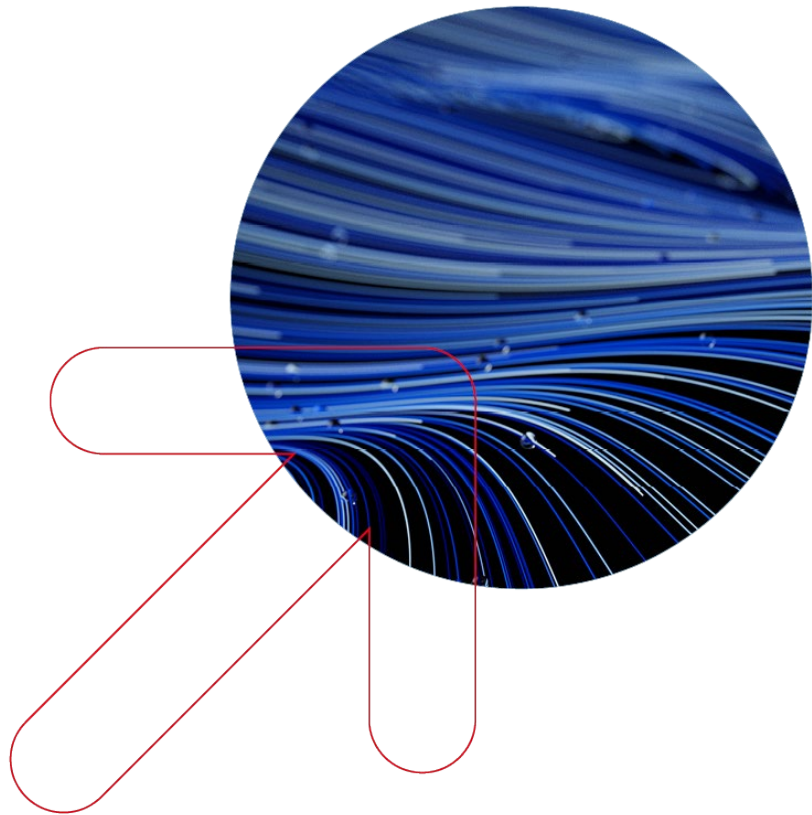


WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 524



Fixed Wireless Access als Versorgungsoption für Breitbandanschlüsse?

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, Verwaltungs- und Abteilungsleiter	Alex Kalevi Dieke
Direktor, Abteilungsleiter	Prof. Dr. Bernd Sörries
Abteilungsleiter	Dr. Christian Wernick
Abteilungsleiter	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Stand: Januar 2024

ISSN 1865-8997

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

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:

<https://www.wik.org/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege>

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.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Zusammenfassung	VIII
Summary	X
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Methodische Vorgehensweise	2
2 Charakteristika von FWA-Lösungen	4
2.1 Technische Voraussetzungen und Realisierungsformen	5
2.1.1 Eigenschaften von Funktechnologien sowie hoher und niedriger Frequenzen	5
2.1.2 Beamforming	5
2.1.3 MIMO	6
2.1.4 Carrier Aggregation	6
2.1.5 Bandbreite	7
2.2 WIK-Propagation-Modell	8
2.2.1 Line-of-Sight Modellierung	9
2.2.2 Non-Line-of-Sight Modellierung	10
2.3 Ergebnisse der Abschätzung von Reichweiten der verschiedenen Trägerfrequenzen	12
2.3.1 Geschätzte Datenraten über Entfernung Line-of-Sight	12
2.3.2 Geschätzte Datenraten über Entfernung Non-Line-of-Sight	14
2.3.3 Grundsätzlicher Zusammenhang Trägerfrequenz-Bandbreite-Distanz	15
2.3.4 Schlussfolgerungen für die Reichweiten bei Line-of-Sight und Non-Line-of- Sight	17
3 FWA und FTTH im Vergleich	19
3.1 Fragestellung und methodische Vorgehensweise	19
3.2 Modelldesign	20
3.2.1 Grundlegende Modellannahmen	22
3.2.2 Angenommene Topologie für die Versorgungsgebiete	23

3.2.3	Anschlüsse und Gebäude als Steuerungsgrößen der Besiedlungsdichte	27
3.2.4	Berücksichtigte Investitionen	27
3.2.4.1	Verzweigerkabel-Segment (VZK)	28
3.2.4.2	Faserverzweiger (FVZ)	29
3.2.4.3	Hauptkabel-Segment (HK)	29
3.2.4.4	Fixed Wireless Access (FWA)	30
3.3	Szenario-Rechnungen	30
3.3.1	Ergebnisse der Basis-Szenarien bei Line-of-Sight	32
3.3.1.1	Zieldatenübertragungsrate: 10 Mbps	32
3.3.1.2	Zieldatenübertragungsrate 1 Gbps	33
3.3.2	Ergebnisse der Basis-Szenarien bei Non-Line-of-Sight	34
3.3.2.1	Zieldatenübertragungsrate 10 Mbps	34
3.3.2.2	Zieldatenübertragungsrate 1 Gbps	36
3.3.3	Sensitivitäten und tiefere Betrachtung auf der Basis „FWA-Radius 4.500 m“	37
3.3.3.1	Radius 4.500 m - Ausgangspunkt	37
3.3.3.2	Sensitivität Mast und Anbindung bereits vorhanden	38
3.3.3.3	Streusiedlung	38
3.3.3.4	Die letzten 2%	40
3.3.3.5	Sensitivität der Preise für FWA-Equipment	41
3.3.3.6	Gesamter Anschlussbereich mit FWA, Darstellung für 4.500 m	42
3.3.3.7	FWA für die inneren 4 Verzweigerbereiche, Darstellung für 4.500m	42
4	Zusammenfassung der Erkenntnisse und ihre empirische Relevanz in Deutschland	44
4.1	Erkenntnisse aus den Modellrechnungen	44
4.2	Empirische Relevanz in Deutschland	46
4.3	Relevanz von FWA in anderen Ländern der EU	48
5	Fazit	49
	Literaturverzeichnis	50
	Anhang	51
	Detaildarstellung Reichweitenabschätzung	51

Detaildarstellung Szenario-Rechnungen	61
Sensitivitäten Luftverkabelung	65
Sensitivität Luftverkabelung für Anbindung Basisstationen	65
Sensitivität Luftverkabelung für Verzweigerkabel außen	66
Sensitivität Mast und FTTH-Verzweigerkabel-Segmente per Luftverkabelung erschlossen	67
Sensitivität Preise für FWA	68
Sensitivität: alle Preise wurden für FWA-Equipment $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m	69
Sensitivität: Basisstationen $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m	70
Sensitivität: Masten $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m	70
Sensitivität: Antennen $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m	71
Sensitivität: CPE $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Carrier Aggregation	7
Abbildung 2:	Frequenzaufteilung Deutschland Stand 23.08.2021	8
Abbildung 3:	Extrapolation Pfadverlust-Distanz für 900 MHz	11
Abbildung 4:	Datenrate über Entfernung, Line-of-Sight	13
Abbildung 5:	Datenrate über Entfernung, Non-Line-of-Sight	14
Abbildung 6:	Zusammenhang Trägerfrequenz-Bandbreite-Distanz (LOS)	16
Abbildung 7:	Struktur eines Verzweigerbereichs und seiner Vervielfachung	23
Abbildung 11	Schematische Abbildung von Besiedlungsstrukturen im WIK-Modell	25
Abbildung 12:	Schematische Verringerung der Besiedlungsdichte durch Vergrößerung des Gebäudeabstands	26
Abbildung 13:	Versorgung des stilisierten Anschlussbereichs mit FWA	26
Abbildung 14:	FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 25.000 m	33
Abbildung 15:	FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 16.000m und 4.500 m	34
Abbildung 16:	FTTH vs. Non-Line-of-Sight mit Radius 3.600 m, 2.600 m, 1.900 m und 1.600 m	35
Abbildung 17:	FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 400 m und 150 m	36
Abbildung 18:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 4.500 m bei FWA, Ausgangspunkt für Sensitivitäten	37
Abbildung 19:	Sensitivität: Masten und Anbindung FWA-Basisstationen bereits vorhanden	38
Abbildung 20:	Sensitivität Streusiedlung	39
Abbildung 21:	Sensitivität „Letzte 2%“	41
Abbildung 22:	Sensitivität: Gesamter Anschlussbereich durch FWA versorgt	42
Abbildung 23:	Sensitivität: Innere 4 Verzweigerbereiche mit FWA versorgt	43
Abbildung 24:	Übertragung der Modellergebnisse auf Deutschland in GIS	47
Abbildung 25:	Datenrate über Entfernung bei 700 MHz, Line-of-Sight	51
Abbildung 26:	Datenrate über Entfernung bei 700 MHz, Non-Line-of-Sight	51
Abbildung 27:	Datenrate über Entfernung bei 800 MHz, Line-of-Sight	52
Abbildung 28:	Datenrate über Entfernung bei 800 MHz, Non-Line-of-Sight	52
Abbildung 29:	Datenrate über Entfernung bei 900 MHz, Line-of-Sight	53

Abbildung 30:	Datenrate über Entfernung bei 900 MHz, Non-Line-of-Sight	53
Abbildung 31:	Datenrate über Entfernung bei 1.500 MHz, Line-of-Sight	54
Abbildung 32:	Datenrate über Entfernung bei 1.500 MHz, Non-Line-of-Sight	54
Abbildung 33:	Datenrate über Entfernung bei 1.800 MHz, Line-of-Sight	55
Abbildung 34:	Datenrate über Entfernung bei 1.800 MHz, Non-Line-of-Sight	55
Abbildung 35:	Datenrate über Entfernung bei 2.100 MHz, Line-of-Sight	56
Abbildung 36:	Datenrate über Entfernung bei 2.100 MHz, Non-Line-of-Sight	56
Abbildung 37:	Datenrate über Entfernung bei 2.600 MHz, Line-of-Sight	57
Abbildung 38:	Datenrate über Entfernung bei 2.600 MHz, Non-Line-of-Sight	57
Abbildung 39:	Datenrate über Entfernung bei 3.600 MHz, Line-of-Sight	58
Abbildung 40:	Datenrate über Entfernung bei 3.600 MHz, Non-Line-of-Sight	58
Abbildung 41:	Datenrate über Entfernung bei 6 GHz, Line-of-Sight	59
Abbildung 42:	Datenrate über Entfernung bei 6 GHz, Non-Line-of-Sight	59
Abbildung 43:	Datenrate über Entfernung bei 26 GHz, Line-of-Sight	60
Abbildung 44:	Datenrate über Entfernung bei 26 GHz, Non-Line-of-Sight	60
Abbildung 45:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 25.000 m bei FWA	61
Abbildung 46:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 16.00 0m bei FWA	61
Abbildung 47:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 4.500 m bei FWA	62
Abbildung 48:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 3.600 m bei FWA	62
Abbildung 49:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 2.600 m bei FWA	63
Abbildung 50:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 1.900 m bei FWA	63
Abbildung 51:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 1.600 m bei FWA	64
Abbildung 52:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 400 m bei FWA	64
Abbildung 53:	Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 150 m bei FWA	65
Abbildung 54:	Sensitivität: Luftverkabelung für Anbindung der FWA-Basisstationen	66

Abbildung 55:	Sensitivität: Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment	67
Abbildung 56:	Sensitivität: Luftverkabelung für Anbindung der FWA-Basisstationen und Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment	68
Abbildung 57:	Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment	69
Abbildung 58:	Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Basisstationen	70
Abbildung 59:	Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Masten	70
Abbildung 60:	Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Antennen	71
Abbildung 61:	Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – CPE	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abgeschätzte Reichweiten aus dem WIK-Propagation-Modell	17
Tabelle 2:	Reichweiten (Radien) für den vorzunehmenden Investitionsvergleich	18
Tabelle 3:	Reichweiten (Radien) für den vorzunehmenden Investitionsvergleich (Identisch mit Tabelle 2)	31
Tabelle 4:	Bewertung der Eignung von Trägerfrequenzen zur Grundversorgung und zur Gigabitversorgung	45

Abkürzungsverzeichnis

2G	Mobilfunkgeneration 2, z.B. GSM
4G	Mobilfunkgeneration 4, z.B. LTE
5G	Mobilfunkgeneration 5
ASB	Anschlussbereich
BEREC	Body of European Regulators for Electronic Communications
bit	binary digit
BS	Basisstation
CPE	Customer Premise Equipment
dB	Dezibel
dBi	Dezibel in Bezug auf isotrope Antenne
dBm	Dezibel Milliwatt (Leistungspegel)
EECC	European Electronic Communication Code
EU	Europäische Union
EVZ	Endverzweiger
FTTH	Fiber to the Home
FVZ	Faserverzweiger
FWA	Fixed Wireless Access
Gbps	Gigabit per second, auch Gbit/s
GHz	Gigahertz = 1.000.000.000 Hertz
GIS	Geografisches Informationssystem
HH	Haushalt
HK	Hauptkabelbereich, auch Hauptkabel-Segment
Hz	Hertz, Einheit [1/Sekunde]
km	Kilometer = 1.000 Meter
km ²	Quadratkilometer
LOS	Line-of-Sight
m	Meter
Mbps	Megabit pro Sekunde, auch Mbit/s
MHz	Megahertz = 1.000.000 Hertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mmWave	Millimeter Wellen (>=6 GHz)
MPoP	Metropolitan Point of Presence
NLOS	Non-Line-of-Sight
ODF	Optical Distribution Frame
OPEX	Operational Expenditures
PtP	Point-to-Point
s	Sekunde
VBA	Visual Basic for Applications
VHCN	Very High Capacity Network
VZB	Verzweigerbereich, auch Verzweigerkabel-Segment
VzK	Verzweigerkabelbereich, auch VZK
W	Watt

Zusammenfassung

Fixed Wireless Access (FWA) ist der Ersatz eines Festnetzanschlusses durch eine Funklösung. Er wird im Kontext des angestrebten Gigabit-Breitbandausbaus in der Fläche, in dünn besiedelten Gebieten, grundsätzlich als eine Alternative zum teuren Glasfaserausbau angesehen, um Endkunden mit schnellem Internet zu versorgen. Allerdings gibt es hier auch Grenzen der Leistungsfähigkeit. Für eine FWA-Anbindung können unterschiedliche Trägerfrequenzen zum Einsatz kommen. Die möglichen Trägerfrequenzen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, der Reichweiten und der für den Frequenzbereich der Trägerfrequenz verfügbaren Bandbreite zur Datenübertragung. Wesentlich ist in diesem Kontext, ob die Möglichkeit besteht, Sender und Empfänger mit Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS) aufbauen zu können oder ob diese Möglichkeit nicht besteht (Non-Line-of-Sight, NLOS).

In diesem Forschungsprojekt wurde untersucht, in welchem Rahmen sich über FWA einerseits eine Grundversorgung mit 10 Mbps und andererseits eine Gigabitversorgung mit 1 Gbps aus ökonomischer Sicht realisieren lässt, und zwar abhängig von der Dichte der Besiedlung.

Um eine funkbasierte Versorgung mit den hier zu betrachtenden Zieldatenübertragungsraten zu ermöglichen, bedarf es des Einsatzes entsprechender Trägerfrequenzen und Bandbreiten. Die damit verbundenen Investitionen in FWA Anschlüsse vergleichen wir mit Investitionen, die für eine FTTH-Versorgung zu tätigen sind.

Die möglichen Reichweiten (Radien) der Funknetze wurden mit dem WIK-Propagation-Modell¹ bestimmt. Die darauf aufbauenden Vergleiche der benötigten Investitionen für FWA gegenüber FTTH wurden mit dem WIK-Investitions-Modell berechnet und dann miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgt auf Basis eines vereinfachten, modellbasierten Ansatzes zur Abbildung unterschiedlicher Besiedlungsdichten und damit Versorgungsanforderungen. Die wesentliche Variable für den modellbasierten Vergleich der Technologien ist dabei der Gebäudeabstand (die Besiedlungsdichte) des jeweils zugrundeliegenden virtuellen, generisch festgelegten Anschlussbereiches. Die Investitionsgrößen wurden für verschiedene Parametereinstellungen abgeleitet. Dabei wurden die folgenden Erkenntnisse aus der Modellierung gewonnen:

- Nur die mmWave Trägerfrequenzen (≥ 6 GHz) sind in der Praxis für eine Gigabitversorgung (1Gbps) geeignet, während sich für eine Grundversorgung (10Mbps) wegen ihrer physikalischen Eigenschaften insbesondere die niedrigen Trägerfrequenzen eignen.
- Der Vorteilhaftigkeit von FWA gegenüber FTTH sind aber Grenzen gesetzt:

¹ Das WIK-Propagation-Modell wurde im Rahmen der Studie „Überprüfung der Eignung verschiedener Technologien zur Erbringung der Grundversorgung“ für die Bundesnetzagentur in 2023 entwickelt, um damit grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Frequenz-Bandbreite-Datenübertragungsrate-Reichweite aufzeigen zu können.

- Jede eingesetzte Basisstation muss eine Mindestmenge an Anschlüssen versorgen.
- Für eine Gigabitversorgung abgelegener Liegenschaften ist praktisch zwingend eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger notwendig.
- Bereits vorhandene und mitnutzbare Masten (z.B. aus der Mobilfunkversorgung) mit Breitband-Anbindung (Glasfaser) begünstigen FWA deutlich.
- Bei sehr dicht und sehr dünn besiedelten Gebieten kann FWA auch ökonomisch weniger vorteilhaft sein als FTTH.

In der Praxis wird jede individuelle Konstellation für den Einsatz von FWA bewertet werden müssen. Allgemeingültige Aussagen erscheinen nicht möglich, da in der praktischen Realisierung auch die hier nicht betrachteten Umwelteinflüsse (Topologie, Vegetation, Bebauung, Möglichkeit für Luftverkabelung, vorhandene Masten, Anzahl Nutzer in der Funkzelle, Möglichkeit einer Sichtverbindung etc.) immer einen relevanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer funkbasierten Lösung haben und beachtet werden müssen.

Summary

Fixed Wireless Access (FWA) is the replacement of a landline with a wireless solution. In the context of the planned gigabit broadband expansion in the area, in sparsely populated areas, it is generally seen as an alternative to expensive fiber-optic expansion in order to provide end customers with fast internet. However, there are also limits to performance here. Different carrier frequencies can be used for an FWA connection. The possible carrier frequencies differ in terms of their physical properties, the ranges and the bandwidth available for data transmission for the frequency range of the carrier frequency. In this context, it is essential whether it is possible to set up transmitters and receivers with line-of-sight (LOS) or whether this possibility does not exist (non-line-of-sight, NLOS).

In this research project, it was investigated in which framework a basic supply with 10 Mbps on the one hand and a gigabit supply with 1 Gbps on the other hand can be realized via FWA from an economic point of view, depending on the density of the settlement.

In order to enable a radio-based supply with the target data transmission rates to be considered here, the use of appropriate carrier frequencies and bandwidths is required. We compare the associated investments in FWA connections with investments that have to be made for FTTH coverage.

The possible ranges (radii) of the radio networks were determined using the WIK propagation model². The resulting comparisons of the required investments for FWA versus FTTH were calculated using the WIK investment model and then compared with each other. The comparison is based on a simplified, model-based approach for mapping different population densities and thus supply requirements. The essential variable for the model-based comparison of the technologies is the building distance (the population density) of the underlying virtual, generically defined connection area. The investment variables were derived for various parameter settings. The following insights were gained from the modeling:

- Only the mmWave carrier frequencies (≥ 6 GHz) are suitable for gigabit coverage (1Gbps) in practice, while the low carrier frequencies are particularly suitable for basic coverage (10Mbps) due to their physical properties.
- However, there are limits to the advantage of FWA over FTTH:
 - Each base station used must supply a minimum number of connections.
 - For a gigabit supply of remote properties, a line of sight between transmitter and receiver is practically mandatory.
 - Existing and co-usable masts (e.g. from mobile phone coverage) with broadband connection (fiber optics) clearly favor FWA.

² The WIK propagation model was developed for the Federal Network Agency in 2023 as part of the study "Review of the suitability of different technologies for the provision of the universal service" in order to be able to show fundamental relationships between frequency-bandwidth-data transmission rate-range.

- In very densely populated and very sparsely populated areas, FWA can also be less economically advantageous than FTTH.

In practice, each individual constellation for the use of FWA will have to be evaluated. Generally valid statements do not seem possible, since in practical implementation the environmental influences not considered here (topology, vegetation, buildings, possibility for aerial cabling, existing masts, number of users in the radio cell, possibility of line of sight, etc.) always have a relevant influence on the performance of a radio-based solution and must be taken into account.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

In Deutschland wird Fixed Wireless Access (FWA) für die breitbandige VHCN-Versorgung^{3 4} nicht wirklich diskutiert. Dennoch besteht die Erwartung, dass FWA gerade in ruralen Gebieten bei der Erschließung abgelegener Haushalte sinnvoll zum Einsatz kommen kann. Bei FWA handelt es sich um eine Versorgung von Haushalten oder Unternehmen ersatzweise durch den Einsatz von (Mobil-)Funktechnologie statt mittels Festnetztechnologie. Es wird zwar (Mobil-)Funktechnologie verwendet, allerdings entfällt der Mobilitätsaspekt.

Zur Erreichung einer Gigabit-Versorgung bedarf es Trägerfrequenzen, die üblicherweise im mmWave-Bereich liegen (≥ 6 GHz bzw. ≥ 26 GHz). Diese stehen in Deutschland derzeit nicht zur generellen Vergabe an, aber z.B. die Bandbreite im 26 GHz Band kann gegen eine Frequenznutzungsgebühr, z.B. für den Aufbau eines lokalen Campus-Funknetzwerks genutzt werden.⁵

Unabhängig davon gibt es bereits Überlegungen im Hinblick auf die Mindestversorgung im Universaldienst, Mobilfunkanbieter aus dem (bestehenden) Mobilfunknetz zur Versorgung unterversorgter Anschlüsse zu verpflichten, derzeit mit mindestens 10 Mbps im Downstream und 1,7 Mbps im Upstream.⁶ Ob dies eine ökonomisch sinnvolle Strategie für die Grundversorgung darstellt, ist ebenfalls Gegenstand der hier vorgestellten Analyse.⁷

³ Very-High-Capacity Networks (VHCN) sind das Ausbauziel der Europäischen Kommission bis 2030. Sie wurden im EECC (2018) definiert und durch das Gremium der Europäischen Regulierer BEREK detaillierter spezifiziert. (<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines/berec-guidelines-on-very-high-capacity-networks>). Wir konzentrieren uns in unseren Untersuchungen auf den Vergleich von FWA mit Glasfaserausbauten, weil bei einem Neubau von Festnetzen die zukunftssichere Glasfaser die Infrastruktur der Wahl ist.

⁴ Im Rahmen dieser Studie wird die Möglichkeit einer Versorgung mit Datenübertragungsraten von bis zu 1 Gbits (Gigabitversorgung) untersucht. Die Begriffe VHCN-Versorgung bzw. Gigabit-Versorgung werden von uns in dieser Studie synonym verwendet.

⁵ Verwaltungsvorschrift für Frequenzuteilungen für lokale, breitbandige Frequenznutzung im Frequenzbereich 24,25 – 27,5 GHz, Anlage 5, BNetzA: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/Verwaltungsvorschrift26GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1#:~:text=Der%20gesamte%20Frequenzbereich%204%2C25,Netzzugangs%20zum%20Angebot%20von%20Telekommunikationsdiensten.

⁶ BNetzA, Universaldienst: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Grundversorgung/start.html>
Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie waren die Datenübertragungsraten auf diese Werte festgelegt. Zum Ende des Jahres 2024 oder zum Beginn des Jahres sollen die Datenübertragungsraten für die Grundversorgung auf 15 Mbps im Downstream bzw. 5 Mbps im Upstream angehoben werden, die daraus resultierenden Reichweiten würden sich damit verringern.

⁷ Mobilfunk als flächendeckender Ansatz zur Sicherstellung einer Grundversorgung für den Universaldienst wurde in einer Studie für die BNetzA ausgeschlossen: Umlaut communications GmbH, WIK-Consult GmbH: Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes:

In diesem Projekt untersuchen wir Mobilfunktechniken für ihre Eignung als Festnetzerersatz, und zwar in Form eines stationären Endkundenanschlusses. Dies ist nicht willkürlich gegriffen, denn derartige Anwendungen gibt es in der Realität bereits. Im EU-Staatsbeihilferecht bspw. sind die FWA-Netze dem Festnetz zugeordnet.⁸

Erkenntnisziel der Untersuchung ist daher, anhand welcher Kriterien eine Einschätzung zur Vorteilhaftigkeit von FWA im Vergleich zu FTTH in weniger dicht besiedelten Gebieten getroffen werden kann. Für unsere Analyse verzichten wir auf die Betrachtung konkreter (ländlicher) Regionen in Deutschland. Mit dem gewählten methodischen Ansatz arbeiten wir besiedlungsstrukturelle Merkmale typischer Gebiete heraus, wie sie sich in verschiedenen Formen auch in Deutschland wiederfinden. Die von uns gewählte abstrakte, analytische Herangehensweise zur Abbildung der Besiedlungsstruktur hat den Vorteil, quantifizieren zu können, ab welchen Schwellwerten eine FWA-Lösung im Vergleich zu FTTH vorteilhaft ist. Unsere Analyse hat dabei nicht zum Ziel, konkrete Versorgungsgebiete für FWA zu bestimmen.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Für unsere Untersuchung über die Leistungsfähigkeit von FWA sowohl zur Erbringung einer Gigabit-Versorgung als auch seiner Eignung für die Grundversorgung sind wir wie folgt vorgegangen:

Aufsatzpunkt bilden die Arbeiten des WIK mit Studien zur Ökonomie von Fest- und Mobilfunknetzen.

- Für Funknetze: Kenntnisse über Mobilfunktechnik, über Reichweite und Übertragungskapazität von Mobilfunkfrequenzen, Kenntnis über Kosten und Kostenstrukturen⁹
- Für FTTH-Netze: Kenntnis über Kostenstrukturen und Qualitätsmerkmale, auch in Abhängigkeit von Besiedlungsstrukturen¹⁰
- Modellgestützter, generischer Ansatz zur Berücksichtigung unterschiedlicher Besiedlungsstrukturen bei der Ermittlung von Investitionen in Anschlussnetze.¹¹

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_umlaut_WIK_Mobilfunk.pdf?__blob=publicationFile&v=1

⁸ EU State Aid Guideline 2023, https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/legislation/regulations_en

⁹ 5G Status Studie, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 449 2019, Elbanna, A. Abschätzung des Bedarfs an 5G Mobilfunkstandorten für den Frequenzbereich von 3,6 GHz zur Füllung von Lücken zwischen den bestehenden Mobilfunkstandorten, WIK-Kurzstudie 2022, Zoz, K., Plückerbaum, T., Sörries, B., Elbanna, A.

¹⁰ Technische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 493 2022, Zuloaga, G., Kulenkampff, G., Ockenfels, M., Plückerbaum, T.

¹¹ Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 494 2022, Ockenfels, M., Kulenkampff, G.

In Kombination dieses Erfahrungsspektrums haben wir uns zu der folgenden Vorgehensweise entschieden:

In Kapitel 2 stellen wir die technischen Zusammenhänge dar, wir treffen Aussagen zu den Reichweiten und Kapazitäten (mögliche Datenübertragungsraten) der in Deutschland lizenzierten Mobilfunkfrequenzen und dort typischerweise vergebenen 10 MHz-Frequenzblöcke (Bandbreiten) in Bezug auf die Leistungsfähigkeit für eine FWA-Lösung (Abschnitte 2.1 und 2.2). Der Fokus liegt darauf, eine Einschätzung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit in Bezug auf Datenübertragungsrate und Reichweite für eine Grundversorgung (Eignung für eine Mindestbandbreite je Kunde von 10 Mbps) und einer Gigabitversorgung zu treffen. Bei der Analyse unterscheiden wir die Bedingungen unter „Line-of-Sight“ von denen „ohne Line-of-Sight“, die für uns Eckwerte für die Grenzen der Leistungsfähigkeit darstellen. (Abschnitt 2.2.1).

