

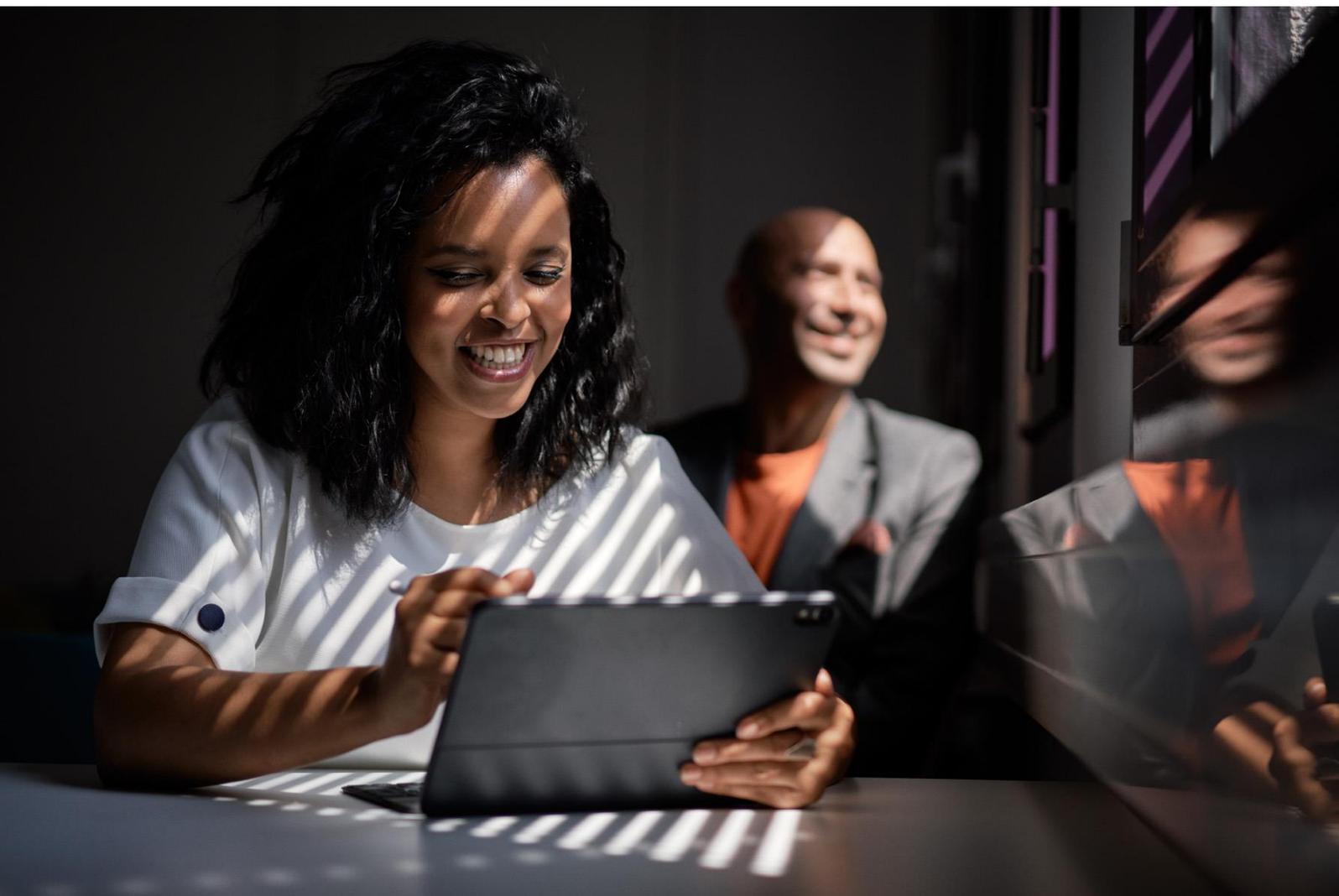
Studie

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

03.01.2022, Version 1.6

umlaut communications GmbH, WIK-Consult GmbH

wik 
CONSULT




umlaut



Inhaltsverzeichnis

Executive Summary.	5
1. Einleitung	8
1.1 Hintergründe	8
1.2 Ziele der Studie	9
1.3 Vorgehensweise	10
1.4 Gliederung der Studie	11
1.5 Abgrenzung	12
2. Technische Eckdaten von 4G (LTE) und 5G	13
2.1 Technische Hintergründe	13
2.1.1 Mobilfunkausbau	13
2.1.2 Zuteilung der Mobilfunkfrequenzen	14
2.1.3 Reichweiten und Zellgrößen	15
2.1.4 Datenraten	16
2.1.5 Latenzen	17
2.1.6 Carrier Aggregation (Frequenzbündelung)	18
2.1.7 Mehrantennentechniken und Beamforming (Richtstrahlbündelung)	18
2.1.8 Priorisierung	19
2.1.9 ‚ <i>Network Slicing</i> ‘ (Individuelle Netzscheibe)	21
2.1.10 Übersicht über Spezifikationen von 4G und 5G	22
2.1.11 Technische Eignung von 4G- und 5G-Mobilfunksystemen für die Erbringung eines Universaldienstes	22
2.2 Leistungsfähigkeit aktueller 4G (LTE)-Netze in der Praxis	23
2.2.1 Download-Datenrate	23
2.2.2 Upload-Datenrate	26
2.3 Parameter mit Einfluss auf eine stationäre Mobilfunknutzung	29
2.3.1 Einsatz von Außenantennen	29
2.3.2 Bekannte/vorbestimmte Richtstrahlbündelung („ <i>Beamforming</i> “)	30
3. Bewertung der Mobilfunkversorgung zur Erbringung des Universaldienstes	31
3.1 Vorgehensweise	31
3.2 Erhebung der relevanten Festnetzversorgung (Bedarfsermittlung)	32
3.3 Erhebung der nationalen Mobilfunkversorgung	34

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Studie im Auftrag der BNetzA, Kennziffer 2021/003a/Z25-7

3.3.1	Erfassungsmethodik	34
3.3.2	Auswertemethodik	35
3.3.3	Datenbasis	36
3.3.4	Ergebnisse der Datenanalyse der Mobilfunkversorgung	37
3.4	Ergänzende Daten aus dem Mobilfunk-Monitoring	39
3.5	Prognose über die künftige nationale Mobilfunkversorgung	40
3.5.1	Versorgungsauflagen	40
3.5.2	Mobilfunkförderprogramme	41
3.6	Analyse des Kapazitätsbedarfs zur Versorgung der Universaldiensthaushalte über Mobilfunk am Beispiel des Münsterlandes	41
3.6.1	Modellierungsansatz	41
3.6.2	Verfügbares Frequenzspektrum (Kapazität)	43
3.6.3	Kapazitätsbedarf für kommerzielle Mobilfunkdienste	44
3.6.4	Kapazitätsbedarf für den Universaldienst	46
3.6.5	Ergebnisse der regionalen Kapazitätsanalyse	46
3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	47
4.	Interpretation der Ergebnisse	51
4.1	Interpretation der Mobilfunkversorgung	52
4.1.1	Universaldienst in mit Mobilfunk ausreichend versorgten Flächen	52
4.1.2	Universaldienst in mit Mobilfunk unzureichend versorgten Flächen	52
4.1.3	Universaldienst in mit Mobilfunk nicht versorgten Flächen	53
4.2	Interpretation der Kapazitätsanalyse	54
5.	Zusammenfassung und Empfehlungen	56
	Referenzen.	58
	Abkürzungen.	61

Executive Summary

Hintergrund: Anrecht auf einen schnellen Internetzugang an einem festen Standort

Nach dem neuen Telekommunikationsgesetz (TKG–2021), welches am 1. Dezember 2021 in Kraft getreten ist, haben die Bürger und Bürgerinnen der Bundesrepublik Deutschland zukünftig einen Anspruch auf einen angemessenen Breitbandanschluss an einem festen Standort, der ihnen die soziale und wirtschaftliche Teilhabe ermöglichen soll.

Das zukünftige Universaldienstregime setzt die Richtlinie EU /2018/1972 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Dezember 2018 um. Die diesbezüglichen Bestimmungen zu dem zukünftigen Universaldienstregime finden sich in Artikel 84 – 92 Richtlinie EU /2018/1972 sowie Anhang V, VI, VII, X. Die nationalen Regelungen finden sich in §§ 156 – 163 TKG–2021.

Kern- und Ausgangspunkt des zukünftigen Universaldienstregimes ist die Bestimmung der Mindestanforderungen an den Universaldienst zur Ermöglichung der im TKG–2021 genannten Dienste (d. h. Anhang V Dienste, Teleheimarbeit einschließlich Verschlüsselungsverfahren im üblichen Umfang und eine für Verbraucher marktübliche Nutzung von Inholdediensten). Die technischen Mindestanforderungen zur Ermöglichung der im Gesetz genannten Dienste beinhalten im Wesentlichen drei Parameter:

- minimale Download–Datenrate,
- minimale Upload–Datenrate und
- maximale Latenz.

Ergänzend können weitere Parameter erforderlich sein, wenn diese zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Universaldienstleistung notwendig werden sollten.

Eine dezidierte Festlegung der Mindestanforderungen in Deutschland liegt gegenwärtig noch nicht vor. Nach der Gesetzesbegründung sind die zu realisierenden Dienste im Rahmen des Universaldienstes mit einem „30–Mbit–Produkt“ in jedem Fall nutzbar.

Mobilfunk ist grundsätzlich in der Lage, die sich abzeichnenden technischen Mindestanforderungen an den Universaldienst zu erfüllen.

Mobilfunk ist grundsätzlich in der Lage, den Universaldienst zu erbringen. Für die sich abzeichnenden Anforderungen eines Universaldienstes bieten 4G und 5G grundsätzlich ausreichende Datenraten im Downlink und Uplink.

- Die Netzbetreiber in Deutschland bieten heute über fest installierte 4G– bzw. 5G–Router maximale Datenraten von bis zu 500 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink über 4G. Bei einer Bandbreite von 20 MHz in 4G–Netzen können im Downlink Datenraten von 160 Mbit/s erreicht werden.
- Von einem vollständigen 5G–Netz (5G SA) werden sie sogar weit übertroffen. In dem von der Fachzeitschrift connect in Kooperation mit umlaut durchgeführten Mobilfunktest für die DACH–Region sieht man basierend auf Crowd–Daten, dass bei den deutschen Netzen in mehr als 93% aller Fälle kürzere Latenzen als 100 ms erreicht werden, in mehr als 75% der Fälle wird sogar ein Wert von 50 ms eingehalten bzw. unterboten.

Mobilfunknetze sind ein ‚Shared–Medium‘, d. h. die verfügbare Netzqualität eines Nutzers ist von dem Nutzungsverhalten der anderen Mobilfunkteilnehmer in einer Mobilfunkzelle abhängig. Zur Erbringung des Universaldienstes durch Mobilfunklösungen ist es aus rein technischer Sicht jedoch möglich, die

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

entsprechenden Teilnehmer durch eine geeignete Priorisierung der Datenverkehre bevorzugt zu versorgen, um ggf. zugesagte Mindestdatenraten realisieren zu können. In 5G-Netzen erlaubt „*Network Slicing*“, logisch getrennte „Netzscheiben“ bzw. virtuelle Netze für verschiedene Nutzungsszenarien mit unterschiedlichen Eigenschaften abzubilden, die jedoch auf derselben physikalischen Infrastruktur realisiert werden. Dies erlaubt innerhalb einer Funkzelle die adaptive Anpassung der Übertragung für verschiedene Nutzer mit unterschiedlichen Anforderungsfällen.

