzlicher Faserverzweiger bzw. ein größerer Faserverzweiger benötigt wird.

Parametrisierung:

- 15m Gebäudeabstand
- 1 Anschluss pro Gebäude
- 1 bis 100 Anschlüsse

Abbildung 11: Investitionen pro Anschluss Faserverzweiger über Anschlüsse



Quelle: WIK

Bis etwa 25 Anschlüsse sind stark fallende Investitionen pro Anschluss beobachtbar. danach ist ein nahezu konstanter Verlauf mit leicht abfallender Tendenz zu beobachten.

In dem hier gewählten Beispiel hat der kleinere Faserverzweiger eine Kapazität von 80 Anschlüssen. Für höhere Anschlusszahlen kommt danach der größere Faserverzweiger zum Einsatz, dessen Kosten – bezogen auf die Anzahl Anschlüsse – subadditiv ist. Dies hat zur Folge, dass in der Abbildung 11 der Fixkostensprung kaum merklich ist. Erst die Vergrößerung zeigt die ab dem 81sten Anschluss einen Sägezahn aufgrund der sprungfixen Kosten.

3.3 Hauptkabelsegment (HK)

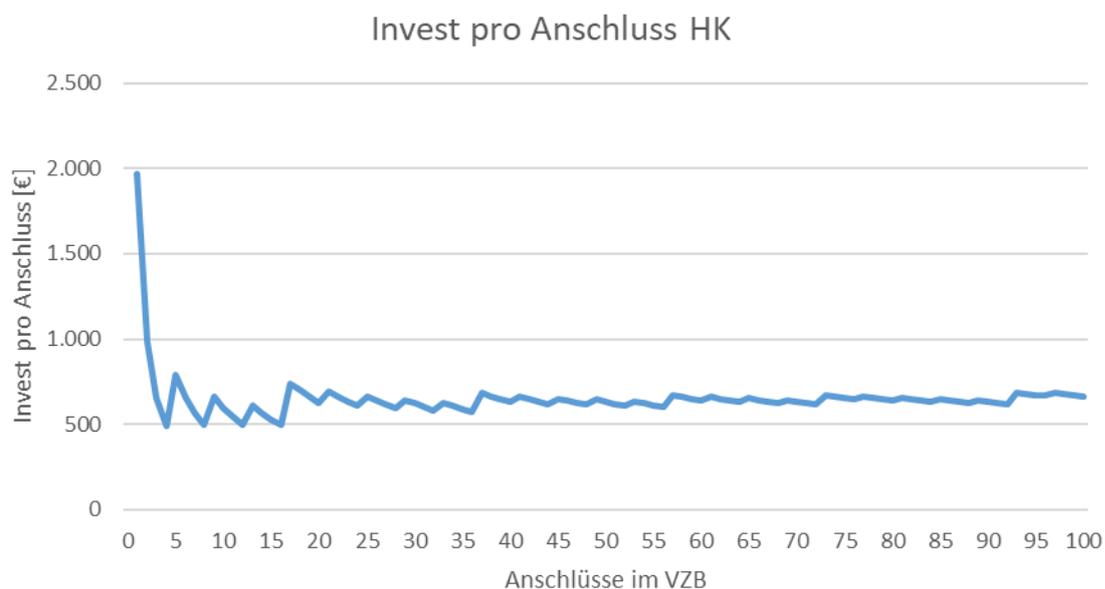
3.3.1 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?

Die ansteigende Anzahl Anschlüsse bewirkt eine Ausdehnung der Erstreckung des Verzweigerbereichs und auch des Anschlussbereichs.

Parametrisierung:

- 15m Gebäudeabstand
- 1 Anschluss pro Gebäude
- 1 bis 100 Anschlüsse

Abbildung 12: Invest pro Anschluss Hauptkabelsegment mit steigender Anschlusszahl



Quelle: WIK

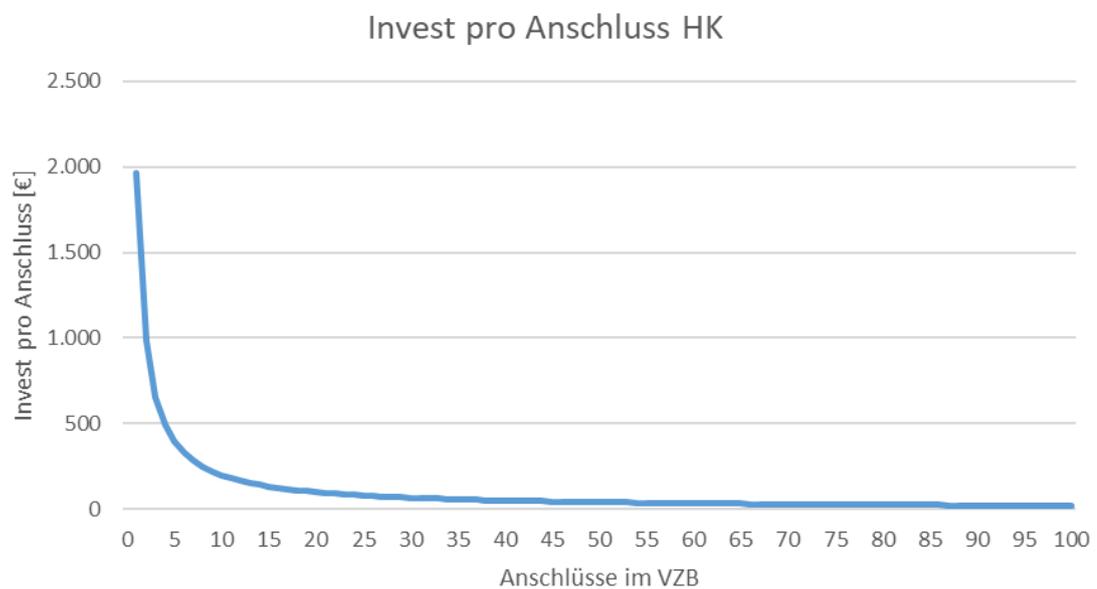
Die bei dieser Analyse beobachtbaren Zusammenhänge zeigen zu Anfang stärkere Sprünge auf. Um den Verlauf zu erklären, sind folgende Aspekte zu nennen:

- Mit zunehmender Anzahl Anschlüsse kommt es in Intervallen – nach Maßgabe der Konfektionierung der Kabel – zu höheren, sprungfixen Investitionen.
- Graben- und Schachtinvestitionen unterliegen in dem von uns betrachteten Spektrum keinen inkrementellen Kosten bei der Ausweitung der Anschlusszahl (keine Erhöhung).
- Der in der Abbildung 12 dargestellte sägezahnförmige Verlauf ist der räumlichen Ausweitung des Anschlussbereichs geschuldet, der die Investitionen in Kabel,

Muffen, Trassen und Schächte längenabhängig erhöht. – Hier ist anzumerken, dass aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes und dem damit einhergehenden Verzicht auf eine gemeinsame HK-Trassennutzung für die FVz-Anbindungen, hier die Sägezähne relativ stark ins Gewicht fallen.

Eliminiert man den modellimmanenten Effekt der Ausweitung der regionalen Erstreckung des Anschlussbereichs und fixiert diesen, stellen sich die Zusammenhänge für die Hauptkabelsegment-Investitionen wie folgt dar:

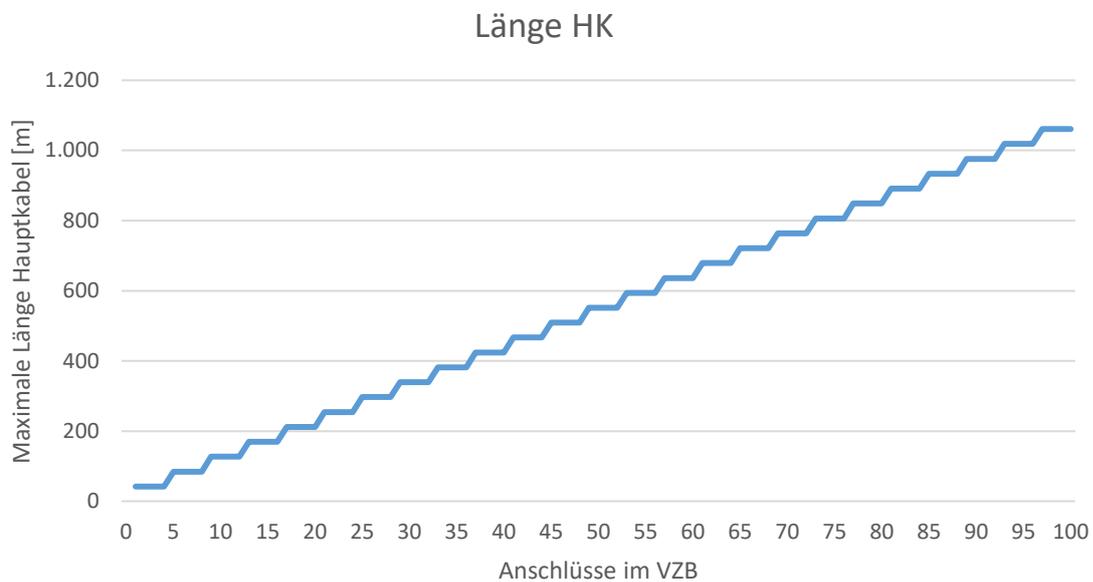
Abbildung 13: Invest pro Anschluss Hauptkabelsegment mit steigender Anschlusszahl konstanter räumlicher Erstreckung des Anschlussbereichs



Quelle: WIK

Diese Abbildung 13 stellt den gleichen Sachverhalt dar, wie die vorangegangene Abbildung. Hier wird aber dadurch, dass zusammen mit der Anzahl Anschlüsse auch die Anzahl der Anschlüsse pro Gebäude variiert werden, der Effekt der Vergrößerung der Erstreckung des Anschlussbereichs eliminiert. Der Kurvenverlauf wird dadurch geglättet und verläuft auch stetig fallend. Der Anstieg nach Erreichen eines Optimums in der vorangegangenen Abbildung ist also auf die Ausdehnung des Anschlussbereichs zurück zu führen.