In Kapitel 3 nehmen wir den Vergleich von FWA und FTTH vor. Dazu erläutern wir zunächst die methodische Herangehensweise. Dies umfasst die Erstellung eines Besiedlungsstrukturenmodells (Excel/VBA-Modell) zur Generierung hypothetischer, generischer Besiedlungsstrukturen, anhand derer ein szenariobasierter Vergleich des Einsatzes sowohl von FWA als auch FTTH durchgeführt werden kann (Abschnitt 3.2).

In einem weiteren Schritt erstellen wir ein Investitionsmodell, um eine Bewertung der Technologiewahl (FWA oder FTTH) in Abhängigkeit verschiedener Besiedlungsstrukturen vorzunehmen. Die Berechnungen werden anhand endogen dimensionierter Anlagen und technischer Einrichtungen für eine Vielzahl von Szenarien durchgeführt, wobei die für den Technologievergleich herangezogenen Szenarien auf stilisierten Besiedlungsstrukturen basieren. Dabei wird für die analysierten Fälle jeweils auch die Anschlussdichte variiert.

- a. Dichter besiedelter Kern, dünner besiedelte Peripherie
- b. Streusiedlung mit äquidistanten Anschlüssen im inneren und äußeren Bereich

In den letzten Abschnitten geben wir eine Zusammenfassung der abgeleiteten Ergebnisse.

2 Charakteristika von FWA-Lösungen

FWA-Lösungen dienen der Anbindung von Haushalten bzw. Gebäuden, welche nicht per Glasfaser-Technologie angebunden sind oder werden, durch den ersatzweisen Einsatz von (Mobil-)Funktechnologien. Es wird zwar (Mobil-)Funktechnologie verwendet, allerdings entfällt hier der Mobilitätsaspekt. Als wesentlicher Grund für diese Technologiewahl werden die Investitionen je Anschluss angeführt, die zumeist von der großen Entfernung der anzubindenden Liegenschaft oder Gebäudegruppe an ein bestehendes oder zu errichtendes Glasfasernetz, ggf. verstärkt durch die Unwegsamkeit des Geländes, getrieben werden, und deren Höhe die Erschließung der Liegenschaft oder Gebäudegruppe durch Festnetztechnologien unwirtschaftlich macht. Diese Einschätzung ist sowohl bei einer beabsichtigten Versorgung mit VHCN (1 Gbps), als auch bei einer Grundversorgung (10 Mbps) zu beobachten.

FWA-Lösungen verwenden zur Überbrückung der Distanz bis zum Endkunden Mobilfunktechnik der 4. und 5. Generation, wobei die (Mobil-)Funktechnik beibehalten wird, jedoch der Mobilitätsaspekt entfällt. Dadurch wird es möglich, nutzerseitig reichweitensteigernde Antennentechnik (z.B. zum Senderstandort hin ausgerichtete Outdoor-Antennen) zu verwenden.

Zur Erreichung auch großer Datenübertragungsraten bei Endkunden ist auf der einen Seite eine hinreichend große Bandbreite notwendig, auf der anderen Seite steigert eine direkte Sichtverbindung zwischen den Antennen die mögliche Datenrate erheblich, denn die Sendeleistung wird nicht durch dämpfende Sichtblockaden beeinträchtigt. Bei einer bestehenden direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger wird von Line-of-Sight-Bedingungen (LOS) gesprochen, wenn eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger nicht möglich ist von Non-Line-of-Sight-Bedingungen (NLOS).

Generell ist anzumerken, dass FWA-Lösungen im Vergleich zu FTTH-Lösungen immer auch schwankenden externen Einflüssen wie Niederschlag (Regen, Schneefall, Nebel) und Blitzschlag und anderen elektromagnetischen Störgrößen ausgesetzt sind, welche die Leistungsfähigkeit vorübergehend beeinflussen. Darüber hinaus wird die mögliche Reichweite durch die eingesetzte Mobilfunktechnologie (spektrale Effizienz), die vorhandene Bebauungsstruktur, die Topologie des Geländes und die vorhandene Vegetation beeinflusst.

Ein weiteres Einsatzgebiet von FWA-Lösungen ist auch die Versorgung großer Gebäude (z.B. auch in urbanen Gebieten) mit Gigabit-Internet über Funk, um dort eine aufwändige Aufrüstung der hausinternen Infrastruktur mit Glasfaser zu umgehen. Dieser Aspekt ist aber nicht Gegenstand dieser Studie.¹²

¹² Hier stehen beispielsweise WiFi 6 oder 7 im Wettbewerb zu den Mobilfunktechniken: vgl. Kroon, P.; Godlovitch, I.; Plückerbaum, T.: Sustainability Benefits of 6 GHz Spectrum Policy, study for Wi-Fi Alliance, Bad Honnef, Austin-Texas, August 2023, <https://www.wi-fi.org/file/sustainability-benefits-of-6-ghz-spectrum-policy>

2.1 Technische Voraussetzungen und Realisierungsformen

2.1.1 Eigenschaften von Funktechnologien sowie hoher und niedriger Frequenzen

Grundsätzlich gilt, dass niedrige Frequenzen (700 MHz – 3.600 MHz) eine hohe Reichweite und gute Materiedurchdringungseigenschaften haben, die eine bessere Indoor-Abdeckung ermöglichen und weniger Abschattung durch Sichthindernisse bedeuten. Mit ihnen geht aber eine geringe mögliche Bandbreite [MHz] einher, weil die Zahl möglicher Frequenzblöcke geringer ist. Bei den hohen Frequenzen (> 6 GHz) verhält es sich genau umgekehrt. Diese haben eine geringere Reichweite und schlechte Materiedurchdringungseigenschaften, ermöglichen aber eine große Bandbreite [MHz]. Dieses Dilemma gilt es bei FWA-Lösungen zu beachten. Niedrige Frequenzen sind daher eher geeignet zur Grundversorgung (10 Mbps), dafür auch in bebauten Gebieten und auf relativ große Distanzen. Hohe Frequenzen eignen sich insbesondere auch für eine Gigabitversorgung (1 Gbps).

Eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger ist zumeist notwendig. Bei der Funkplanung sind zwingend die lokale Bebauungsstruktur, Topografie und Vegetation zu beachten.

Um sowohl Reichweiten- als auch Datenübertragungsraten in Funknetzen zu verbessern, wurden verschiedene technische Ansätze entwickelt. Dazu zählen Beamforming, MIMO (Multiple Input Multiple Output), Carrier Aggregation und die Verwendung von Außenantennen (CPE).

Auf die Aspekte zu Beamforming, MIMO, Carrier Aggregation und Bandbreite (spektrale Effizienz) gehen wir in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter ein.

2.1.2 Beamforming

Eine „normale“ Antenne, bestehend aus einem Stab, sendet die Funkwellen in alle Richtungen (360°) aus. Beamforming,¹³ oder deutsch Strahlformung, nutzt mehrere Antennen gleichzeitig zur Übertragung des gleichen Signals und nutzt hierbei deren Interferenzen¹⁴, um die Funkwellen gerichtet zu bündeln (in einer gewünschten Richtung zu addieren). Dies führt zu deutlichen Reichweitengewinnen für das gebündelte und damit gerichtete Funksignal. Hierzu werden die Einzelsignale der genutzten Antennen so

¹³ Quelle: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/#>

¹⁴ Interferenzen entstehen immer, wenn sich Wellen überlagern. Treffen zwei Wellenberge oder Wellentäler aufeinander, so verstärken sich diese, trifft jedoch ein Wellenberg auf ein Wellental, so löschen sich beide gegenseitig aus.

berechnet, dass die Phasenverschiebung und Amplitudenskalierung in Summe die gewünschte Strahlform ergibt.

Heute sind die Rechner so leistungsfähig, dass es im Mobilfunk sogar möglich ist, nicht nur ein stationäres, sondern auch ein sich bewegendes Endgerät mit dem Strahl zu verfolgen¹⁵. Da die Wellenlänge bei den mmWave-Trägerfrequenzen sehr klein ist – eben wenige Millimeter –, sind auch die benötigten Antennen sehr klein und es werden (viele) Antennengruppen auf einem Panel angebracht, von welchen einige dann für das Formen eines Strahls zusammen geschaltet werden können. Das gesamte Antennenpanel ist dann in der Lage, mehrere gerichtete Strahlen zur Versorgung mehrerer Ziele zu erzeugen.

2.1.3 MIMO

MIMO steht für „Multiple Input Multiple Output“. ¹⁶ Ähnlich dem Beamforming werden zur Datenübertragung mehrere Antennen gleichzeitig genutzt. Bei MIMO werden die zu übertragenden Daten jedoch auf mehrere Antennen verteilt und am Empfangsgerät mit mehreren Antennen empfangen. Die Kennzeichnung vor „MIMO“ gibt an, wie viele Antenne gleichzeitig genutzt werden, so bedeutet „2X2 MIMO“, dass je zwei Antennen bei Sender und Empfänger genutzt werden. Die mögliche Steigerung der Datenrate liegt jedoch nicht beim genannten Faktor, sondern darunter. So wird bei Einsatz von 2X2 MIMO eine Steigerung von etwa 30% erwartet, bei 3X3 von etwa 50% und bei 4X4 von etwa 70%.

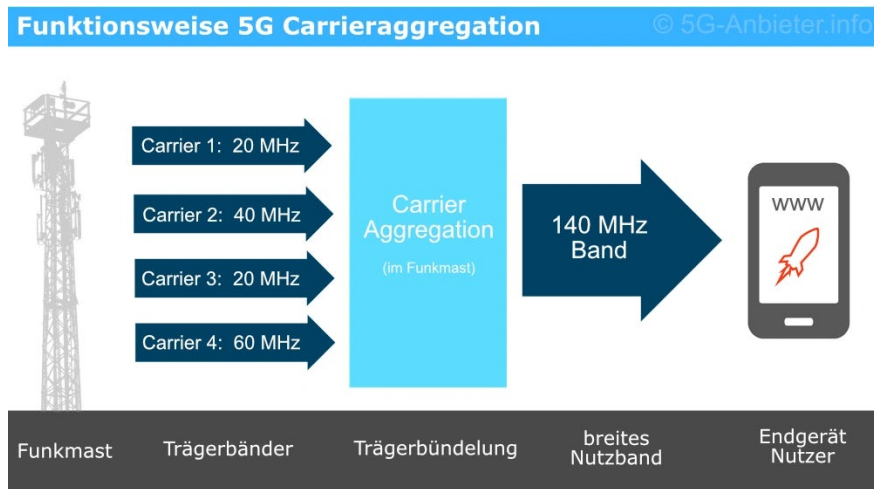
2.1.4 Carrier Aggregation

Die gesamte in einer Mobilfunkzelle bei einer bestimmten Trägerfrequenz verfügbare Bandbreite ist in einzelne Frequenzblöcke aufgeteilt, häufig z.B. in 10 MHz Blöcke, in denen dann die Modulation des Nutzsignals erfolgt. Diese Frequenzblöcke stehen für die verschiedenen Trägerfrequenzen (z.B. 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz, 3,5 GHz, ...) zur Verfügung. Ein Frequenzblock ist in seiner Datenübertragungsrate beschränkt. Diese wird auch durch die Art der Modulation im Frequenzblock bestimmt (z.B. 2G, 4G, 5G). Carrier Aggregation, die Bündelung von Frequenzblöcken für eine Übertragung, ermöglicht höhere Bandbreiten. Mit dem Carrier Aggregation Verfahren können mehrere Frequenzblöcke aus der gleichen Trägerfrequenz (Intra-band Aggregation) oder auch solche aus unterschiedlichen Trägerfrequenzen (Inter-band Aggregation) zusammen für eine Verbindung zwischen einem Sender und einem Empfänger genutzt und hierdurch die Datenübertragungsrate gesteigert werden.

¹⁵ Quelle: <https://www.computerweekly.com/de/definition/Beamforming>

¹⁶ Quelle : [https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO_\(Nachrichtentechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO_(Nachrichtentechnik))

Abbildung 1: Carrier Aggregation



Quelle: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-carrier-aggregation.html>

2.1.5 Bandbreite

Die verfügbare Bandbreite (angegeben in MHz) ist die Summe der nutzbaren Frequenzblöcke und spielt im Zusammenhang mit der angenommenen spektralen Effizienz (angegeben in bit/s/Hz, auch Bandbreiteneffizienz genannt) eine maßgebliche Rolle für die maximal mögliche Datenübertragungsrate. Die spektrale Effizienz ist hierbei eine Eigenschaft der Mobilfunkgeneration. Mathematisch sind die beiden Werte zu multiplizieren, um die maximal mögliche Datenübertragungsrate zu bestimmen. Bei einer angenommenen spektralen Effizienz von z.B. 10 bit/s/Hz und einer verfügbaren Bandbreite von 10 MHz ergibt sich rechnerisch eine maximal mögliche Datenübertragungsrate von

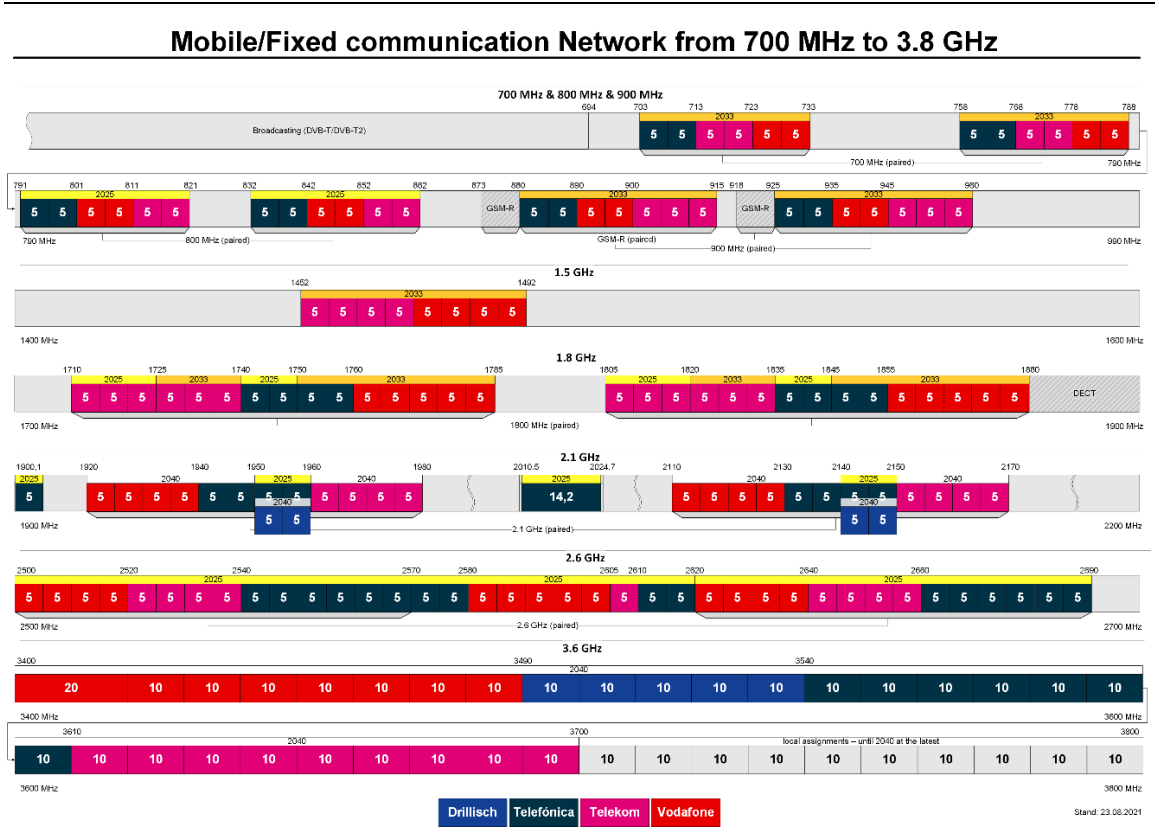
$$10 \text{ bit/s/Hz} * 10.000.000\text{Hz} = 100.000.000\text{bit/s} = 100\text{Mbit/s.}$$

Diese Datenübertragungsrate ist praktisch nur direkt an der Sendeantenne verfügbar und nimmt bei Sichtverbindung zum Empfänger exponentiell mit der Entfernung zur Sendeantenne ab.

Hinzu kommen weitere Störfaktoren wie Topologie, Vegetation, Wetter und Bebauung. Am Rechenbeispiel lässt sich schon erkennen, dass mit der angenommenen Bandbreite und der angenommenen spektralen Effizienz grundsätzlich keine Gigabit-Versorgung möglich ist. Hierzu wäre eine gebündelte Bandbreite von mindestens 100 MHz notwendig. Dieses ist aber z.B. bei einer Trägerfrequenz von 800 MHz gar nicht verfügbar, weil sich bei 800 MHz + 100 MHz bereits die nächste Trägerfrequenz von 900 MHz befindet und sich bei 800 MHz – 100 MHz bereits die Trägerfrequenz von 700 MHz. Darüber hinaus müssen sich die Mobilfunkanbieter die Bandbreite rund um eine Trägerfrequenz in einzelne Frequenzblöcke „teilen“, d.h. sie ersteigern i.d.R. einzelne Frequenzblöcke von 10 MHz. Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang, dass bei niedrigen Frequenzen weniger Bandbreite verfügbar ist, als bei den hohen Frequenzen. Dies wird deutlich, da z.B.

in der ersten und zweiten Zeile der Abbildung (Frequenzbereich 700-900 MHz) nur jeweils 2 bzw. 3 Frequenzblöcke zu je 5MHz (gepaart dann 4 bzw. 6) je Mobilfunkbetreiber zur Verfügung stehen. Dagegen stehen im Frequenzbereich 3,6 GHz (letzte beiden Zeilen der Abbildung) bereits bis zu 90 MHz für einen Mobilfunkbetreiber zur Verfügung.

Abbildung 2: Frequenzaufteilung Deutschland Stand 23.08.2021



Quelle: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/Areas/Telecommunications/Companies/TelecomRegulation/FrequencyManagement/ElectronicCommunicationsServices/FrequencyAward2018/20200128_SpectrumDiagram_pdf?__blob=publicationFile&v=1

2.2 WIK-Propagation-Modell

Zur Abschätzung der möglichen Reichweiten wurde das WIK-Propagation-Modell entwickelt. Das Modell vereint die Möglichkeit entweder in Anlehnung an Okumura-Hata eine NLOS oder unter Berücksichtigung von Freiraumdämpfung eine Line-of-Sight (LOS) abzubilden. Es ermöglicht somit auf der einen Seite, die Reichweiten unterschiedlicher Trägerfrequenzen in einem bebauten Gebiet ohne direkte Sichtverbindung (Non-Line-of-Sight - NLOS) zwischen Sender (Basisstation) und Empfänger (kundenseitiges Empfangsgerät) auf der Basis der Methode von Okumura-Hata abzuschätzen. Zwar ist das originäre Okumura-Hata-Modell nur für niedrige Trägerfrequenzen vorgesehen, es liefert aber auch für mmWave Trägerfrequenzen weitestgehend plausible Ergebnisse.

Auf der anderen Seite bestimmt das Modell mögliche Reichweiten in Gebieten mit direkter Sichtverbindung (Line-of-Sight – LOS) zwischen Sender und Empfänger. Das wird im Modell durch die Modellierung des Freiraum-Verlustes berücksichtigt. In realen Situationen ist die Dämpfung tatsächlich höher zu erwarten, was durch eine konservative Parametrisierung in Bezug auf Antennen-Gewinn, Beamforming-Gewinn und spektrale Effizienz berücksichtigt wurde. Insgesamt liefert das Modell plausible Ergebnisse, welche mit Annahmen realer FWA-Ausbauvorhaben zur Reichweite von FWA-Systemen übereinstimmen.

Wesentliche Modellparameter sind:

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| • Trägerfrequenz [MHz] | siehe unten |
| • Sendeleistung [W] | 2W ¹⁷ |
| • Antennen-Gewinn [dBi] | 10dBi |
| • Beamforming-Gewinn [dBi] | 10dBi |
| • Empfängerempfindlichkeit [dB] | -96dB |
| • Bandbreite [MHz] | siehe unten |
| • Spektrale Effizienz [bit/s/Hz] | 15 bit/s/Hz |

Es wurden die folgenden Trägerfrequenzen und Bandbreiten untersucht:

- 700 MHz mit 20 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 800 MHz mit 20 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 900 MHz mit 20 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 1.500 MHz mit 20 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 1.800 MHz mit 60 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 2.100 MHz mit 40 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 2.600 MHz mit 45 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 3.600 MHz mit 90 MHz Bandbreite (lizenzierte Bandbreite)
- 6 GHz mit 400 MHz Bandbreite (unlizenzierte Bandbreite)
- 26 GHz mit 400 MHz Bandbreite (unlizenzierte Bandbreite)

2.2.1 Line-of-Sight Modellierung

Es handelt sich hierbei nicht um ein präzises Verfahren zur Bestimmung der möglichen Datenrate bei angenommener Distanz zwischen Sender und Empfänger. Diese präzisen Verfahren werden normalerweise bei einer Funknetzplanung eines Funk-Netzbetreibers mit Hilfe eines Planungstools eingesetzt, das die örtlichen Gegebenheiten detailliert abbildet. Die Berechnungen liefern aber plausible Ergebnisse für die späteren Betrachtungen und Abschätzungen in dieser Studie.

¹⁷ Es wurde die typische Sendeleistung eines handelsüblichen Outdoor CPE angenommen, da ja nicht nur die Basisstation bis zum Endkunden-Gerät funken muss, sondern das Endkunden-Gerät auch wieder zurück zur Basisstation.

Der Pfadverlust wird über die Formel zur Berechnung der Freiraumdämpfung bestimmt:

$$Loss [dB] = 20 \times \log_{10} \frac{4 \times \pi \times d}{\lambda} 18$$

d = Distance [m]

λ = Wellenlänge [m]

Damit wird die Stärke des Eingangssignals (Receiving Level) [dB] berechnet durch Addition der Sendeleistung [dBm], plus Antennengewinn [dBi], plus Beamforminggewinn [dBi], abzüglich des Pfadverlusts [dB] für die gewählte Entfernung (Distance):

$$Rx [dB] = Tx + GA + GB - L$$

Rx = Receiving Level [dB]

Tx = Sendeleistung [dBm]

GA = Antennengewinn [dBi]

GB = Beamforminggewinn [dBi]

L = Loss [dB] bei gewählter Distanz

Durch Vergleich des berechneten Eingangssignals mit der angenommenen Empfängerempfindlichkeit wird das Empfangsbudget [dB] bestimmt.

Das Empfangsbudget für einen angenommenen Abstand von 1 Meter von der Sendeanenne wird als 100% angenommen. Mit steigender Entfernung zum Sendestandort sinkt das Empfangsbudget durch den steigenden Pfadverlust und wird mit dem Empfangsbudget bei 1 Meter in Beziehung gesetzt. Hierdurch erfolgt eine Skalierung der Datenrate, welche für den 100%-Punkt mit der aus angenommener Bandbreite [MHz] und angenommener spektraler Effizienz [bit/s/Hz] berechneten maximalen Datenübertragungsrate gleichgesetzt wird. Für jede Entfernung ab 1 Meter kann damit die maximal mögliche Datenrate grob abgeschätzt werden.

2.2.2 Non-Line-of-Sight Modellierung

Auch hierbei handelt sich nicht um ein präzises Verfahren zur Bestimmung der möglichen Datenrate bei angenommener Distanz zwischen Sender und Empfänger, siehe Kapitel 2.2.1.

Zur Quantifizierung von Pfadverlusten¹⁹ wurde auf ein öffentlich verfügbares Tool (Kalkulator) „RF Wireless World“²⁰ zurückgegriffen. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Parametern

- 30 m Antennenhöhe Sender,
- 2 m Antennenhöhe Empfänger

für die Frequenzen 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1.500 MHz, 1.800 MHz, 2.100 MHz, 2.600 MHz, 3.600 MHz, 6 GHz und 26 GHz für diverse Entfernungen zwischen 1 und 10.000 Metern bestimmt. Die Ergebnisse des Kalkulators erscheinen für den vorgesehenen Zweck plausibel.

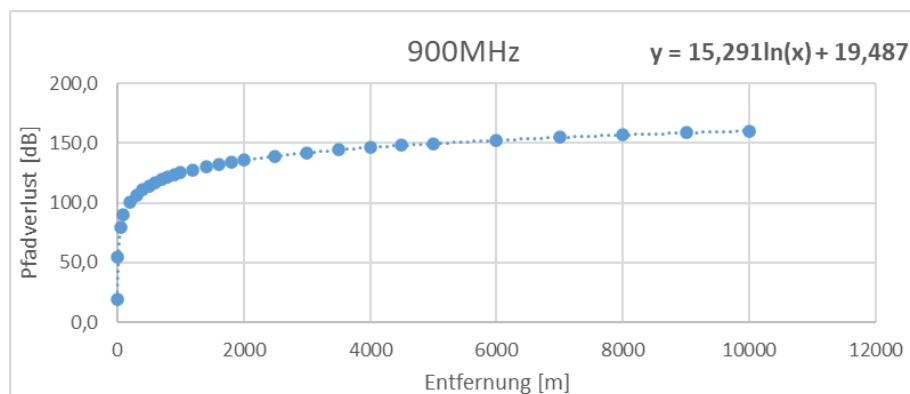
Die so ermittelten Relationen zwischen Distanz und Pfadverlust für die untersuchten Frequenzbereiche haben wir dann einer Extrapolation unterzogen und durch eine Logarithmus-Funktion angenähert. Für jeden Frequenzbereich ergibt sich damit eine Funktion:

$$\text{Pfadverlust [dB]} = C1 * \ln(d) + C2$$

- D = Distanz [m]
- C1 = Koeffizient 1
- C2 = Koeffizient 2

Für den Frequenzbereich 900 MHz ergibt sich beispielsweise die folgende Extrapolation:

Abbildung 3: Extrapolation Pfadverlust-Distanz für 900 MHz



Quelle: WIK.

¹⁹ Pfadverluste, englisch Path Loss, beschreibt den Leistungsverlust einer elektromagnetischen Welle, ausgehend von einem Sender bis zu einem Empfänger über die Distanz. Ursache für einen Pfadverlust ist auf der einen Seite die sogenannte Freiraumdämpfung, weil sich die Sendeenergie mit zunehmender Distanz auf eine immer größer werdende (Kugel-)Fläche verteilt und auf der anderen Seite weitere Verluste z.B. durch Absorption hinzu kommen.

²⁰ <https://www.rfwireless-world.com/calculators/Hata-model-path-loss-calculator.html> Der Kalkulator auf dieser Website ermöglicht es, durch Angabe von Trägerfrequenz, Antennenhöhen und Abstand einen Pfadverlust zu berechnen. Hinweis: Bei Distanzen muss ein „.“ Als Dezimaltrennzeichen verwendet werden.

Mit der Extrapolations-Funktion haben wir dann die Stärke des Eingangssignals (Receiving Level) [dB] bestimmt durch Addition der angenommenen Sendeleistung [dBm], plus angenommenen Antennengewinn [dBi], plus angenommenen Beamforming-Gewinn [dBi], abzüglich des Pfadverlusts [dB] für die gewählte Entfernung (Distance).

Durch Vergleich des berechneten Eingangssignals mit der angenommenen Empfängerempfindlichkeit wird das Empfangsbudget [dB] bestimmt.

Das Empfangsbudget für einen angenommenen Abstand von 1 Meter von der Sendeanenne wird als 100% angenommen. Mit steigender Entfernung zum Sendestandort sinkt das Empfangsbudget durch den steigenden Pfadverlust und wird mit dem Empfangsbudget bei 1 Meter in Beziehung gesetzt. Hierdurch erfolgt eine Skalierung der Datenrate, welche für den 100%-Punkt mit der aus angenommener Bandbreite [MHz] und angenommener spektralen Effizienz [bit/s/Hz] berechneten maximalen Datenübertragungsrate gleichgesetzt wird. Für jede Entfernung ab 1 Meter kann damit die maximal mögliche Datenrate grob abgeschätzt werden.