Abschätzung der potenziellen über Mobilfunk zu versorgenden Haushalte und die mögliche Versorgung dieser potenziellen Universaldiensthaushalte über Mobilfunk

Auf Basis der Daten des Breitbandatlas wurde abgeschätzt, wie viele Haushalte leitungsgebunden (bspw. VDSL, FTTB/H) nicht über einen Breitbandanschluss verfügen, der den möglichen Universaldienstanforderungen genügt. Als Ergebnis dieser approximativen Berechnungen ergab sich eine Zahl von 2,1 Mio. Haushalten in Deutschland, die potenziell einen Universaldienst nachfragen könnten, weil sie aktuell leitungsgebunden nicht ausreichend versorgt sind.

Bei ca. 32.000 Haushalten ist, ohne die Analyse lokal verfügbarer Übertragungskapazitäten, festzustellen, dass die vorhandene Mobilfunkversorgung aller Mobilfunknetzbetreiber nicht ausreichen wird, einen Universaldienst mit garantierten 10 Mbit/s im Downlink zu erbringen. Damit könnte für etwa 98,6% der potenziellen Universaldiensthaushalte bereits über die bestehende Mobilfunkversorgung ein Universaldienst realisiert werden.

Etwa 15.000 Haushalte werden voraussichtlich kurz- bis mittelfristig vom erwarteten Mobilfunkausbau zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben profitieren. Durch diese zukünftigen Ausbaumaßnahmen könnte der Anteil erreichbarer Universaldiensthaushalte somit auf 99,2% gesteigert werden. Weitere Haushalte könnten ggf. von Mobilfunkförderprogrammen profitieren.

Etwa 17.000 Haushalte werden kurz- bis mittelfristig nicht über Versorgungsaufgaben vom Mobilfunkausbau profitieren. Hier müssten entweder Bestandsstandorte mit zusätzlichen Frequenzen aufgerüstet oder neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden. Würden diese Haushalte aufgrund des Universaldienstes mit 4G und/oder 5G versorgt, müssten voraussichtlich ca. 2.150 Mobilfunkstandorte errichtet werden, womit Investitionen von ca. 46.000 Euro pro Universaldiensthaushalt verbunden wären.

Eine beispielhafte regionale Analyse von Übertragungskapazitäten an einzelnen Mobilfunkstandorten eines exemplarisch betrachteten Mobilfunknetzes eines Anbieters verdeutlicht, dass dort etwa zwischen 12% und 16% der potenziellen Universaldiensthaushalte mit Mobilfunk versorgt werden könnten, wenn diese jederzeit über 10 Mbit/s im Downlink verfügen müssen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Durchschnitt 1.000 Mobilfunknutzer eine mittlere Datenrate von ca. 12 Mbit/s beanspruchen, während ein Universaldiensthaushalt über 10 Mbit/s im Downlink zugewiesen bekommt.

Es bleibt als Fazit, dass für jeden einzelnen potenziellen Universaldienstkunden, der über Mobilfunk versorgt werden soll, zu prüfen ist, ob in der jeweiligen Funkzelle des Universaldiensterbringers, in der sich der Standort des potenziellen Universaldienstkunden befindet, die vorhandenen Übertragungskapazitäten der Mobilfunkzelle ausreichend ist, um die Universaldiensthaushalte über Mobilfunk zu versorgen. Sofern dies nicht der Fall ist, müssen kapazitätserhöhende Maßnahmen für diese Mobilfunkzelle von Seiten des Mobilfunknetzbetreibers vorgenommen werden.

Die tatsächliche Realisierbarkeit von Universaldienstanschlüssen über 4G/5G in einer Mobilfunkzelle hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl und Lage der Universaldienst Haushalte,
- Eingesetztes Frequenzspektrum am jeweils betrachteten Mobilfunkstandort,
- Verkehrsverlauf in der jeweiligen Mobilfunkzelle,
- Mindestdatenrate und Anforderungen an die Verfügbarkeit der Mindestdatenrate.

Durch den zusätzlichen Einsatz von Frequenzen kann die Kapazität einer Mobilfunkzelle erhöht werden. Die jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber setzen in ihren Funkzellen bisher in unterschiedlichem Ausmaß die ihnen bundesweit zugeteilten Frequenzen ein. Durch Nutzung sämtlicher den jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber zugeteilten Frequenzen in Frequenzbereichen mit vergleichbaren Ausbreitungseigenschaften, wäre eine Erhöhung der Übertragungskapazitäten an einzelnen Standorten mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden. Die statische Tragfähigkeit des Standortes und die Vorgaben zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung können die Nutzung weiterer Frequenzbereiche jedoch einschränken oder ausschließen.

Die Versorgung eines spezifischen (Universaldienst-)Haushaltes innerhalb einer bestehenden Mobilfunkzelle kann ferner durch folgende Maßnahmen erreicht werden: Priorisierung, ‚Carrier Aggregation‘ (Frequenzbündelung), Nutzung von (optimal ausgerichteten) Außenantennen sowie ‚Network Slicing‘ bei 5G.

Sofern potenzielle kapazitätssteigernde Maßnahmen und die Versorgung eines spezifischen Haushaltes verbessernde Maßnahmen innerhalb einer Zelle nicht hinreichend sind, wären neue Mobilfunkstandorte zu errichten, um die Universaldienstkunden über Mobilfunk zu versorgen. Die Realisierung bzw. die zeitliche Umsetzung bedürfte einer gewissen Zeit. Einschränkungen bei der Akquise und dem Aufbau neuer Mobilfunkstandorte (schwierige Erteilung von Baugenehmigungen, Berücksichtigung von Naturschutzbelangen, Bürgerinitiativen, etc.) beeinflussen die Realisierung.

Fazit

Der im TKG festgelegte Universaldienst ist ein dynamisches Konzept. Die Mindestanforderungen an den Universaldienstanschluss werden mit der zunehmenden Nutzung von hochbitratigen Breitbandanschlüssen ansteigen. Die Möglichkeit, den Universaldienst anzubieten, wird insoweit vom Einsatz künftiger Frequenzen an Bestandsstandorten sowie von einer Verdichtung der Mobilfunknetze abhängen. Je höher die Mindestdatenrate mit einer entsprechenden Verfügbarkeit ausfällt, desto weniger sind die öffentlichen Mobilfunknetze geeignet, die entsprechenden Kapazitäten bereitzustellen, die bereits heute die durchschnittliche Nachfrage von Mobilfunkteilnehmern um ein Vielfaches übersteigt.

1. Einleitung

1.1 Hintergründe

Dem Telekommunikationsgesetz zufolge, welches am 1. Dezember 2021 in Kraft tritt [1], haben die Bürger und Bürgerinnen der Bundesrepublik Deutschland zukünftig einen Anspruch auf einen angemessenen Breitbandanschluss an einem festen Standort, der ihnen die soziale und wirtschaftliche Teilhabe ermöglichen soll. Die hierüber zur Verfügung gestellten Dienste werden dabei zusammenfassend und abstrakt als „Universaldienst“ bezeichnet. Die Regelungen zur Erbringung dieses Universaldienstes sind dabei in einem sogenannten Universaldienstregime zu definieren.

Das zukünftige Universaldienstregime setzt die Richtlinie EU /2018/1972 [2] des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Dezember 2018 um. Die diesbezüglichen Bestimmungen zu dem zukünftigen Universaldienstregime finden sich in Artikel 84 – 92 Richtlinie EU /2018/1972 sowie Annex V, VI, VII, X. Die nationalen Regelungen finden sich in §§ 156 – 163 TKG.

Ein Universaldienstregime beinhaltet die folgenden Elemente:

- die Festlegung der technischen Mindestanforderungen an den Anschluss,
- die Festlegung eines erschwinglichen Preises für das Universaldienstangebot,
- die Identifizierung von Universaldienstgebieten (Haushalte, in denen zunächst kein Universaldienstanschluss verfügbar ist),
- die Bestimmung eines Universaldienstbringers in den unzureichend versorgten Gebieten,
- die Kompensation der zu belegenden unzumutbaren Nettokosten des Universaldienstleisters zur Erbringung des Universaldienstes sowie
- ein Finanzierungsregime zur Deckung der unzumutbaren Nettokosten der(s) Universaldienstbringer(s).

Kern- und Ausgangspunkt des zukünftigen Universaldienstregimes ist die Bestimmung der Mindestanforderungen an den Universaldienst. Die Mindestanforderungen sind in einer Rechtsverordnung festzulegen. Diese ist innerhalb von sechs Monaten nach Inkrafttreten des Telekommunikationsmodernisierungsgesetzes zu erlassen (§ 157 Abs. 4 TKG). Die Mindestanforderungen sind so festzulegen, dass die in Anhang V der Richtlinie (EU) 2018/1972 gelisteten Dienste¹ ermöglicht werden. Mit Blick auf die Festlegung weiterer Qualitätsparameter ist zu beachten, dass Parameter, Definition und Messverfahren für die Dienstqualität gemäß Anhang X der Richtlinie (EU) 2018/1972 erfolgen sollen. Zudem soll der Universaldienst die von mindestens 80% der Verbraucher im Bundesgebiet genutzte Mindestbandbreite (Abs. 3) berücksichtigen. Bei der Festsetzung der Mindestanforderungen sollen die Auswirkungen der festgelegten Qualität auf Anreize zum privatwirtschaftlichen Breitbandausbau und Breitbandfördermaßnahmen (Abs. 3) berücksichtigt werden.

¹ (1) E-Mail; (2) Suchmaschinen, die das Suchen und Auffinden aller Arten von Informationen ermöglichen; (3) grundlegende Online-Werkzeuge für die Aus- und Weiterbildung; (4) Online-Zeitungen oder Online-Nachrichten; (5) Online-Einkauf oder Online-Bestellung von Waren und Dienstleistungen; (6) Arbeitssuche und Werkzeuge für die Arbeitssuche; (7) berufliche Vernetzung; (8) Online-Banking; (9) Nutzung elektronischer Behördendienste; (10) Soziale Medien und Sofortnachrichtenübermittlung und (11) Anrufe und Videoanruf (Standardqualität)), des weiteren Teleheimarbeit einschließlich Verschlüsselungsverfahren im üblichen Umfang und eine für Verbraucher national marktübliche Nutzung von Online-Inhaltendienste (gemäß § 157 TKG Abs. 3).

Die technischen Mindestanforderungen zur Ermöglichung der im Gesetz genannten Dienste beinhalten im Wesentlichen drei Parameter:

- minimale Download-Datenrate,
- minimale Upload-Datenrate und
- maximale Latenz.

Ergänzend können weitere Parameter erforderlich sein, wenn diese zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Universaldienstleistung notwendig werden sollten.

Abhängig von der Festsetzung der Mindestanforderungen stellt sich die Frage, durch welche Anschließstechnologie ein solcher Universaldienstanschluss realisiert werden kann bzw. aktuell wird. Dabei sind verschiedene Kommunikationstechnologien oder -netze hinsichtlich ihrer Eignung zu betrachten:

- Glasfaserinfrastruktur FTTH/B (*„Fibre to the Home/Building“*),
- *„Very High Speed Digital Subscriber Line“* (VDSL) bzw. Vectoring-VDSL (*„Fibre to the Cabinet“*, FTTC), zumindest in den Fällen, in denen die Wohneinheit nicht allzu weit vom Kabelverzweiger entfernt ist,
- Breitbandkabelnetz (*„Hybrid Fiber Coax“*, HFC),
- *„Fixed Wireless Access“* (FWA) als auch öffentliche Mobilfunknetze unter Einsatz von 4G- und/oder 5G-Technologien oder
- Telekommunikationsdienste auf Basis von Satelliten.