Abbildung 14: Steigende Hauptkabellänge mit zunehmender Anschlusszahl



Quelle: WIK

Abbildung 14 zeigt die maximale Länge des Hauptkabels. Der treppenförmige Verlauf wird hier durch Aufblähung der Verzweigerbereiche ausgelöst, die sich infolge der steigenden Anschlusszahl ergibt. Da diesem Szenario 1 Anschluss pro Gebäude zugrunde liegt und in 4 Himmelsrichtungen ausgebaut wird, entstehen die Treppenstufen in 4er-Intervallen.

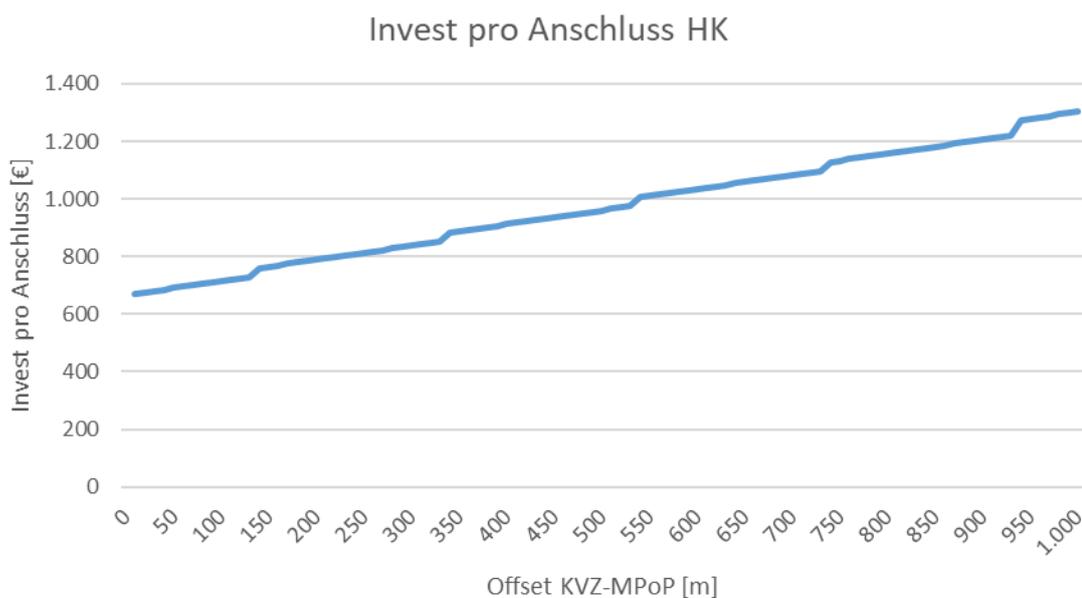
3.3.2 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Hauptkabellänge (Offset)?

Mit dem Eingangsparameter „Offset“ kann der Abstand der Faserverzweiger zum MPoP durch Angabe einer zusätzlichen Distanz [m] erhöht werden.¹⁸ Die simulierte Vergrößerung des Abstands zwischen Faserverzweiger und MPoP schlägt sich in der Anbindung aller Faserverzweiger nieder und bewirkt eine ansteigende Hauptkabellänge.

Parametrisierung:

- 15m Gebäudeabstand
- 1 Anschluss pro Gebäude
- 100 Anschlüsse
- *FVZ-MPoP Offset 10 bis 1000m*

Abbildung 15: Investitionen pro Anschluss Hauptkabel über Abstand FVZ-MPoP



Quelle: WIK

Wie zu erwarten, führt die exogene Verlängerung des HK-Segments mit zunehmender Distanz stetig zu steigenden (längenabhängigen) Investitionen pro Anschluss. Die Sprünge entstehen, wenn jeweils längenbedingt zusätzliche Schächte und Muffen benötigt werden, wobei letztere weniger stark ins Gewicht fallen.

¹⁸ Zusätzliche Länge, welche zur durch das Modell berechneten Hauptkabellänge addiert wird.

3.4 Hauptverteiler (MPoP)

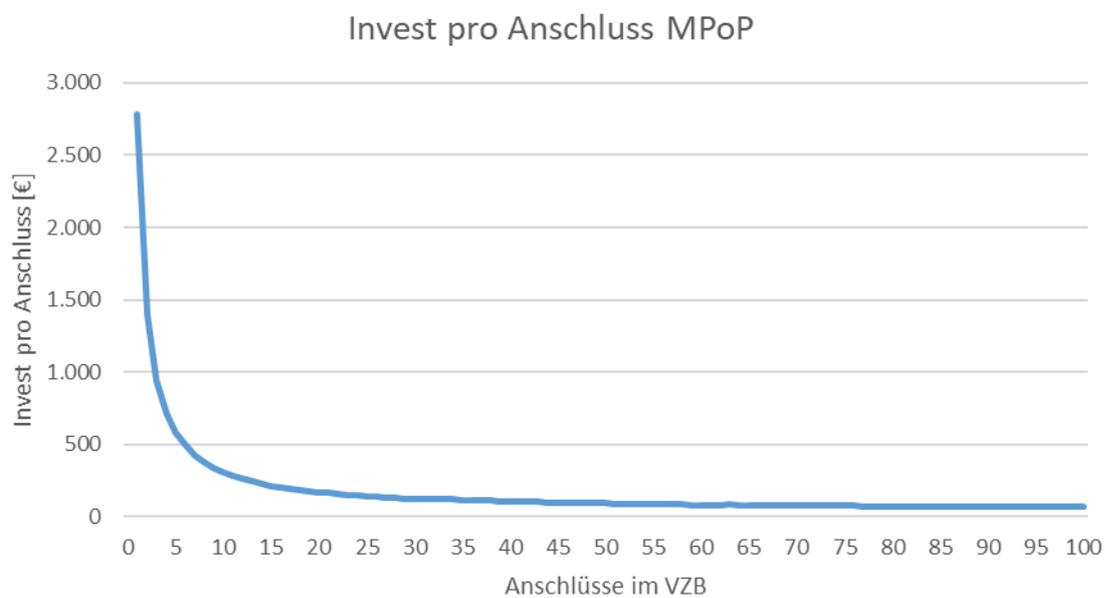
Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Anzahl Anschlüsse?

Die ansteigende Anzahl Anschlüsse bewirkt eine ansteigende Belegung des MPoP.

Parametrisierung:

- 1 bis 100 Anschlüsse

Abbildung 16: Investitionen pro Anschluss MPoP über Anschlüsse



Quelle: WIK

Zu Anfang ergibt sich eine deutliche Reduktion der Investitionen pro Anschluss. Hier ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Anzahl von 60 Anschlüssen im VZB mit 320 Anschlüssen im Anschlussbereich (und damit am MPoP) korrespondiert. Ab etwa 60 Anschlüssen im VZB haben sich die Investitionen pro Anschluss nahezu linearisiert.

3.5 Backhaul

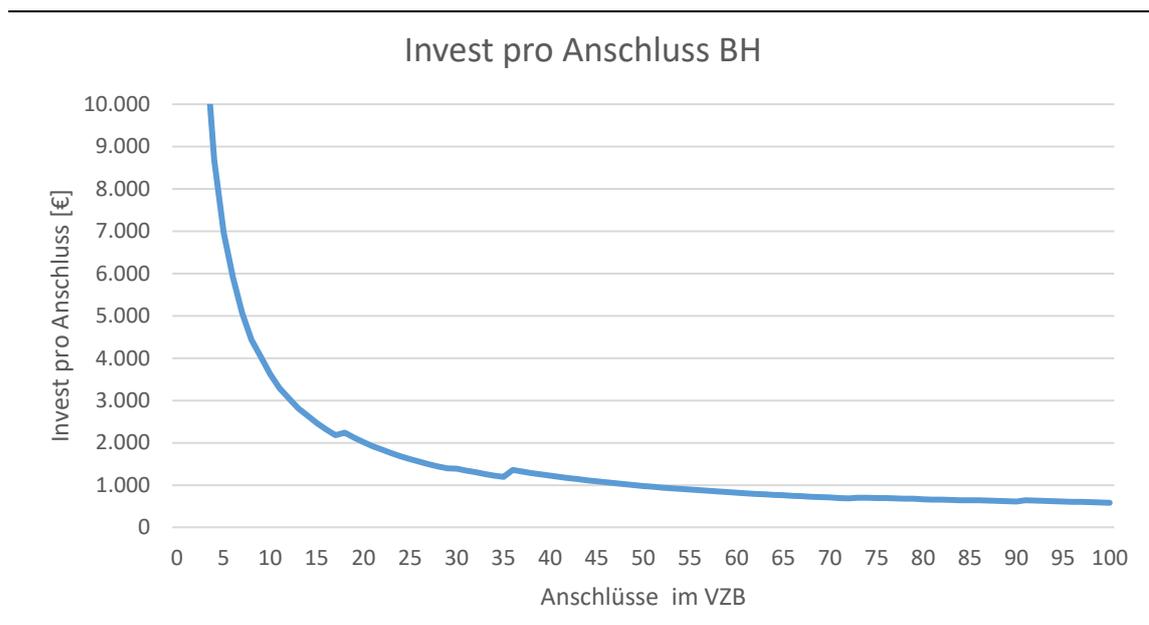
3.5.1 Wie verändern sich die Investitionen bei Zusammenlegung von Verteilerstandorten?

Die ansteigende Anzahl Anschlüsse bewirkt eine entsprechend ansteigende Belegung des MPoP. Diese Untersuchung erfolgt für den Basisfall (der Anschlussbereich wird durch einen eigenen MPoP versorgt), sowie die Variante, dass dieser MPoP deaktiviert wird und die Anschlüsse des gesamten Anschlussbereichs über eine Backhaul-Verbindung zu einem benachbarten, aktiven MPoP angebunden werden.

Parametrisierung:

- 1 bis 100 Anschlüsse
- 10 km Backhaul-Länge

Abbildung 17: Backhaul-Invest pro Anschluss mit steigender Anschlusszahl



Quelle: WIK

Durch die Auflösung eines MPoP-Standorts (und Anbindung der Anschlüsse an einen benachbarten ASB) und gegebener Backhaul-Länge greifen relevante Kostendegressionen mit steigender Anzahl Anschlüsse. Allerdings sind auch hier leichte sprungfixe Kosten zu erkennen, die sich dem Bedarf an höheren Faserzahlen sowie den daraus abgeleiteten Kapazitätsbedarfen für Muffen, Rohre, Schächte und Gräben ergeben.¹⁹

¹⁹ Bei den von uns gewählten Parameterkonstellationen kommt hier im Wesentlichen nur der Kabel- und Muffeninvest zum Tragen.