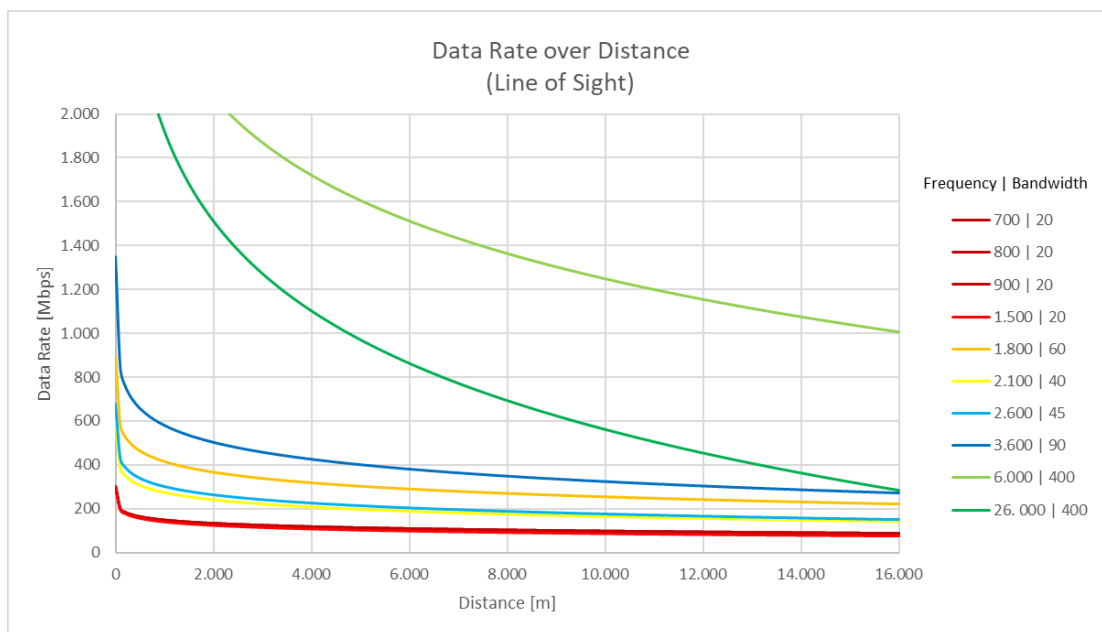
2.3 Ergebnisse der Abschätzung von Reichweiten der verschiedenen Trägerfrequenzen

In den nachfolgenden Abschnitten werden die möglichen Reichweiten mittels WIK-Propagation-Modell in Abhängigkeit von der verwendeten Trägerfrequenz [MHz] und der dort verwendeten Bandbreite [MHz] geschätzt und grafisch dargestellt.

2.3.1 Geschätzte Datenraten über Entfernung Line-of-Sight

In der nachfolgenden Abbildung sind die Ergebnisse der Abschätzung von erreichbaren Datenübertragungsraten unter „Line-of-Sight“ Bedingungen für die verschiedenen Trägerfrequenzen in Abhängigkeit der Entfernung vom Antennenstandort dargestellt.

Abbildung 4: Datenrate über Entfernung, Line-of-Sight



Quelle: WIK.

Das 700 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 800 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 900 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 1.500 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 1.800 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 60 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 2.100 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 40 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 2.600 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 45 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 3.600 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 90 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nur auf wenige 10 m möglich.

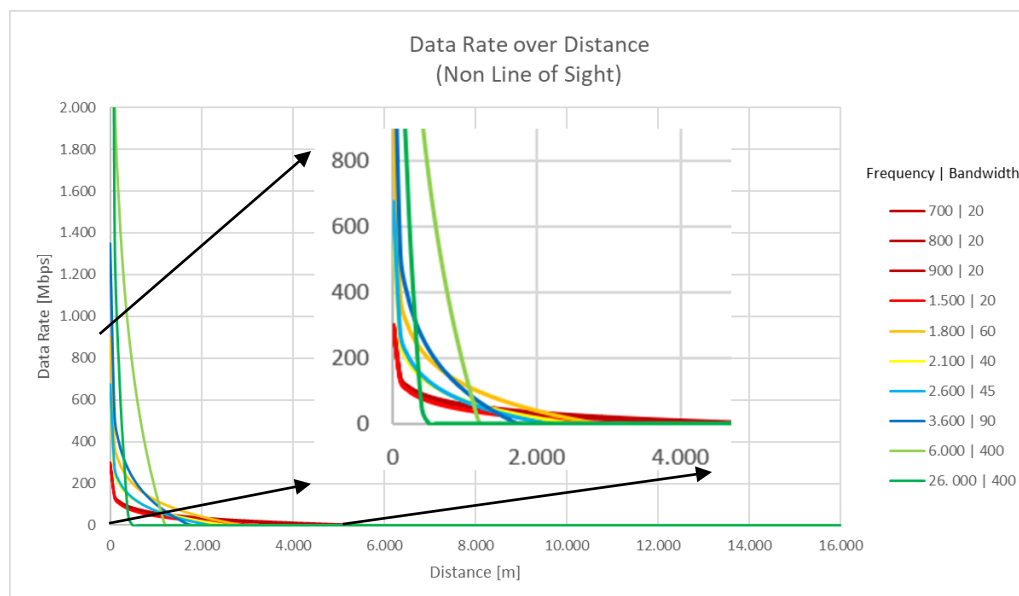
Das 6.000 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 400 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis über 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist unter Line-of-Sight Bedingungen bis etwa 16 km möglich.

Das 26.000 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 400 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 25 km unter Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von 1 Gigabit/s ist unter Line-of-Sight Bedingungen bis etwa 4,5 km möglich.

2.3.2 Geschätzte Datenraten über Entfernung Non-Line-of-Sight

In der nachfolgenden Abbildung sind die Ergebnisse der Abschätzung von erreichbaren Datenübertragungsraten unter „Non-Line-of-Sight“ Bedingungen für die verschiedenen Trägerfrequenzen in Abhängigkeit der Entfernung vom Antennenstandort dargestellt.

Abbildung 5: Datenrate über Entfernung, Non-Line-of-Sight



Quelle: WIK.

Das 700 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 4,4 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 800 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 4,0 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 900 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 3,6 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 1.500 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 20 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 2,5 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 1.800 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 60 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 2,6 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 2.100 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 40 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 2,2 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 2.600 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 45 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 1,9 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

Das 3.600 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 90 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 1,6 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist nicht möglich.

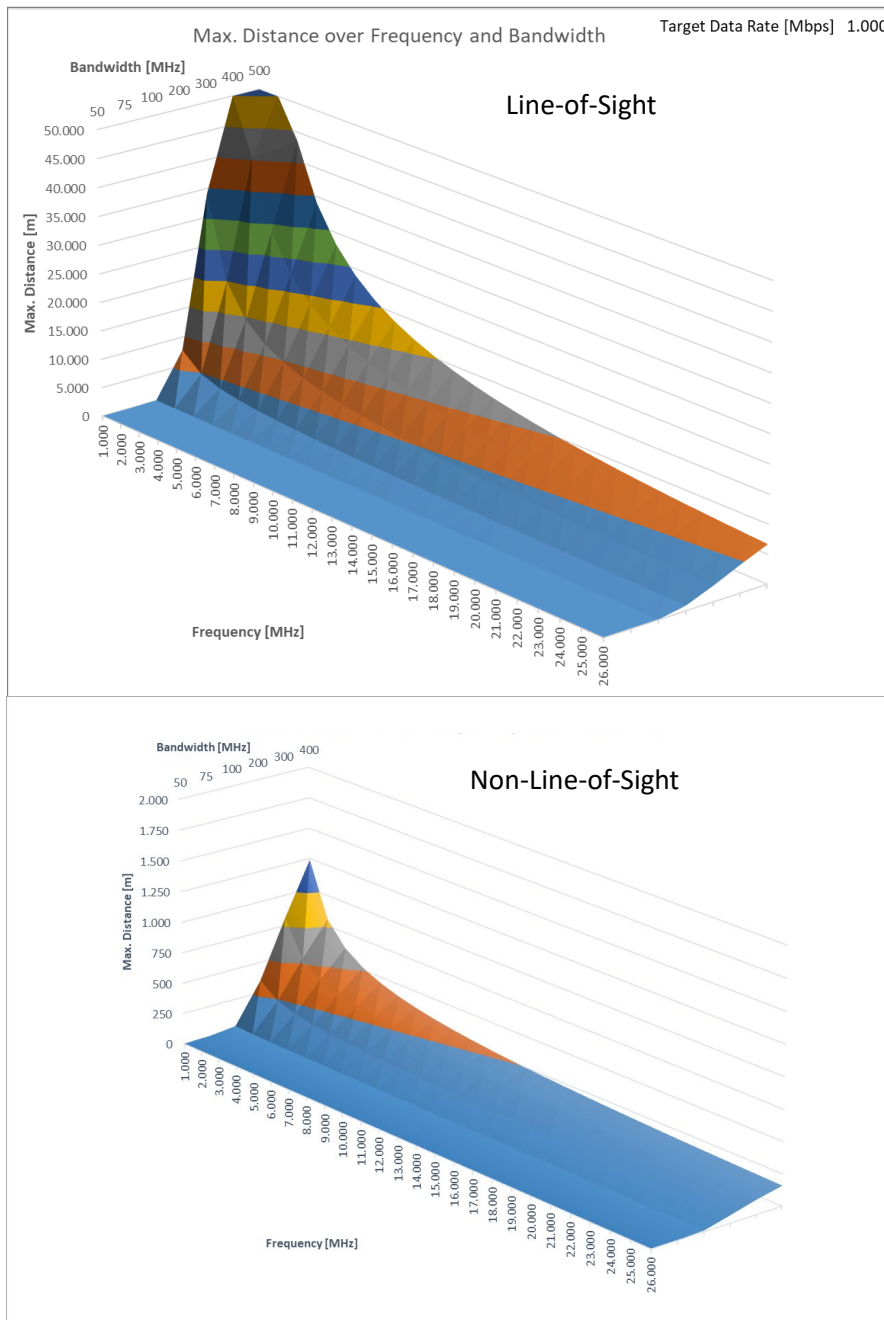
Das 6.000 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 400 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 1,1 km unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von Gigabit/s ist unter Non-Line-of-Sight Bedingungen bis etwa 400 m möglich.

Das 26.000 MHz-Frequenzband kann bei Nutzung von 400 MHz-Bandbreite Datenraten von 10 Mbps bis etwa 400 m unter Non-Line-of-Sight Bedingungen übertragen. Die Übertragung von 1 Gigabit/s ist unter Non-Line-of-Sight Bedingungen bis etwa 150 m möglich.

2.3.3 Grundsätzlicher Zusammenhang Trägerfrequenz-Bandbreite-Distanz

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Trägerfrequenz, genutzter Bandbreite und der daraus resultierenden Reichweite (hier am Beispiel unter Sichtverbindungs-Bedingungen) für eine Ziel-Datenrate von 1 Gbps.

Abbildung 6: Zusammenhang Trägerfrequenz-Bandbreite-Distanz (LOS)



Quelle: WIK

Mit steigende Trägerfrequenz (X-Achse) nimmt die mögliche Reichweite (Y-Achse) auch bei steigender Nutzung von Bandbreite (Z-Achse) ab. Die Abbildung zeigt eine Ziel-Datenrate von 1 Gbps. In der Praxis stehen aber gerade bei den niedrigen Trägerfrequenzen, welche grundsätzlich sehr gut geeignet wären, hohe Reichweiten zu erzielen, nur geringe Bandbreiten zur Verfügung. Weiterhin ist zu beachten, dass Reichweiten größer als 25 km wegen der Erdkrümmung nur schwer zu erreichen sind, da dann besonders hohe Antennenstandorte nötig wären. Daher ist es notwendig, die bei den hohen

Trägerfrequenzen verfügbaren Bandbreiten zu nutzen, um akzeptable Reichweiten (einige km) zu erreichen. Jeder Farbwechsel in der Abbildung repräsentiert einen Reichweitenunterschied von 5 km. In Abbildung 6 ist der Zusammenhang unter Non-Line-of-Sight-Bedingungen im unteren Teil dargestellt. Auffällig sind die signifikant geringeren möglichen Distanzen.

2.3.4 Schlussfolgerungen für die Reichweiten bei Line-of-Sight und Non-Line-of-Sight

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Berechnungen im WIK Propagation Modell für die verschiedenen Trägerfrequenzen und die dafür als verfügbar angenommenen Bandbreiten numerisch dargestellt.

Tabelle 1: Abgeschätzte Reichweiten aus dem WIK-Propagation-Modell

Frequency [MHz]	Spectrum [MHz]	Max. Distance LOS @ 1Gbps [m]	Max. Distance NLOS @ 1Gbps [m]	Max. Distance LOS @ 10Mbps [m]	Max. Distance NLOS @ 10Mbps [m]
26.000	400	4.763	160	25.474	414
6.000	400	16.165	401	110.118	1.195
3600	90	23	11	171.030	1.661
2600	45	0	0	215.404	1.991
2100	40	0	0	259.679	2.289
1800	60	0	0	324.511	2.661
1500	20	0	0	291.021	2.573
900	20	0	0	476.846	3.687
800	20	0	0	534.349	4.006
700	20	0	0	607.973	4.401

In Tabelle 1 steht in der Spalte „Frequency“ die jeweilige Trägerfrequenz und in der Spalte „Spectrum“ die angenommene Bandbreite.

Im Vergleich treten die signifikanten Unterschiede zwischen Line-of-Sight und Non-Line-of-Sight zutage. Insbesondere bei einer Ziel-Datenübertragungsrate von 1 Gbps zeigt sich, dass im Prinzip nur die mmWave-Frequenzen infrage kommen, die Begründung liegt in den nicht für eine Gigabitübertragungsrate vorhandenen Bandbreiten bei den niedrigen Frequenzen. Bei einer Ziel-Datenübertragungsrate von 10 Mbps zeigt sich die Stärke der niedrigen Frequenzen mit deutlich besserer Reichweite und Materialdurchdringungseigenschaften.

Reichweiten von über 25 km sind nicht als realistisch einzuschätzen, selbst bei Vernachlässigung etwaiger Hindernisse. Wegen der Erdkrümmung müssten dann bereits deutlich höhere Masten verwendet werden. Bei einer Höhe von 50 m beträgt die Entfernung zum Horizont etwa 25 km. (Zum Vergleich: Bei einer Höhe von 2 m beträgt die Entfernung

zum Horizont etwa 5 km und bei einer Höhe von 20 m beträgt die Entfernung zum Horizont etwa 16 km.)²¹

Für die Untersuchungen im WIK-Investitionsmodell werden daher die folgenden Reichweiten als Radien untersucht:

Tabelle 2: Reichweiten (Radien) für den vorzunehmenden Investitionsvergleich

Frequency [MHz]	LOS	NLOS	Versorgung
26.000	4,5km	150m	1 Gbps
6.000	16km	400m	1 Gbps
3600	25km	1600m	10 Mbps
2600		1900m	10 Mbps
1800		2600m	10 Mbps
900		3600m	10 Mbps

²¹ <https://www.omnicalculator.com/de/physik/erdkruemmung-rechner>

3 FWA und FTTH im Vergleich

Es sind mehrere ökonomische Aspekte beim Vergleich zwischen FTTH-Festnetz und Fixed Wireless Access zu beobachten.

Beim Festnetz sind die Investitionen für einen Festnetzausbau stark abhängig von der Länge der Anschlusslinie, insbesondere des Verzweigerkabel-Segments. Gemeinsame Nutzung von Grabeninfrastruktur für mehrere Gebäude senkt dabei die Investitionen je Anschluss. Die Möglichkeit hierzu ist aber von der tatsächlichen Bebauungsstruktur abhängig.

Bei FWA werden die Investitionen für eine FWA-Anbindung durch die Standortinvestitionen für die Antennen bestimmt. Das sind einerseits der Mast und die benötigten Antennen, die Basisstation selbst, aber auch deren Glasfaser- oder Richtfunkanbindung. Nutzerseitig wird ein (Outdoor-)CPE benötigt, welches auch die Antenne enthält und einen Ethernet-Anschluss für die Endgeräte bereitstellt.

Daher wird im Investitionsvergleich ein Break-Even-Punkt gesucht, ab dem FWA preiswerter sein kann als Festnetz FTTH.

Bei allen Betrachtungen ist aber auch zu berücksichtigen, dass das Festnetz (FTTH-PtP) als „futureproof“ gilt und auch zukünftigen Ansprüchen an steigende Datenübertragungsraten genügt, ohne dass zusätzliche Investitionen in die Übertragungsmedien getätigt werden müssen. Darüber hinaus sind die glasfaserbasierten Technologien qualitativ hinsichtlich der Übertragungssicherheit und Zuverlässigkeit einer Funkverbindung überlegen.

3.1 Fragestellung und methodische Vorgehensweise

Konkret untersucht werden soll, ob FWA zur Versorgung entlegener Anschlüsse aus ökonomischer Sicht besser geeignet ist, als ein FTTH-Netz.

Zur Bewertung der unterschiedlichen Lösungen werden die Investitionen für ein FTTH-Anschlussnetz unterschiedlich strukturierter Gebiete mit den Investitionen einer ausreichenden FWA-Abdeckung derselben Gebiete bei den beiden Zieldatenübertragungsraten für jeden Anschluss verglichen. Für die FWA-Abdeckung werden die Radien, also die möglichen Reichweiten der Basisstationen variiert. Es werden die ermittelten Radien aus der vorangegangenen Untersuchung (siehe Kapitel 2) verwendet. Geringere Reichweiten führen hierbei dazu, dass mehr Basisstationen zur Funkversorgung eines Gebietes benötigt werden und damit auf der Investitionsbedarf steigt.

Die methodische Vorgehensweise ist hierbei abstrakt analytisch. Hierzu werden beispielhafte Besiedlungsstrukturen/Anschlussbereiche definiert, welche die folgenden Charakteristika widerspiegeln:

- hohe zu erwartenden Investitionen wegen großer Distanzen,
- Streusiedlungen,
- verstreuten Bebauungen rund um Kerngebiete.

Aus diesen Gebietsunterschieden ergibt sich jeweils eine unterschiedliche Anzahl benötigter Mobilfunkstandorte, insbesondere in Abhängigkeit der unterstellten Trägerfrequenzen und Bandbreiten, abgeleitet aus der Zieldatenübertragungsrate.

Für die definierten Beispiele werden verschiedene Szenarien-Rechnungen durchgeführt und die Investitionen für die Realisierung der betrachteten Anschlüsse bestimmt:

- gesamter Anschlussbereich mit FTTH²²,
- dichte Bebauung mit FTTH und dünne (äußere) Bebauung alternativ mit FWA,
- gesamter Anschlussbereich mit FWA.

Es werden Sensitivitätsanalysen mit variablen Anschlussdichten und verschiedenen Bauungsstrukturen durchgeführt und vergleichende Aussagen zwischen FTTH und FWA abgeleitet:

- Merkmale, die eine Vorteilhaftigkeit von FWA begünstigen, ökonomische Grenzen von FWA,
- Relation der Investitionen je Anschluss in Abhängigkeit vom Gebäudeabstand, Anzahl Anschlüsse und Anschlussdichte,
- FWA für verschiedene Trägerfrequenzen und Bandbreiten und den daraus resultierenden Reichweiten.

3.2 Modelldesign

Für die Zwecke der Untersuchung wurde ein Excel-basiertes Modell erstellt, welches eine Investitionswertermittlung für einen stilisierten Anschlussbereich erlaubt. Das verwendete Modell basiert auf dem bereits für den WIK Diskussionsbeitrag Nr. 494²³ verwendeten Modell.

Das Modell ist als indikatives Modell zu verstehen und soll eine systematische Analyse der ökonomischen Zusammenhänge von Anschlussbereichen ermöglichen. Dabei steht 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

²² Das Design der untersuchten Anschlussbereiche wird im Kapitel 3.2 näher beleuchtet.

²³ Ockenfels, M., Kulenkampff, G. 2022: Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_494.pdf.

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

3.2.1 Grundlegende Modellannahmen

Das Modell ist für die Festnetzmodellierung 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 Querschnitt 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-Segment).²⁷

Für das Verzweigerkabel-Segment 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. Als Sensitivität kann alternativ auch eine Luftverkabelung 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 jedoch 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.

Als Alternative zum Festnetz-Szenario wird parallel auch ein FWA-Szenario unabhängig vom Festnetz-Szenario berechnet. Hierbei werden passend zu den parametrisierten Gebäuden die benötigten Senderstandorte zur Funkversorgung bestimmt, welche ihrerseits per Glasfaser an den MPoP angebunden werden.

²⁷ 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.

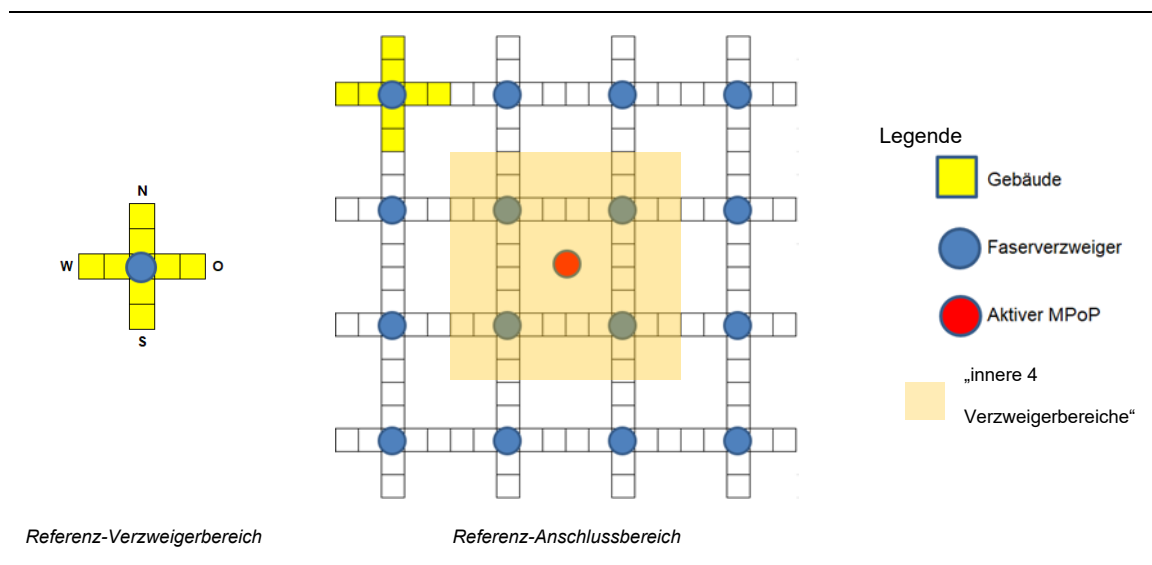
Im MPoP können Investitionen für die benötigte Fläche (Grundfläche plus Flächenbedarfe für ODF-Racks und Switch-Racks) sowie die ODF-Belegung (ODF = Optical Distribution Frame) angenommen werden. Im Rahmen dieser Studie werden jedoch keine Investitionen für den MPoP angenommen, da unterstellt wird, dass diese für Festnetz-Szenarien und FWA-Szenarien gleich sind und daher für den grundlegenden Vergleich der Technologien unerheblich sind.

3.2.2 Angenommene Topologie für die Versorgungsgebiete

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 (generischen) Verzweigerbereichs ab (Referenz-Verzweigerbereich). Das Modell ist so aufgebaut, dass anhand EINES parametrisch definierten Verzweigerbereichs ein symmetrischer Anschlussbereich generiert wird, in dem eine Vervielfachung des definierten Verzweigerbereichs vorgenommen wird. Der den Modellanalysen in dieser Studie zugrunde liegende Anschlussbereich besteht dabei immer aus 16 Verzweigerbereichen.

Die Anschlussdichte des Anschlussbereichs wird mit Hilfe des Parameters „Gebäudeabstand“ kontrolliert. Die Anzahl der Anschlüsse pro Gebäude wurde in dieser Studie durchgängig auf 1 Anschluss pro Gebäude festgelegt. In der hier verwendeten Modellversion kann die parametergesteuerte Festlegung der Anschlussdichte für die inneren 4 Anschlussbereiche (diese repräsentieren z.B. ein Ortszentrum) unabhängig von den äußeren 12 Verzweigerbereichen vorgenommen werden (diese repräsentieren z.B. die ein Ortszentrum umgebende Bebauung) (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Struktur eines Verzweigerbereichs und seiner Vervielfachung



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 (siehe Abbildung 7). Dabei ist die Trassenlänge jeweils eine Funktion der Anschlüsse im Verzweigerbereich, der durchschnittlichen Anzahl Anschlüsse pro Gebäude und dem durchschnittlichen Gebäudeabstand ist.²⁸

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.

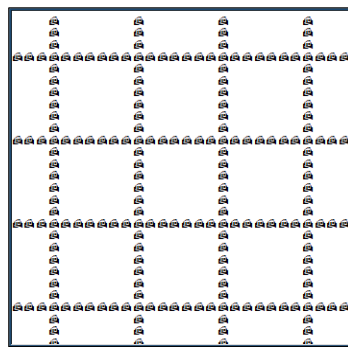
Die Größe der Gebäude, im Sinne von der Anzahl der darin enthaltenen Wohnungen, kann über einen Parameter „Anschlüsse pro Gebäude“ eingestellt werden. Aus der Kombination aus der Anzahl Anschlüsse und Anschlüsse pro Gebäude ergibt sich dann die Anzahl der Gebäude. Im Rahmen dieser Studie werden lediglich Gebäude mit *einem* Anschluss unterstellt (Einfamilienhaus).

Durch die Unabhängigkeit der inneren und äußeren Verzweigerbereiche können z.B. folgende Szenarien abgebildet werden.

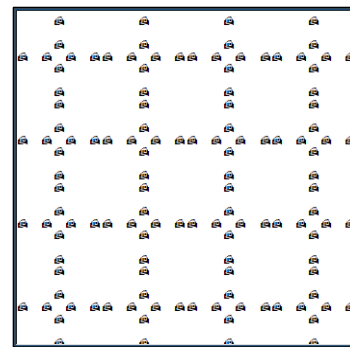
- a) Anschlussdichte innen und außen gleich – dünn besiedelt
- b) Anschlussdichte innen und außen gleich – dicht besiedelt
- c) Hohe Anschlussdichte innen und hohe Anschlussdichte außen

28 Für jede dieser vier Trassen wird angenommen, dass sich diese nicht weiter verzweigen. Für die inneren 4 Verzweigerbereiche kann die Anzahl der Gebäude bzw. Anschlüsse und der Gebäudeabstand frei gewählt werden. Für die äußeren 12 Verzweigerbereiche kann nur der Gebäudeabstand frei gewählt werden. Die Anzahl der Gebäude wird dann endogen bestimmt, damit die Grundstruktur (siehe nachfolgende Abbildung) erhalten bleibt. Dies führt z.B. bei einer Parametrisierung von relativ dichten Verzweigerbereichen innen und einem entsprechend größeren Gebäudeabstand außen zu einer verringerten Anzahl Gebäude bzw. Anschlüsse außen und damit zu einer geringeren Anschlussdichte in den 12 äußeren Verzweigerbereichen, relativ zu den 4 inneren Verzweigerbereichen.

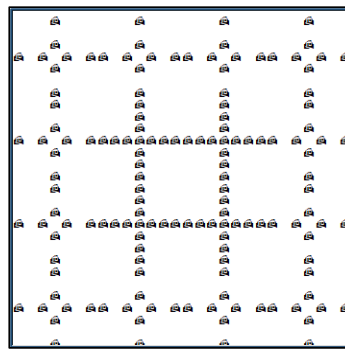
Abbildung 8 Schematische Abbildung von Besiedlungsstrukturen im WIK-Modell



a) *Innen und außen gleich,
aber dünner besiedelt*



b) *Innen dichter und außen
dünner besiedelt*



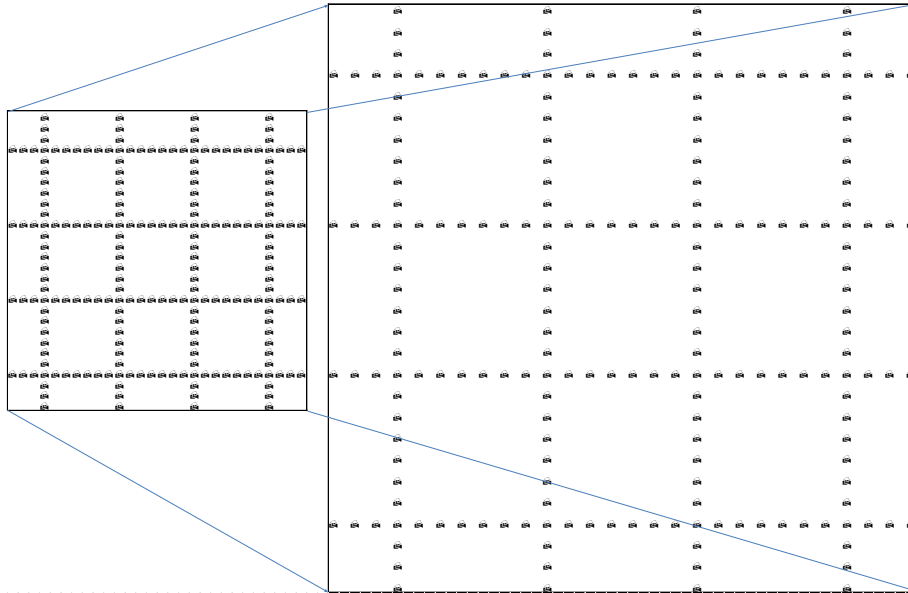
c) *Hohe Anschlussdichte innen und
geringe Anschlussdichte außen*

Quelle: WIK.