Die möglichen Anschlussarten zur Erbringung des Universaldienstes bestimmen zum einen die Universaldienstgebiete (die Anzahl und Verteilung der unzureichend versorgten Haushalte) in Deutschland. Dies sind all diejenigen Haushalte, die aktuell und in den kommenden Jahren nicht durch eigenwirtschaftlichen Ausbau von Netzbetreibern und durch die Nutzung von Förderprogrammen durch einen geeigneten Universaldienstanschluss über eine der möglichen Anschlussarten versorgt werden, die die festgelegten Mindestanforderungen erfüllt. Zum anderen sind die möglichen Anschlussarten zur Realisierung der technischen Mindestanforderungen an den Universaldienst diejenigen Technologien, die von Seiten der(s) Universaldienstleister(s) genutzt werden können, um unzureichend versorgten Haushalten (Universaldienstgebieten) einen Universaldienstanschluss durch Errichtung einer entsprechenden Infrastruktur zukünftig anzubieten. Aufgrund des technologieutralen Ansatzes des Universaldienstregimes ist es in der Entscheidung des Universaldienstleisters, die Anschlussart zu wählen – vorausgesetzt die dann geltenden Mindestanforderungen sind erfüllt.

Die möglichen Anschlussarten bestimmen somit auch die Universaldienstkosten der Universaldienstleister, die zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen gering sein sollten. Schließlich sind die Universaldienstkosten über einen Universaldienstfond zu finanzieren, zu dem die Marktteilnehmer (die nummernbasierte Dienste anbieten) gemäß ihrem Umsatz im relevanten Markt beitragen. Zudem bestimmen die möglichen Anschlussarten, ob ein Universaldienst für alle diesbezüglich unzureichend versorgten Haushalte durch Errichtung einer angemessenen Infrastruktur in angemessener Zeit realisierbar ist.

1.2 Ziele der Studie

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Eignung, die Möglichkeiten und etwaigen Grenzen von Mobilfunklösungen zur Erbringung eines Universaldienstes an einem festen Standort zu analysieren. Dies

ist abhängig von den zu erfüllenden technischen Mindestanforderungen. Eine dezidierte Festlegung der Mindestanforderungen in Deutschland liegt gegenwärtig noch nicht vor.²

Die Ergebnisse sollen helfen, die Entscheidung der Bundesnetzagentur im Hinblick auf eine künftige Feststellung einer möglichen Unterversorgung vor dem Hintergrund des rechtlichen Anspruchs auf eine hinreichend schnelle Internetanbindung vorzubereiten und zu substantiieren.

Die Studie liefert insoweit Erkenntnisse im Hinblick auf die Frage, in welchem Ausmaß mobilfunkgestützte Internetanbindungen zur Erbringung eines Universaldienstes in Anspruch genommen werden könnten. Hierzu wird untersucht, ob auf Basis der aktuellen Mobilfunkversorgung in Deutschland, durch den Aus- und Neubau von Mobilfunkinfrastrukturen (auch im Hinblick auf die Erfüllung der Versorgungsaufgaben), über Bestandsinfrastrukturen oder über den Ausbau von zusätzlichen Kapazitäten an bestehenden Mobilfunksendeanlagen der Universaldienst angeboten werden kann.

Zugleich werden die Grenzen der aktuellen Mobilfunktechnologien je nach Umfang des Anwendungsbereichs aufgezeigt.

1.3 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der grundlegenden Fragestellung, ob und in welchem Umfang öffentliche Mobilfunknetze auf Basis von mindestens 4G-Technologien („*Long Term Evolution*“, LTE und LTE-Advanced) oder 5G-Technologien („*New Radio*“, NR) die technischen Mindestanforderungen erfüllen können, werden neben der Auswertung von Literatur, technischen Ausführungen über die Leistungsfähigkeit der betrachteten Mobilfunktechnologien und öffentlich verfügbaren Versorgungsstatistiken auch Messdaten der umlaut communications ausgewertet. Während öffentlich verfügbare Daten über die Versorgung mit LTE in der Regel nur Planungsdaten widerspiegeln, zeigen Messdaten, welche Datenraten bzw. Qualitätsparameter tatsächlich bei den Nutzern zur Verfügung stehen. Insoweit können die technischen Mindestanforderungen an den Universaldienst unmittelbar mit den in der Praxis gemessenen Datenraten gespiegelt werden. Ebenfalls können die Restriktionen, die bei Telekommunikationsdiensten auf Basis des öffentlichen Mobilfunks zu beachten sind, benannt werden. Dies erfolgt auch auf Basis relevanter Literatur.

Um die Eignung des Mobilfunks zur Erbringung des Universaldienstes zu prüfen, wird im weiteren Verlauf des Gutachtens die Anzahl der potenziell vom Universaldienst betroffenen Haushalte approximiert. Zunächst ist das Ziel diejenigen Haushalte zu identifizieren, die bereits über einen leitungsgebundenen Internetanschluss verfügen, der über die erforderlichen Leistungsmerkmale eines Universaldienstanschlusses verfügt. Eine genaue Identifikation der Haushalte im Sinne des Universaldienstes versorgten ist aufgrund der Gesetzeslage sowie der betreiberproprietären Daten nicht möglich. Allerdings ist es auf Basis der Daten des Breitbandatlas möglich, die Anzahl der Haushalte annähernd zu bestimmen, welche leitungsgebunden nicht über eine Datenrate von mindestens 30 Mbit/s im Download verfügen. Dieser Schwellenwert referenziert auf die Gesetzesbegründung des TKG-2021. Demnach sind die zu realisierenden Dienste im Rahmen des Universaldienstes mit einem „30-Mbit-Produkt“ in jedem Fall nutzbar [3]. Mit diesem Vorgehen können somit Haushalte, welche über eine geringere leitungsgebundene Datenrate als 30 Mbit/s verfügen, als potenzielle Universaldiensthushalte identifiziert werden.

² Um hierzu eine Entscheidung zu fällen, hat die Bundesnetzagentur insgesamt drei Studien in Auftrag gegeben.

In einer erst kürzlich angefertigten Studie des WIK/zafaco für die Bundesnetzagentur [4] wird abgeleitet, dass die über Universaldienst zu erbringenden Dienste bereits mit einer Download-Datenrate von 7,7 Mbit/s realisierbar sind. Informationen über die Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Anschlüssen mit einer Datenrate von 10 Mbit/s lagen zum Zeitpunkt der Analyse bzgl. des Breitbandatlas allerdings nicht vor, sodass die gewählte Vorgehensweise der vorliegenden Studie vor diesem Hintergrund seinerzeit als angemessen angesehen wurde. Sollten die technischen Mindestanforderungen an den Universaldienst geringer als 30 Mbit/s festgesetzt werden, sodass bspw. ein 10 Mbit/s-Anschluss den Universaldienst schon gewährleistet, so wird mit der vorgenommenen Annahme die Anzahl der leitungsgebunden unzureichend versorgten Haushalte zunächst tendenziell überschätzt. Allerdings wird dieser Aspekt durch weitere Annahmen in der Berechnung teilweise kompensiert. Von daher und aufgrund vorliegender vertraulicher Informationen kann davon ausgegangen werden, dass die bestimmte Zahl der unzureichend versorgten Haushalte mit Blick auf den zukünftigen Universaldienst weitgehend realistisch für die Bundesrepublik Deutschland steht. Mit anderen Worten, die tatsächliche Anzahl leitungsgebunden unzureichend versorgter Haushalte in Referenz zum Universaldienst dürfte in der ermittelten Größenordnung liegen.

Hinsichtlich der derart ermittelten potenziellen Universaldiensthaushalte wird im Weiteren betrachtet, ob diese leitungsgebunden unzureichend versorgten Haushalte in Deutschland durch Mobilfunk (LTE) versorgt werden könnten. Im Rahmen der weiteren Analyse werden dazu die Daten des Breitbandatlas mit Mobilfunk-Messdaten verschnitten, sodass anhand der aktuellen Versorgung mit LTE die Anzahl und Lage der verbleibenden potenziellen Universaldiensthaushalte bestimmt wird. In einem weiteren Schritt werden die bereits analysierten Daten mit Planungsdaten verschnitten, um dem geplanten Ausbau der Mobilfunkversorgung auf Basis der Versorgungsaufgaben Rechnung zu tragen (Auswirkungen der Mobilfunkförderung wurden nicht explizit berücksichtigt). Als Residuum verbleiben die aufgrund der aktuellen bzw. zukünftig zu erwartenden Versorgungslagen durch ein Universaldienstregime potenziell zu adressierenden Haushalte.

Für die so identifizierten Haushalte werden an einem konkreten Ausbaubeispiel für das Münsterland detaillierte Kapazitätsanalysen durchgeführt, um abzuschätzen, ob die verfügbaren Mobilfunkkapazitäten eine Versorgung dieser Haushalte mit einem potenziellen Anspruch auf eine Universaldienstversorgung bedienen können.

Eine mögliche Umsetzung dieser Versorgung, z. B. durch Aus- oder Neubau von Sendeanlagen sowie dessen ökonomischen Auswirkungen insb. Kostenabschätzungen werden am Ende der Studie diskutiert.

1.4 Gliederung der Studie

Diese Studie gliedert sich im Weiteren wie folgt, um die verschiedenen Fragestellungen strukturiert zu beantworten.

Kapitel 2 beschreibt zunächst die technischen Eckdaten und die Unterschiede der relevanten Mobilfunktechnologien 4G und 5G mit Bezug auf die Spezifikationen für die Übertragung. Ergänzend wird der Einsatz von 4G- und 5G-Mobilfunkverbindungen für eine stationäre Anwendung betrachtet. Damit wird die generelle Eignung der 4G- und 5G-Technologien zur Erfüllung der Anforderungen eines potenziellen Universaldienstes analysiert. Theoretische, aus dem Standard abgeleitete technische Leistungsparameter werden hierbei mit praktisch erreichbaren Werten verglichen.

Darüber hinaus werden weitere technische Parameter des Mobilfunks identifiziert und analysiert, die insbesondere die Leistungsfähigkeit des Mobilfunks bei stationärer Nutzung verändern und somit Einfluss auf die Mobilfunkversorgung in Randgebieten oder ländlicher Lage haben. Dazu gehören die Möglichkeiten, durch den Einsatz von Außenantennen an Gebäuden auf der Empfängerseite zur Verbesserung der Signalqualität in kapazitiver und funkausleuchtungstechnischer Hinsicht beizutragen, und Möglichkeiten, auf Seiten der Mobilfunk-Basisstationen durch neue Antennentechnologien das Sendesignal für bestimmte Nutzungen zu optimieren (z. B. durch ‚*Beamforming*‘).

In **Kapitel 3** wird die aktuelle und zukünftig zu erwartende Mobilfunkversorgung im Hinblick auf die Realisierung des Universaldienstes analysiert. Zunächst wird die derzeitige Breitbandversorgung im Festnetzbereich betrachtet. Danach wird ergänzend zu öffentlich verfügbaren Versorgungsdaten die aktuelle Mobilfunkversorgung in Deutschland anhand von Crowd-Daten untersucht, um eine faktenbasierte Aussage über die Versorgungslage für verschiedene Besiedlungsstrukturen zu treffen. Von besonderer Bedeutung sind die Anzahl der Haushalte und deren Verteilung in den aktuell ggf. noch unzureichend versorgten Gebieten. Diese hier ermittelten Haushalte könnten, soweit keine hinreichend leistungsfähige leitungsgebundene Breitbandinfrastruktur vorliegt, von dem Universaldienst profitieren. Des Weiteren wird der künftige Mobilfunkausbau modelliert und analysiert, ob die vorhandenen Mobilfunkkapazitäten ausreichen, potenzielle Universaldiensthaushalte zu versorgen.

Kapitel 4 fasst die Erkenntnisse der verschiedenen, aufeinander aufbauenden Analysen zusammen und setzt die Ergebnisse in geeignete Relation zueinander. Die ermittelten Zusammenhänge werden interpretiert und im Hinblick auf die Erbringung des Universaldienstes über Mobilfunk bewertet.

Mit einer Zusammenfassung in **Kapitel 5** schließt das Gutachten ab. Die Ergebnisse der vorangegangenen Analysen werden aggregiert sowie reflektiert. Die generierten Erkenntnisse zu Erbringung des breitbandigen Universaldienstes durch mobilfunkgestützte Internetanbindung werden zusammengefasst.