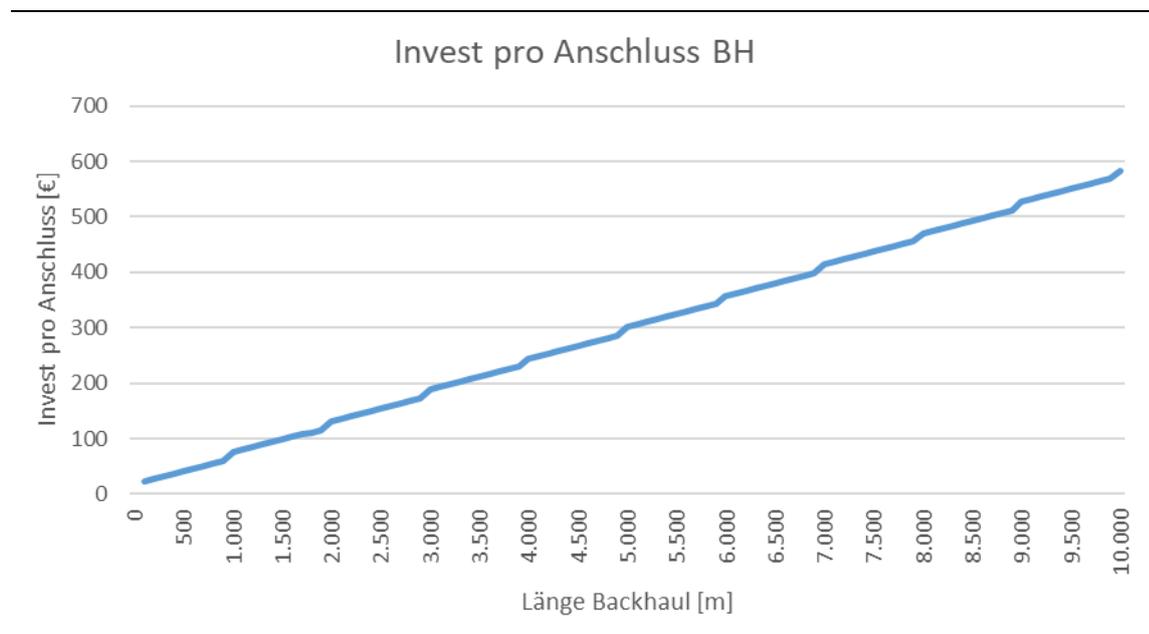
3.5.2 Wie verhalten sich die Investitionen mit steigender Backhaul-Länge?

Die simulierte Vergrößerung des Abstands zwischen deaktiviertem und aktivem MPoP bewirkt eine ansteigende Backhaul-Länge.

Parametrisierung:

- 100 Anschlüsse
- *Backhaul-Länge 100-10000m*

Abbildung 18: Backhaul-Invest pro Anschluss mit steigender Backhaul-Länge



Quelle: WIK

Backhaul-Investitionen steigen nahezu linear mit der Länge. Die kleinen Sprünge entstehen, wenn jeweils längenbedingt zusätzliche Schächte benötigt werden. Mit jedem zusätzlichen Kilometer Backhaul-Länge steigen die Investitionen pro Anschluss für das Backhaulsegment um etwa 80%.

4 Übergreifende Analysen der Investitionswertmodellierung (FTTH PtP)

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Wirkungen der Variation in der Parametrisierung isoliert für die einzelnen Abschnitte untersucht wurden, werden nachfolgend Zusammenhänge auf Ebene des Anschlussbereichs betrachtet und nicht nur isolierte Auswirkungen analysiert.

Die Analyse setzt dazu auf Szenarien auf, die sich grob in drei Kategorien unterteilen lassen:

- (1) Analyse von Variationen der Anschlussdichte bei veränderter und gleichbleibender räumlicher Erstreckung anhand ausgewählter Szenarien
- (2) Skalierung von Anschlüssen und Gebäuden mit steigender räumlicher Erstreckung
- (3) Analyse der Auflösung von MPoP und ökonomische Rationalität der Anbindung der Anschlüsse an einen benachbarten Standort

4.1 Variationen der Anschlussdichte bei veränderter und gleichbleibender räumlicher Erstreckung – Beschreibung der ausgewählten Szenarien

Wie im Abschnitt Modellbeschreibung dargestellt, wird der Referenz-Anschlussbereich anhand der Parameter Anzahl Anschlüsse pro Referenz-VZB, Anzahl Anschlüsse pro Gebäude und durchschnittlicher Gebäudeabstand beschrieben. Damit ist dem Modell inhärent, dass mit steigender Anschlusszahl auch die räumliche Erstreckung steigt.

Um diesen Effekt kontrollieren zu können, wurden nachfolgende Szenarien definiert, die es erlauben, die Veränderungen der berechneten Investitionen pro Anschluss mit der räumlichen Erstreckung in Beziehung zu setzen.

Hierzu werden im drei verschiedene Anschlusszahlen betrachtet:

- geringe Anzahl Anschlüsse im Anschlussbereich:
800 (50 Anschlüsse pro Referenz-ASB) ,
- mittlere Anzahl Anschlüsse im Anschlussbereich:
2400 (150 Anschlüsse pro Referenz-ASB) und
- hohe Anzahl Anschlüsse im Anschlussbereich:
32.000 (160 Anschlüsse pro Referenz-ASB)

In der nachfolgenden tabellarischen Übersicht sind aus Gründen der Übersichtlichkeit die Szenarien in Abhängigkeit der Höhe der Anschlusszahl farblich einheitlich gekennzeichnet (rötlich = hoch, gelb = mittel, grün = gering).

In Tabelle 3 sind 9 Szenarien dargestellt, die zu drei Tripeln zusammengefasst sind (die jeweils die drei Konstellationen von Anschlusszahlen, dargestellt durch die Farben rot, gelb, grün enthalten) . Der Aufbau lässt sich folgendermaßen erklären:

- Jedes Triple (von links nach rechts) basiert auf derselben (einheitlichen) räumlichen Erstreckung (demselben Gebäudeabstand).
- Von Triple zu Triple erhöht sich die räumliche Erstreckung (parametrisch gesteuert über einen erhöhten Gebäudeabstand).

Der Gebäudeabstand wird ausgehend vom ersten Triple einmal verdoppelt und im zweiten Schritt verzehnfacht.

Ein Vergleich für eine gegebene Anzahl Anschlüsse ist somit von links nach rechts möglich und lässt eine Analyse der Investitionen bei Reduktion der Anschlussdichte zu (Betrachtung der Szenarien jeweils nur für die rötlichen, gelben oder grünen Szenarien)

Hierauf aufbauend wird für diese 3 Szenarien der Gebäudeabstand einmal verdoppelt und einmal verzehnfacht.

Tabelle 3: Parametrisierung für Analyse Investitionsanteile (Skalierung der ASB-Erstreckung)

# Anschlüsse (ASB)	32.000	2.400	800	32.000	2.400	800	32.000	2.400	800
# Anschlüsse (Referenz-VZB)	2.000	150	50	2.000	150	50	2.000	150	50
Gebäudeabstand	25	25	25	50	50	50	250	250	250
#Anschlüsse/Gebäude	40	3	1	40	3	1	40	3	1
Erstreckung (Radius) [m]	1.244	1.244	1.244	2.488	2.488	2.488	12.442	12.442	12.442
Szenario	F1-H_X1	F1-M_X1	F1-G_X1	F1-H_X2	F1-M_X2	F1-G_X2	F1-H_X10	F1-M_X10	F1-G_X10

Legende: Fall-Anschlusszahl-Gebäudeabstand

In dem zweiten Set von Szenario- Analysen wird die räumliche Erstreckung des Anschlussbereichs konstant gehalten und die Gebäude- bzw. Anschlussdichte variiert. Hierzu wird, aufbauend auf den drei Basisszenarien (erstes Tripel aus Tabelle 3)²⁰ die Anzahl der Gebäude reduziert. In der Parametrisierung erfolgt dies durch eine Vergrößerung der Anschlüsse pro Gebäude bei gleichzeitiger Vergrößerung des Gebäude-

²⁰ Die jeweils erste Konstellation ist mit der Untersuchung von Fall 1 identisch. Die jeweils zweite und dritte Beobachtung aus den Tripeln bestätigt die Zusammenhänge auch für die geringeren Anschlusszahlen von 150 und 50 pro VZB.

abstands. Die Varianten und zugehörigen Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Parametrisierung für Analyse Investitionsanteile (unveränderte ASB Erstreckung bei Variation der Anschluss und Gebäudedichte)

# Anschlüsse (ASB)	32.000	32.000	32.000	2.400	2.400	2.400	800	800	800
# Anschlüsse (Referenz-VZB)	2.000	2.000	2.000	150	150	150	50	50	50
Gebäudeabstand	25	46	81	25	46	81	25	46	81
#Anschlüsse/Gebäude	40	80	160	3	6	12	1	2	4
Erstreckung (Radius) [m]	~1.240	~1.241	~1.242	~1.240	~1.241	~1.242	~1.240	~1.241	~1.242
Szenario	F2-H-H	F2-H-M	F2-H_G	F2-M-H	F2-M-M	F2-M_G	F2-G-H	F2-G-M	F2-G_G