Zur Festlegung der Erstreckung des betrachteten Anschlussbereichs und der Gebäude-dichte in den inneren Verzweigerbereichen bzw. der äußeren Verzweigerbereichen wird die Parametrisierung im Modell folgendermaßen vorgenommen:

Eine Vergrößerung des Referenz-Verzweigerbereichs entweder durch eine Erhöhung der Anzahl Anschlüsse oder des Gebäudeabstands (in den Berechnungen im Rahmen dieser Studie wird aus Vereinfachungsgründen davon ausgegangen, dass in jedem Gebäude genau ein Anschluss vorhanden ist) führt aufgrund der gewählten Modellarithmetik zu einem „Aufblähen“ des gesamten Anschlussbereichs. In den später folgenden Szenarien erfolgt eine inkrementelle Erhöhung des Gebäudeabstands von 1 Meter bis 100 Meter in Schritten von 1 Meter für die inneren 4 Verzweigerbereiche und von 10 Meter bis 1000 Meter in Schritten von 10 Metern für die äußeren 12 Verzweigerbereiche. Die Anzahl der Gebäude bzw. Anschlüsse bleibt in jedem Iterationsschritt Schritt gleich, nur die räumliche Erstreckung vergrößert sich. In der konkreten hier verwendeten Parametrisierung werden je innerem Verzweigerbereich 240 Anschlüsse festgelegt, für die äußeren Verzweigerbereiche sind es jeweils 24.

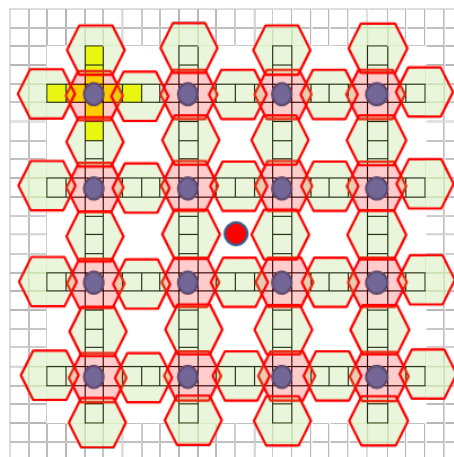
Abbildung 9: Schematische Verringerung der Besiedlungsdichte durch Vergrößerung des Gebäudeabstands



Quelle: WIK.

Diese Struktur wird genauso bei den FWA-Szenarien unterstellt. Zentraler Punkt ist ebenfalls der MPoP im Zentrum, jedoch werden die zur Funkversorgung benötigten Standorte der Basisstationen dynamisch bestimmt, um die parametrisierten Reichweiten einzuhalten und die angenommenen Gebäude zu versorgen. Damit eine Überschätzung der Standorte vermieden wird, wird kein flächiger Ansatz verfolgt, sondern die Standorte folgen den stilisierten Straßenzügen.

Abbildung 10: Versorgung des stilisierten Anschlussbereichs mit FWA



Quelle: WIK.

Die notwendigen Investitionen für FWA werden bestimmt durch:

- Standorte,
- Basisstationen,
- Anbindung (Glasfaser),
- Antennenkapazität und
- Empfangseinheit (Outdoor CPE).

Zur Vereinfachung wird sowohl bei der Festnetz-, als auch bei der FWA-Berechnung nur bis zum Hauptkabel bzw. zur Basisstation-Anbindung gerechnet, der MPoP wird als gleichwertig betrachtet und vernachlässigt.

In den später folgenden Berechnungen liegt die horizontale bzw. vertikale Erstreckung des Anschlussbereichs zwischen 480 m und 48 km.

3.2.3 Anschlüsse und Gebäude als Steuerungsgrößen der Besiedlungsdichte

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

- die Anzahl Anschlüsse pro Verzweigerbereich,
- der durchschnittliche Gebäudeabstand,
- die Anzahl Anschlüsse pro Gebäude – diese sind im Rahmen dieser Studie immer gleich eins.

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

Bei gegebener Anzahl von Anschlüssen pro Gebäude (hier immer 1) geht das Modell mit einer steigenden Anschlusszahl wie folgt um:

Jeder zusätzliche Anschluss wird im Uhrzeigersinn auf die vier Achsen zugeteilt, wobei für die Gebäude nur ein Anschluss unterstellt wird. D.H. jeder hinzukommende Anschluss vergrößert den Anschlussbereich.

3.2.4 Berücksichtigte Investitionen

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

- Verzweigerkabel-Segment (Festnetz)
- Faserverzweiger (Festnetz)

- Hauptkabel-Segment (Festnetz)
- MPoP (im Rahmen dieser Studie vernachlässigt)
- Backhaul/Uplink (im Rahmen dieser Studie vernachlässigt)
- Outdoor-CPE (FWA)
- Antennenmast
- Sendeantenne an der Basisstation (FWA)
- Basisstation (FWA)
- Anbindung der Basisstation zum MPoP (FWA)

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

3.2.4.1 Verzweigerkabel-Segment (VZK)

Das Verzweigerkabel-Segment ist das Anschlussnetz-Segment, das vom Endkundenanschluss bis zum Faserverzweiger reicht. Es wird in unserem abstrakten Modell aus vier Achsen gebildet. Jede Achse bildet eine Reihe von Gebäuden ab, deren einheitlicher Abstand zueinander parametrisch gesteuert wird („durchschnittlicher Gebäudeabstand“).

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. In der konkreten Modellanwendung in der vorliegenden Studie wird damit für jedes Gebäude ein Kabel mit einer Faser verwendet

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

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

3.2.4.2 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 Gehäuse 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.

3.2.4.3 Hauptkabel-Segment (HK)

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

Für die Anbindung eines Faserverzweigerstandorts an den MPoP wird das hierfür benötigte Kabel durch das Modell passend ausgewählt. Jeder Faserverzweiger erhält ein eigenes Kabel. Für die Investitionswertbestimmung stehen im Modell insgesamt 13 verschiedene Kabelgrößen mit unterschiedlichen Faserzahlen zur Verfügung. Es wird jeweils das kleinste Kabel ausgewählt, welches die Nachfrage am FVz bedienen kann.

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, um damit eine Annäherung an die Realität zu erreichen. 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.

3.2.4.4 Fixed Wireless Access (FWA)

Für die FWA-Szenarien wird die identische Struktur und Ausprägung der stilisierten Ortschaft übernommen, wie bereits bei den Festnetz-Szenarien.

Als Investitions-Werte werden berücksichtigt:

- Mast: 50.000€ pro Basisstation
- Basisstation: 10.000€ pro Basisstation
- Antenne (Sender): 5.000€ pro Haushalt
- Outdoor CPE: 300€ pro Haushalt
- HK-Anbindung:
 - Kabel 12 Fasern 2,30€ pro Meter
 - Graben Typ1 50€ pro Meter
 - Luftverkabelung 10,50€ pro Meter
(alternativ zur Erdverlegung – Sensitivität)

Für die Investitionswertbestimmung für die FWA-Anbindung der Haushalte wurden Schätzwerte verwendet, welche durch Anfragen bei Equipment-Herstellern untermauert werden sollten. Leider war keiner der angefragten Hersteller bereit, weiteren Input zu liefern. Daher sind die verwendeten Investitionsparameter als „Expert Best Guess“ zu verstehen.

3.3 Szenario-Rechnungen

In den nachfolgenden Szenarien werden die Ausbaustrategien FTTH einerseits und FWA andererseits anhand der Investitionen pro Anschluss untersucht und miteinander verglichen.

Dazu wird in den Basis-Szenarien ausschließlich auf die Investitionen in den Randlagen abgestellt, die in unserem Besiedlungsstrukturmodell durch die äußeren 12 Verzweigerbereiche des stilisierten Anschlussbereichs abgebildet werden.

Die Ergebnisse der Analyse haben wir nachfolgend grafisch aufbereitet. Dargestellt haben wir die Höhe des Investitionswertes je Anschluss, sowohl für FTTH als auch für FWA. Auf der X-Achse haben wir den Gebäudeabstand der äußeren Verzweigerbereiche dargestellt, so dass die Kurven den Zusammenhang zwischen Besiedlungsdichte (Gebäudeabstand bei 1 Anschluss/Gebäude) und Investitionshöhe pro Anschluss wiedergeben.²⁹

Die für FWA angenommenen Reichweiten stammen aus den Überlegungen im Reichweiten-Modell, siehe Kapitel 2.3.

Tabelle 3: Reichweiten (Radien) für den vorzunehmenden Investitionsvergleich (Identisch mit Tabelle 2)

Frequency [MHz]	LOS	NLOS	Versorgung
26.000	4,5km	150m	1 Gbps
6.000	16km	400m	1 Gbps
3600	25km	1600m	10 Mbps
2600		1900m	10 Mbps
1800		2600m	10 Mbps
900		3600m	10 Mbps

„Frequency“ steht für die Trägerfrequenz

²⁹ Um eine 10-fach höhere Anschlussdichte in den inneren 4 Verzweigerbereichen im Vergleich zu den äußeren 12 Verzweigerbereichen zu simulieren, muss in der Parametrisierung für die äußeren Verzweigerbereiche ein Faktor von 10 für den Gebäudeabstand im Vergleich zu den inneren Verzweigerbereichen angegeben werden.

Als feste Parameter wurden gewählt:

- Anzahl Anschlüsse innen: 240 je VZB
- Anzahl Anschlüsse außen: 24 je VZB

Das erzeugt einen Anschlussbereich mit insgesamt 1.248 Anschlüssen, davon 288 außen verteilt.

Als variabler Parameter wurden gewählt:

- Abstand Gebäude innen: 1 m mit Inkrement 1 m
- Abstand Gebäude außen: 10 m, mit Inkrement 10 m
→ Gebäudeabstand außen bei 100 m innen = 1.000 m (100 x 10 m)

Daraus resultieren folgende Anschluss-Dichten:

- 16.667 Anschlüsse/km² innen und 1.667 Anschlüsse/km² außen bei 1 m Gebäudeabstand
- 1,66 Anschlüsse/km² innen und 0,16 Anschlüsse/km² außen bei 100 m Gebäudeabstand

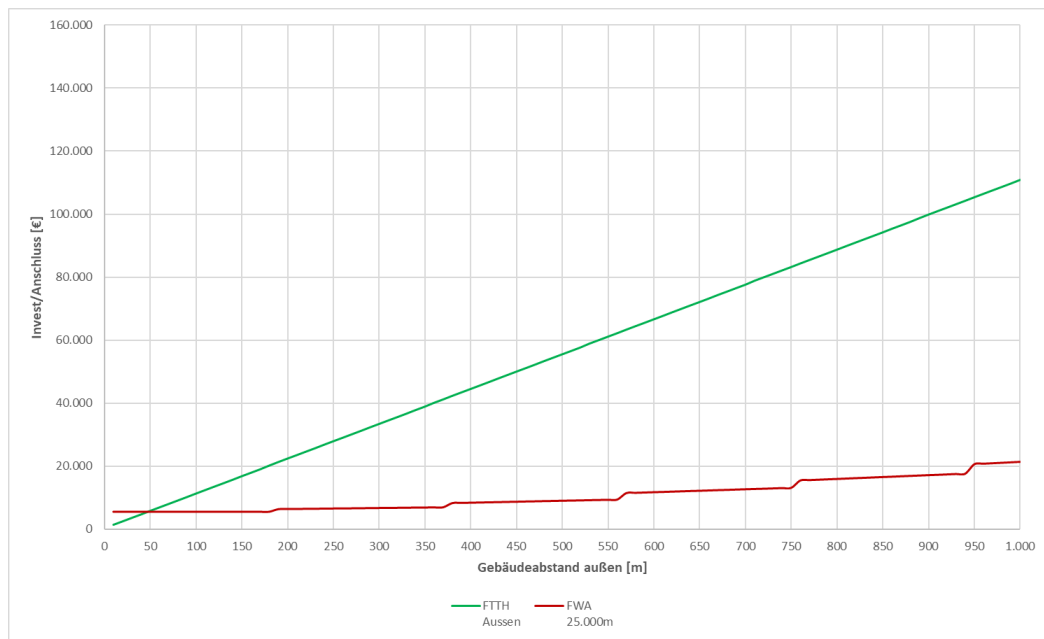
3.3.1 Ergebnisse der Basis-Szenarien bei Line-of-Sight

3.3.1.1 Zieldatenübertragungsrate: 10 Mbps

Wir schauen im Kontext der Grundversorgung (10 Mbps) jetzt auf einen Anschlussbereich, der mit Funkzellen unterschiedlicher Trägerfrequenzen (900 – 3.600 MHz) und einem LOS Radius von 25 km abgedeckt wird. Verglichen werden die Investitionen je Anschluss von FWA (dunkelrot) mit denen von FTTH PtP (grün). Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit der Gebäudeabstände im Außenbereich dargestellt.³⁰

³⁰ Diese hängen von denen im Innenbereich des Anschlussbereiches ab.

Abbildung 11: FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 25.000 m



Quelle: WIK.

Gilt für Line-of-Sight Bedingungen der Frequenzen (Zielübertragungsrate 10 Mbps):

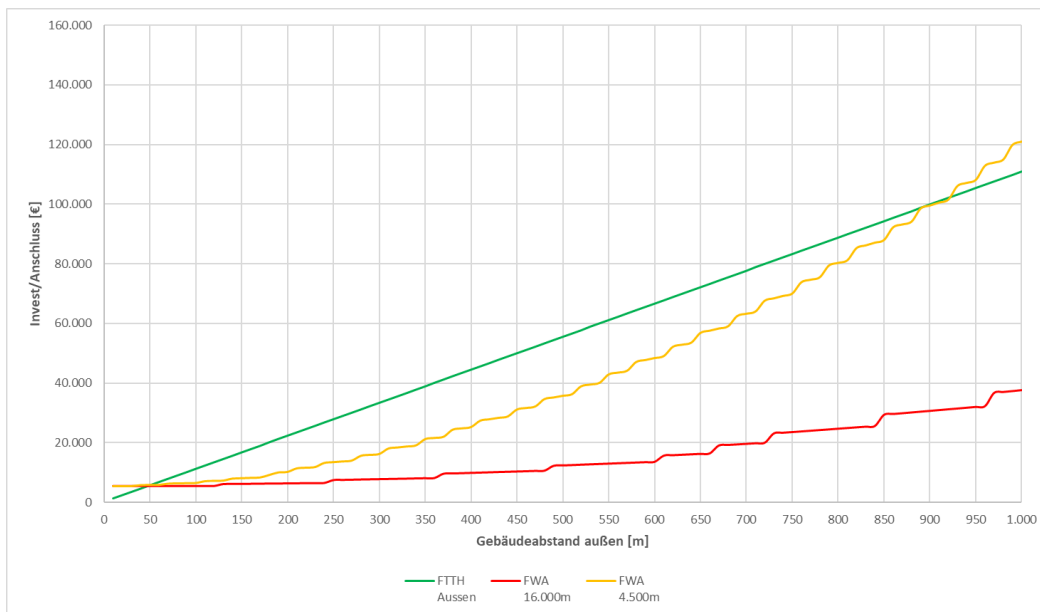
- 900 MHz
- 1.800 MHz
- 2.600 MHz
- 3.600 MHz

Bei einer Reichweite von 25 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als deutlich vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 10 Mbps bei den Trägerfrequenzen von 900 MHz bis 3.600 MHz.

3.3.1.2 Zieldatenübertragungsrate 1 Gbps

Wir schauen jetzt im Kontext der Gigabitversorgung auf einen Anschlussbereich, der mit Funkzellen unterschiedlicher Trägerfrequenzen (6 GHz und 26 GHz) und einem LOS Radius von 16 km bzw. 4,5 km abgedeckt wird. Verglichen werden die Investitionen je Anschluss von FWA (26 GHz rot und 6 GHz orange) und mit FTTH PtP (grün). Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit der Gebäudeabstände im Außenbereich dargestellt.

Abbildung 12: FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 16.000m und 4.500 m



Quelle: WIK.

Gilt für Line-of-Sight Bedingungen der Frequenzen (Zielübertragungsrate 1 Gbps):

- 6 GHz (16.000 m)
- 26 GHz (4.500 m)

Bei einer Reichweite von 16 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als deutlich vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 1 Gbps bei einer Trägerfrequenz von 6 GHz.

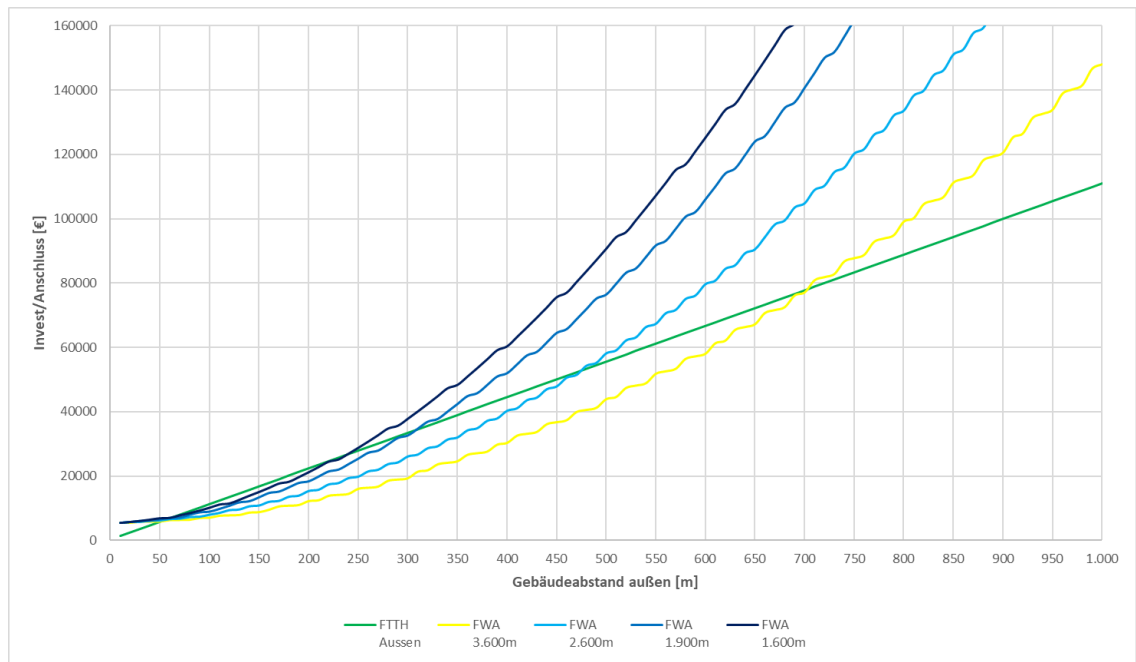
Bei einer Reichweite von 16 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand bis etwa 900 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als überwiegend vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 1 Gbps bei einer Trägerfrequenz von 26 GHz.

3.3.2 Ergebnisse der Basis-Szenarien bei Non-Line-of-Sight

3.3.2.1 Zieldatenübertragungsrate 10 Mbps

Wir schauen im Kontext der Grundversorgung (10 Mbps) jetzt auf einen Anschlussbereich, der mit Funkzellen unterschiedlicher Trägerfrequenzen (900 – 3.600 MHz) und LOS Radien von 3,6 km, 2,6 km, 1,9 km bzw. 1,6 km abgedeckt wird. Verglichen werden die Investitionen je Anschluss von FWA (900 MHz gelb, 1.800 MHz hellblau, 2.600 MHz blau und 3.600 MHz dunkelblau) und mit FTTH PtP (grün). Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit der Gebäudeabstände im Außenbereich dargestellt.

Abbildung 13: FTTH vs. Non-Line-of-Sight mit Radius 3.600 m, 2.600 m, 1.900 m und 1.600 m



Quelle: WIK.

Gilt für Non-Line-of-Sight Bedingungen der Frequenzen (Zielübertragungsrate 10 Mbps):

- 900 MHz (3.600 m)
- 1.800 MHz (2.600 m)
- 2.600 MHz (1.900 m)
- 3.600 MHz (1.600 m)

Bei einer Reichweite von 3,6 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand bis etwa 700 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als überwiegend vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 10 Mbps bei einer Trägerfrequenz von 900 MHz.

Bei einer Reichweite von 2,6 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand bis etwa 450 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als überwiegend vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 10 Mbps bei einer Trägerfrequenz von 1,8 GHz.

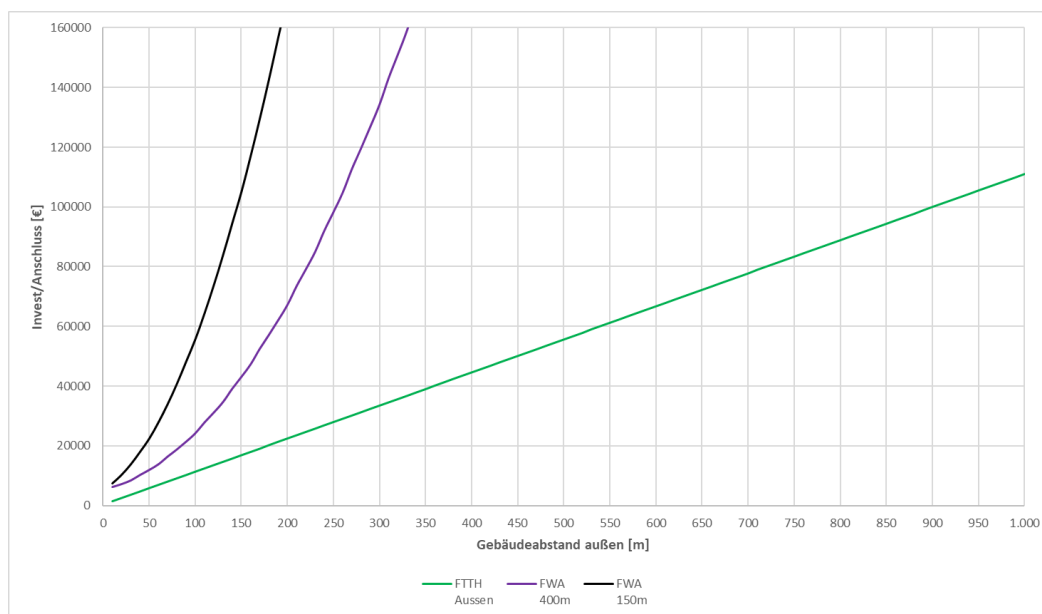
Bei einer Reichweite von 1,9 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand bis etwa 300 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als überwiegend vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 10 Mbps bei einer Trägerfrequenz von 2,6 GHz.

Bei einer Reichweite von 1,6 km zeigt sich FWA ab etwa 50 m Gebäudeabstand bis etwa 250 m Gebäudeabstand in den äußeren Verzweigerbereichen als leicht vorteilhaft für eine Zieldatenübertragungsrate von 10 Mbps bei einer Trägerfrequenz von 3,6 GHz.

3.3.2.2 Zieldatenübertragungsrate 1 Gbps

Wir schauen jetzt im Kontext der Gigabitversorgung auf einen Anschlussbereich, der mit Funkzellen unterschiedlicher Trägerfrequenzen (6 GHz und 26 GHz) und einem NLOS Radius von 16 km bzw. 4,5 km abgedeckt wird. Verglichen werden die Investitionen je Anschluss von FWA (26 GHz schwarz und 6 GHz violett) und mit FTTH PtP (grün). Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit der Gebäudeabstände im Außenbereich dargestellt.

Abbildung 14: FTTH vs. Line-of-Sight mit Radius 400 m und 150 m



Quelle: WIK.

Gilt für Non-Line-of-Sight Bedingungen der Frequenzen (Zielübertragungsrate 1 Gbps):

- 6 GHz (400 m)
- 26 GHz (150 m)

Bei einer Reichweite von 400 m ist FTTH in den äußeren Verzweigerbereichen stets vorteilhaft bei einer Zieldatenübertragungsrate von 1 Gbps gegenüber einer Trägerfrequenz von 6 GHz. Ab einem Gebäudeabstand von etwa 800 m werden keine weiteren Basisstationen mehr angenommen, da bereits eine Basisstation je Anschluss berechnet wurde.

Bei einer Reichweite von 150 m ist FTTH in den äußeren Verzweigerbereichen stets vorteilhaft bei einer Zieldatenübertragungsrate von 1 Gbps gegenüber einer Trägerfrequenz

von 26 GHz. Ab einem Gebäudeabstand von etwa 300 m werden keine weiteren Basisstationen mehr angenommen, da bereits eine Basisstation je Anschluss berechnet wurde.

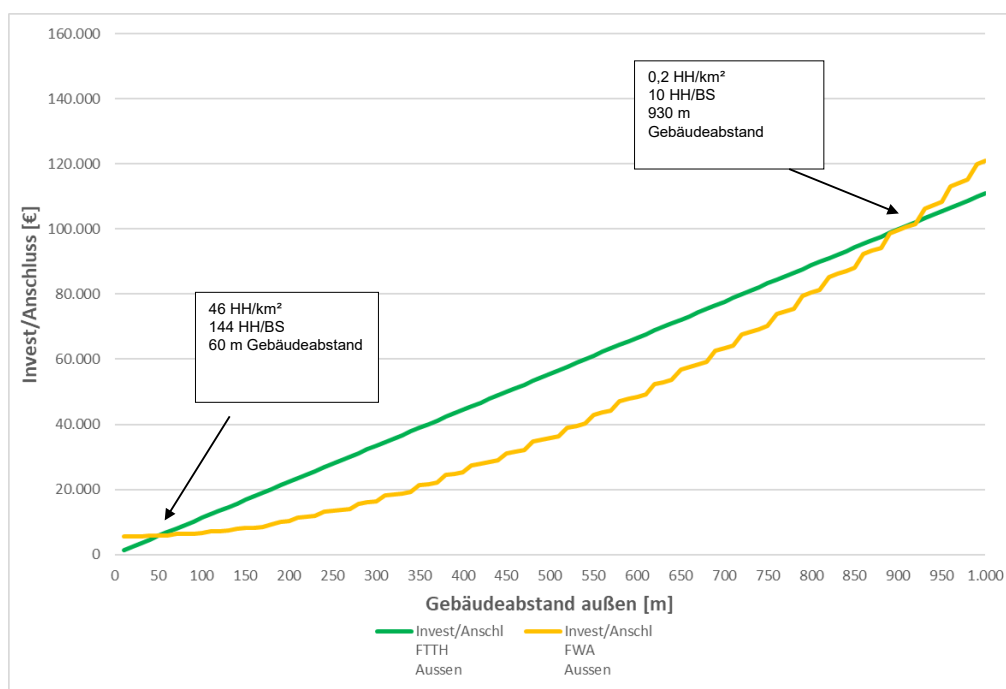
3.3.3 Sensitivitäten und tiefere Betrachtung auf der Basis „FWA-Radius 4.500 m“

In den folgenden Abschnitten (3.3.3.1 bis 3.3.3.7) wird der Radius von 4.500 m, welcher unter der Annahme von Line-of-Sight Bedingungen für eine Trägerfrequenz von 26 GHz und einer verfügbaren Bandbreite von 400 MHz als für FWA besonders geeignet angenommen werden kann, verschiedenen Sensitivitäten und tiefergehenden Betrachtungen unterzogen.