1.5 Abgrenzung

Diese Studie fokussiert auf die Versorgung mit Universaldienstleistungen vorrangig von privaten Haushalten bei der stationären Mobilfunknutzung im Haus bzw. in Gebäuden. Diese ortsfeste Nutzung hat Einfluss auf die Berechnung der Empfangsleistungen, der Varianz der Mobilfunkübertragung und der Störungsanfälligkeit. Diese Studie hat nicht zum Ziel, die Mobilfunkversorgung in Deutschland ganzheitlich zu bewerten oder Aussagen über den Stand zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben zu treffen.

2. Technische Eckdaten von 4G (LTE) und 5G

Worum geht es in diesem Kapitel?

In diesem Kapitel werden die (grundlegenden) technischen Voraussetzungen der 4G- und 5G-Mobilfunktechnologien mit Bezug auf die Anforderungen eines zukünftigen Universaldienstes nach Artikel 84 – 92 Richtlinie (EU) 2018/1972, Annex V, VI, VII, X sowie den nationalen Regelungen in §§ 156 – 163 TKG analysiert.

Dazu werden dabei die hierzu wesentlichen Übertragungsspezifikationen betrachtet, die die 4G- und 5G-Technologien aktuell bereitstellen:

- Ausbaustrategie für 5G-Mobilfunknetze
- Mobilfunkfrequenzen
- Reichweiten
- Datenraten
- Latenzen
- ‚Carrier Aggregation‘ (Frequenzbündelung)
- Antennentechnik
- Priorisierung
- ‚Network Slicing‘

Auf dieser Grundlage wird anhand von Messdaten die Leistungsfähigkeit aktueller LTE-Mobilfunknetze analysiert und im Hinblick auf die Eignung zur Realisierung des Universaldienstes bewertet.

Darüber hinaus werden Möglichkeiten zur Verbesserung des Mobilfunkempfangs bei stationärer Nutzung, wie z. B. Beamforming und der Einsatz von Außenantennen, identifiziert.

2.1 Technische Hintergründe

2.1.1 Mobilfunkausbau

In den letzten Jahren wurden in Deutschland Mobilfunknetze nach dem 4G-Standard (LTE, LTE-A) weiträumig ausgebaut. Die Netzbetreiber betrachten diese Versorgung als so weitreichend, dass sie 2021 begonnen haben, die 3G-Netztechnik (‚Universal Mobile Telecommunications Service‘, UMTS) abzubauen und die freiwerdenden Frequenzbereiche durch die leistungsfähigere LTE-Technik zu nutzen.

5G-Netze werden von den bestehenden Mobilfunknetzbetreibern zunächst auf Basis der bestehenden 4G-Infrastruktur aufgebaut. Das liegt auch daran, dass die 5G-Funktechnik zunächst an das bestehende 4G-Kernnetz angeschlossen wird, im Englischen als ‚Non-Stand-Alone‘ (NSA) bezeichnet [5]. Im zentralen Kernnetz eines Mobilfunknetzes (‚Core Network‘, CN) werden u. a. die Dienste und Funktionen für die Kunden vorgehalten. 5G-Funktechnik wird also zunächst im Wesentlichen mit Diensten und Funktionalitäten eines 4G-Netzes angeboten und stellt lediglich ergänzende Übertragungskapazitäten bereit. Dank zusätzlichem Funkspektrum können so durch 5G NSA höhere Datenraten im Mobilfunknetz erreicht werden, welches zusammenfassend als ‚enhanced Mobile Broadband‘ (eMBB) bezeichnet wird. In diesem ersten Schritt sind spezifische 5G-Funktionalitäten wie z. B. besonders

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

kurze Reaktionszeiten („*ultra Reliable Low Latency Communication*“, uRLLC) und „*Network Slicing*“ (vgl. Abschnitt 2.1.9) werden erst mit einem 5G-Kernnetz ermöglicht [6].

Der Vorteil von NSA liegt darin, dass der Funkzellen-Ausbau und die Nutzung der neuen 5G-Funkzellen mit Anschluss an das existierende 4G-Kernnetz sofort beginnen kann. Da der Mobilfunkausbau in der Fläche erfahrungsgemäß mehrere Jahre dauert, lässt sich auf diese Weise die gewonnenen Mobilfunkkapazität sofort nutzen, während das Kernnetz parallel erweitert bzw. ergänzt wird.

Steht das 5G-Kernnetz zur Verfügung, können die 5G-Basisstationen „umgeschwenkt“ werden. 5G-Dienste werden erwartungsgemäß mit der Inbetriebnahme eines 5G-Kernnetzes nachgezogen [7][5]. 5G-Funktechnik angeschlossen an ein 5G-Kernnetz wird dann als 5G „*Stand-Alone*“ (SA) bezeichnet.

Abbildung 1 illustriert den Unterschied von einem 5G-Mobilfunknetz im NSA- (links) und SA-Betrieb.

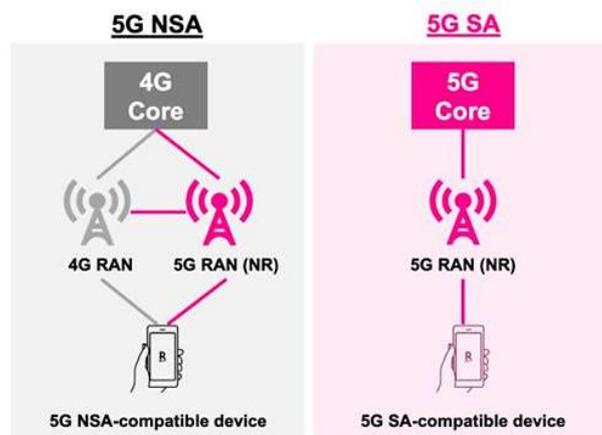


Abbildung 1: 5G Non-Stand-Alone (NSA) und Stand-Alone (SA) [8]

2.1.2 Zuteilung der Mobilfunkfrequenzen

In Deutschland werden 4G-Netze von drei Netzbetreibern in verschiedenen Frequenzbereichen eingesetzt. Die Frequenzbereiche reichen von 700 MHz über 1,8 GHz bis zu 2,6 GHz [9].

Für 5G werden in Deutschland weitere Frequenzen im Bereich 3,4–3,8 GHz (international auch C-Band genannt) zusätzlich eingesetzt. Die hier verfügbaren hohen Bandbreiten ermöglichen sehr hohe Datenübertragungsraten von weit über 100 Mbit/s für deutlich mehr Nutzer pro Funkzelle als bisher („*Shared Medium*“). Theoretisch ermöglicht auch 4G bei kleinen Funkzellen in diesem Frequenzbereich Datenraten von einigen 100 Mbit/s, 5G steigert diesen theoretischen Wert allerdings auf bis zu 20 Gbit/s [9].

Abbildung 2 zeigt das in Deutschland aktuell lizenzierte Frequenzspektrum mit den Zuteilungen an die drei etablierten Netzbetreiber. Es wird deutlich, dass die Verfügbarkeiten zugeteilter Frequenzbandbreiten pro Netzbetreiber bereits ab 2,6 GHz deutlich größer sind als im Frequenzbereich unterhalb von 2 GHz.

Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz



Abbildung 2: Aktuelles Frequenzspektrum für den drahtlosen Netzzugang in Deutschland für den Frequenzbereich 700–3800 MHz mit Angabe der jeweiligen Lizenzinhaber (Mobilfunknetzbetreiber) [10]

2.1.3 Reichweiten und Zellgrößen

Die Analyse der Eignung von Mobilfunklösungen zur Erbringung eines Universaldienstes erfordert, deren limitierende Faktoren und Kausalitäten zu beleuchten. Daher wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen der Reichweite der Mobilfunklösungen in Abhängigkeit zu sie beeinflussenden Faktoren, wie z. B. Zellgrößen, aufgezeigt.

Mobilfunknetze sind in Funkzellen strukturiert. Die Zellgrößen werden im Wesentlichen durch die Reichweite des Funksignals und die Auslastung der umliegenden Funkzellen begrenzt. Die erzielte Reichweite ist grundsätzlich von mehreren Faktoren abhängig, wie z. B. der umgebenden Bebauung, der Topografie, der vorhandenen Vegetation, aber auch von den Antennenhöhen von Sender und Empfänger, von den verwendeten Sende- und Empfangsantennen, der Sendeleistung und dem verwendeten Mobilfunkstandard sowie von der aktuellen Auslastung der umliegenden Funkzelle (z. B. Anzahl der Nutzer und Art der genutzten Telekommunikationsdienste) und der Geschwindigkeit eines sich bewegenden Teilnehmers. Außerdem verfügen niedrigere Frequenzen über eine bessere Gebäudedurchdringung als höhere.

Im heutigen Mobilfunkbereich bieten Frequenzen im 3 GHz-Bereich weniger als ein Zehntel der Reichweite von Frequenzen bei 700 MHz. So kann die Reichweite von 5G-Funkzellen bei 3,6 GHz bei innerstädtischer Bebauung beispielsweise nur wenige hundert Meter und für 4G-Funkzellen bei 700 MHz im ländlichen Bereich bis zu 10–15 km betragen. In der Praxis ergeben sich bei flachen Topografien die

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Erfahrungswerte für die maximalen Reichweiten für 4G sowie für heutige und künftige 5G–Stationen wie in Abbildung 3 gezeigt[11].

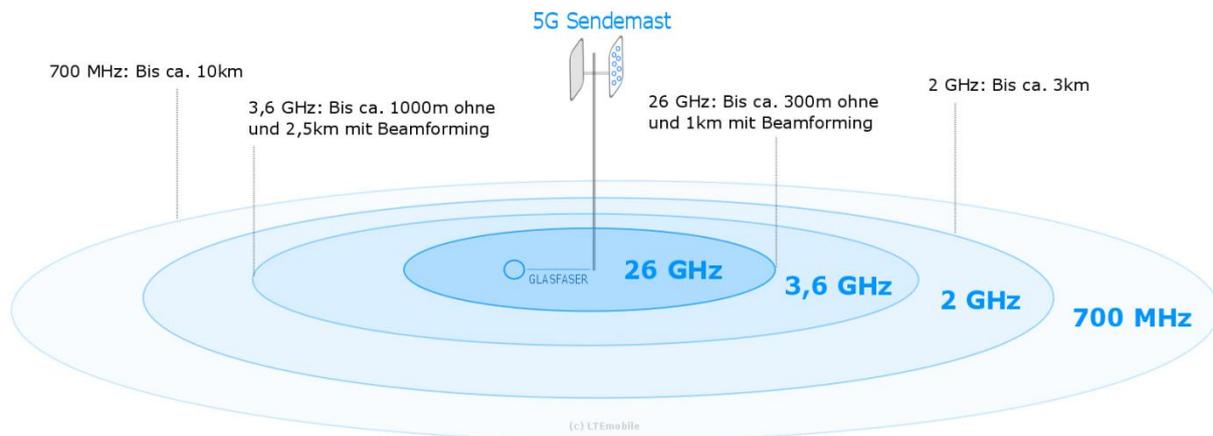


Abbildung 3: Maximale Reichweiten je Frequenz für 4G und 5G (Erfahrungswerte) [12]

Für eine Funkversorgung von Randlagen über 4G– und 5G–Mobilfunktechnik würden Netzbetreiber vorrangig die verfügbaren niedrigeren Frequenzen unterhalb von 1 GHz einsetzen. Sofern diese Randlagen außerhalb der Reichweite der genutzten Frequenzen liegen, können Außenantennen an den Gebäuden helfen, die Reichweiten zu verbessern (vgl. Abschnitt 2.3.1).