Legende: Fall-Anschlusszahl-Gebäudeabstand

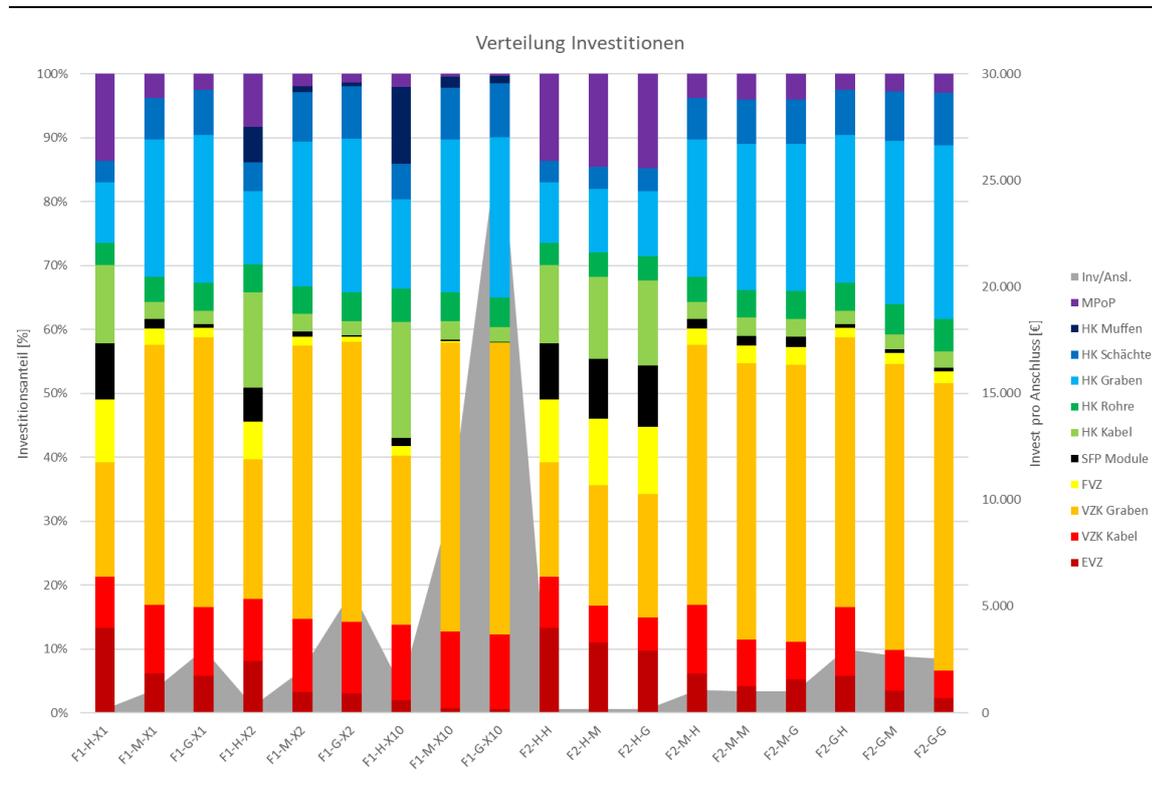
4.2 Investitionsstrukturen der ausgewählten Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Investitionsanteile der einzelnen Segmente im Anschlussnetz in verschiedenen Szenarien verglichen.

4.2.1 Investitionsanteile

Die Abbildung 19 stellt die zuvor parametrisierten Szenarien auf der X-Achse dar. Die farbigen Säulen repräsentieren hierbei die Verteilung der Investitionsanteile auf die unterschiedlichen Segmente. Die graue Kurve im Hintergrund zeigt die Investitionen pro Anschluss des jeweiligen Szenarios.

Abbildung 19: Investitionsanteile und Investitionen pro Anschluss



Quelle: WIK

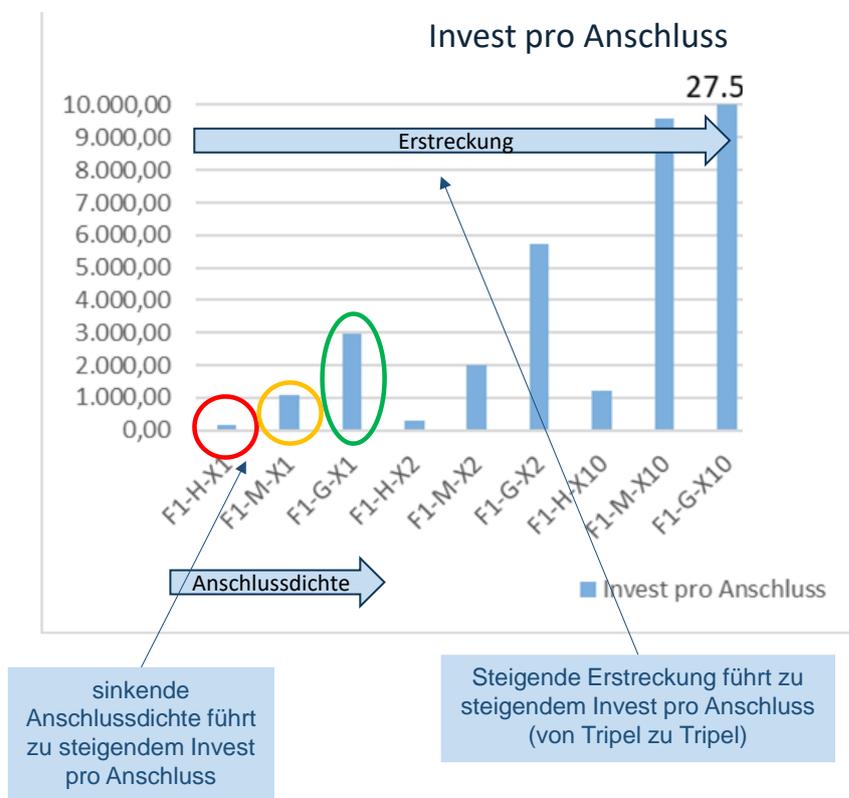
Zu dem Gewicht der einzelnen Komponenten lässt sich folgendes festhalten: Die Investitionen werden dominiert von den Tiefbauinvestitionen bestehend aus Kabeln, Gräben, Rohre, Schächte und Muffen, besonders in den Szenarien mit hohen Investitionen pro Anschluss.

Durch die gleichzeitige Darstellung von Investitionsanteilen und absoluten Investitionen pro Anschluss wird deutlich, dass die Positionen für SFP-Module, FVZ und MPoP relativ umso vernachlässigbarer werden je höher die Gesamtinvestitionen ausfallen: Sie spielen eine vernachlässigbare Rolle und fallen lediglich bei Szenarien mit geringen Investitionen pro Anschluss ins Gewicht, da diese Szenarien auch eine sehr hohe Anzahl Anschlüsse repräsentieren und ebendiese Investitionen nahezu direkt proportional zu den Anschlüssen sind.

4.2.2 Investitionen pro Anschluss

Um Aussagen über die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Auslegung eines FTTH PtP Anschlussbereichs treffen zu können, wird im weiteren Verlauf auf die Investitionen pro Anschluss zurückgegriffen.

Abbildung 20: Skalierung ASB-Erstreckung durch Erhöhung des Gebäudeabstands



Quelle: WIK

Der Vergleich der Szenarien miteinander führt zu der Erkenntnis, dass eine Verringerung der Anschluss-Dichte – in der Grafik dargestellt durch die Änderung von grün auf gelb auf rot – genauso wie eine Vergrößerung der Erstreckung (abgebildet durch den Pfeil im linken oberen Teil der Abbildung) zu einem deutlichen Anstieg der Investitionen pro Anschluss führt (Fälle 1 siehe Tabelle 3).

Die Auswirkungen der räumlichen Erstreckung auf die Investitionen pro Anschluss im letzten Szenario mit nur 800 Anschlüssen im Verzweigerbereich führen mit 27,5Tsd. Euro zu knapp dem dreifachen Investitionswert gegenüber dem Szenario links zuvor (F1-M-X10). Treiber ist hier eine Verfünffachung der räumlichen Erstreckung. Bei der grafischen Darstellung wurde die Balkenhöhe hier bei 10.000,00 abgeschnitten und stattdessen der numerische Betrag angegeben.

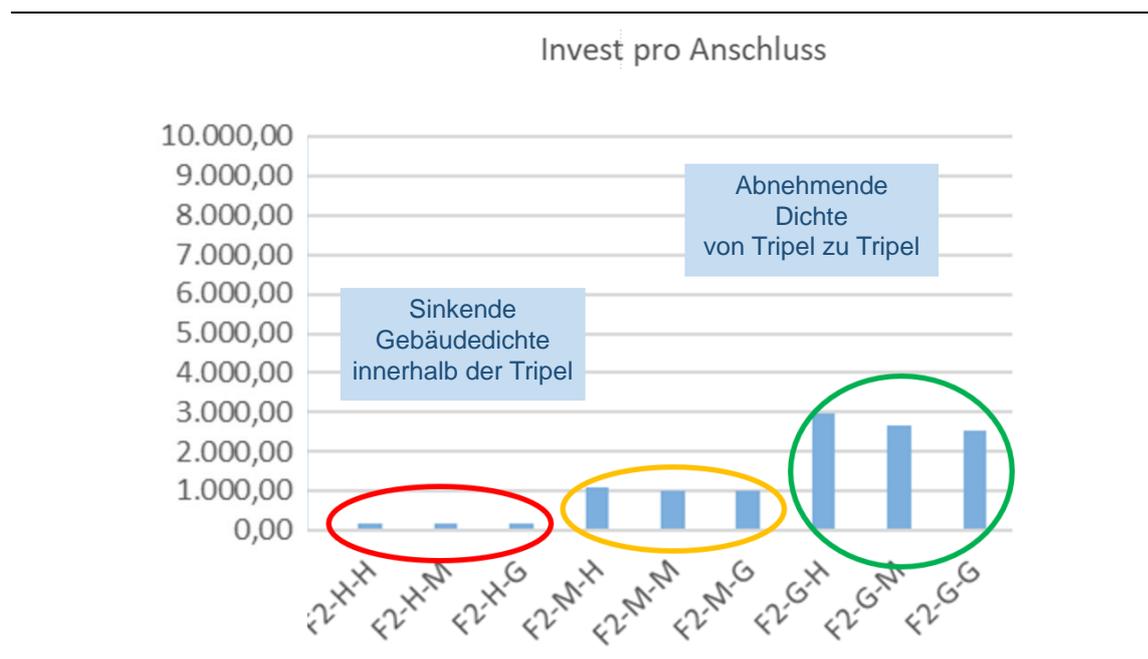
In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Parameterkonstellationen aus Tabelle 4 dargestellt. Über alle neun Szenarien ist die räumliche Erstreckung unverändert.