3.3.3.1 Radius 4.500 m - Ausgangspunkt

Zunächst zeigen wir das bereits in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte Szenario mit 4.500 m als Referenzszenario für die nachfolgenden Fälle noch einmal. Wir gehen davon aus, dass die Trägerfrequenz von 26 GHz (und die daraus resultierende Reichweite von 4.500 m) eine bevorzugte Trägerfrequenz für eine Gigabitversorgung mit FWA darstellen könnte.

Abbildung 15: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 4.500 m bei FWA, Ausgangspunkt für Sensitivitäten



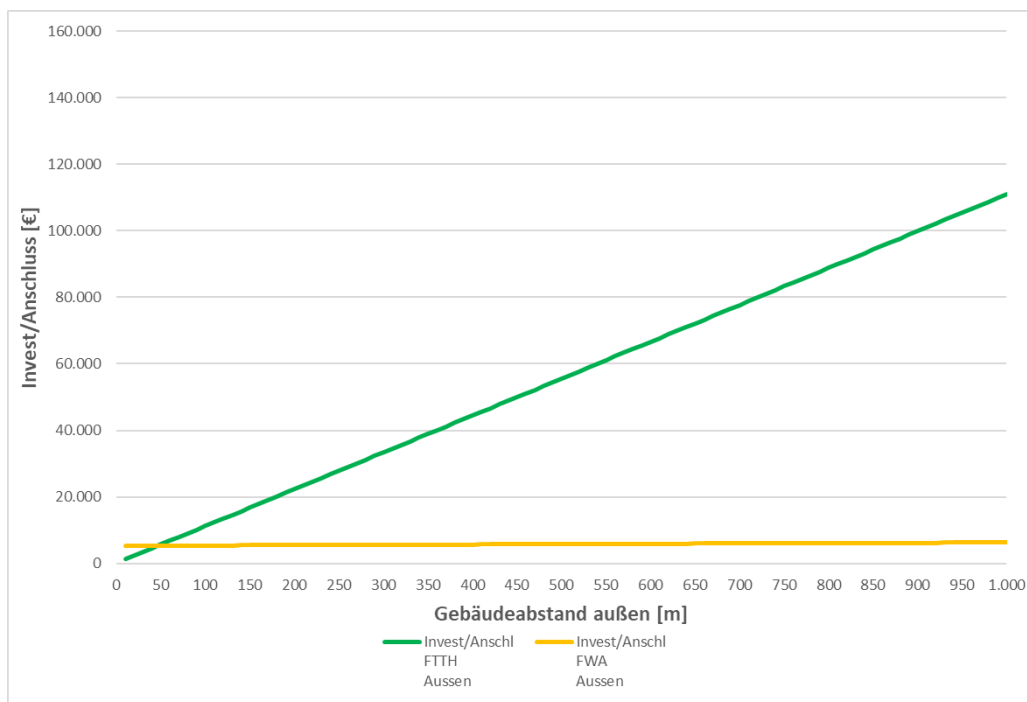
Quelle: WIK.

Aus den Berechnungs-Ergebnissen kann abgeleitet werden: Der Bereich der Vorteilhaftigkeit von FWA liegt zwischen 46 Haushalten/km² und 0,2 Haushalten/km² bzw. 144 Haushalten pro Basisstation und 10 Haushalten pro Basisstation oder einem Gebäudeabstand zwischen 60 Metern und 930 Metern.

3.3.3.2 Sensitivität Mast und Anbindung bereits vorhanden

Es folgt eine Sensitivierung mit der Annahme, dass bereits Masten und Glasfaseranbindungen für die Basisstationen vorhanden sind. Dies könnte dann der Fall sein, wenn das betrachtete Gebiet bereits über Mobilfunk versorgt wird. Das reduziert die notwendigen Investitionen. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 16: Sensitivität: Masten und Anbindung FWA-Basisstationen bereits vorhanden



Quelle: WIK.

Die Nutzung bereits bestehender Masten und deren Anbindung begünstigt FWA sehr deutlich.

3.3.3.3 Streusiedlung

Eine Streusiedlung besteht aus einzelnen Gebäuden oder Gebäudegruppen, die auf einer größeren Fläche verteilt sind.

Als feste Parameter wurden gewählt:

- Anzahl Anschlüsse innen: 240 je VZB
- Anzahl Anschlüsse außen: 240 je VZB

Das erzeugt einen Anschlussbereich mit insgesamt 3.840 Anschlüssen

Als variabler Parameter wurde gewählt:

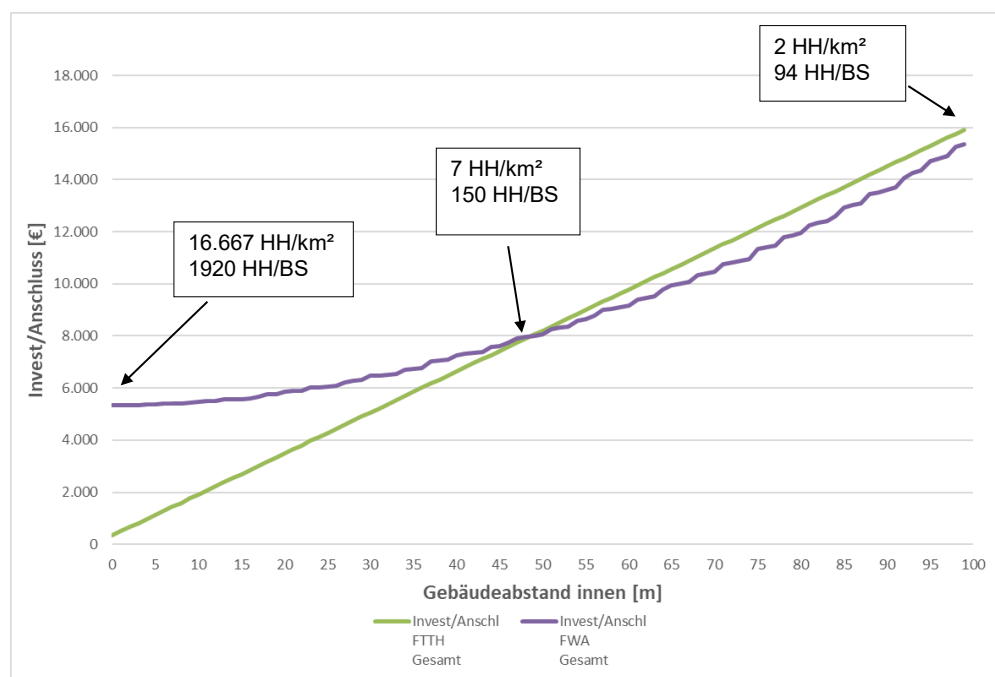
- Abstand Gebäude innen: 1 m mit Inkrement 1m

Daraus resultieren folgende Anschluss-Dichten:

- 16.667 Anschlüsse/km² innen und außen bei 1 m Gebäudeabstand
- 1,66 Anschlüsse/km² innen und außen bei 100 m Gebäudeabstand

Diese Parametrisierung erzeugt einen homogenen Anschlussbereich, welcher bei entsprechend großen Gebäudeabständen eine Streusiedlung repräsentiert. Betrachtet werden die Investitionen des gesamten Anschlussbereichs, also der inneren und äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 17: Sensitivität Streusiedlung



Quelle: WIK.

In Streusiedlungen überwiegt bis zu einem Gebäudeabstand von etwa 50 m, was einer Anschlussdichte von 7 Haushalten/km² bzw. 150 Haushalten pro Basisstation entspricht, deutlich FTTH, erst darüber hinaus bietet FWA leichte Vorteile.

Für Streusiedlungen kann eine gewisse Vorteilhaftigkeit von FWA erst bei relativ großen Gebäudeabständen (ca. > 50) bzw. bei sehr dünner Besiedlungsdichte und dennoch hoher Auslastung der Basisstationen festgestellt werden.

3.3.3.4 Die letzten 2%

Als die „letzten 2%“ werden üblicherweise die wenigen, am weitesten von einem Ortszentrum entfernten Gebäude (z.B. Aussiedlerhöfe) verstanden, welche aufgrund der großen Entfernung, nicht mehr kostendeckend mit Glasfaser angebunden werden können und die Investitionen pro Anschluss weit über den durchschnittlichen der übrigen Anschlüsse eines Anschlussbereichs liegen.

Als feste Parameter wurden gewählt:

- Anzahl Anschlüsse innen: 240 je VZB
- Anzahl Anschlüsse außen: 4 je VZB

Das erzeugt einen Anschlussbereich mit insgesamt 1008 Anschlüssen, davon 48 außen verteilt.

Als variabler Parameter wurde gewählt:

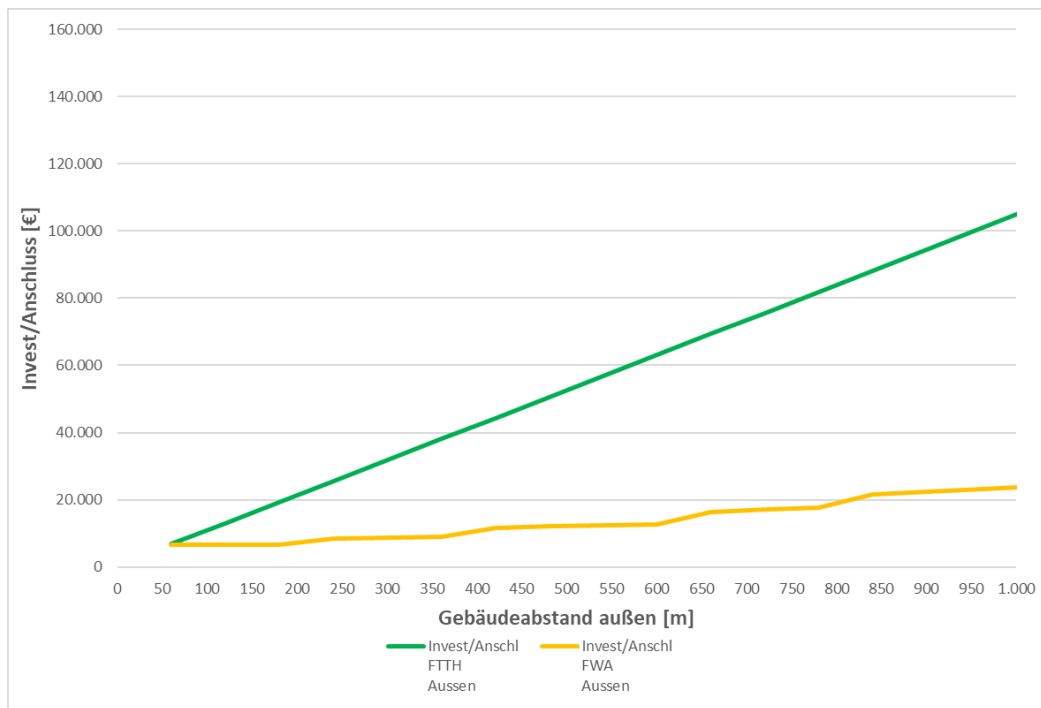
- Abstand Gebäude innen: 1 m mit Inkrement 1 m
→ Gebäudeabstand außen bei 1 m innen = 60 m
→ Gebäudeabstand außen bei 100 m innen = 6.000 m

Daraus resultieren folgende Anschluss-Dichten:

- 16.667 Anschlüsse/km² innen und 278 Anschlüsse/km² außen bei 1 m Gebäudeabstand
- 1,66 Anschlüsse/km² innen und 0,0027 Anschlüsse/km² außen bei 100 m Gebäudeabstand

Diese Parametrisierung erzeugt einen Anschlussbereich, welcher in den inneren Verzweigerbereichen eher dicht, aber außen sehr dünn besiedelt ist und simuliert, dass sich in den äußeren Verzweigerbereichen nur etwa 2% der Anschlüsse befinden, verglichen mit den inneren Verzweigerbereichen. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 18: Sensitivität „Letzte 2%“



Quelle: WIK.

Die „letzten 2%“ Anschlüsse um dichter bebaute Gebiete herum können mit FWA deutlich günstiger erschlossen werden, als mit FTTH. Je größer der Gebäudeabstand, umso vorteilhafter zeigt sich FWA.

Für „die letzten 2%“ der teuersten und abgelegensten Anschlüsse in einem Anschlussbereich erscheint FWA als relativ gute Option, jedoch auf relativ hohem Investitionsniveau, also immer noch oberhalb eines erwartbaren, durchschnittlichen Invests pro Anschluss in einem dichter besiedelten Gebiet.

3.3.3.5 Sensitivität der Preise für FWA-Equipment

Da es sich bei den für das FWA-Equipment angesetzten Preise lediglich um Expertenschätzungen handelt, wurden auch eine Sensitivierung der Preise durchgeführt. Preisveränderungen führen zu einer Verschiebung der Investitionskurven nach oben bzw. nach unten, die grundsätzlichen Verhältnismäßigkeiten bleiben jedoch bestehen und nur am Rande der Vorteilhaftigkeit von FWA kommt es zu leichten Verschiebungen: Bei einer Erhöhung um 50% verkleinert sich der Bereich der Vorteilhaftigkeit, bei einer Verringerung um 50% vergrößert sich der Bereich der Vorteilhaftigkeit.

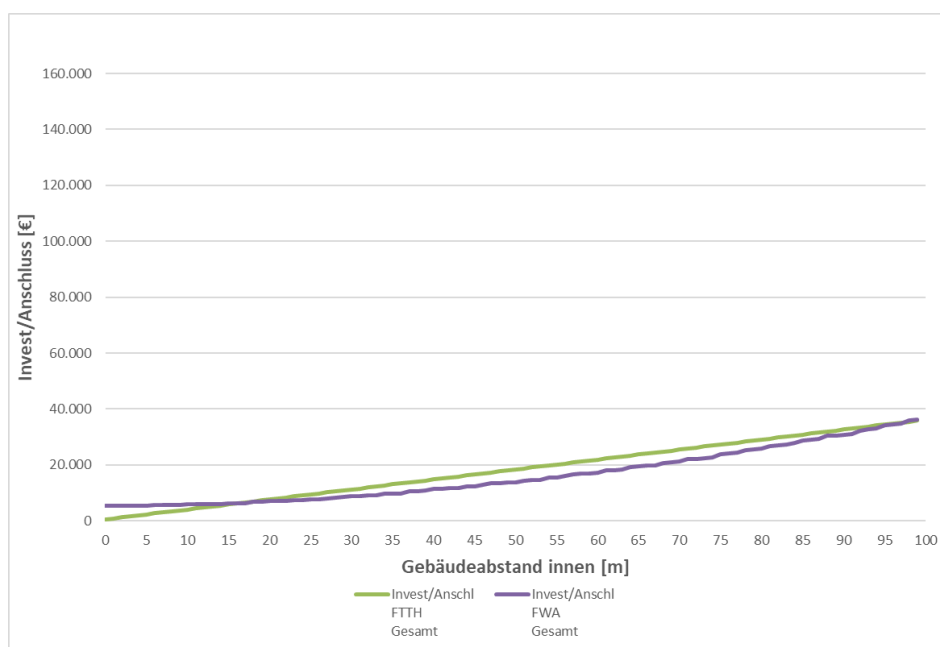
Eine Preisvariation bei den Basisstationen zeigt, wie auch bei den Masten eine eher geringe Auswirkung, bei den Antennen zeigen sich jedoch deutlich sichtbare Auswirkungen, während sich bei den CPE kaum Auswirkungen zeigen.

Eine Detailbetrachtung hierzu findet sich im Anhang.

3.3.3.6 Gesamter Anschlussbereich mit FWA, Darstellung für 4.500 m

Als Grenzbetrachtung wurde untersucht, ob und wie sich FWA zur Versorgung eines gesamten Anschlussbereichs eignet. Das Ausgangsszenario ist wieder das aus Abschnitt 3.3.1.

Abbildung 19: Sensitivität: Gesamter Anschlussbereich durch FWA versorgt



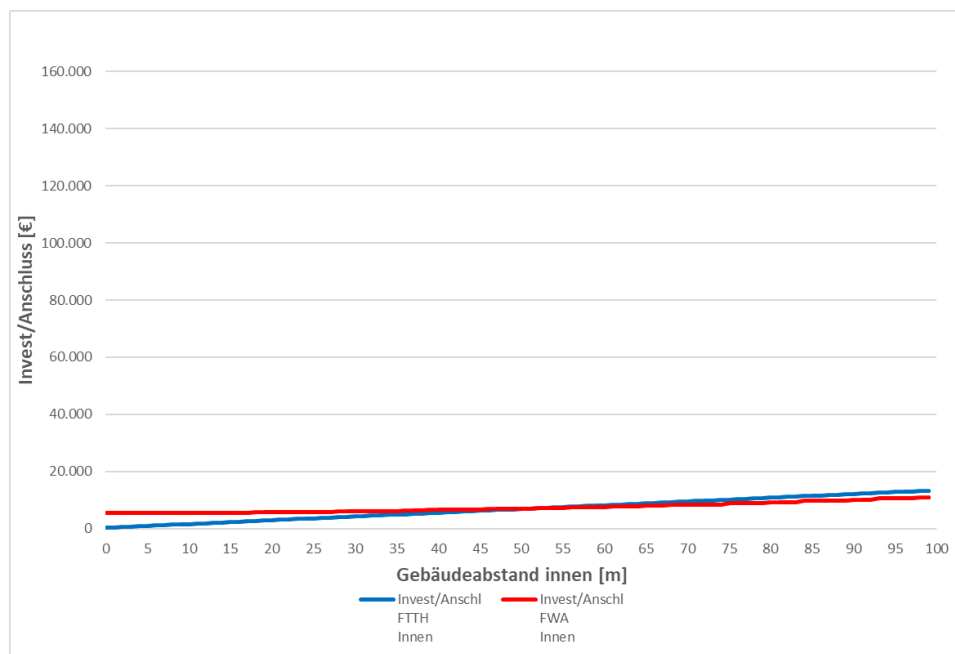
Quelle: WIK.

Es zeigt sich eine gewisse Vorteilhaftigkeit von FWA gegenüber FTTH in Grenzen, was der Mischkalkulation von inneren und äußeren Verzweigerbereichen geschuldet ist.

3.3.3.7 FWA für die inneren 4 Verzweigerbereiche, Darstellung für 4.500m

Es wurde ebenfalls betrachtet, wie sich die Vorteilhaftigkeit von FWA gegenüber FTTH in den inneren 4 Verzweigerbereichen isoliert darstellt. Das Ausgangsszenario ist wieder das aus Abschnitt 3.3.1.

Abbildung 20: Sensitivität: Innere 4 Verzweigerbereiche mit FWA versorgt



Quelle: WIK.

Erst bei relativ großen Gebäudeabständen zeigt sich eine leichte Vorteilhaftigkeit von FWA. Bei dieser Betrachtung ist jedoch zu beachten, dass die Reichweite von 4.500 m auf der Line-of-Sight Annahme beruhen und daher alle Antennen auf den zu versorgenden Gebäuden in Sichtverbindung zu den Sendeantennen angebracht werden müssten, was in realen Bebauungssituation eher schwierig sein dürfte. D.h. real verschlechtert sich die Situation für FWA im Vergleich, denn die Reichweite der Glasfaser spielt im betrachteten Längenbereich keine Rolle.

4 Zusammenfassung der Erkenntnisse und ihre empirische Relevanz in Deutschland

4.1 Erkenntnisse aus den Modellrechnungen

Frequenzen

Die lizenzierten Frequenzbereiche (≤ 3.600 MHz) eignen sich bestenfalls zur FWA-Grundversorgung (10 Mbps), weil die für eine Gigabitversorgung benötigte Bandbreite nicht zur Verfügung steht. Dem gegenüber stehen die guten Materiedurchdringungseigenschaften der niedrigen Frequenzen.

Der Frequenzbereich 3.600 MHz bietet ohne Sichtverbindung wegen der geringeren Reichweite im Vergleich zu niedrigeren Trägerfrequenzen kaum noch Vorteile gegenüber FTTH.

Die mmWave Frequenzbereiche (6 GHz, 26 GHz) eignen sich in Grenzen zur FWA-Gigabitversorgung.

Bei den mmWave Frequenzbereichen ist eine Sichtverbindung (LOS) zwingend notwendig, da sonst keine ökonomisch sinnvollen Reichweiten erzielt werden können. Dies bedingt dann jedoch eine günstige Topologie bzw. Vegetation oder erfordert hohe Antennenstandorte. Letzteres wirkt sich dann aber negativ (kostentreibend) auf die Ökonomie aus und kann genehmigungsrechtlich problematisch sein.

Besiedlungsstruktur

Es müssten je Basisstation mindestens etwa 10 Haushalte versorgt werden können, sonst sind die Investitionen in Basisstationen, Masten und deren Anbindung höher, als die Gebäude gleich mit einer Glasfaser anzubinden.

Für die Versorgung „der letzten 2%“ stellt sich FWA als deutlich vorteilhaft dar, wenn auch auf hohem Niveau. Die Investitionen sind signifikant geringer als eine Anbindung der Gebäude mit Glasfaser, dennoch sind die Investitionen pro Anschluss weit über denen in dichter besiedelten Bereichen.

Für eine Versorgung dichter besiedelter Gebiete oder ganzer Ortschaften ist FWA nicht geeignet, da hier eine Anbindung mit FTTH ökonomisch vorteilhafter ist.

Für Streusiedlungen kann FWA eine Alternative zu FTTH sein.

Vorhandene Infrastruktur

Bereits vorhandene Masten und Anbindungen begünstigen FWA erheblich. Innerhalb deren Reichweite kann FWA punktuell vorteilhaft sein.

Die Detail-Untersuchungen (Sensitivitäten) wurden mit einem Fokus auf einen Radius von 4.500 m durchgeführt, da dies der erwarteten/geschätzten Reichweite einer FWA-Gigabitversorgung im 26 GHz Frequenzbereich mit einer Bandbreite von 400 MHz unter Line-of-Sight-Bedingungen entspricht und zu erwarten ist, dass FWA-Realisierungen in dieser Form ausgeführt werden.

Als Hilfestellung zur Beurteilung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit von FWA gegenüber FTTH scheint die Anzahl der durch eine Basisstation versorgten Haushalte besser geeignet als die Anschlussdichte, weil eine Mindestversorgung von Haushalten je Basisstation erforderlich ist, damit die FTTH-Versorgung nicht kostengünstiger wird. Wichtiges Kriterium hier ist der Gebäudeabstand.

In der Praxis wird jede individuelle Konstellation bewertet werden müssen, allgemeingültige Aussagen erscheinen nicht möglich, da auch die hier nicht betrachteten Umwelteinflüsse (Topologie, Vegetation, Bebauung, Möglichkeit für Luftverkabelung, vorhandene Masten, Möglichkeit einer Sichtverbindung etc.) beachtet werden müssen.

Eine Zusammenfassung der FWA-Eignung der unterschiedlichen Trägerfrequenzbereiche unter Berücksichtigung von den Line-of-Sight Bedingungen und den angestrebten Zieldatenübertragungsraten gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Bewertung der Eignung von Trägerfrequenzen zur Grundversorgung und zur Gigabitversorgung

Trägerfrequenz	Grundversorgung (10Mbps)		Gigabitversorgung (1Gbps)	
	Line-of-Sight	Non Line-of-Sight	Line-of-Sight	Non Line-of-Sight
900 MHz	↑↑↑	↑↑	↓↓↓	↓↓↓
1.800 MHz	↑↑↑	↑	↓↓↓	↓↓↓
2.600 MHz	↑↑↑	↑	↓↓↓	↓↓↓
3.600 MHz	↑↑↑	→	↓↓↓	↓↓↓
6 GHz	↑↑	↓	↑↑↑	↓
26 GHz	↑↑	↓↓	↑↑↑	↓↓

Legende	
↑↑↑	hervorragend geeignet
↑↑	gut geeignet
↑	geeignet
→	grenzwertig
↓	ungeeignet
↓↓	sehr ungeeignet
↓↓↓	nicht möglich

Eine Luftverkabelung wirkt für FTTH bzw. FWA investitionsreduzierend. Werden beide mit Luftverkabelung erschlossen, zeigt sich FWA insgesamt immer noch günstiger. Siehe weitere Ausführungen im Anhang.

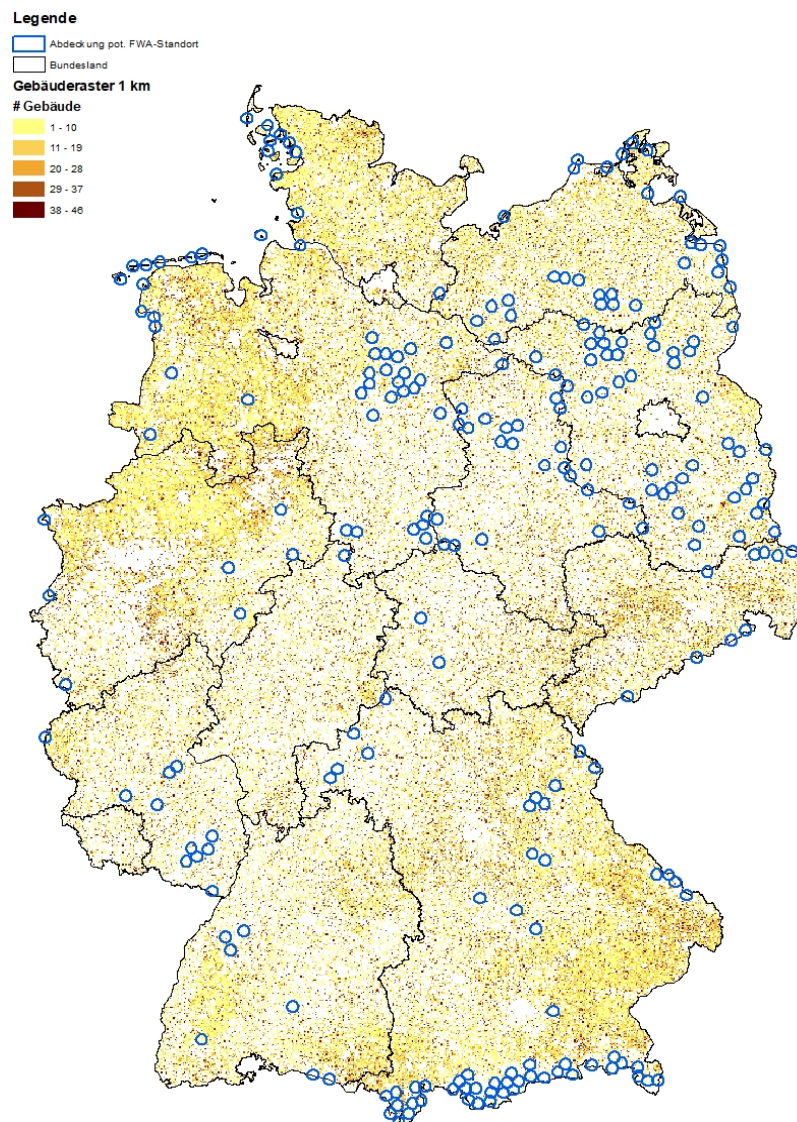
4.2 Empirische Relevanz in Deutschland

Die für einen Radius von 4.500 m in den vorangegangenen Berechnungen ermittelten Grenzen der Vorteilhaftigkeit von FWA gegenüber FTTH wurden zur Illustration in einem GIS-System abgebildet und in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

Es wurde in GIS nach Gebieten gesucht, welche die Kriterien erfüllen:

- Haushaltsdichte (=Gebäudedichte) im 1 km-Raster*
Zwischen 1 HH/km² und 46 HH/km²
- Haushalte (=Gebäude) pro Radius von 4.500 m**
Zwischen 10 HH/BS und 144 HH/BS

Abbildung 21: Übertragung der Modellergebnisse auf Deutschland in GIS



* GIS Daten zu Gebäuden liegen im 1000m-Raster vor
(WIGEOGIS-AZ Haushalts- und Gebäuderaster, Stand 2021)

** GIS Daten zu Gebäuden liegen im 100m-Raster vor
(WIGEOGIS-AZ Haushalts- und Gebäuderaster, Stand 2021)

Quelle: WIK

Das Dichtekriterium alleine würde deutlich mehr Gebäude/Haushalte in Deutschland für FWA qualifizieren als das Kriterium der benötigten Gebäude/Haushalte je Basisstation.