2.1.4 Datenraten

Die maximalen Übertragungsraten für 4G–Netze mit einer Bandbreite von 5 MHz liegen nach den umlaut Messdaten in der Praxis für den Download bei 30–40 Mbit/s und für den Upload bei bis zu 14 Mbit/s (vgl. Abschnitt 2.2). Bei einer Bandbreite von 20 MHz können im Downlink Datenraten von typisch 160 Mbit/s erreicht werden. In einigen Fällen konnte auch über 200 Mbit/s ermittelt werden. Im Uplink zeigen die Messdaten maximale Datenraten um die 70 Mbit/s. Einzelne Spitzenwerte überschreiten auch 100 Mbit/s. Die in der Praxis erzielten Datenraten werden in Abschnitt 2.2 vertiefend auch für andere Bandbreiten analysiert.

Die Netzbetreiber in Deutschland bieten heute über fest installierte 4G– bzw. 5G–Router maximale Datenraten von bis zu 500 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink über 4G (z. B. Telekom Speedbox und Vodafone GigaCube) bzw. bis zu 2800 Mbit/s im Downlink und 150 Mbit/s im Uplink über 5G (z. B. Vodafone GigaCube) an [13]. Für mobile Endgeräte betragen die Angebote nach Eigendarstellung der Netzbetreiber zwischen 225 Mbit/s (Telefónica) und theoretisch 1 Gbit/s (Vodafone) im Downlink [14]. Diese maximalen Datenraten erfordern dabei sowohl für Router als auch für mobile Endgeräte eine Mindestbandbreite von 20 MHz bzw. die Nutzung von einer sogenannten Frequenzbündelung (*Carrier Aggregation*, CA), wie in Abschnitt 2.1.6 und in Abschnitt 2.2 erläutert.

In einer Studie von WIK-Consult/zafaco [15] werden die Anforderungen an die Datenübertragungsrate für den Internetzugang nach § 157 (3) TKG 2021 hergeleitet. Demnach ergeben sich Anforderungen an den Download von 7,7 Mbit/s und an den Upload von 1,3 Mbit/s.³

Für die spezifizierten Anforderungen einer Universaldienstes bieten 4G und 5G demnach grundsätzlich ausreichende Datenraten. Diese Anforderungen können prinzipiell auch unter widrigen Bedingungen (z. B. Wetter, Reichweitengrenze) erfüllt werden. In Grenzfällen können Maßnahmen ergriffen werden, wie z. B. optimierte Antennenausrichtungen, Außenantennen oder die Bereitstellung hoher Bandbreiten, um die Mindestanforderungen an die Übertragungsgeschwindigkeiten zu erfüllen, siehe dazu auch Abschnitt 2.3.

2.1.5 Latenzen

Die Latenz (oder auch Latenzzeit) beschreibt die Verzögerungszeit bei der Datenübertragung über ein Kommunikationsnetz, also die Zeit die Daten von der Quelle bis zu ihrem Ziel benötigen, und beeinflusst maßgeblich die Antwort- oder Reaktionszeit, die sich durch die Durchlauf- oder Verarbeitungszeit des jeweils gerade genutzten Telekommunikationsnetzes ergibt. Die Paketumlaufzeit (*Round Trip Time*, RTT) beinhaltet die Latenzen des Hin- und Rückwegs sowie die Bearbeitungszeit des Pakets im Zielsystem. Jede Signalverarbeitung benötigt Zeit. Der Anspruch besteht, dass sie so kurz ist, dass ein Nutzer sie nicht bemerkt oder eine genutzte Anwendung nicht gestört wird. Von den durch das Kommunikationsnetz verursachten Übertragungsverzögerungen getrennt zu betrachten sind die Latenzen, die außerhalb des 4G/5G-Telekommunikationsnetzes entstehen, wie z. B. Internet-basierte Anwendungen oder weitere in Reihe verbundene Telekommunikationsnetze (z. B. bei Roaming). Für einige Anwendungen wie Online-Gaming sind geringe Latenzen (und damit geringe Reaktionszeiten) wichtiger als die maximalen Datenraten.

Während ein 4G-Netz für einzelne Anwendungen Latenzen von typisch 15–50 ms aufweist, ist 5G bis hinunter zu 1 ms an der Funkschnittstelle in eng begrenzten Flächen wie Betriebsgeländen oder innerhalb von Gebäuden erreichbar [16]. Geringe Latenzen sind z. B. für zukünftige Maschine-zu-Maschine-Anwendungen oder autonomes Fahren von Bedeutung. Für eine mobile Nutzung sind in einem 5G-Kernnetz 5–10 ms Latenz realistisch zu erwarten, wenn die genutzten Anwendungen dies entsprechend unterstützen. Voraussetzungen für diese kurzen Latenzen sind aber ein vollständiges 5G-Kernnetz und damit ein 5G Stand-Alone-Betrieb (5G SA), s. o., sowie eine geografisch nah am Teilnehmer vorgehaltene Dienstplattform (sogenanntes Edge-Computing).

Mit Blick auf die Latenz ergeben sich nach einer aktuellen Studie von WIK-Consult/zafaco [15] die strengsten Anforderungen für den Sprachtelefondienst, wenn die zu realisierenden Dienste eines Internetzugangs betrachtet werden. Der obere Grenzwert für die Latenz wird mit 150 ms beziffert. Diese Anforderung besteht auch für alle Produkte, die Sprache in Form eines bidirektionalen Echtzeitdienstes beinhalten. Diese Anforderung wird bei einer guten Mobilfunkverbindung heute bereits von 4G und bei 5G im NSA-Betrieb (s. o.) erfüllt. Von einem vollständigen 5G-Netz (5G SA) werden sie sogar weit übertroffen.

Die Messergebnisse zu Paketumlaufzeiten von Mobilfunkkunden zu 4G liegen aktuell schon mehrheitlich in dem o. g. Bereich. In dem von der Fachzeitschrift connect in Kooperation mit umlaut durchgeführten

³ Die Analyse zeigt, dass die Treiber für den Download die webbrowserbasierten Anhang V-Dienste sind. Die Anforderungen an den Upload sind ursächlich in dem Dienst Datenaustausch in der Rubrik Teleheimarbeit.

Mobilfunktest für die DACH-Region sieht man basierend auf Crowd-Daten, dass bei den deutschen Netzen in mehr als 93% aller Fälle kürzere Paketumlaufzeiten als 100 ms erreicht werden (dort als ‚*Over-The-Top*‘ (OTT) ‚*Voice Class*‘ ausgewiesen), in mehr als 75% der Fälle wird sogar ein Wert von 50 ms (‚*Gaming Class*‘) eingehalten bzw. unterboten [17].

Die in der Praxis auftretenden Latenzen von 4G und 5G sind somit für die Bereitstellung einer Universaldienstleistung unkritisch.

2.1.6 Carrier Aggregation (Frequenzbündelung)

Zur Steigerung der Übertragungskapazität kann in 4G- und 5G-Mobilfunknetzen die sogenannte ‚*Carrier Aggregation*‘ (dt. Frequenzbündelung) eingesetzt werden. Hierbei werden mehrere Frequenzbänder und damit auch deren Übertragungskapazitäten gebündelt und wie ein einziges breiteres Frequenzband genutzt. Mobilfunknutzer mit einem Endgerät, das diese Übertragungsart entsprechend unterstützt, bekommen dadurch eine besonders hohe Datenrate, soweit es die Frequenzen und die Anzahl der Nutzer in dieser Funkzelle zulassen [18]. Bei 4G ist die Kombination der Frequenzen auf 100 MHz begrenzt, wodurch die mögliche Gesamtdatenrate ebenfalls limitiert ist [19]. Darüber hinaus müssen auch die Endgeräte diese Funktion unterstützen. Grundsätzlich ist Carrier Aggregation sowohl im Downlink als auch im Uplink möglich. Bei 5G wurde diese Technologie weiterentwickelt und weist deutlich mehr Möglichkeiten zu einer flexiblen Anpassung auf.

Durch den Einsatz von Frequenzbündelung werden durch die Kombination von bis zu fünf Frequenzbändern mit entsprechend bis zu 100 MHz Gesamtbandbreite Datenraten von 600 Mbit/s gemessen. Einzelne Stichproben zeigen sogar bereits Datenraten oberhalb von 1 Gbit/s (vgl. Abschnitt 2.2).

2.1.7 Mehrantennentechniken und Beamforming (Richtstrahlbündelung)

Im Mobilfunkbereich werden seit einigen Jahren die Anwendungen bekannter Antennentechnologien aus anderen Bereichen der Funktechnik diskutiert. Dazu gehören Mehrantennentechniken oder das sog. ‚*Beamforming*‘ (dt. Richtstrahlbündelung oder Richtstrahlformung), auch Massive MIMO (‚*Multiple Input Multiple Output*‘) –Antennen genannt.

In Senderichtung wird der Signalpegel durch die Bündelung der Sendeleistungen gesteigert, sodass sich die Reichweite (Zellgröße) und/oder die Datenraten erhöhen lassen. Treiber für die Entwicklung solcher Antennen ist primär die individuelle Versorgung einzelner Nutzer einer Zelle mit einem „Strahlbündel“ und die Reduktion störender Signalanteile (Interferenz) in Richtung anderer Mobilfunknutzer.

Aktuell werden Beamforming-Antennen allerdings vor allem bei höheren Frequenzen eingesetzt, da eine Antenne größer wird, je niedriger der Frequenzbereich ist. Hohe Reichweitengewinne steigen mit der Anzahl der Antennenelemente. Eine Massive-MIMO-Antenne im 2 GHz- oder gar 700 MHz-Bereich wird dadurch so groß, dass z. B. die Windlasten an Antennenmasten problematisch werden können. Daher werden solche Antennen heute bei den niedrigeren Mobilfunkfrequenzen kaum entwickelt.⁴

⁴ Im Frequenzbereich zwischen 700 MHz und 900 MHz werden heute üblicherweise Antennen mit lediglich zwei Antennenelementen, im Bereich bei 2 GHz mit vier Antennenelementen eingesetzt. Aufgrund der geringen Anzahl Antennenelemente



Abbildung 4: Kommerzielles Antennenbeispiel einer Massive MIMO Beamforming Antenne mit 8 (horizontal) x 8 (vertikal) Antennen für den 3,5 GHz–Frequenzbereich von Nokia

Die realisierbaren Antennengewinne liegen typischerweise im Bereich von 20–28 dBi und wirken sich unmittelbar auf die Reichweite der Funkzelle aus. Bei 3,6 GHz erhöht sich die Reichweite typischerweise um bis zu 1.500 m. Damit liegt die Zellgröße bei 3,6 GHz mit Beamforming–Antenne allerdings immer noch unterhalb der Reichweite von Frequenzen unterhalb von 1 GHz mit MIMO–Antennen. Für Mobilfunknetzbetreiber kann es daher ökonomisch sinnvoller sein, zur Steigerung der Reichweite niedrige Frequenzen unterhalb von 1 GHz einzusetzen als die beschränkte Reichweite von 2,1 GHz oder gar 3,6 GHz–Frequenzen mit kostenintensiven Beamforming–Antennen zu erhöhen.

2.1.8 Priorisierung

Zur Erbringung des Universaldienstes durch Mobilfunklösungen ist es aus rein technischer Sicht möglich, die entsprechenden Teilnehmer durch eine geeignete Priorisierung der Datenverkehre bevorzugt zu versorgen, um ggf. zugesagte Mindestdatenraten realisieren zu können.

Die Priorisierung erfolgt anhand einer vordefinierter Dienstgüte („*Quality of Service*“, QoS). Dabei werden Maßnahmen und Verfahren zur Einflussnahme auf den Datenverkehr in einem Netz angewandt, um die Qualität und Erreichbarkeit von Netzdiensten zu verbessern oder zu gewährleisten.

QoS beschreibt in der Informationstechnologie die Güte eines Kommunikationsdienstes aus Sicht des Anwenders. Dabei werden im Wesentlichen folgende Dienstgüteparameter definiert:

- Datenrate,
- Latenz oder Laufzeitverzögerung („*Delay*“),
- Laufzeitschwankungen („*Jitter*“),
- Paketverlustrate („*Packet Loss*“) oder Paketfehlerrate („*Packet Error*“).