Innerhalb der Triple nimmt der Gebäudeabstand von links nach rechts zu. Da die Anzahl Anschlüsse im ASB konstant bleibt, wird der zunehmende Gebäudeabstand (abnehmende Gebäudedichte) durch eine steigende Anzahl von Anschlüssen pro Gebäude kompensiert.

Die strukturellen Ergebnisse lassen sich wie folgt beschreiben: Innerhalb der farblich gekennzeichneten Ellipsen sind leicht fallende Investitionen pro Anschluss beobachtbar, die durch die steigende Konzentration von Anschlüssen auf weniger Gebäude ausgelöst wird. (Am deutlichsten ist dies im dritten Tripel bei geringer Anschlusszahl im ASB zu erkennen.)

Die Veränderung zwischen den 3 Ellipsen in der Abbildung ist vergleichbar mit der Analyse in Fall 1 Tabelle 3 innerhalb der Triple, *Analyse der Investitionen bei Skalierung der Anschlusszahlen (Ventil bei gleichbleibender Erstreckung ist die steigende Anzahl Anschlüsse pro Gebäude)*. Von links nach rechts steigt das Niveau der Investitionen pro Anschluss, was durch die von links nach rechts sinkende Anschlusszahl im ASB zurückzuführen ist (von 32.000 Anschlüsse ganz links, auf 2.400 Anschlüsse in der Mitte sowie 800 Anschlüsse rechts).

Abbildung 21: Änderung von Anschluss- u. Gebäudedichte bei unveränderter räumlicher Erstreckung des ASB



Quelle: WIK

4.2.3 Erklärungsansätze für die beobachteten Phänomene

4.2.3.1 Sende- und Empfangseinrichtungen

Die Bedeutung der Investitionen in Sende- und Empfangseinrichtungen (SFP-Module) ist eher vernachlässigbar, der Investitionsanteil der SFP-Module liegt, je nach Szenario, zwischen 0,1% und etwa 10%. Je höher die Anschlussdichte, umso höher auch der Anteil der Investitionen bei den SFP-Modulen. Aufgrund der in diesen Fällen eher geringen

Investitionen pro Anschluss, kommt diesen bei unseren Untersuchungen dennoch keine besondere Bedeutung zu.

4.2.3.2 Investitionsanteile FVZ und MPoP

Die Investitionsanteile für FVZ und MPoP sind lediglich bei den Szenarien mit hoher Anschlussdichte von signifikanter Größe. Allerdings gilt hier die gleiche Feststellung wie bei den SFP-Modulen: In diesen Fällen sind die Investitionen pro Anschluss insgesamt gering und damit auch die absoluten, auf FVZ und MPoP entfallenden Investitionen pro Anschluss.

4.2.3.3 Anschluss- und Gebäudedichte

Mit sinkender Anschlussdichte steigen die Investitionen pro Anschluss (siehe „F1“, erste drei Fälle). Darüber hinaus führt bei unveränderter Anschlussdichte eine sinkende Gebäudedichte erwartungsgemäß zu weiterer Investitionsdegressionen: Auf je weniger Gebäude sich die Anschlüsse verteilen, desto geringer die Investitionen pro Anschluss.

Zum Beispiel bei Einfamilienhaussiedlungen (Gebiete mit geringen Anschlussdichten und mit hohen Gebäudedichten) sind aus ökonomischen Gründen die Verzweigerbereiche eher klein auszulegen, um die mit steigender Gebäudeanzahl steigenden längenabhängigen Investitionen im Verzweigerbereich (VZB) gering zu halten.

4.2.3.4 Investitionsanteile Tiefbau

In allen Szenarien werden die Investitionsanteile dominiert von den Tiefbauinvestitionen, insbesondere den Grabeninvestitionen in den Szenarien mit eher geringeren Anschlussdichten. Die VZB-Grabeninvestitionen liegen dabei noch einmal deutlich über denen des Hauptkabelsegments (HK).²¹

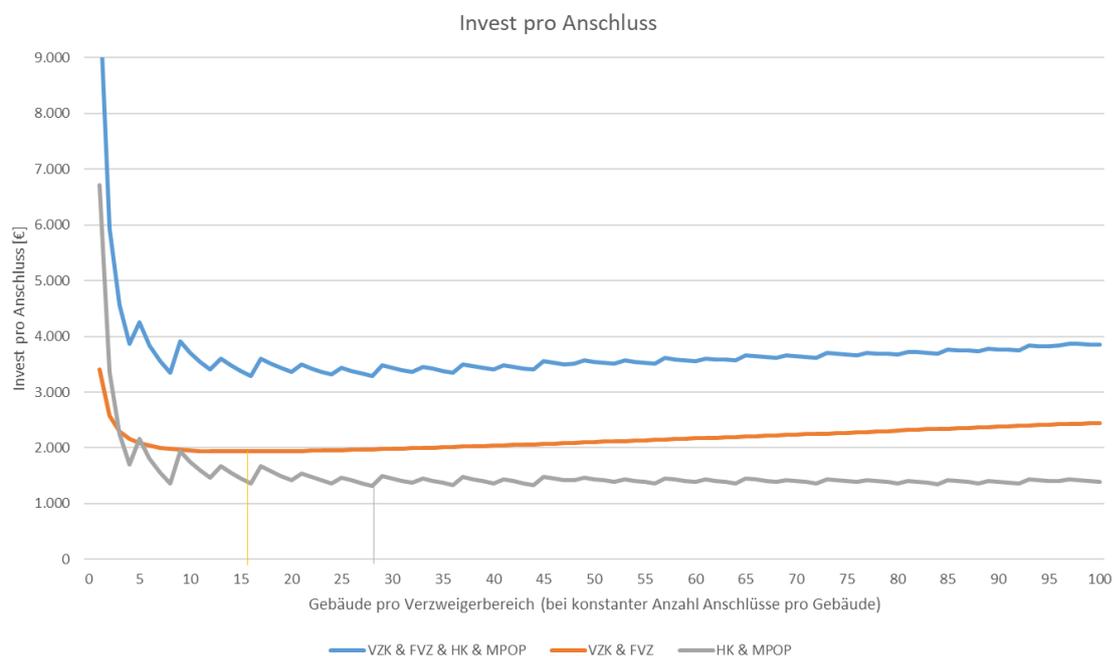
Die Trasseninvestitionen von VZB und HK verhalten sich ähnlich bei Veränderung der Anschlussdichte. Die Feststellung aus der technischen Analyse, dass die regionale Erstreckung der Anschlusslinie (hier im VZB) kaum Beschränkungen unterliegt, wird von der ökonomischen Analyse eindeutig nicht gestützt.

Die Trassenlänge und -größe ist der relevante Treiber für Investitionen im Anschlussnetz. Für diese sind größtmögliche Investitionsdegressionen zu realisieren.²²

²¹ Hier sind die beiden die HK-Investitionen betreffenden gegenläufigen Effekte anzumerken: die HK-Investitionen vereinnahmen die Einsparungen aus gemeinsamer Verlegung mit dem VZK vollständig für sich; dem steht gegenüber, dass jeder Faserverzweiger durch eine eigene HK-Trasse angebunden wird.

²² An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass in dem Modell auf eine gemeinsame Trassennutzung für die Faserverzweigeranbindungen an den MPoP verzichtet wurde.

Abbildung 22: Investitionen pro Anschluss über steigender Gebäudeanzahl



Quelle: WIK

Abbildung 22 verdeutlicht die Abhängigkeit der Investitionen pro Anschluss von der Anzahl der Gebäude. Die orange Kurve zeigt den Verlauf für das Verzweigerkabelsegment, bestehend aus dem Verzweigerkabel (inkl. Graben) und dem Faserverzweiger. Die graue Kurve stellt den Verlauf für das Hauptkabelsegment dar, bestehend aus dem Hauptkabel (inkl. Graben, Rohre, Schächte und Muffen) und dem MPoP. Die blaue Kurve ist die Summe aus den beiden anderen Kurven.

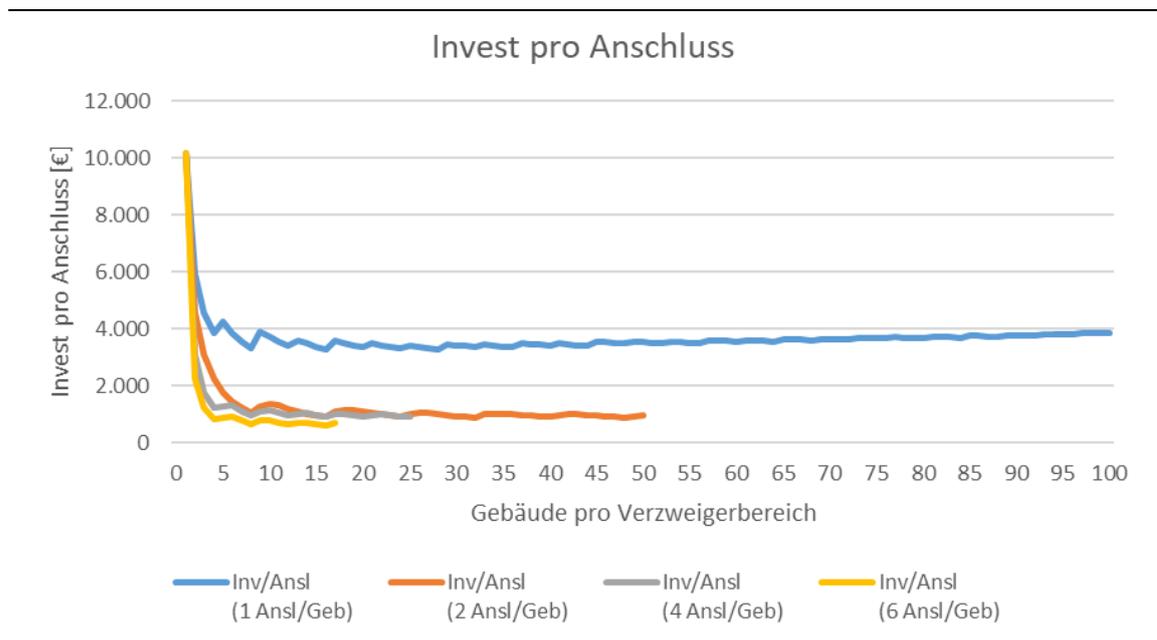
Wichtige Erkenntnis der Modellrechnung ist, dass es jeweils für das Verzweigerkabelsegment, wie auch für das Hauptkabelsegment ein Optimum gibt. Die Optima liegen hierbei eher bei einer geringen Anzahl Gebäude. Diese Modellergebnisse lassen sich auch in der Realität beobachten, nämlich dass in Glasfaser-Ausbaugebieten neue, eher kleinere Faserverzweiger an den Straßenrändern hinzu kommen, anstatt die alten Standorte aus der Kupferverkabelung zu nutzen.