Nach dem Kriterium Gebäude/Haushalte je Basisstation können mögliche Gebiete in den besonders ruralen Gebieten der Bundesrepublik identifiziert werden, eine recht auffällige Häufung gibt es ebenfalls am Alpenrand und auf den Inseln.

4.3 Relevanz von FWA in anderen Ländern der EU

Einige Mitgliedsländer der EU haben Frequenzen im Bereich 26 – 28 GHz für die Nutzung durch FWA ausgeschrieben und vergeben. Dazu gehören Italien, Österreich und die nordischen Länder.³¹ Hier sind die Besiedlungsstrukturen in den gebirgigen Regionen prädestiniert für den Einsatz von breitbandigem FWA mit Beamforming. Eine Positionierung von Antennenstandorten an den Berghängen schafft in der Regel gute Voraussetzungen dafür, Line-of-Sight-Bedingungen herzustellen. Auch die sehr dünn besiedelten ländlichen Regionen dieser Länder sind ein Treiber für den Einsatz dieser Technologie.

In diesen und den übrigen Mitgliedsländern gibt es auch im niederfrequenten Bereich (bis 3,8 GHz) FWA Lösungen als Auskopplung aus den bestehenden Mobilfunknetzen. Hier ist insbesondere auch die sogenannte Cube-Lösung der österreichischen Mobilfunkanbieter zu erwähnen (fest oder nomadisierend, d.h. an wechselnden festen Standorten eingesetzt).³²

31 <https://www.ericsson.com/48fe32/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023br/emr-monetization-fwa-growth-opportunity.pdf> , Stand 16.12.2024

32 <https://www.a1.net/internet/mobile-internet-tarife/net-cube-mit-vertrag> , Stand 16.12.2024, nach RTR Daten von 2024 betragen die Cubes nutzenden Anschlüsse 15,23% aller Festnetzanschlüsse in Österreich: Zuloaga, G; Plückebaum, T.; Kulenkampff, G.; Ockenfels, M.: Ökologische Effekte des Glasfaserausbaus, Bad Honnef, Dezember 2024, https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/veranstaltungen/veranstaltungen_2024/11122024/oe-koelogsche-effekte-des-glasfaserausbaus.de.html

5 Fazit

Nachdem in einem ersten Schritt die Reichweiten einer Funkverbindung bei unterschiedlichen Trägerfrequenzen und Bandbreiten, unterschieden nach Line-of-Sight- und Non-Line-of-Sight-Bedingungen, für eine Gigabitversorgung und eine Mindestversorgung untersucht wurden, konnten in einem zweiten Schritt die Investitionserfordernisse für eine Versorgung mit FWA mit denen einer Versorgung mit FTTH Ethernet verglichen werden.

Bereits die eingehende Untersuchung der möglichen Reichweiten hat gezeigt, dass eine Gigabitversorgung praktisch nur mit Trägerfrequenzen im mmWave-Bereich möglich ist, da für die niedrigeren Frequenzen nicht ausreichend Bandbreite verfügbar ist, diese jedoch für eine Mindestversorgung in Frage kommen.

Durch die Nutzung der mmWave-Trägerfrequenzen ist es wegen deren spezifischen Wellenausbreitungscharakteristika unerlässlich, unter Line-of-Sight-Bedingungen zu arbeiten.

Es ergeben sich dann aus der Investitionsbetrachtung weitere Einschränkungen. So muss je errichtetem Funkmast einer Mindestzahl an Haushalten versorgt werden können, da es sich ansonsten ökonomisch nicht lohnt im Vergleich zu einer direkten Anbindung der Haushalte mit Festnetz. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass vorhandene Funkmasten einen deutlich positiven Einfluss auf die Ökonomie haben.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass FWA grundsätzlich eine Möglichkeit darstellt, abgelegene Liegenschaften, welche ansonsten wegen der sehr hohen zu erwartenden Kosten nicht mit FTTH erschlossen würden, mit schnellem Internet zu versorgen. Einen Ersatz für eine Erschließung ganzer Ortschaften ist FWA jedoch nicht.

Ob eine Versorgung aber in einem konkreten Fall tatsächlich möglich ist, muss individuell geprüft werden, da Einflüsse aus Topologie, Vegetation, Bebauung stets zu beachten sind. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass eine Festnetzanbindung mit FTTH immer eine qualitativ bessere Verbindung garantiert, da z.B. äußere Wetter-Einflüsse ausgeschlossen werden können.

Literaturverzeichnis

- <https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines/berec-guidelines-on-very-high-capacity-networks>
- Verwaltungsvorschrift für Frequenzuteilungen für lokale, breitbandige Frequenznutzung im Frequenzbereich 24,25 – 27,5 GHz, Anlage 5, BNetzA: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/Verwaltungsvorschrift26GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1#:~:text=Der%20gesamte%20Frequenzbereich%2024%2C25,Netzzugangs%20zum%20Angebot%20von%20Telekommunikationsdiensten
- BNetzA, Universaldienst: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Grundversorgung/start.html>
- Umlaut communications GmbH, WIK_Consult GmbH: Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_umlaut_WIK_Mobilfunk.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- EU State Aid Guideline 2023, https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/legislation/regulations_en
- Kroon, P.; Godlovitch, I.; Plückebaum, T.: Sustainability Benefits of 6 GHz Spectrum Policy, study for Wi-Fi Alliance, Bad Honnef, Austin-Texas, August 2023, <https://www.wifi.org/file/sustainability-benefits-of-6-ghz-spectrum-policy>
- <https://www.omnicalculator.com/de/physik/erdkruemmung-rechner>
- Ockenfels, M., Kulenkampff, G. 2022: Ökonomische Aspekte der räumlichen Erstreckung von Anschlussnetzen, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_494.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;jsessionid=CCCD37618540AB44BACBAE0C21EFE52E?__blob=publicationFile&v=2
- 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
- Kulenkampff, G. Ockenfels, M. Zoz, K., Zuloaga, G. 2020: Kosten von Breitband-Zugangsnetzen https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_473.pdf
- <https://www.ericsson.com/48fe32/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023br/emr-monetization-fwa-growth-opportunity.pdf>
- <https://www.a1.net/internet/mobile-internet-tarife/net-cube-mit-vertrag>
- Zuloaga, G. Plückebaum, T.; Kulenkampff, G.; Ockenfels, M. 2024: Ökologische Effekte des Glasfaserausbaus, Studie für die RTR GmbH, https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/veranstaltungen/veranstaltungen/veranstaltungen_2024/11122024/oekologische-effekte-des-glasfaserausbaus.de.html