Standardmäßig werden in einem Kommunikationsnetz alle Datenpakete nach dem „*Best–Effort*–Prinzip gleichbehandelt. Dies hat jedoch zur Folge, dass in einem paketorientierten Netz, je nach

lässt sich kein effektives Beamforming realisieren und es werden andere MIMO–Verfahren genutzt. Für 5G im Frequenzbereich bei 3,5 GHz stehen Antennen mit 32 x 32 oder 64 x 64 Antennenelementen zur Verfügung, mit denen Beamforming sehr effektiv realisiert werden kann.

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Auslastung, die einzelnen Datenpakete unterschiedlich schnell sein können. Insbesondere bei Echtzeitübertragungen wirken sich Verzögerungen oder sogar Paketverluste negativ auf die Übertragungseigenschaften der Verbindung aus, was zu Störungen bei der Sprach- und Videoübertragung führt. Durch eine entsprechende Priorisierung wäre es im Extremfall denkbar, dass sämtliche in einer Funkzelle verfügbaren Ressourcen für einen Teilnehmer reserviert werden und andere Teilnehmer in der Funkzelle keine Kommunikationsdienste mehr nutzen könnten.

Um den Mindestanforderungen des Universaldienstes gerecht zu werden, könnten anhand der sogenannten ‚*QoS Class Identifier*‘ (QCI) Übertragungseigenschaften von Datenverbindungen vom System differenziert werden und beispielsweise zur Priorisierung der Verkehre für den Universaldienst genutzt werden. Der QCI ist eine Kennzahl im Wertebereich 0...255, welcher die Eigenschaften einer Datenverbindung im ‚*Evolved Packet System*‘ (EPS) definiert. Die QCI-Werte zwischen 1 und 127 sind für standardisierte Dienstgüteklassen reserviert. Im 3GPP-Standard TS 23.203 [20] sind im Release 16 bislang QCI-Profile für 26 Dienstgüteklassen definiert, von denen in Tabelle 1 einige zusammengefasst dargestellt sind.

QCI	Typ (Resource Type)	Priorität (Priority Level)	Paketverzögerung (Packet Delay Budget)	Paketfehler-rate (Packet Error Rate)	Beispieldienste (Example Services)
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Sprachkommunikation (Conversational Voice)
2	GBR	4	150 ms	10^{-3}	Videokommunikation (Conversational Video, Live Streaming)
3	GBR	3	50 ms	10^{-3}	Echtzeitspiele (Real-Time Gaming), Fahrzeugkommunikation (V2X Messages)
4	GBR	5	300 ms	10^{-6}	(gepufferte) Videoübertragung (Non-Conversational Video, Buffered Streaming)
5	non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	IMS-Signalisierung (IMS Signalling)
6	non-GBR	6	300 ms	10^{-6}	(gepufferte) Videoübertragung (Video, Buffered Streaming), TCP-basierte Dienste (TCP-based services, e.g. WWW, FTP, E-Mail, Chat/Messaging, P2P File Sharing, Progressive Video, etc.)
7	non-GBR	7	100 ms	10^{-3}	Sprachübertragung, (Voice), Videoübertragung (Video, Live Streaming), Interaktive Spiele (Interactive Gaming)
8	non-GBR	8	300 ms	10^{-6}	wie QCI 6
9	non-GBR	9	300 ms	10^{-6}	wie QCI 6

Tabelle 1: Auswahl von Dienstgüteklassen (QCI) in LTE

Weitere QCI–Werte im Bereich 128 bis 254 können betreiberspezifisch für besondere Anwendungsfälle verwendet werden, sind dann aber ggf. nur innerhalb des Netzes gültig, für das sie definiert bzw. vereinbart wurden.

QCI teilen dabei die verschiedenen Arten von Verbindungen in verschiedene Klassen ein, wobei jede Klasse über individuelle Dienstgüteparameter für die jeweilige Verkehrsart verfügt. Beispiele für zugeordnete Dienstgüteparameter sind:

- Ressourcentyp: garantierte Bitrate (, *Guaranteed Bit Rate* , GBR) oder nicht garantierte Bitrate (non–GBR),
- Prioritätsbehandlung,
- erlaubte Paketverzögerung und
- Paketfehlerrate.

Die Bereitschaft eines Netzbetreibers zu weiteren Anpassungen im Hinblick auf die Berücksichtigung eines Universaldienstes (z. B. Hinsichtlich der Einführung und Implementierung spezifischer QCIs) skaliert mit dem kommerziellen Wert der Vereinbarungen und muss in Anbietergesprächen geprüft werden. Darüber hinaus muss überprüft werden, inwiefern die Realisierung der Priorisierung des Verkehrs mit rechtlichen Vorgaben an die Netzbetreiber kollidieren und daher im Einzelfall trotz technischer Realisierbarkeit nicht genutzt werden können.

2.1.9 , *Network Slicing* (Individuelle Netzscheibe)

In 5G–Netzen wird erstmals in das sogenannte , *Network Slicing* (dt. etwa individuell zugeschnittene Netzscheibe) eingeführt, wobei diese Funktionen allerdings ein 5G–Kernnetz (5G SA) bedingt. , *Network Slicing* erlaubt es, logisch getrennte „Netzscheiben“ bzw. virtuelle Netze für verschiedene Nutzungsszenarien mit unterschiedlichen Eigenschaften abzubilden, die jedoch auf derselben physikalischen Infrastruktur realisiert werden [21]. Sie erlaubt innerhalb einer Funkzelle die adaptive Anpassung der Übertragung für verschiedene Nutzer mit unterschiedlichen Anforderungsfällen.

Anwendungsbeispiele für eine sogenannte , *Slice* sind hohe Reichweiten mit niedriger Datenkapazität für Flächenversorgungen im ländlichen Bereich mit wenigen Nutzern oder die Überwachung und Steuerung in der Landwirtschaft. Über eine andere, parallele , *Slice* können schnelle kurze Datenübertragungen für die Übertragung zu schnell bewegten Objekten, wie z. B. zu Autos oder allgemein für die Maschine–zu–Maschine–Kommunikation realisiert werden.

, *Slices* können auf unterschiedliche Angebotseigenschaften optimiert werden, wie z. B. Datenrate, Reichweite, Latenz, Übertragungskapazität oder Nutzeranzahl.

Diese Adaptivität an verschiedene Anforderungen kann bei Randversorgungen oder Einzelversorgung einzelner Häuser oder von Gehöften hilfreich sein. Innerhalb der physikalischen Grenzen könnte so möglicherweise in einer Funkzelle eines 5G–Netzes ein , *Slice* für die Erfordernisse von Universaldienstleistungen optimiert werden. Ob ein Mobilfunknetzbetreiber ein solches Slice anbieten wird, hängt u. a. von der Kapazitätsverteilung und dem eingesetzten Frequenzspektrum in der jeweiligen Funkzelle ab.

2.1.10 Übersicht über Spezifikationen von 4G und 5G

Einige der in diesem Kapitel aufgeführten relevanten technischen Spezifikationen zu 4G und 5G sind abschließend in Tabelle 2 zusammengefasst.

Spezifikation	4G	5G	Kommentar
Kommerzielle Netze	Seit 2011	Seit 2020	
Genutzte Frequenzbereiche Deutschland [22]	700 MHz 800 MHz 900 MHz 1,8 GHz 2,1 GHz (2,6 GHz ⁵)	2,6 GHz 3,4–3,8 GHz [700 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz mittels DSS]	Weitere Frequenzbereiche vor allem für 5G bei entsprechender Widmung möglich. DSS: Dynamic Spectrum Sharing
Max. Kanalbandbreite	20 MHz	100 MHz	Aktuelle Werte
Carrier Aggregation [23]	bis zu 5 Frequenzkanäle	16	
Max. Download–Datenrate [24]	150 Mbit/s (LTE), 500 Mbit/s (LTE–Advanced)	20 Gbit/s	Gelegentlich in der Literatur auch theor. für LTE–Advanced: 1 Gbit/s
Max. Upload–Datenrate	50 Mbit/s	150 Mbit/s	
Min. Latenz	20 ms	1–5 ms	
Max. Anzahl Nutzer pro Funkzelle	ca. 200–1.000	3.000–10.000	

Tabelle 2: Vergleich technischer Spezifikationen und typischer Werte von 4G und 5G

Wegen der aktuell noch wenigen 5G–Netze und der geringen Verbreitung von 5G–fähigen Endgeräten liegen zu 5G noch nicht ausreichend und großflächig Erfahrungswerte aus Kundensicht vor. Hier kann auf Schätzwerte auf Basis der Mobilfunkexpertise von umlaut und dem WK zurückgegriffen werden.

2.1.11 Technische Eignung von 4G– und 5G–Mobilfunksystemen für die Erbringung eines Universaldienstes

Die Analyse der technischen Spezifikationen und Parameter von 4G– und 5G–Mobilfunknetzen zeigt, dass beide Technologien grundsätzlich in der Lage sind, die zu erwartenden Mindestanforderungen an den Universaldienst zu erfüllen.

In der konkreten Realisierung eines Mobilfunksystem ist zu prüfen, in welcher Ausprägung ein Mobilfunknetz aufgebaut ist, z. B. welche Frequenzen an den Standorten mit welcher technischen Ausprägung (z. B. 2 x 2 MIMO oder 4 x 4 MIMO) sowie Möglichkeiten zur Carrier Aggregation eingesetzt werden oder ob moderne 5G–Möglichkeiten wie Network Slicing verfügbar ist.

⁵ Zur vorübergehenden Nutzung bis zum 31.12.2025 durch Drillisch gewidmet.

Darüber hinaus hängt die konkrete Eignung der vorliegenden Mobilfunkversorgung zur Erbringung des Universaldienstes von den Nutzungsverhalten der bestehenden Mobilfunkteilnehmer und der Anzahl potenzieller Universaldiensthaushalte und deren Lage in der Funkzelle ab.

Einschränkungen für die Erbringung eines Universaldienstes kann es des Weiteren durch inhärente Beeinflussungen eines jeden Mobilfunksystems geben. So liegen beispielsweise topografische Bedingungen, (veränderliche) Bebauung oder auch Witterungseinflüsse nicht immer im Einflussbereich der Netzbetreiber. Die Auswirkungen der einzelnen Parameter werden exemplarisch in Kapitel 4 dargelegt. Für die Bereitstellung eines Universaldienstes verfügen die etablierten Mobilfunknetzbetreiber Telekom Deutschland, Vodafone und Telefónica allerdings grundsätzlich über die notwendigen Funkressourcen und Netzinfrastrukturen.

2.2 Leistungsfähigkeit aktueller 4G (LTE)–Netze in der Praxis

Zur Analyse der Leistungsfähigkeit von 4G–Netzen wurden anhand von weltweit durch umlaut erhobenen Drivetest–Daten der Jahre 2020 und 2021 wesentliche Leistungskenngrößen ausgewertet. Die Datengrundlage beinhaltet dabei mehr als 500 Messkampagnen weltweit (davon zehn in Deutschland), bei denen insgesamt Daten in mehr als 100 verschiedenen Mobilfunknetzen erfasst wurden.

Die Messungen beinhalten sowohl Download– als auch Upload–Übertragungen über das *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), die üblicherweise auf eine Zeit von 7 s limitiert sind. Über alle Kampagnen wurden jeweils mehr als 1,8 Mio. Stichproben für den HTTP–Download bzw. HTTP–Upload gesammelt – allein aus Deutschland sind jeweils mehr als 100.000 Stichproben enthalten.

Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit wird die ermittelte Datenrate in Relation zu der innerhalb der Übertragungszeit von üblicherweise 7 s aufgezeichnete mittlere Empfangsleistung für die Referenzsignale (*Reference Signal Received Power*, RSRP) betrachtet. Da die erzielten Datenraten allerdings stark von der verfügbaren Übertragungstechnologie (insbesondere der Verfügbarkeit von CA und/oder 5G abhängt, werden die Ergebnisse im Folgenden für die verschiedenen Kombinationen technischer Übertragungsrichtungen und –technologien unterschieden.

2.2.1 Download–Datenrate

In Abbildung 5 ist für sämtliche 1,8 Mio. HTTP–Downloads die ermittelte Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP) dargestellt (die Daten für Deutschland zeigen ein ähnliches Bild). Über die Farbe des jeweiligen Datenpunktes wird die genutzte Übertragungstechnologie unterschieden. Hervorgehoben sind die vier Übertragungstechnologien, bei denen nur ein einzelner Frequenzträger verwendet wurde, wobei dieser Bandbreiten von 5, 10, 15 bzw. 20 MHz aufweisen kann.

Man erkennt bereits aus dieser Darstellung den Zusammenhang zwischen Datenrate und Empfangsleistung sowie die maximal erreichbaren Datenraten in Abhängigkeit zu der genutzten Übertragungstechnologie.

So wird beispielsweise innerhalb einer Bandbreite von 5 MHz maximal eine Download–Datenrate von 30 bis 40 Mbit/s erreicht. Mit 10 MHz Bandbreite steigt diese auf etwa 80 Mbit/s. Mit 15 MHz Bandbreite werden üblicherweise bis zu 120 Mbit/s erreicht und mit 20 MHz Bandbreite schließlich üblicherweise bis zu 160 Mbit/s – in einigen Fällen auch mehr als 200 Mbit/s.

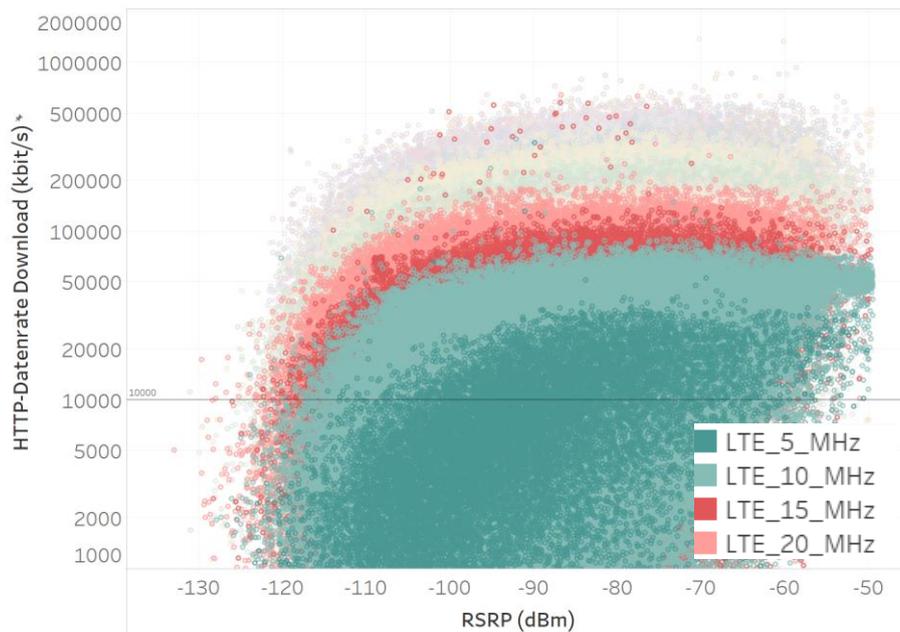


Abbildung 5: Download–Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP)

Noch größere Datenraten bedingen den Einsatz von Frequenzbündelung (CA). So werden durch die Kombination von vier oder fünf Frequenzbändern mit entsprechend bis zu 100 MHz Gesamtbandbreite durchaus Datenraten von 600 Mbit/s gemessen. Einzelne Stichproben zeigen sogar bereits Datenraten oberhalb von 1 Gbit/s.

Die aufgeführten Spitzendatenraten sind nur in vereinzelt Stichproben sichtbar. Vielfach reduziert sich die vom Nutzer erfahrene Datenrate durch äußere Einflüsse wie insbesondere die Mobilität des Teilnehmers (Bewegungsgeschwindigkeit), die aktuelle Auslastung der genutzten Funkzelle (verfügbare Kapazität innerhalb des geteilten Mediums) sowie lokale Störeinflüsse (insbesondere aufgrund von Interferenzeinflüssen durch weitere Mobilfunknutzer).

Um dennoch einen repräsentativen Wert der möglichen Datenrate in Abhängigkeit der Empfangsleistung am Endgerät zu erhalten, wird im Folgenden das 90%-til aller ermittelten Datenraten über alle Stichproben mit derselben mittleren Empfangsleistung bestimmt. Die Empfangsleistung wird hierzu auf ganzzahlige dBm–Werte gerundet. Das 90%-til gibt in diesem Fall an, welche Datenrate bei der jeweiligen Empfangsleistung in 90% der Fälle maximal erreicht wird. Es steht damit stellvertretend für einen Wert, den man unter günstigen Bedingungen (d. h. bei Verfügbarkeit ausreichender Kapazität in der Funkzelle und ohne nachteilige Mobilitätseffekte) realistisch erwarten kann, weil er nachweislich in 10% der ermittelten Stichproben selbst ohne Vorliegen dieser Bedingungen erreicht bzw. sogar übertroffen wird.

Abbildung 6 zeigt als Ergebnis dieser Analyse das 90%-til der Datenrate über die gerundete mittlere Empfangsleistung für die vier möglichen LTE–Übertragungstechnologien mit nur einem Frequenzträger aber verschiedenen Bandbreiten. Die Dicke der Kurve illustriert die Anzahl der enthaltenen Stichproben in dem jeweiligen Datenpunkt. Als Bezugswert, der die möglichen Anforderungen eines Universaldienstes an die Download–Datenrate widerspiegeln könnte, ist eine horizontale Linie bei 10 Mbit/s eingezeichnet.

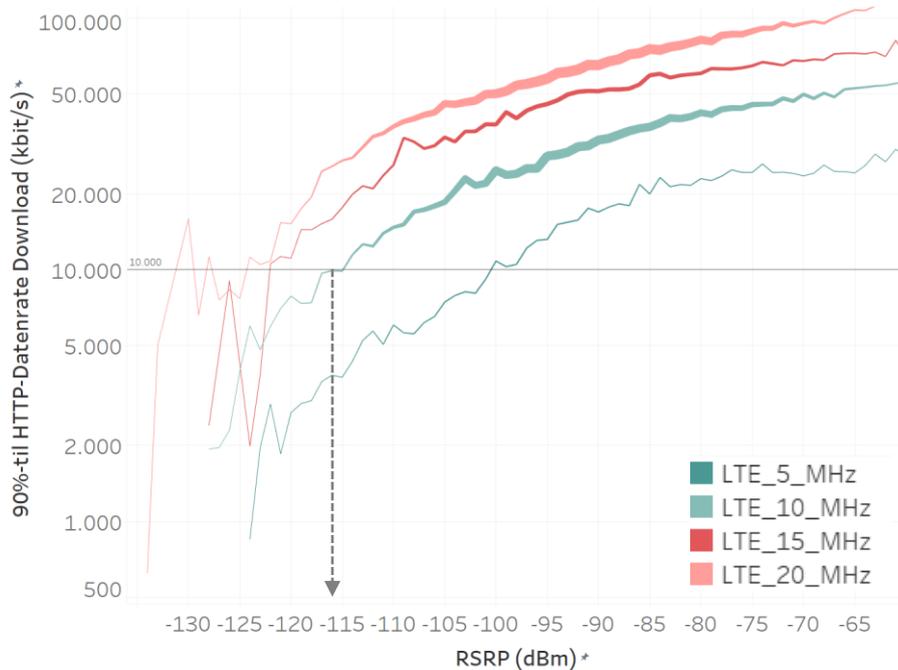


Abbildung 6: 90%-til der Download-Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP) für LTE-Übertragung mit einem einzelnen Frequenzträger in Abhängigkeit der verfügbaren Bandbreite

In der Darstellung ist zu erkennen, dass ein Universaldienst mit einer hypothetischen Anforderung von 10 Mbit/s bei einem 4G-Netz mit einer Bandbreite von 10 MHz (wie in Deutschland in niedrigen Frequenzbereichen zugeteilt) für einen Nutzer bei einer Empfangsleistung von etwa -116 dBm realisierbar ist. Stehen größere Bandbreiten zur Verfügung, reduziert sich die erforderliche Empfangsleistung auf unter -120 dBm.

Würde allerdings die Mindestanforderung hinsichtlich der Download-Datenrate für den Universaldienst auf 7 Mbit/s reduziert, so ließe sich dieser bereits bei einer Bandbreite von 10 MHz und einer Empfangsleistung von etwa -121 dBm realisieren.

Darüber hinaus erklären die zuvor angesprochenen Mobilitätseffekte (z. B. Zellwechsel) die Auslastung der Funkzelle sowie lokale Störsituationen mitunter die in den Abbildungen erscheinende Instabilität der aggregierten Daten im Bereich unter -120 dBm. Wenngleich die Anzahl der tatsächlich gemessenen Daten je abgebildetem Punkt der Kurven in Abbildung 5 mehr als 1000 Messungen repräsentieren, so werden die Messungen in niedrigen Empfangsbereich zusätzlich durch die unterschiedlichen Nutzungsarten und Empfangsarten in Grenzbereichen der Zellen beeinflusst. Diese in Grenzbereichen der Zellen auftretenden Effekte führen die Netze mitunter dazu, einen Zellwechsel bzw. Technologiewechsel einzuleiten, womit die Stabilität der Datenverbindung beeinträchtigt ist.

Die Analysen sind hier beispielhaft für die Bandbreiten 5, 10, 15 und 20 MHz durchgeführt und zeigen deutlich, dass sich die erreichbaren Datenraten in etwa proportional zur verfügbaren Bandbreite verhalten. Um eine Aussage zu den erreichbaren Datenraten in Abhängigkeit der Frequenzausstattung in der jeweiligen Funkzelle treffen zu können, werden im Folgenden sämtliche Stichproben im Hinblick auf die jeweils genutzte Übertragungsbandbreite (unter Berücksichtigung von Carrier Aggregation) normiert und zusammengefasst. Im Ergebnis, welches in Abbildung 7 dargestellt ist, kann die spektrale

Effizienz der Datenübertragung ermittelt werden. Die dargestellte spektrale Effizienz gibt an, welche Datenrate (in kbit/s) pro Bandbreite (in MHz) erreicht werden kann.