Im Verzweigerkabelsegment sind die relevanten Treiber für Investitionen die Anzahl Gebäude und der durchschnittliche Abstand der Gebäude zueinander. Die Investitionsdegression durch zusätzliche Anschlüsse (Kostenträger) wird mit zunehmender Trassenlänge und Gebäudezahl überkompensiert.

Im Hauptkabelsegment sind die relevanten Treiber für Investitionen die Anzahl der Faserverzweiger und die Trassenlänge (entsprechend dem durchschnittlichen Abstand der Faserverzweiger).

Abbildung 23 zeigt die Abhängigkeit der Investitionen pro Anschluss von der Anzahl der Gebäude, jedoch auch für veränderte Konstellationen hinsichtlich der Anschlüsse pro Gebäude (Kurvenschar für 1, 2, 4 und 6 Anschlüsse pro Gebäude). Den nachfolgend dargestellten Szenarien liegt ein uniformer Gebäudeabstand von 30 m zu Grunde. Mit der Ausweitung „Anzahl Gebäude“ wächst gleichermaßen die Anzahl Anschlüsse sowie die Erstreckung des Verzweigerbereichs (und damit auch die Gesamterstreckung des ASB).

Abbildung 23: Invest pro Anschluss bei steigender Gebäudeanzahl bei verschiedenen Gebäudegrößen



Quelle: WIK

Für jede der dargestellten Kurven zeigt sich nach Erreichen des Optimums ein eher flacher Anstieg im weiteren Verlauf. Dennoch führt jede Vervielfachung der Anzahl Gebäude zu einem Anstieg der Investitionen pro Anschluss, beispielsweise bei Einfamilienhäusern um jeweils etwa 3%. Auch bei größeren Gebäuden (mehr Anschlüsse pro Gebäude) zeigt sich generell ein Anstieg, der jedoch umso geringer ausfällt, je mehr Anschlüsse sich in einem Gebäude befinden.

Mit den durchgeführten Szenariorechnungen lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Anschlussdichte und optimaler Zahl der Gebäude feststellen. Aber auch hier gibt es in allen Fällen ein Optimum bei einer relativ geringen Anzahl von Gebäuden:

Tabelle 5: Investitionsminium bei vergleichsweise geringer Gebäudezahl (Gebäudeabstand 30 m)

Anzahl Anschlüsse pro Gebäude	Anzahl Gebäude bei Investitionswertminimum	Korrespondierende räumliche Erstreckung (Länge der Anschlussleitung)
1 (blau)	28	804 m
2 (orange)	32	919 m
4 (grau)	16	459 m
6 (gelb)	16	459 m

Die weitere „Vergrößerung“ des Verzweigerbereichs geht nach Erreichen des Optimums mit leicht, aber dennoch stetig steigenden Investitionen pro Anschluss einher. Die Vergrößerung der räumlichen Abdeckung lässt inkrementelle Investitionen entstehen, die die damit gewonnen Größenvorteile überkompensieren.

Die Vervielfachung von Faserverzweigern an einem Standort kann jedoch mit ungünstigen Investitionssprüngen verbunden sein, die sich beim Einsatz größerer Faserverzweiger auch in erhöhten HK-Grabeninvestitionen niederschlagen können durch einen progressiven Raumbedarf bei größeren HK-Kabeln.

4.2.3.5 Relevanz der MPoP/ODF-Investitionen

Der MPoP/ODF weist stetig sinkende Investitionen pro Anschluss auf und auch der Faserverzweiger hat für sich genommen – innerhalb seiner Kapazität – auch durchgängige Investitionsdegression. Diese sind jedoch bezogen auf die Gesamtinvestitionen der Anschlusslinien nachrangig.

Eine detailliertere Betrachtung der vorgestellten Szenarien mit unterschiedliche Anschlusszahlen zeigt die in der folgenden Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse. Die Unterbringung am MPoP ist der bedeutendste Fixkostenblock für die MPoP-Investitionen für die Größenordnungen von Anschlussbereichen, die in unseren Szenarien als optimal identifiziert wurden.

Tabelle 6: Investitionsrelationen MPoP

	Anschlüsse	Basis	Variabler	Verhältnis	
		Raumbedarf MPoP [m ²]	Raumbedarf Racks [m ²]	Basis zu Racks	Invest %
Hoch	32.000	30	168	18%	100%
Mittel	2.400	30	14	214%	296%
Gering	800	30	6	500%	727%

4.3 Ökonomische Grenzen der Auflösung von MPoP

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Auflösung eines MPoP auswirkt, wenn die durch diesen versorgten Anschlüsse alternativ über eine Backhaul-Anbindung mit einem benachbarten, entfernten MPoP verbunden werden.

Hierzu werden im Modell für jedes ASB-Szenario zwei Varianten hinsichtlich ihrer Investitionen miteinander verglichen. Die beiden Varianten unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Backhaul-Realisierung.²³ Der Vergleich wird für Anschlussbereiche mit 160 bis 960 Anschlüssen durchgeführt.

Die erste Variante bildet jeweils einen Anschlussbereich ab, welcher über einen „eigenen“ MPoP versorgt wird. Der MPoP wird hierbei gemäß den gewählten Anschlusszahlen dimensioniert und benötigt Investitionen für die Anbindung an höhere Netzebenen (Uplink-Kosten).²⁴

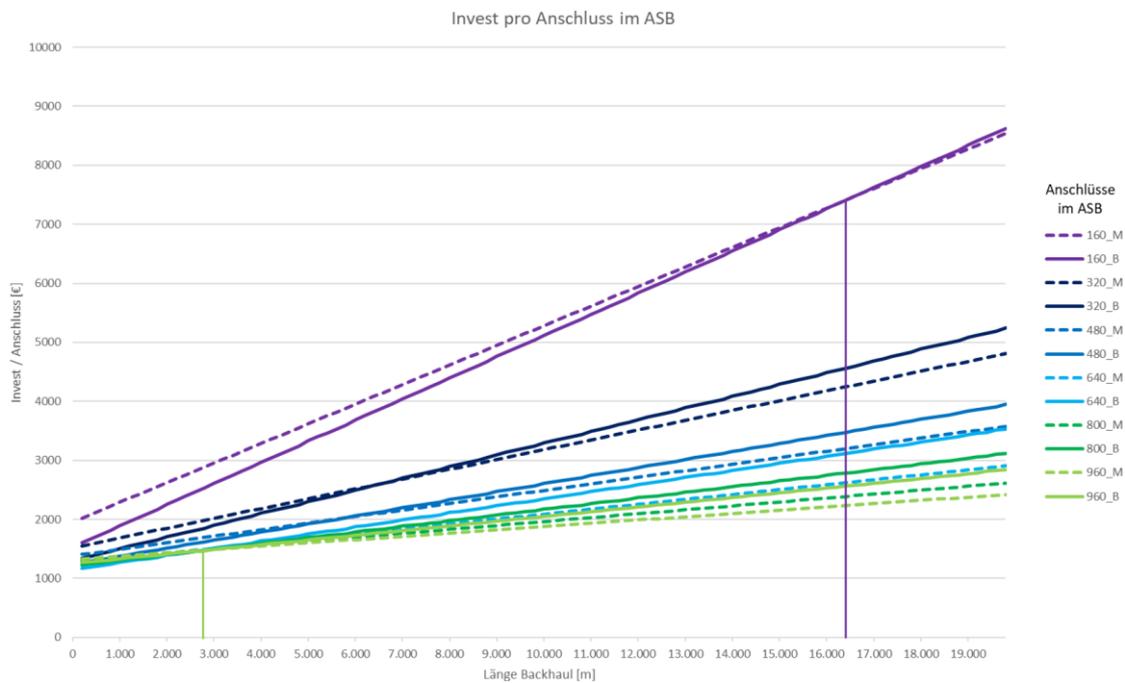
Die jeweils zweite Variante basiert auf demselben Anschlussbereich, jedoch wird der zuvor aktive MPoP auf einen Schacht reduziert, in welchem die von den Faserverzweigern ankommenden Hauptkabel in eine gemeinsame Backhaul-Anbindung zum entfernten MPoP überführt werden (inkl. Spleiß auf ein gemeinsames Kabel). Investitionsseitig bleiben die inkrementellen Investitionen erhalten (z.B. für den ODF), da diese ja am entfernten MPoP ebenfalls anfallen.²⁵ Die Auswahl der SFP-Module wird in diesen Varianten überprüft, wobei die Länge der Anschlussleitung vom entferntesten Gebäude bis zum jetzt auch entfernt gelegenen MPoP, also inklusive der Backhaul-Länge, berücksichtigt wird.

²³ Siehe hierzu Abschnitt 2.5.5.

²⁴ Die Investitionen beinhalten auch die SFP-Module, deren Auswahl sich nach der Länge der Anschlussleitung vom entferntesten Gebäude bis zum ASB-eigenen MPoP richtet.

²⁵ Bei der „Verschiebung“ der Investitionen in Komponenten des Konzentrationsnetzes zum entfernten MPoP wird keine weitere Kostendegression berücksichtigt, da hierzu das erforderliche Mengengerüst fehlt.