Anhang

Detaildarstellung Reichweitenabschätzung

Abbildung 22: Datenrate über Entfernung bei 700 MHz, Line-of-Sight

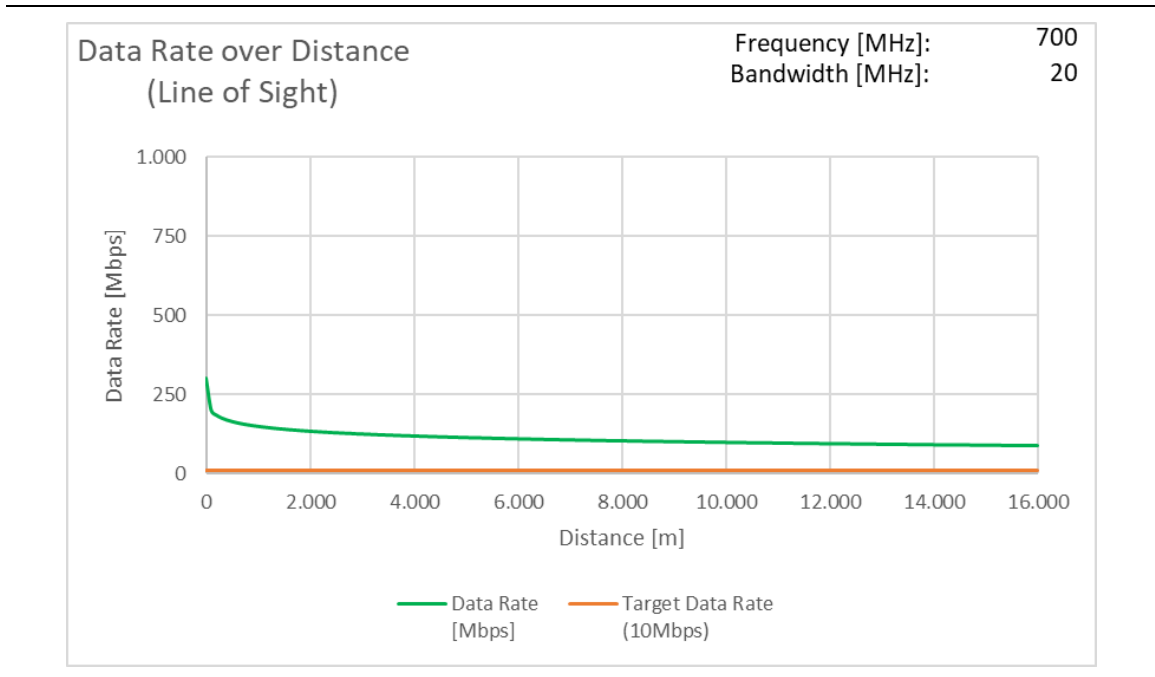


Abbildung 23: Datenrate über Entfernung bei 700 MHz, Non-Line-of-Sight

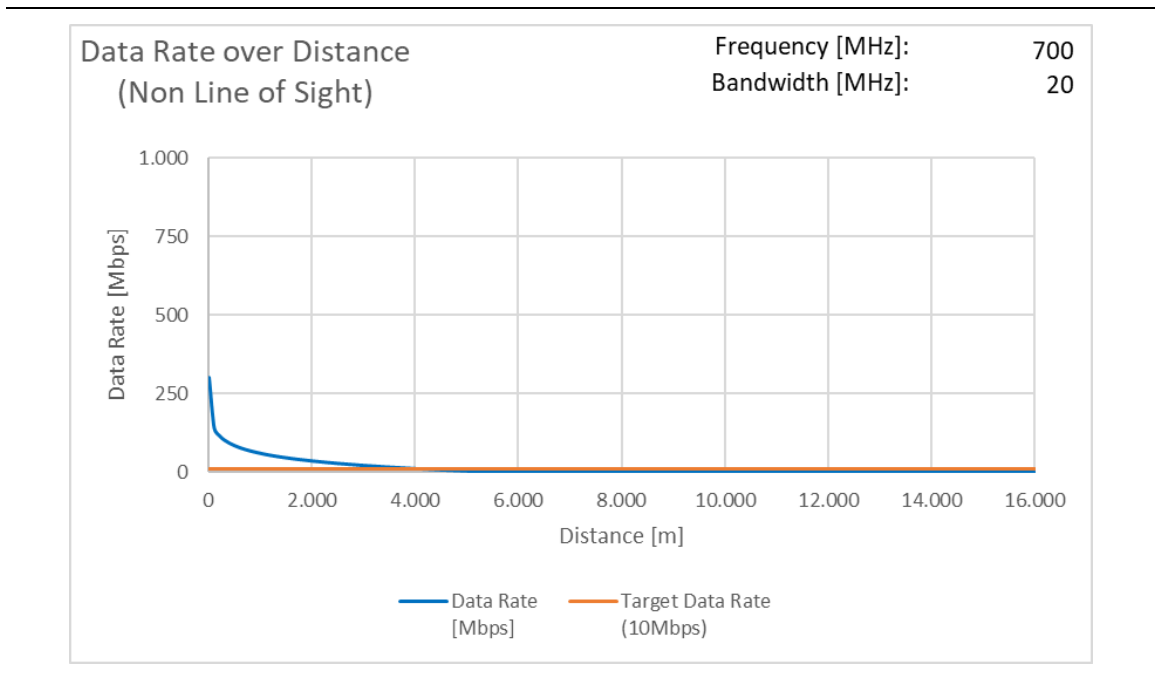


Abbildung 24: Datenrate über Entfernung bei 800 MHz, Line-of-Sight

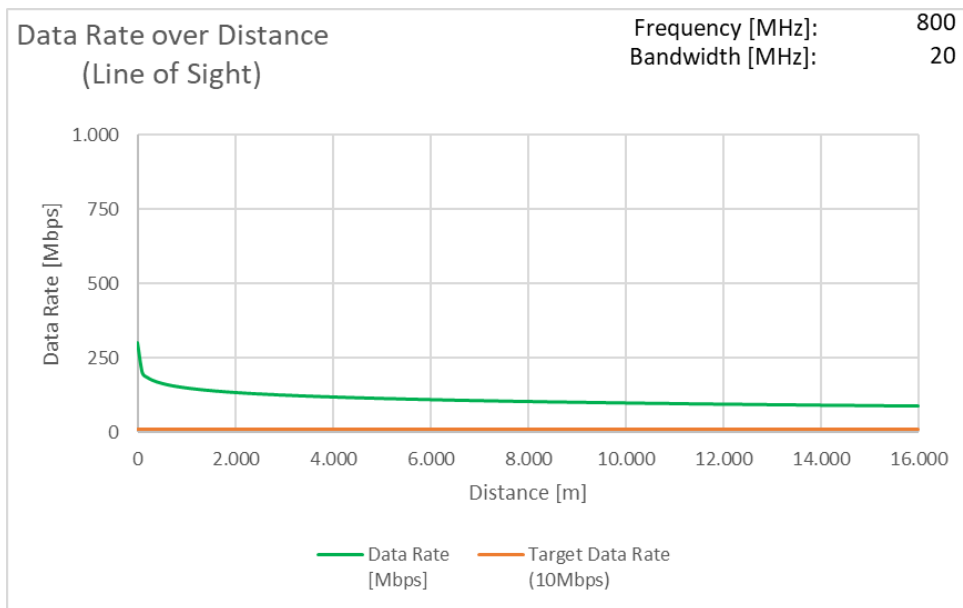


Abbildung 25: Datenrate über Entfernung bei 800 MHz, Non-Line-of-Sight

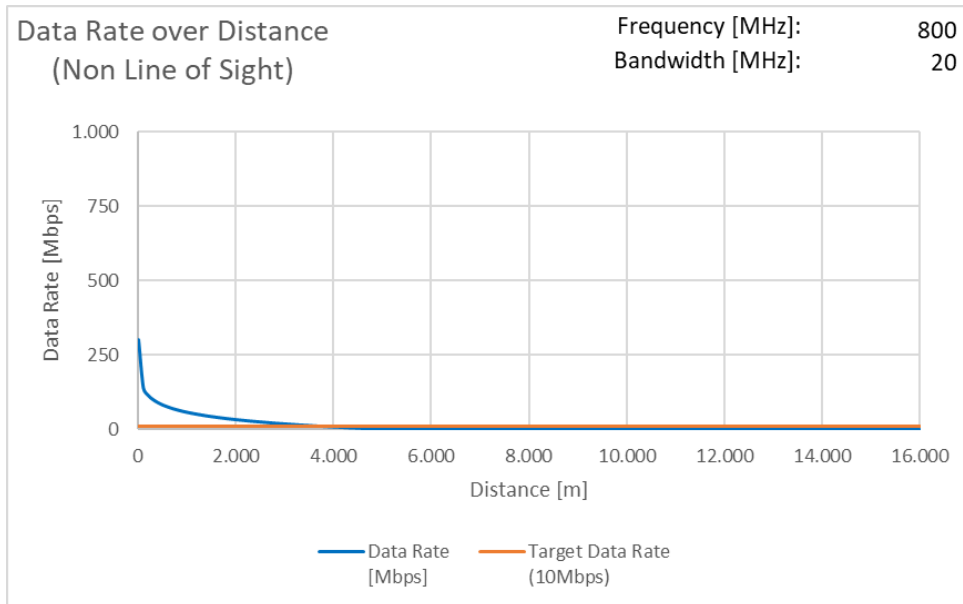


Abbildung 26: Datenrate über Entfernung bei 900 MHz, Line-of-Sight

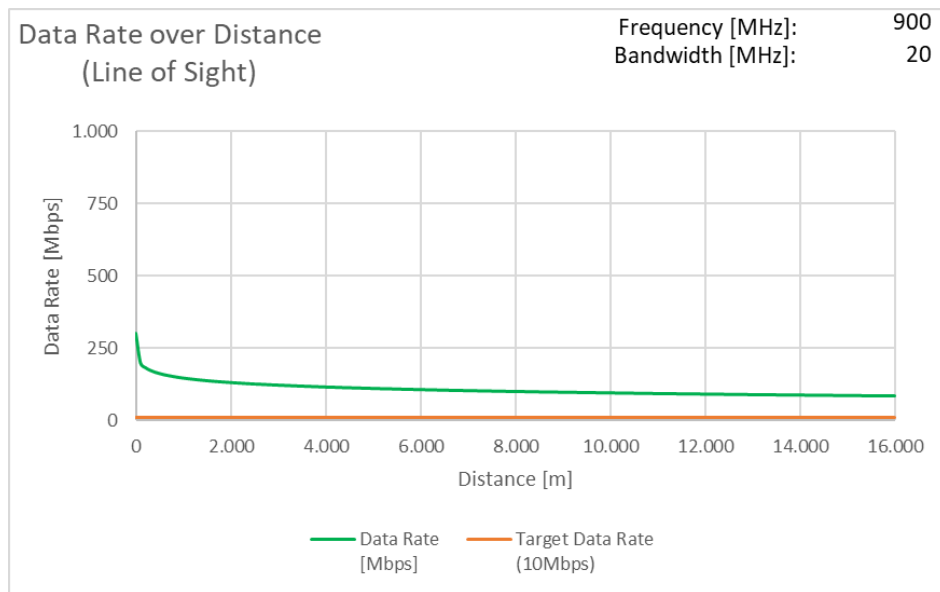


Abbildung 27: Datenrate über Entfernung bei 900 MHz, Non-Line-of-Sight

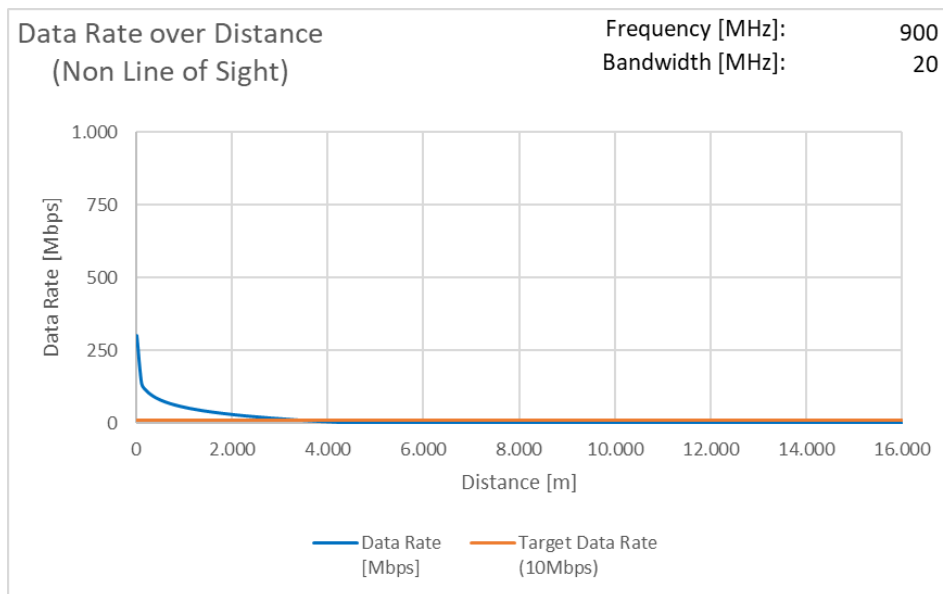


Abbildung 28: Datenrate über Entfernung bei 1.500 MHz, Line-of-Sight

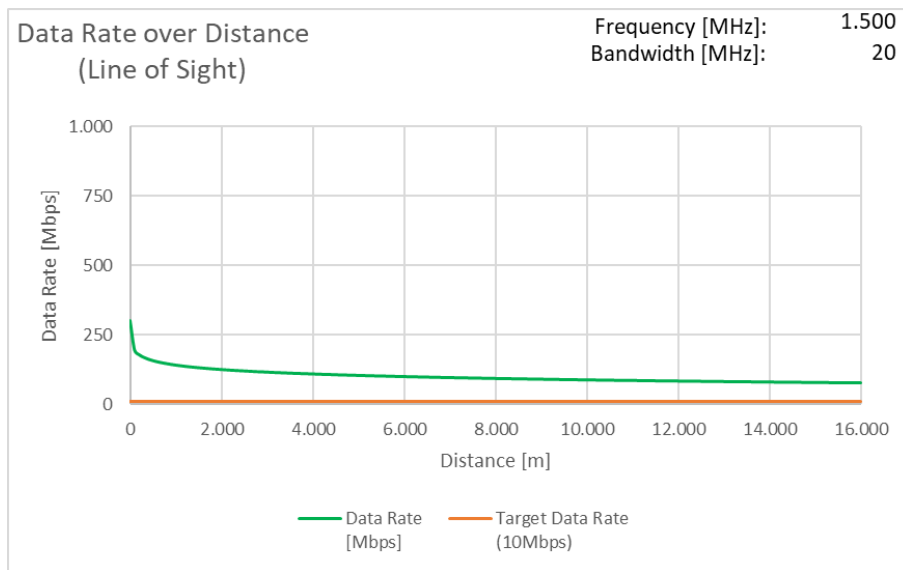


Abbildung 29: Datenrate über Entfernung bei 1.500 MHz, Non-Line-of-Sight

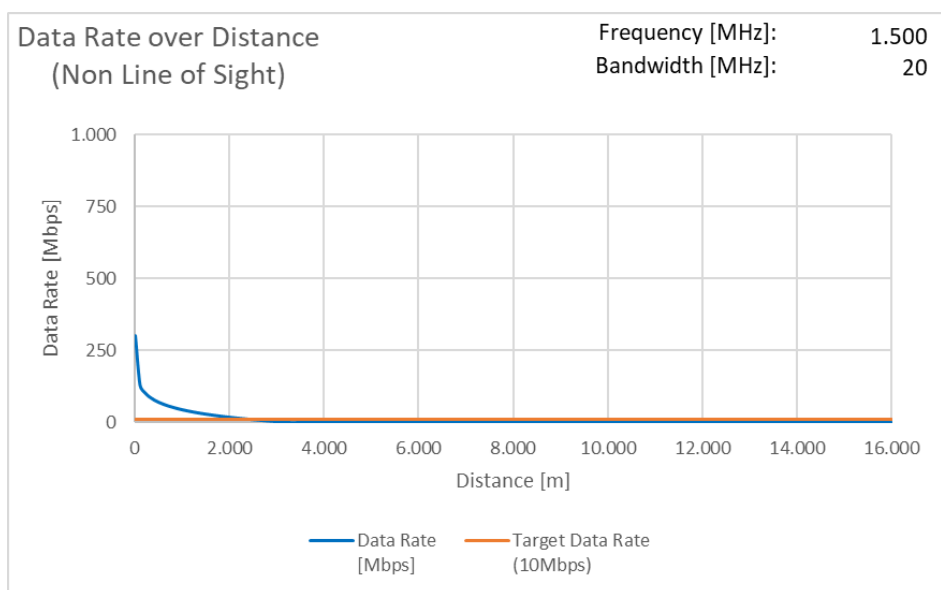


Abbildung 30: Datenrate über Entfernung bei 1.800 MHz, Line-of-Sight

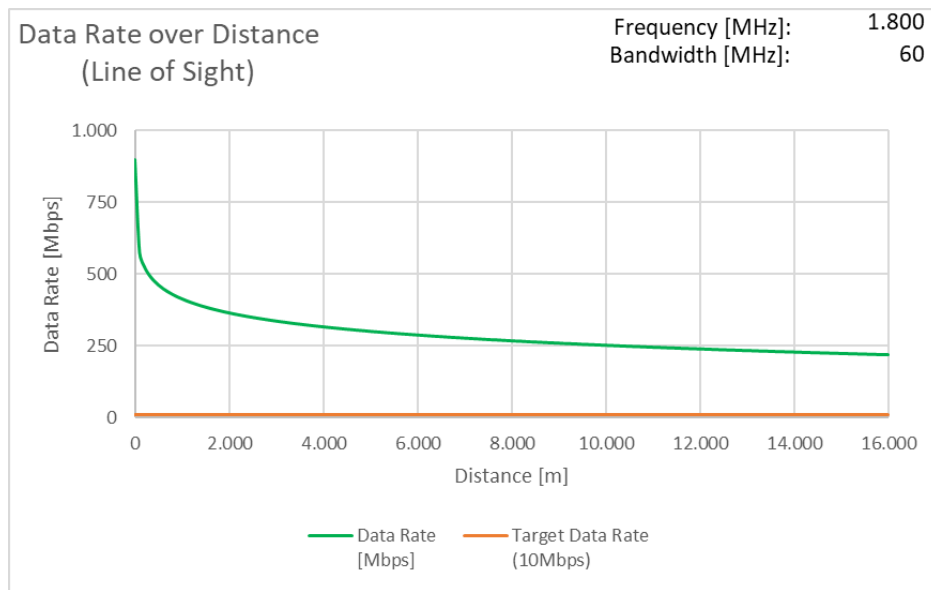


Abbildung 31: Datenrate über Entfernung bei 1.800 MHz, Non-Line-of-Sight

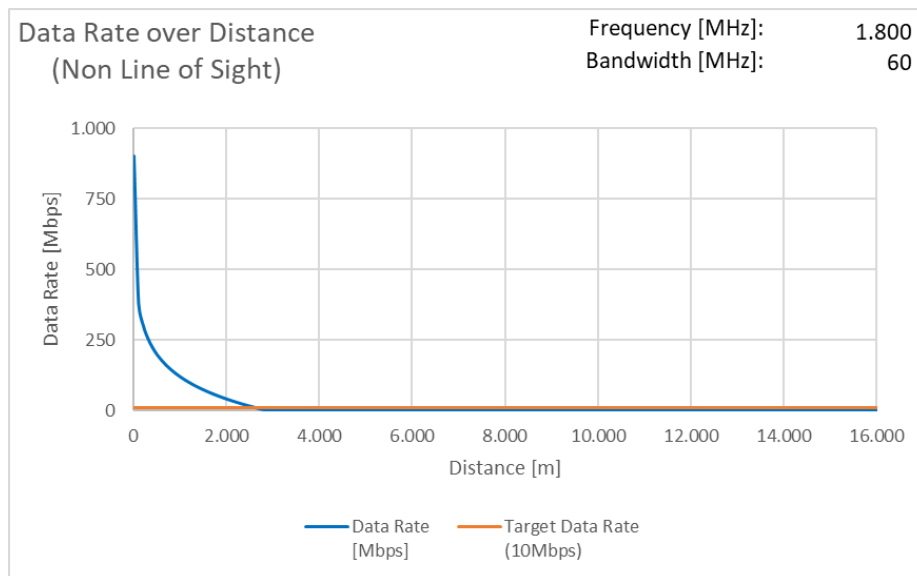


Abbildung 32: Datenrate über Entfernung bei 2.100 MHz, Line-of-Sight

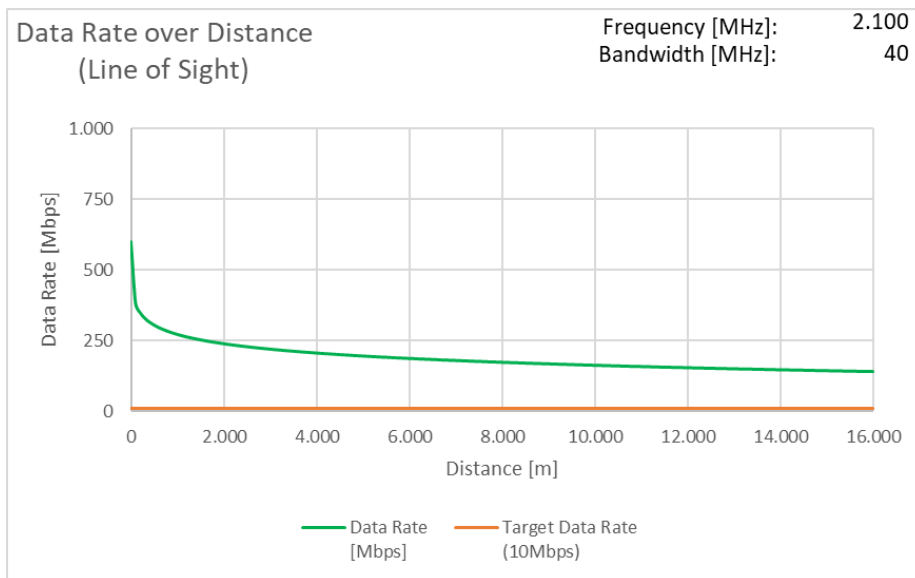


Abbildung 33: Datenrate über Entfernung bei 2.100 MHz, Non-Line-of-Sight

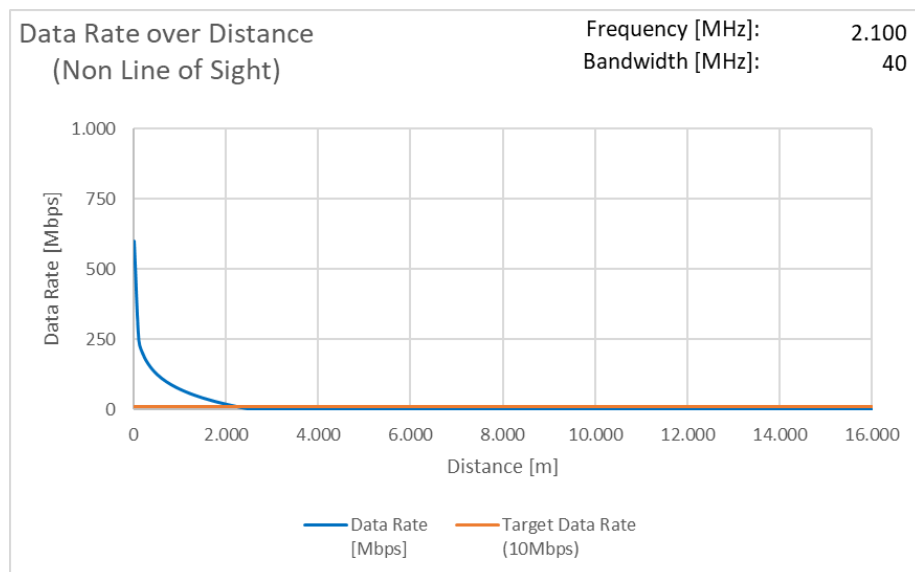


Abbildung 34: Datenrate über Entfernung bei 2.600 MHz, Line-of-Sight

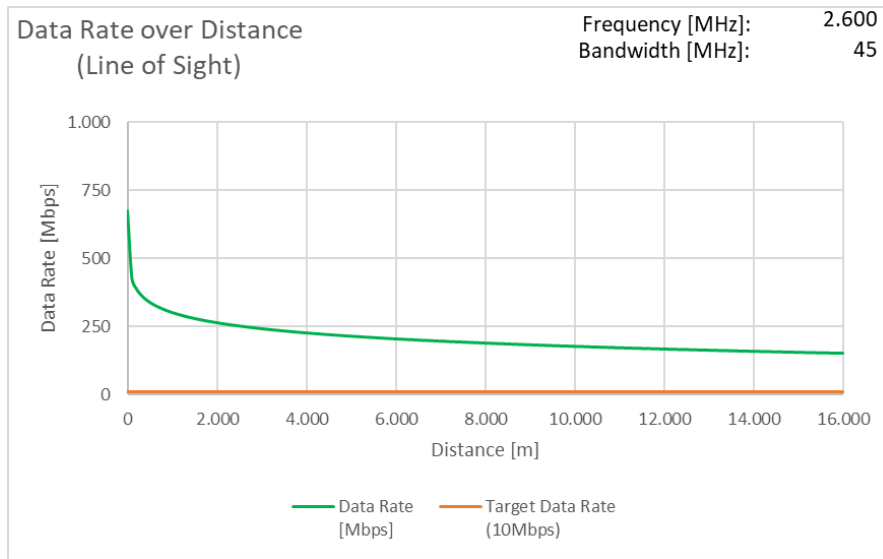


Abbildung 35: Datenrate über Entfernung bei 2.600 MHz, Non-Line-of-Sight

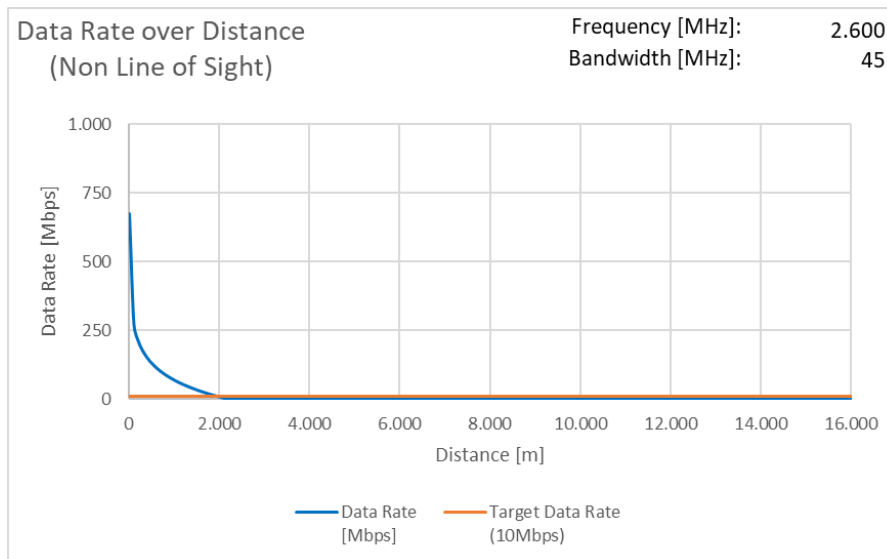


Abbildung 36: Datenrate über Entfernung bei 3.600 MHz, Line-of-Sight

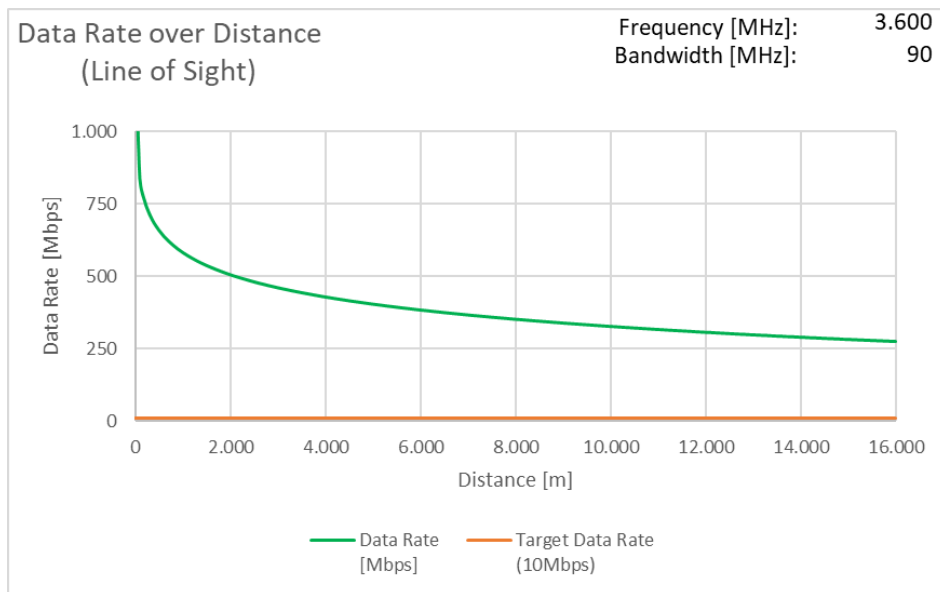


Abbildung 37: Datenrate über Entfernung bei 3.600 MHz, Non-Line-of-Sight

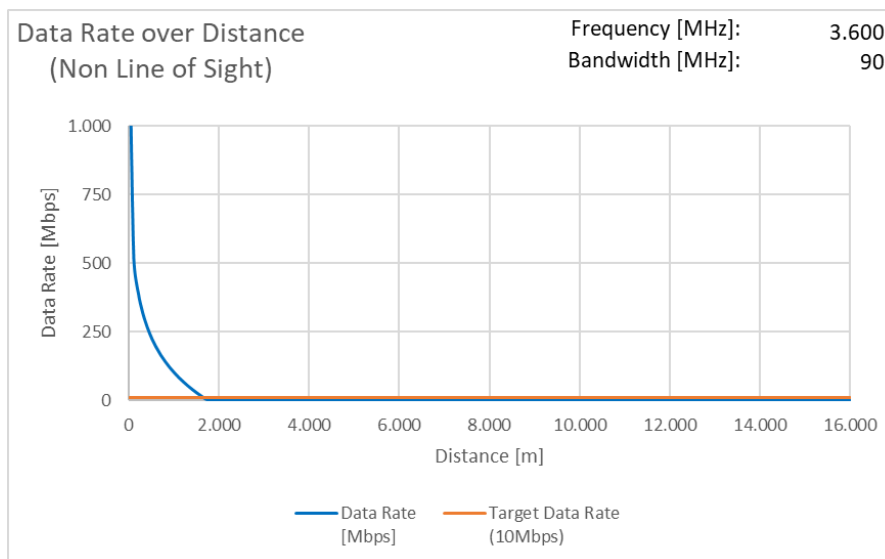


Abbildung 38: Datenrate über Entfernung bei 6 GHz, Line-of-Sight

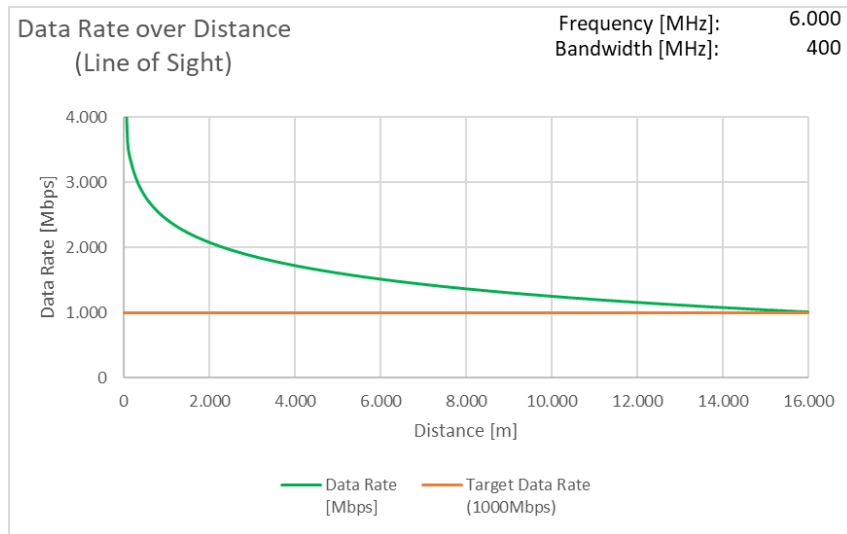


Abbildung 39: Datenrate über Entfernung bei 6 GHz, Non-Line-of-Sight

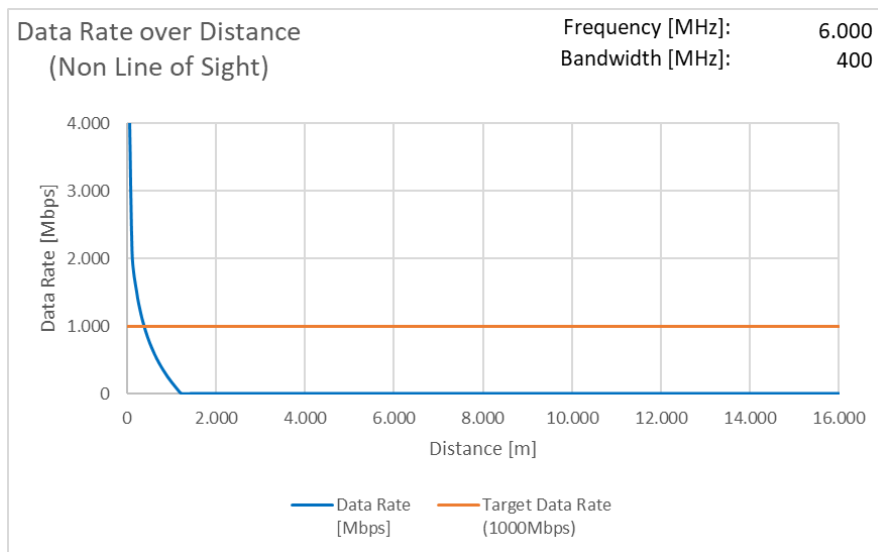


Abbildung 40: Datenrate über Entfernung bei 26 GHz, Line-of-Sight

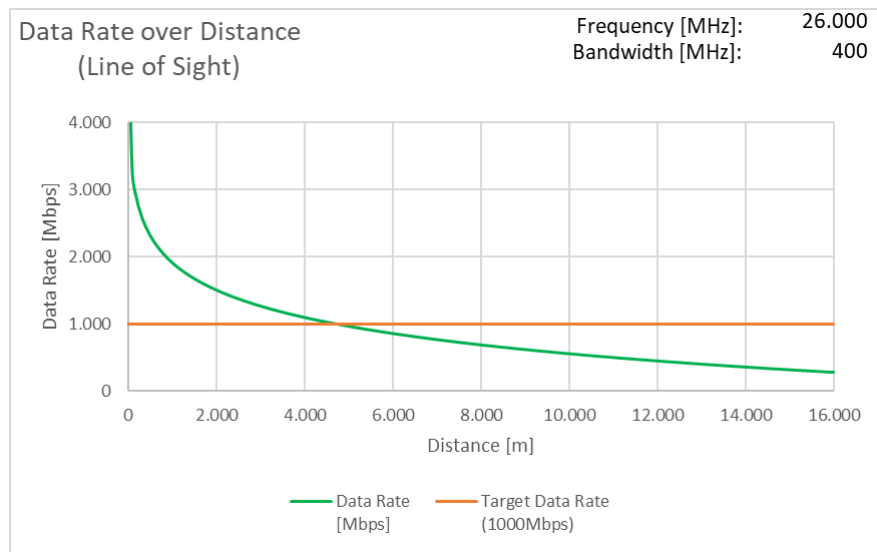
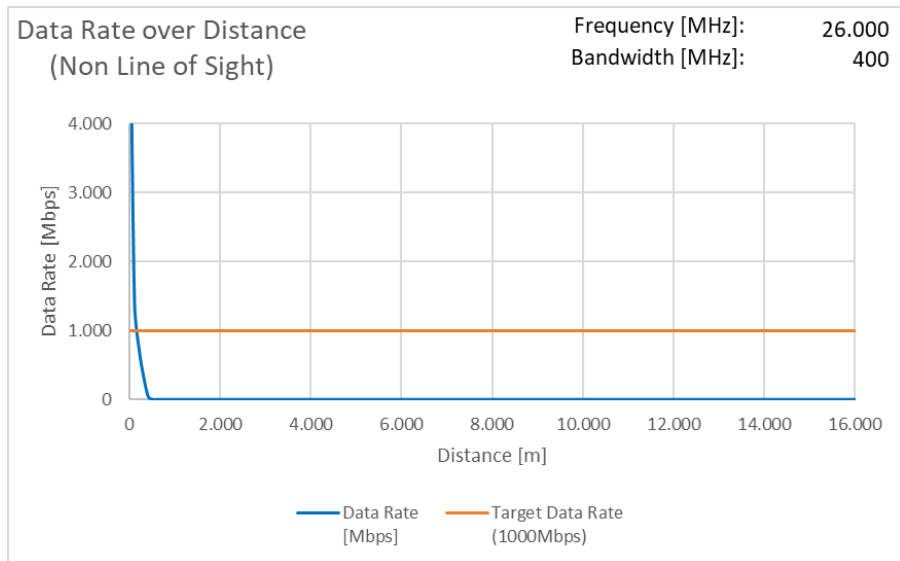


Abbildung 41: Datenrate über Entfernung bei 26 GHz, Non-Line-of-Sight



Detaildarstellung Szenario-Rechnungen

Abbildung 42: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 25.000 m bei FWA

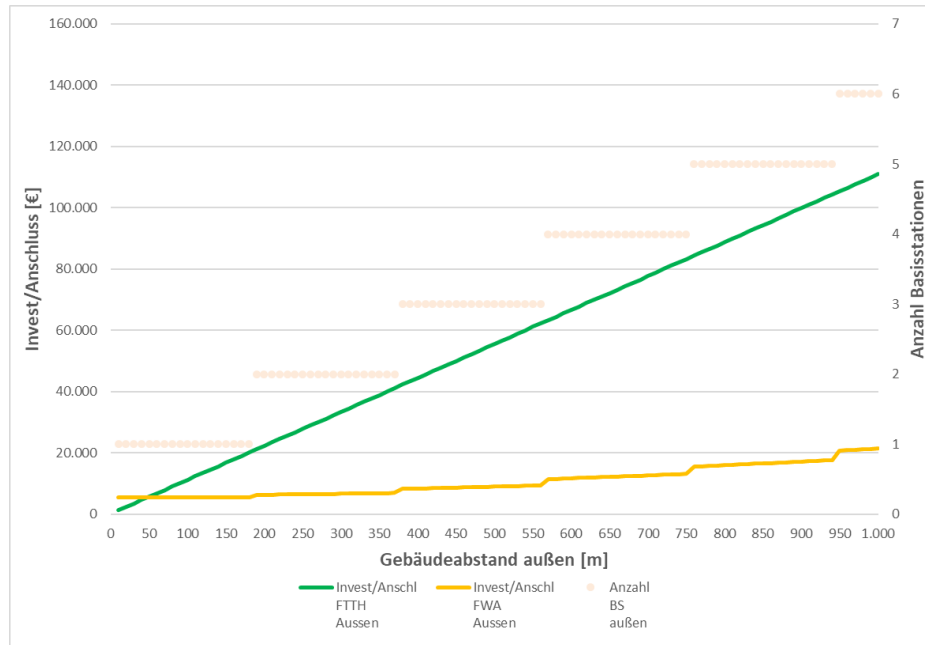


Abbildung 43: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 16.00 0m bei FWA

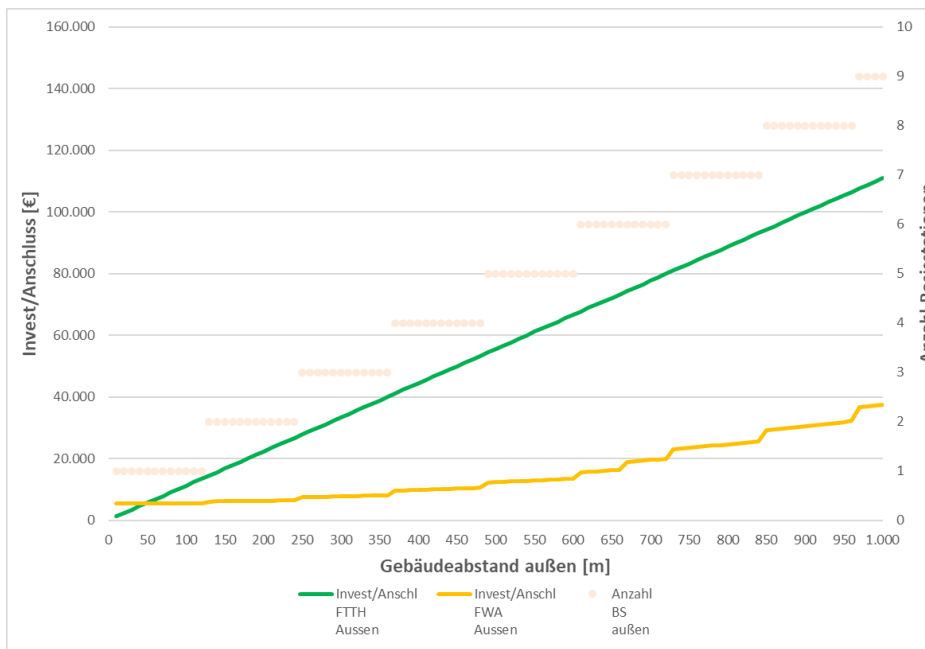


Abbildung 44: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 4.500 m bei FWA

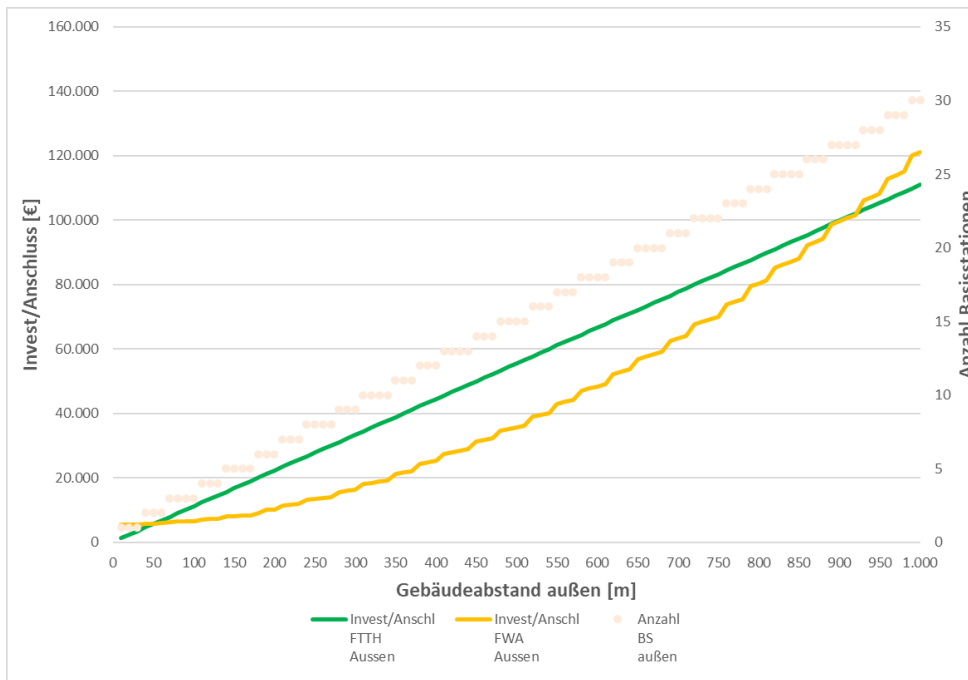


Abbildung 45: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 3.600 m bei FWA

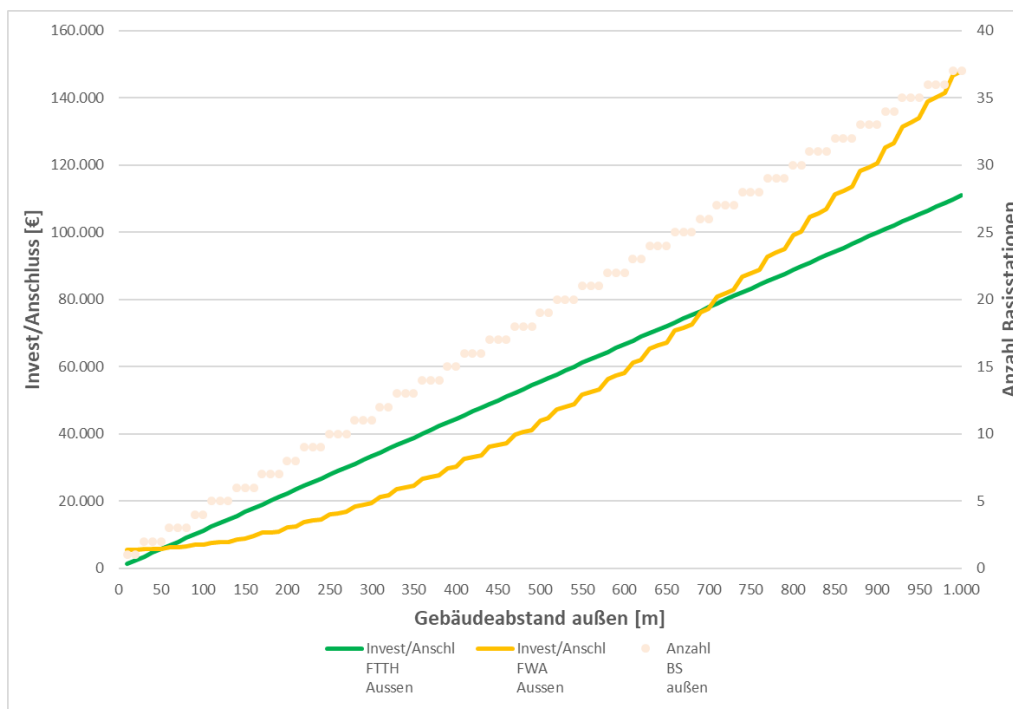


Abbildung 46: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 2.600 m bei FWA

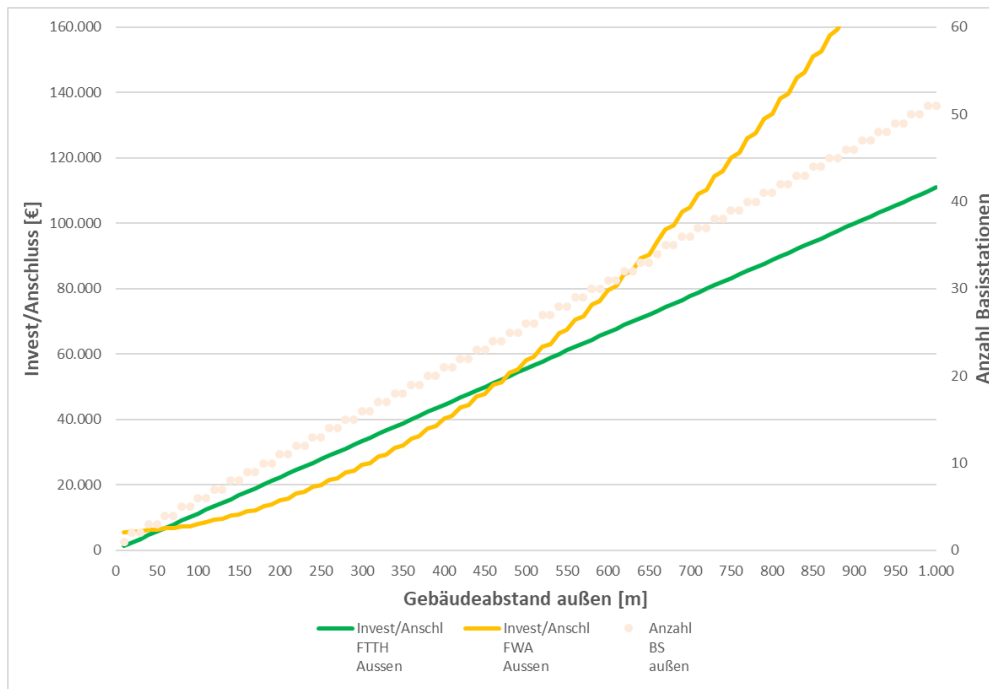


Abbildung 47: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 1.900 m bei FWA

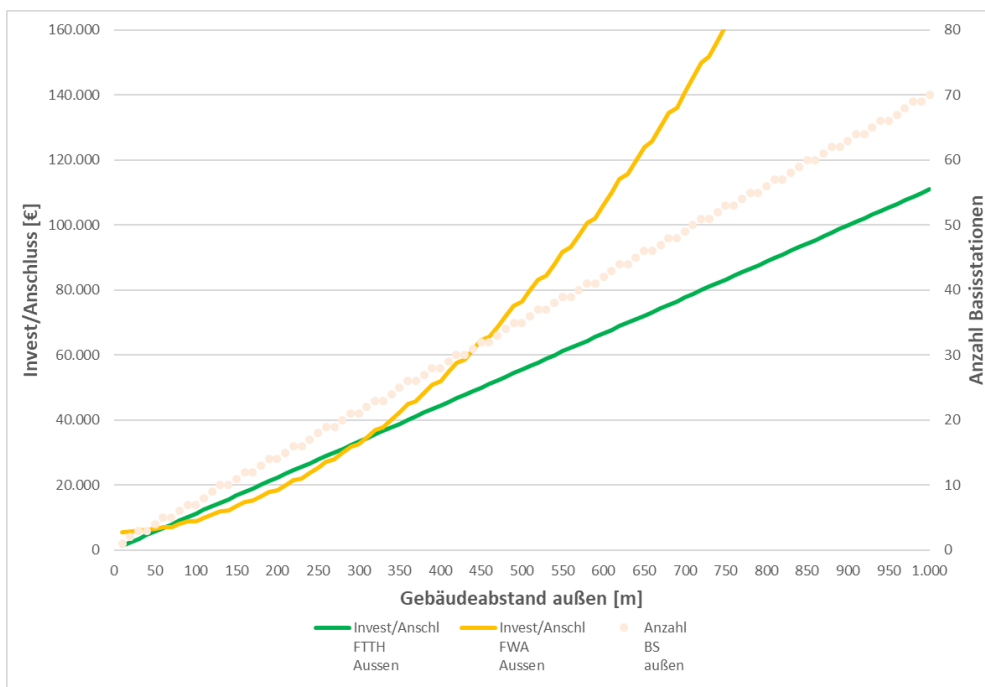


Abbildung 48: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 1.600 m bei FWA