Abbildung 24: Auflösung eines bestehenden Anschlussbereichs und Anbindung an einen benachbarten ASB



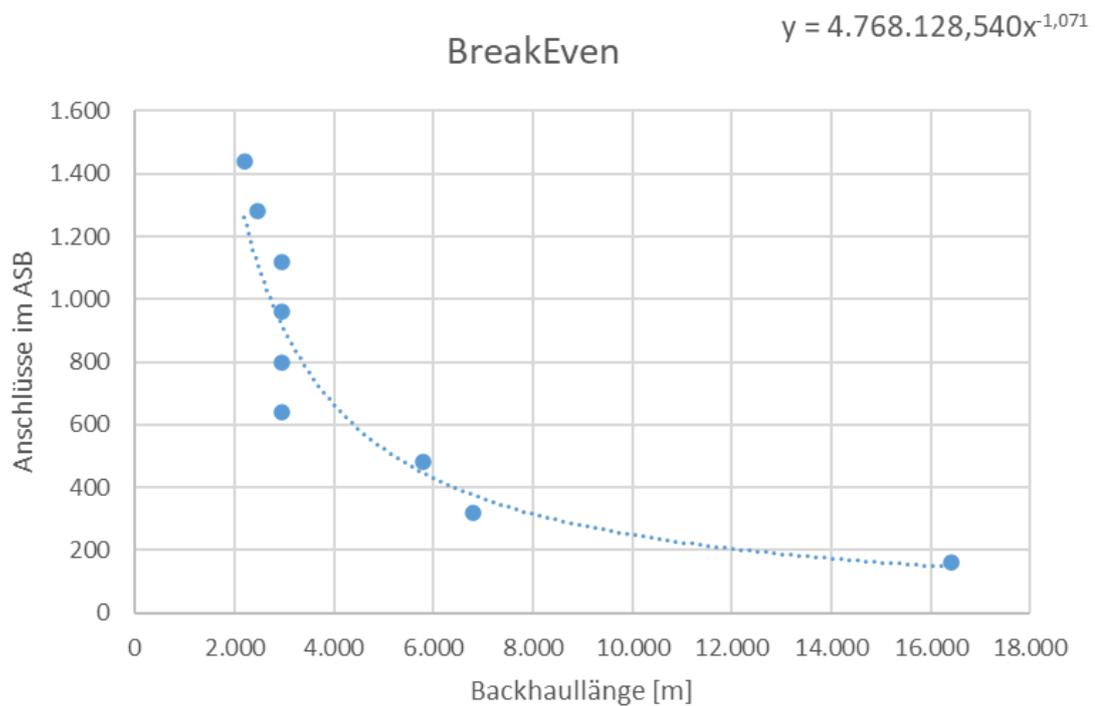
Quelle: WIK

In Abbildung 24 sind als gestrichelte Linien die Verläufe der Investitionen pro Anschluss in Abhängigkeit von der Backhaul-Länge für die ersten Szenarien dargestellt, also für die Fälle, in denen jeder Anschlussbereich durch einen „eigenen“ MPoP“ versorgt wird. Als durchgezogene Linien sind die Verläufe für die zweiten Szenarien, also die Backhaul-Lösung dargestellt. Die Farben repräsentieren jeweils unterschiedlich große Anschlussbereichen (Anzahl Anschlüsse von 160 bis 960).

Es ist zu erkennen, dass zunächst die Backhaul-Lösung zu geringeren Investitionen pro Anschluss führt, dies aber abhängig von der Anzahl der versorgten Anschlüsse nach einer Entfernung zwischen rund 3 km und 16,5 km in einem Break-Even führen und danach mit zunehmender Backhaul-Länge die ersten Szenarien (eigener MPoP) zunehmend günstiger werden.

Die aus dem Modell bestimmten Breakeven Punkte sind in der nachfolgenden Grafik noch einmal übersichtlich dargestellt.

Abbildung 25: Break-Even bei Ersatz MPoP durch Backhaul-Lösung



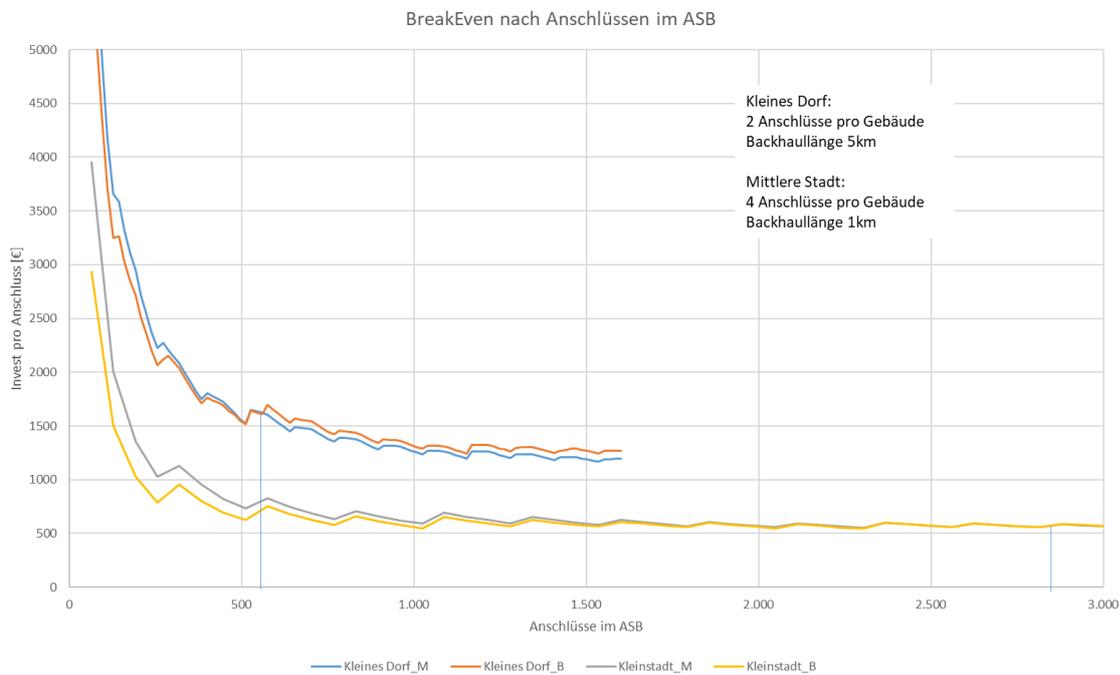
Quelle: WIK

Die technischen Möglichkeiten der räumlichen Ausdehnung von glasfaserbasierten Anschlussnetzen werden durch ökonomische Faktoren deutlich beschränkt. Selbst im Fall sehr kleiner Anschlussbereiche rentieren sich bestenfalls Backhaul-Anbindungen von einer maximalen Länge kleiner 20 km.

Die Zusammenlegung von kleineren ASB (beispielsweise Dörfern) ist daher nur bei kleinen Anschlusszahlen und eher kurzen Backhaul-Längen sinnvoll. Die technischen Möglichkeiten werden unter ökonomisch optimierenden Randbedingungen bei weitem nicht ausgeschöpft.

Der Zusammenhang ist in der nachfolgenden Grafik noch einmal dargestellt.

Abbildung 26: Break-Even für ein kleines Dorf und eine mittelgroße Stadt



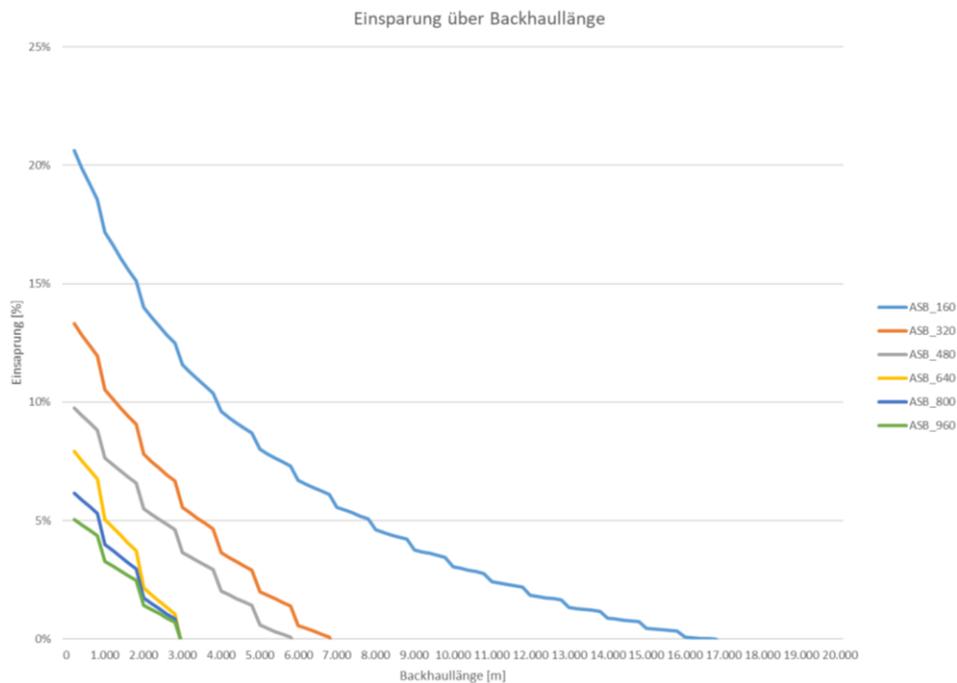
Quelle: WIK

Die blaue und orange Kurve illustrieren die Investitionen pro Anschluss für ein kleines Dorf, einmal mit eigenem MPoP (blau) und einmal mit Backhaul (orange) von 5km Länge. Der vertikale Abstand der beiden Kurven bringt die Einsparung gegenüber der jeweils anderen Realisierungsform zum Ausdruck. Die graue und gelbe Kurve zeigt den Zusammenhang für eine mittelgroße Stadt, die Backhaul-Länge wurde in diesem Szenario mit 1km gewählt.

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich ein geringes ökonomisches Potential für die Auflösung von Anschlussbereichen. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass durch den Backhaul ein bisher unprofitabler Anschlussbereich profitabel wird, aber dieser Effekt hat bei sehr kleinen Anschlussbereichen die größte Wahrscheinlichkeit. Je teurer der Anschlussbereich (im Sinne von Investitionen pro Anschluss), desto schwieriger ist es, ihn durch Backhaul profitabel zu machen. Dennoch kann es Konstellationen geben, in denen durch die Backhaul-Lösung die Investitionen pro Anschluss maßgeblich reduziert werden und eine Wirtschaftlichkeit des Anschlussbereichs inkl. Backhaul erreicht werden kann. Das ist aber immer einer individuellen Prüfung zu unterziehen.