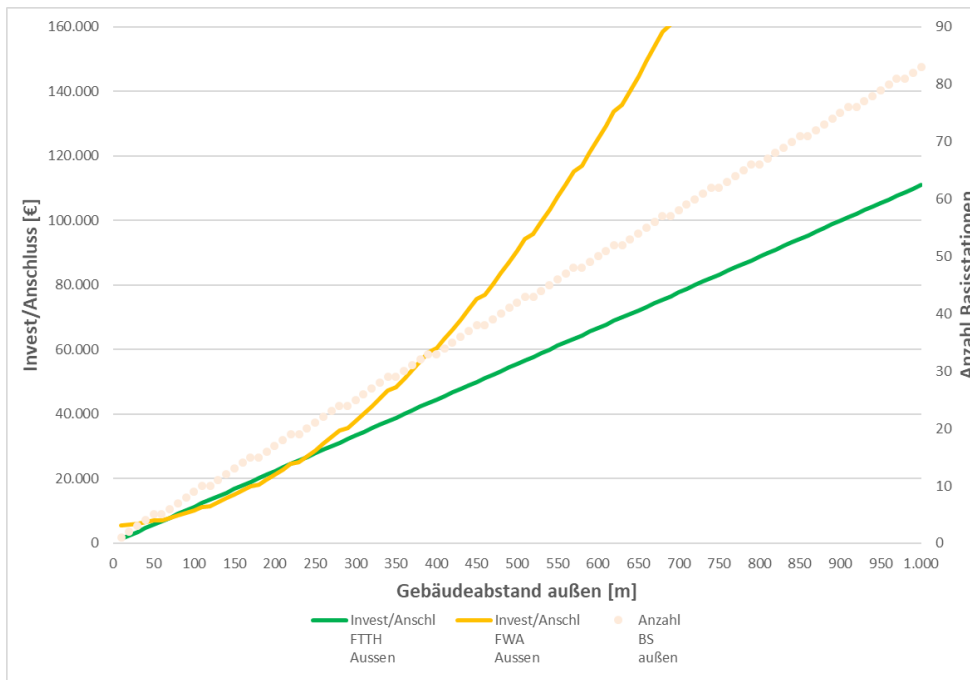


Abbildung 49: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 400 m bei FWA

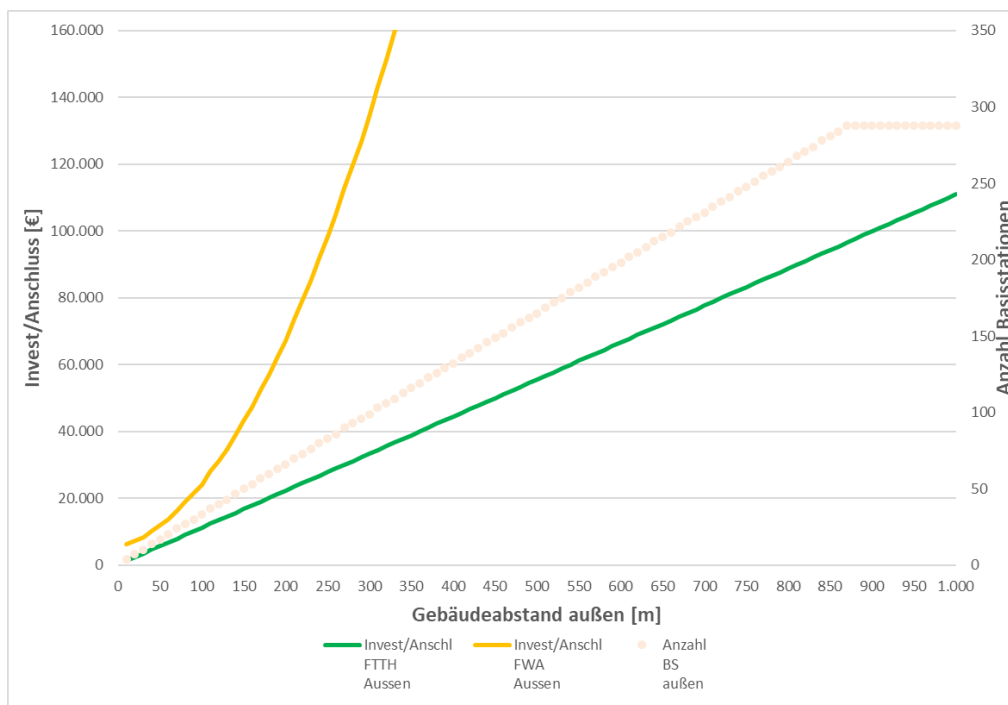
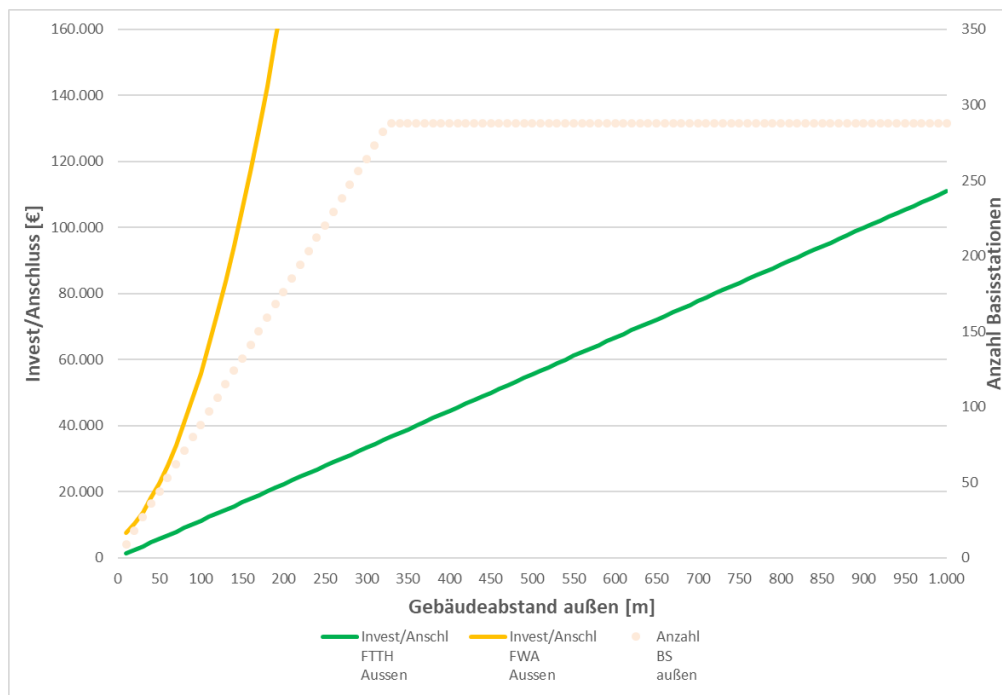


Abbildung 50: Zusammenhang Invest/Anschluss und Gebäudeabstand, FTTH und FWA im Vergleich bei Radius 150 m bei FWA

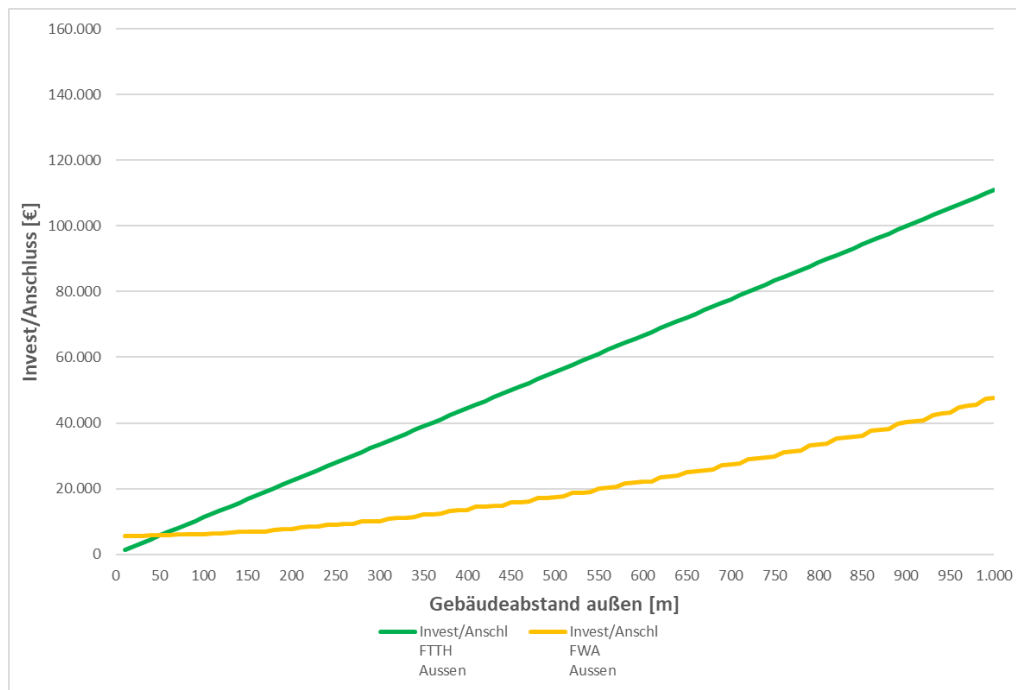


Sensitivitäten Luftverkabelung

Sensitivität Luftverkabelung für Anbindung Basisstationen

Es folgt eine Sensitivierung mit Luftverkabelung für die Anbindung der FWA-Basisstationen, welche bisher als erdverlegte Glasfaser angenommen wurde und nun als Glasfaser in Luftverkabelung. Es wurden die gleichen Längen wie in der jeweiligen Basisvariante angenommen, für die Luftverkabelung wurde aber als Investitionsparameter 10,50€ pro Meter unterstellt. Zum Vergleich: Ein Graben des Typ1 wird mit 50€ pro Meter angenommen. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 51: Sensitivität: Luftverkabelung für Anbindung der FWA-Basisstationen



Die Anbindung der Basisstationen über Luftverkabelung begünstigt FWA deutlich.

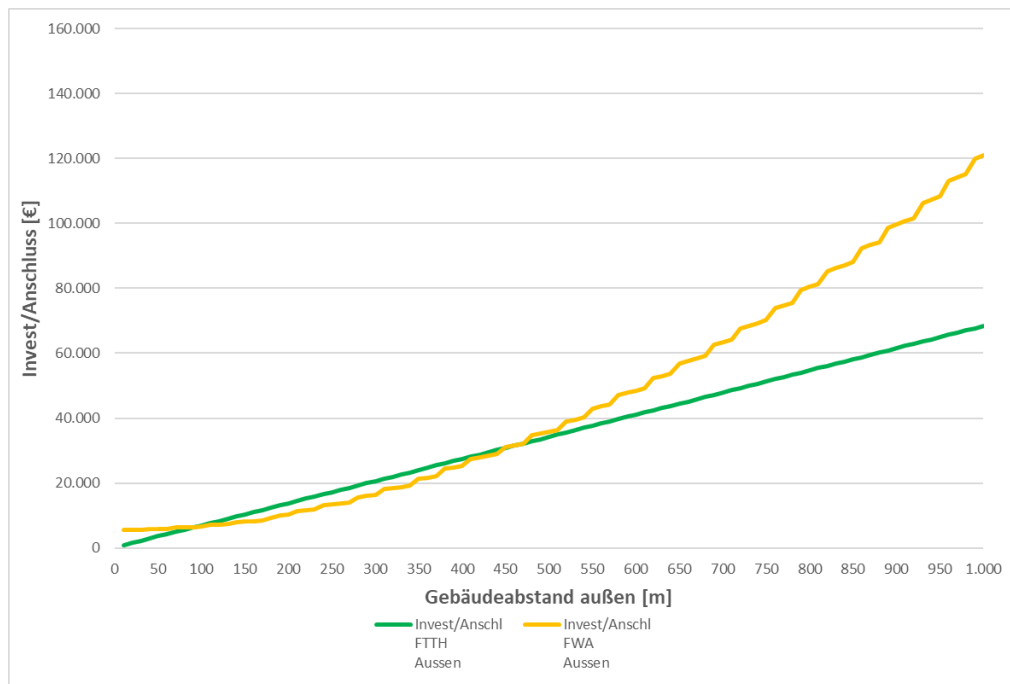
Hinweis: Hier werden die initialen Investitionen betrachtet.

Es gilt aber zu beachten, dass die OPEX höher und die Re-Investitionen bei Luftverkabelung wegen der kürzeren Lebensdauer häufiger sind.

Sensitivität Luftverkabelung für Verzweigerkabel außen

Es folgt eine Sensitivierung mit Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment zwischen Faserverzweiger und Endkundenanschluss. Es wurden die gleichen Längen wie in der jeweiligen Basisvariante angenommen. Für die Luftverkabelung wurde aber als Investitionsparameter 10,50€ pro Meter unterstellt. Zum Vergleich: Ein Graben des Typ1 wird mit 50€ pro Meter angenommen. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 52: Sensitivität: Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment



Die Anbindung der Gebäude in den äußeren Verzweigerbereichen über Luftverkabelung reduziert die Vorteilhaftigkeit von FWA erheblich.

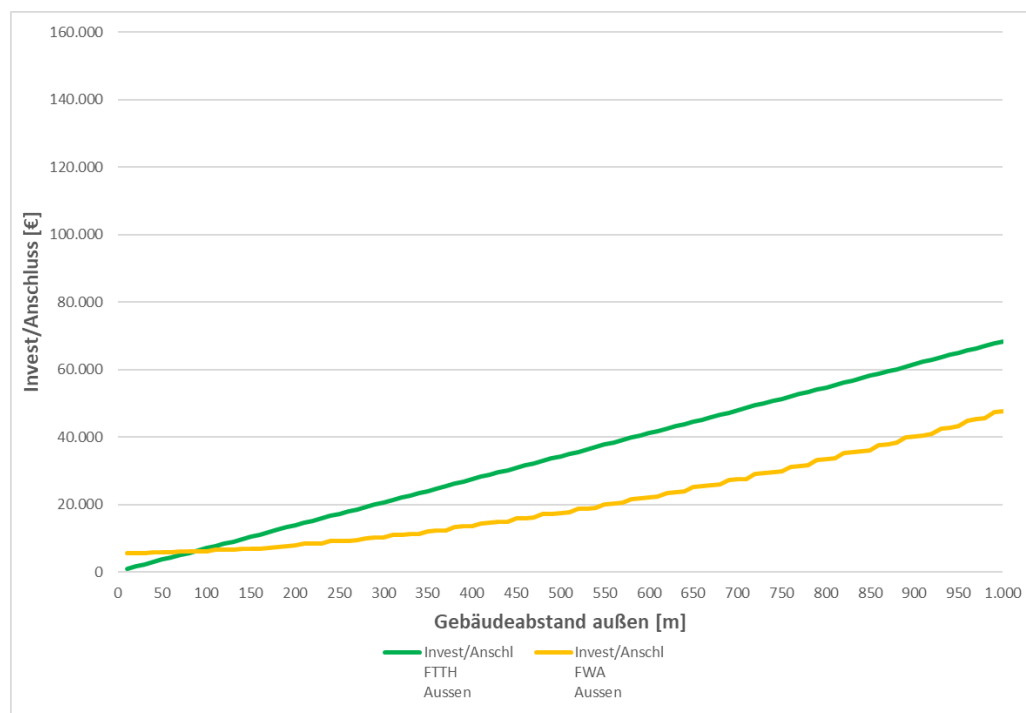
Hinweis: Hier werden die initialen Investitionen betrachtet.

Es gilt aber zu beachten, dass die OPEX höher und die Re-Investitionen bei Luftverkabelung wegen der kürzeren Lebensdauer häufiger sind.

Sensitivität Mast und FTTH-Verzweigerkabel-Segmente per Luftverkabelung erschlossen

Es folgt eine Sensitivierung mit Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment zwischen Faserverzweiger und Endkundenanschluss, sowie eine Sensitivierung mit Luftverkabelung für die Anbindung der FWA-Basisstationen, welche bisher als erdverlegte Glasfaser angenommen wurde und nun als Glasfaser in Luftverkabelung. Es wurden die gleichen Längen wie in der jeweiligen Basisvariante angenommen. Für die Luftverkabelung wurde aber als Investitionsparameter 10,50€ pro Meter unterstellt. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Abbildung 53: Sensitivität: Luftverkabelung für Anbindung der FWA-Basisstationen und Luftverkabelung für das FTTH-Verzweigerkabel-Segment



In beiden Fällen wirkt sich Luftverkabelung deutlich investitionsmindernd aus, jedoch überwiegt der Effekt bei FWA.

Hinweis: Hier werden die initialen Investitionen betrachtet.

Es gilt aber zu beachten, dass die OPEX höher und die Re-Investitionen bei Luftverkabelung wegen der kürzeren Lebensdauer häufiger sind.

Sensitivität Preise für FWA

Da es sich bei den FWA-Equipment-Preisen für

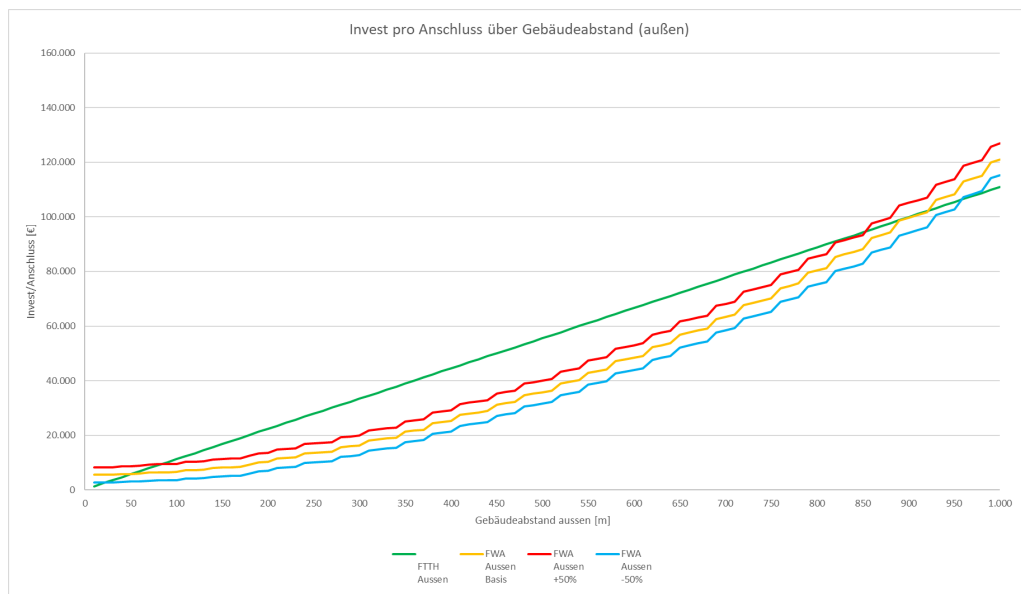
- Basisstationen,
- Masten,
- Antennen und
- CPE

nur um geschätzte Werte handelt (siehe 3.2.4.4), wurde eine Sensitivitätsanalyse auf die FWA-Equipment-Preise für die äußeren 12 Verzweigerbereiche durchgeführt. Hierzu wurden die Preise einmal um 50% erhöht und einmal um 50% gesenkt. Die Berechnungen wurden für einen Radius von 4.500 m durchgeführt (Szenario aus Abschnitt 3.3). Alle

anderen Parameter wurden beibehalten. Betrachtet werden nur die Investitionen der äußeren Verzweigerbereiche.

Sensitivität: alle Preise wurden für FWA-Equipment $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m

Abbildung 54: Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment

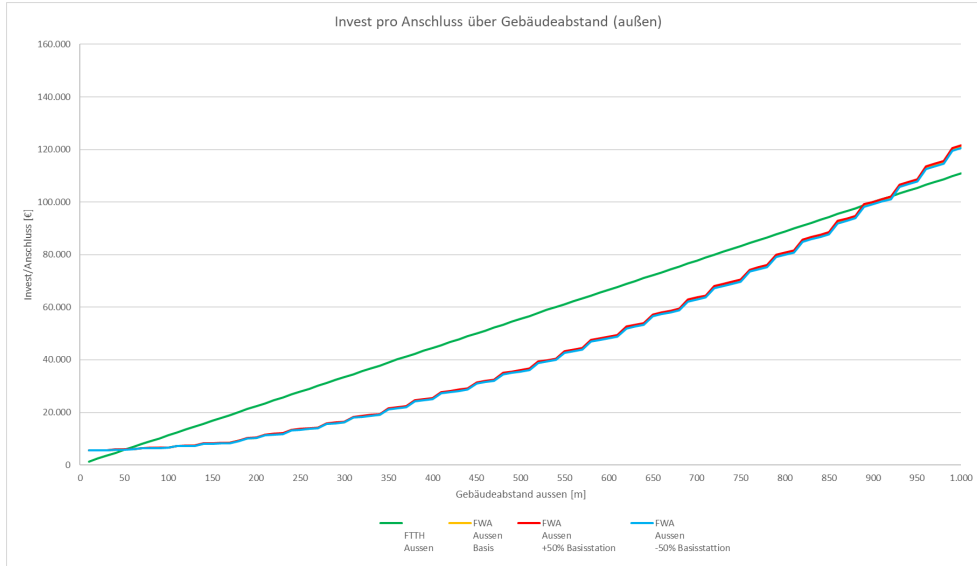


Die Preisveränderungen führen zu einer Verschiebung der Investitionskurven nach oben bzw. nach unten, die grundsätzlichen Verhältnismäßigkeiten bleiben jedoch bestehen und nur am Rande der Vorteilhaftigkeit von FWA kommt es zu leichten Verschiebungen: Bei einer Erhöhung um 50% verkleinert sich der Bereich der Vorteilhaftigkeit, bei einer Verringerung um 50% vergrößert sich der Bereich der Vorteilhaftigkeit.

Nachfolgend wurden die einzelnen Einflüsse untersucht und jeweils um 50% erhöht, bzw. verringert.

Sensitivität: Basisstationen $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m

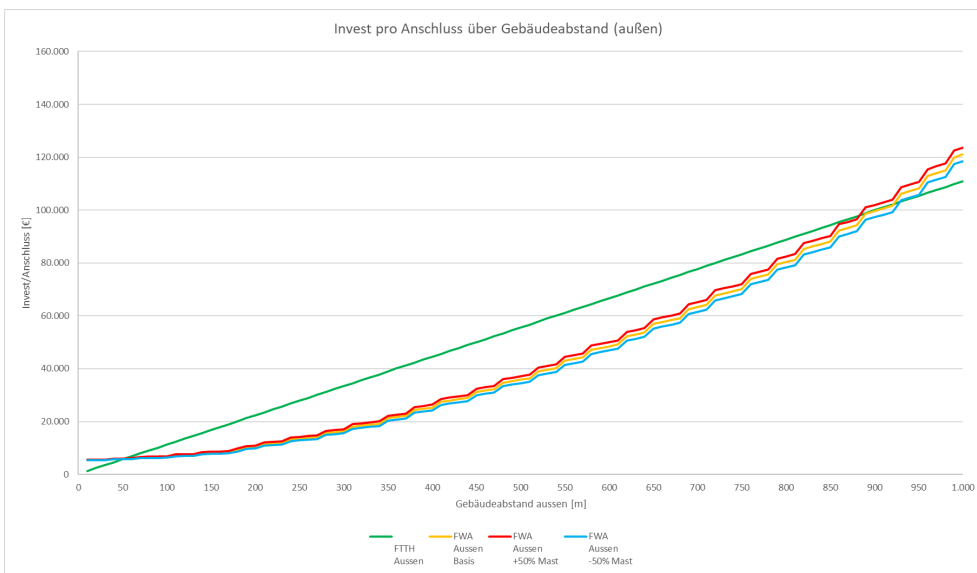
Abbildung 55: Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Basisstationen



Preisunterschiede bei den Basisstationen wirken sich eher gering aus.

Sensitivität: Masten $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m

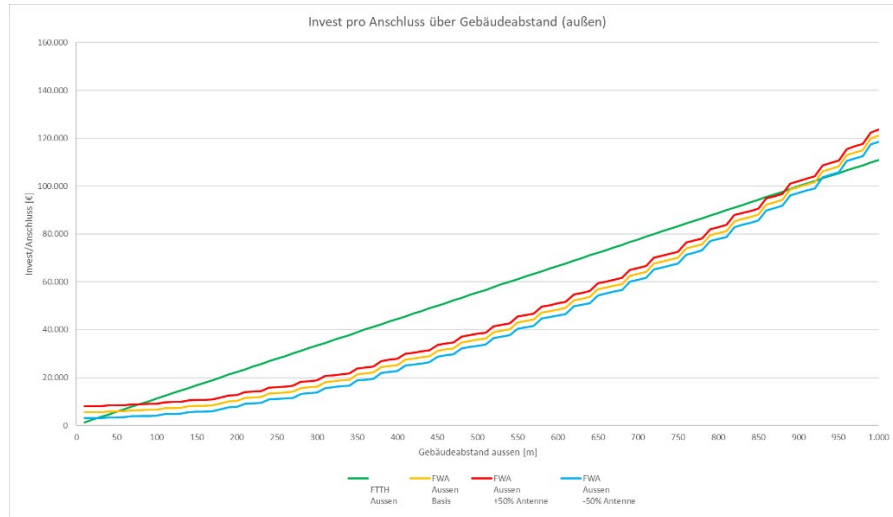
Abbildung 56: Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Masten



Preisunterschiede bei den Masten wirken sich eher gering aus, am meisten bei großen Gebäudeabständen, da dies die Errichtung von mehr Masten (mehr Funkzellen) bedingt.

Sensitivität: Antennen $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m

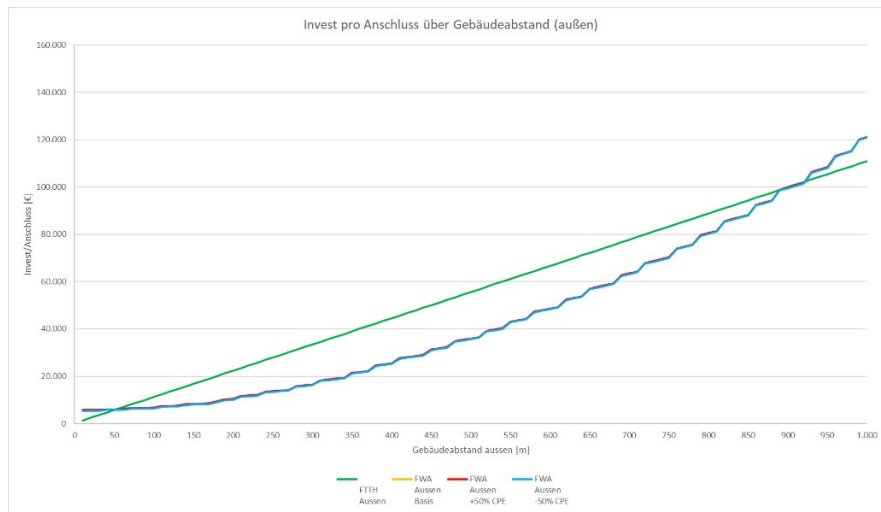
Abbildung 57: Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – Antennen



Preisunterschiede bei den Antennen wirken sich sichtbar und gleichmäßig aus.

Sensitivität: CPE $\pm 50\%$ variiert, Darstellung für 4.500 m

Abbildung 58: Sensitivität: Preisvariation FWA-Equipment – CPE



Preisunterschiede bei den (Outdoor-) CPE wirken sich kaum merklich aus.

ISSN 1865-8997