Die folgende Abbildung 27 verdeutlicht die Einsparpotenziale für die unterschiedlich großen Anschlussbereiche in Abhängigkeit von der Backhaul-Länge.

Abbildung 27: Einsparpotenzial durch die Zusammenlegung von Anschlussbereichen



Quelle: WIK

Auch aus dieser Darstellung lässt sich ablesen, dass eine Einsparung eher für kleine Anschlussbereiche und über kurze Distanzen möglich ist.

4.4 Bedeutung für die räumliche Erstreckung von FTTH PtP Anschlussnetzen

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Beobachtungen und Analysen der Auswirkungen von topologischen Einflussgrößen (Variation von Anschlusszahlen, Anschlussdichten und Gebäudedichten) und strategischen Maßnahmen (Zusammenfassung von Anschlussbereichen) können Rückschlüsse auf die Auslegung von Verzweiger- und Anschlussbereichen von FTTH PtP Anschlussnetzen gezogen werden.

Auf der einen Seite konnten die Analysen zeigen, dass die Investitionen pro Anschluss ein Optimum aufweisen, welches für das Verzweigerkabelsegment inkl. Faserverzweiger isoliert betrachtet bei etwa 16 Gebäuden je Verzweigerbereich liegt und für das Hauptkabelsegment inkl. MPoP bei etwa 28 Gebäuden je Verzweigerbereich. Zusammenfassend liegt die optimale Erstreckung eines Anschlussbereiches, z.B. bei einem angenommenen Gebäudeabstand von 30 Metern und einem Anschluss pro Gebäude bei etwa 400 bis 1.000 Metern.²⁶

²⁶ Siehe Tabelle 6.

Auf der anderen Seite konnten die Analysen zeigen, dass die möglichen Einsparungen durch die Auflösung einzelner MPoP engen Grenzen unterliegen. Eine solche Strategie erscheint nur für Anschlussbereiche bis etwa 1.000 Anschlüssen sinnvoll. Hier darf die Backhaul-Länge 3 km kaum übersteigen. Lediglich bei deutlich geringeren Anschlusszahlen (160 Anschlüsse) sind Backhaul-Längen von maximal 20 Kilometern an der Grenze der Vorteilhaftigkeit. Die größtmöglichen Ersparnisse von bis zu 20% sind dabei aber immer nur bei möglichst geringen Backhaul-Längen und sehr kleinen Anschlussbereichen zu erreichen (bis max. etwa 200 Anschlüsse im Anschlussbereich).

Eine Zusammenlegung von Anschlussbereichen kann in engen Grenzen (kleine Anschlussbereiche über eher kurze Distanzen) lohnend sein, aber für die Mehrheit der Anschlussbereiche ist diese in einem FTTH PtP Glasfasernetz eher nicht vorteilhaft.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Verzweigerbereiche eher klein ausgelegt werden sollten (im Sinne von kleiner Anzahl angeschlossener Gebäude) und zwar relativ unabhängig von der Gebäudegröße (Anzahl Anschlüsse pro Gebäude).

5 Fazit: Technische Leistungsfähigkeit versus ökonomische Restriktionen

Aus technischer Sicht ist durch den Einsatz von Glasfasertechnologie eine deutliche Ausweitung von Verzweiger- und Anschlussbereichen möglich. Die Beschränkungen, insbesondere durch die verschiedenen Dämpfungseffekte bei der Verwendung von Kupfer-Doppeladern, entfallen bei den Glasfasern. Daher wäre es prinzipiell möglich, Verzweigerbereiche und ganze Anschlussbereiche deutlich auszudehnen. Dies wird auch oft im Kontext der Zusammenlegung von Anschlussbereichen und Auflösung von MPoP diskutiert.

Aus ökonomischer Sicht zeigen sich die längenabhängigen Investitionen in Kabel- und Gräben) als limitierender Faktor für die räumliche Erstreckung bzw. Ausweitung von Anschlussbereichen. Es ist stets günstiger, den Zuschnitt der Verzweigerbereiche eher kleiner auszulegen. Hierbei ist die Anzahl der Gebäude wesentlich, weniger die absolute Anzahl der Anschlüsse. Gleiches gilt für die Hauptkabeltrassen oder auch Backhaul-Anbindungen. Eine Zusammenfassung von Anschlussbereichen über Backhauling ist in bestimmten Fällen möglich und sinnvoll. Dies gilt vor allem für kleine Anschlussbereiche und kurze Strecken von nicht mehr als 10-15km.

Allgemein bekannte Ausbauregeln, den Zuschnitt von Verzweigerbereichen beispielsweise an den Kapazität von Faserverzweigern auszurichten, konnten nicht bestätigt werden. Vielmehr wurde gezeigt, dass die längenabhängigen Investitionen diese Überlegungen klar dominieren.

Die hier vorgestellten, modellbasierten Analysen zeigen, dass die Leistungsfähigkeit von FTTH PtP Anschlusslinien bzgl. der technisch erzielbaren Reichweite (räumlichen Erstreckung) durch die ökonomischen Zusammenhänge in der Regel nicht ausgeschöpft werden sollten. Nur in Fällen vereinzelter Anschlüsse oder kleiner Siedlungen ist der Verzicht auf einen eigenständigen Anschlussbereich ökonomisch vorteilhaft.

6 Literatur

- Elixmann, D. Ilic, D. Neumann, K. Plückebaum, T. (2009): The Economics of Next Generation Access - Study for the European Competitive Telecommunication Association (ECTA); https://www.wik.org/uploads/media/ECTA_NGA_Study_2008.pdf
- Hoernig, S.; Jay,S.; Neumann, K.-H.; Peitz, M.: Plückebaum, T.; Vogelsang, I. (2010): 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, https://www.vodafone.com/sites/default/files/2020-09/public_policy_series_13.pdf
- Ilic, D.; Neumann, K.-H.; Plückebaum, T. (2009): Szenarien einer nationalen Glasfaserausbastrategie in der Schweiz, Bad Honnef, Dezember 2009, http://www.wik.org/uploads/media/Glasfaserausbastrategie_Schweiz_2009_12_11.pdf
- Kulenkampff G., Plückebaum, T. Zoz, K. (2019): Analytisches Kostenmodell für das Anschlussnetz AKM-AN Version 3.0; https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Anschlussnetz/20190114_AKM_AN_RefDokpdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Kulenkampff, G. Ockenfels, M. Zoz, K., Zuloaga, G. (2020): Kosten von Breitband-Zugangsnetzen; https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_473.pdf
- Neumann, K.-H.; Ockenfels, M.; Plückebaum, T. (2017); Modellierung der Kosten eines flächen-deckenden Hochbreitbandnetzes in der Schweiz, Bad Honnef, 5. Oktober 2017, <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesgesetze/fmg-revision-2017.html>
- Zuloaga, G., et al (2022): Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 493, Bad Honnef

- Nr. 476: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:
Analyse der Angebotsentwicklung für leitungsgebundene Breitbanddienste für Privatkunden im deutschen Festnetzmarkt von 2017-2020, Dezember 2021
- Nr. 477: Christian Märkel, Marcus Stronzik, Martin Simons, Matthias Wissner, Martin Lundborg:
Einsatz von Blockchain in KMU: Chancen & Hemmnisse, Dezember 2021
- Nr. 478: Matthias Wissner, Ahmed Elbanna, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:
Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, Dezember 2021
- Nr. 479: Dajan Baischew, Ahmed Elbanna, Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:
Die Grundzüge von 6G, Dezember 2021
- Nr. 480: Marie-Christin Papen, Martin Lundborg, Sebastian Tenbrock:
360-Grad-Überblick über den Digitalisierungsstand in KMU, Dezember 2021
- Nr. 481: Nico Steffen, Lukas Wiewiorra, Peter Kroon, unter Mitarbeit von Philipp Thoste:
Wettbewerb und Regulierung in der Plattform- und Datenökonomie, Dezember 2021
- Nr. 482: Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Kupfer-Glas-Migration in Frankreich und im Vereinigten Königreich, Juli 2022
- Nr. 483: Dr. Karl-Heinz Neumann; Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Übergang von Kupfer- auf Glasfasernetze: Phasen und Prozesse der Migration, November 2022
- Nr. 484: Dr. Andrea Liebe; Martin Lundborg, Pirmin Puhl, Katrin Marques Magalhaes, Mitarbeit: Philipp Thoste:
Chancen digitaler Reifegradmodell für KMU, Dezember 2022
- Nr. 485: Julian Knips, Dr. Christian Wernick, Dr. Sebastian Tenbrock:
Analyse von Angeboten auf gigabitfähigen Infrastrukturen in Europa, Dezember 2022
- Nr. 486: Menessa Ricarda Braun, Dr. Christin Gries, Dr. Christian Wernick:
Politische und regulatorische Ansätze zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Smartphones, Dezember 2022
- Nr. 487: Dr. Nico Steffens, Dr. Lukas Wiewiorra:
Device Neutrality – Softwaremarktplätze und mobile Betriebssysteme, Dezember 2022
- Nr. 488: Dr. Lorenz Nett, Dr. Bernd Sörries:
Flexibilisierung der Frequenzregulierung und des Frequenzplans, Dezember 2022
- Nr. 489: Stefano Lucidi, Dajan Baischew, Dr. Bernd Sörries:
Signifikante Entwicklungen hin zu 6G, Dezember 2022
- Nr. 490: Dr. Sonia Strube Martins, Julian Knips, Dr. Christian Wernick:
eSIM – Potentiale, Anforderungen und Wettbewerbsprobleme, Dezember 2022
- Nr. 491: Dr. Christin-Gries, Dr. Christian Wernick, Menessa Ricarda Braun:
Die Rolle von Refurbishment-Anbietern im Smartphone-Markt, Dezember 2022
- Nr. 492: Dajan Baischew, Lisa Schrade-Grytsenko, Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele, Dezember 2022
- Nr. 493: Gonzalo Zuloaga, Dr. Gabriele Kulenkampff, Martin Ockenfels, Dr. Thomas Plückebaum:
Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, Dezember 2022
- Nr. 494: Martin Ockenfels, Dr. Gabriele Kulenkampff:
Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, Dezember 2022

ISSN 1865-8997