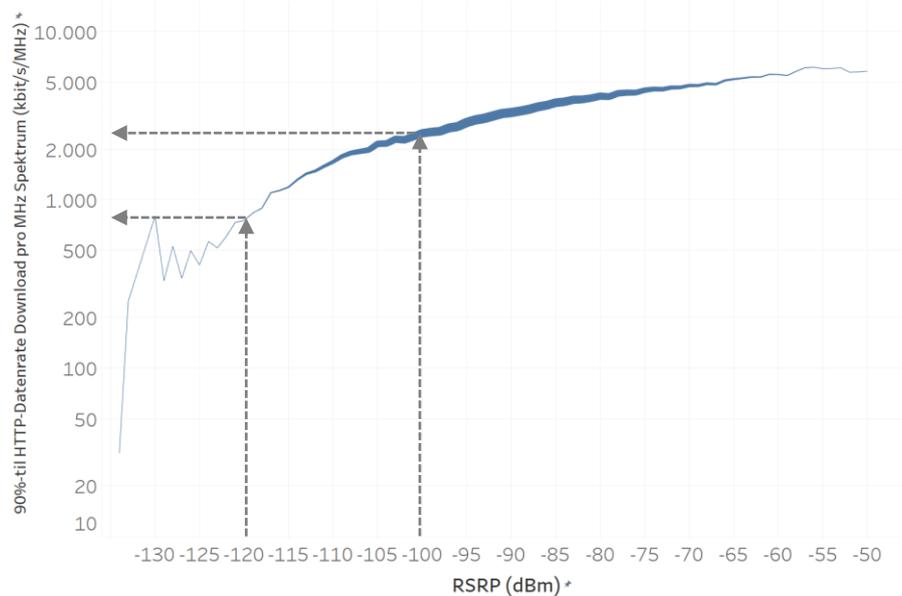


Abbildung 7: 90%-til der Download-Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP), normiert auf das zur Verfügung stehende Spektrum (in MHz)

Für eine Empfangsleistung von -120 dBm lässt sich beispielsweise eine spektrale Effizienz von 800 kbit/s/MHz ermitteln. Bei dieser spektralen Effizienz kann für die Erreichung einer Datenrate von 10 Mbit/s ein Bandbreitenbedarf von etwa $12,5$ MHz abgeschätzt werden. Bei einer Frequenzausstattung der entsprechenden Funkzelle von 20 MHz macht dieser Bedarf bereits mehr als 60% der Zellkapazität aus. Bei einer Empfangsleistung von -100 dBm beträgt die spektrale Effizienz bereits 2.500 kbit/s/MHz und der Bandbreitenbedarf für eine Datenrate von 10 Mbit/s dementsprechend nur noch etwa 4 MHz. Für dieselbe Funkzelle (mit 20 MHz Bandbreite) sinkt der Anteil an der benötigten Zellkapazität auf 20% .

Der Bandbreitenbedarf (oder allgemein Kapazitätsbedarf) hängt also stark von der vorliegenden Mobilfunkversorgung am Ort des Universaldienstempfängers ab. Für die Erbringung des Universaldienstes über Mobilfunk ist es daher unverzichtbar, das Verbesserungspotenzial durch Maßnahmen des Universaldienstempfängers (Mitwirkungspflicht) weitgehend auszuschöpfen. Hierbei sei insbesondere auf die geeignete Nutzung von Außenantennen hingewiesen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Bei den weiteren Analysen in Abschnitt 3.6 wird der hier ermittelte Zusammenhang genutzt, um den Kapazitätseintrag der potenziellen Universaldienstteilnehmer innerhalb einer Funkzelle unter Berücksichtigung des in der Funkzelle verfügbaren Frequenzspektrums (d. h. Bandbreite) und der gemäß Abschnitt 3.3 für die jeweiligen Teilnehmer erwarteten Mobilfunkversorgung zu ermitteln.

2.2.2 Upload-Datenrate

Analog zu den Betrachtungen für den Download sind im Folgenden ergänzend die Ergebnisse der Analysen für den HTTP-Upload dargestellt. Abbildung 8 zeigt zunächst die Ergebnisse aller etwa $1,8$ Mio. Stichproben. Da für den Uplink derzeit wesentlich weniger verschiedene Übertragungstechniken unterstützt werden, da insbesondere die Mehrträgerübertragung auf maximal drei Frequenzträger

limitiert ist, müssen deutlich weniger Varianten unterschieden werden als im Downlink. Berücksichtigt in der Abbildung sind wiederum die vier möglichen Einträger-Übertragungstechnologien mit Bandbreiten zwischen 5 MHz und 20 MHz.

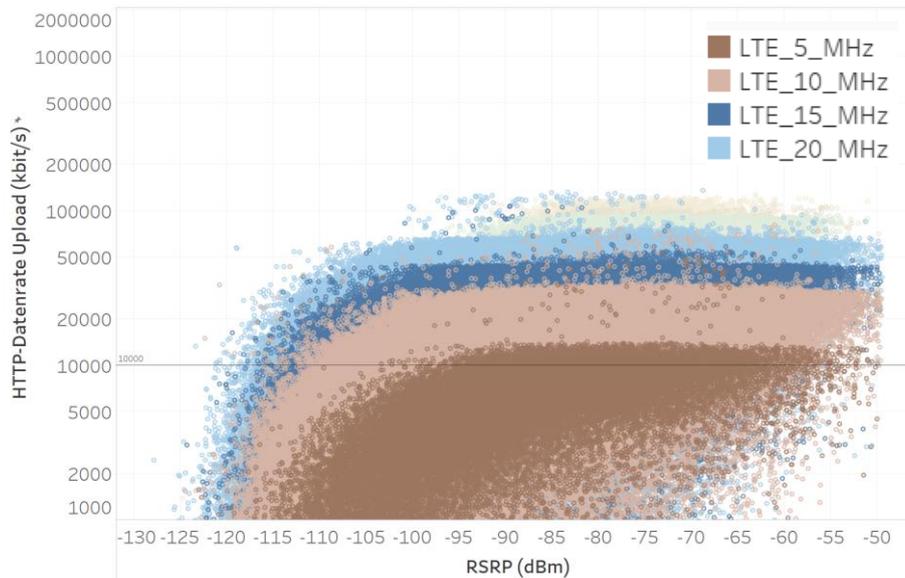


Abbildung 8: Upload-Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP)

Auch hier lassen sich recht deutlich die technischen Grenzen der verschiedenen Übertragungstechniken erkennen. Während bei 5 MHz Bandbreite üblicherweise eine Upload-Datenrate von etwa 13–14 Mbit/s erreicht wird, steigt diese für 10 MHz Bandbreite auf über 30 Mbit/s und für 20 MHz Bandbreite auf bis zu 70 Mbit/s und mehr.

Da Mehrträgerübertragung mit mehr als zwei Frequenzträgern für den Uplink noch nicht weit verbreitet ist, lassen sich die maximalen Upload-Datenrate bei der Kombination von zwei Frequenzträgern mit einer maximalen Gesamtbandbreite von 40 MHz finden. Bei dieser Übertragungstechnologie liegen die Spitzendatenrate bei etwa 120 Mbit/s.

Wie auch für den Download sind im Folgenden die Ergebnisse für das 90%-til der Datenraten aggregiert. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis dieser Analyse für den Upload, wobei als Referenzwert erneut eine Datenrate von 10 Mbit/s eingezeichnet ist.

In der Darstellung ist zu erkennen, dass ein Universaldienst mit einer entsprechenden Anforderung von 10 Mbit/s bei einem 4G-Netz mit einer Bandbreite von 10 MHz bei einer Empfangsleistung von etwa –104 dBm realisierbar ist. Stehen größere Bandbreiten zur Verfügung, reduziert sich die erforderliche Empfangsleistung auf etwa –109 dBm bei 15 MHz Bandbreite bzw. –113 dBm bei 20 MHz Bandbreite.

Reduzieren sich die Anforderungen an den Universaldienst für den Upload auf eine Datenrate von lediglich 5 Mbit/s, so ließe sich dieser bereits innerhalb einer Bandbreite von 10 MHz und einer Empfangsleistung von –115 dBm realisieren. Bei einer Mindestanforderung von 2 Mbit/s für den Upload würde sogar eine Empfangsleistung von –123 dBm ausreichen, wobei bei diesen Größenordnungen die zugrundeliegende Stichprobenanzahl bereits deutlich geringer ist.

Abschließend ist auch für den Upload in Abbildung 7 die resultierende spektrale Effizienz dargestellt. Je nach Anforderungen des Universaldienstes muss bei der kapazitiven Bewertung zusätzlich zum Download auch der Upload als möglicherweise limitierender Faktor betrachtet werden.

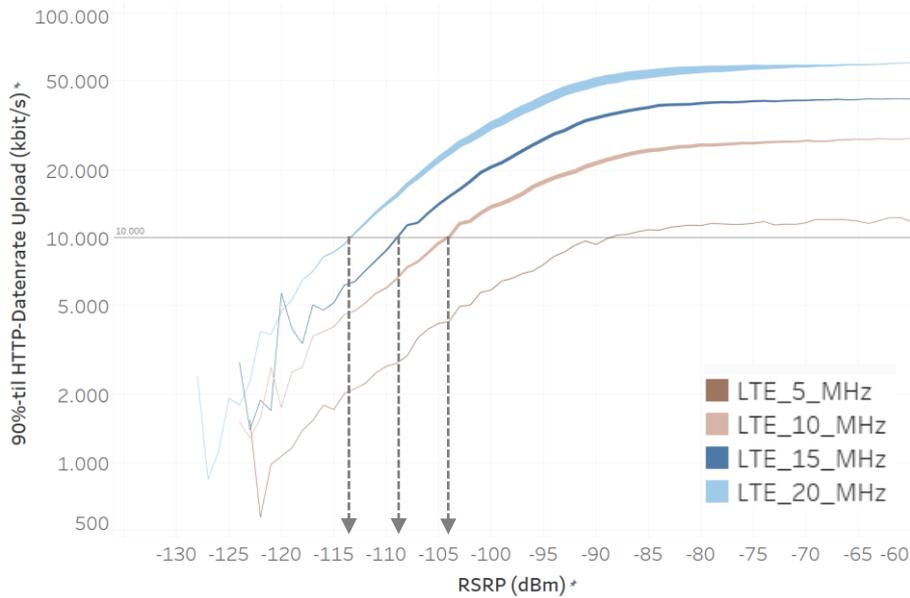


Abbildung 9: 90%-til der Upload-Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP) für LTE-Übertragung mit einem einzelnen Frequenzträger in Abhängigkeit der verfügbaren Bandbreite

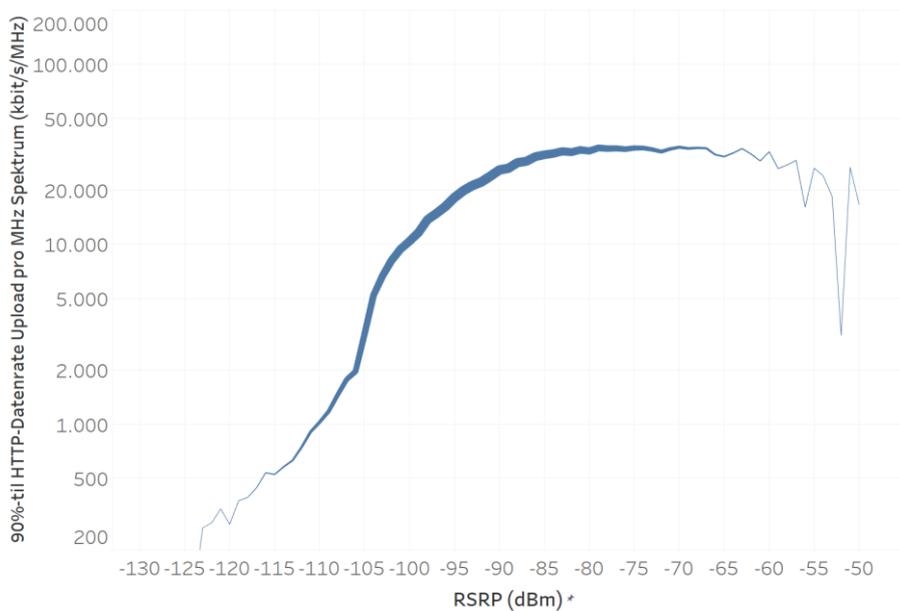


Abbildung 10: 90%-til der Upload-Datenrate über der mittleren Empfangsleistung (RSRP), normiert auf das zur Verfügung stehende Spektrum (in MHz)

Bei allen angestellten Betrachtungen ist zu bedenken, dass die Stichproben auf Smartphones erfasst wurden, die einen mobilen Nutzer repräsentieren sollen. Im Hinblick auf die Versorgung stationärer Teilnehmer, für die ein Universaldienst zu dimensionieren ist, müssen daher weitergehende Überlegungen angestellt werden, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

2.3 Parameter mit Einfluss auf eine stationäre Mobilfunknutzung

Die für einen Nutzer tatsächlich erzielbare Dienstgüte hängt neben den in Abschnitt 2.1 aufgeführten technischen Parametern wie in Abschnitt 2.2 hergeleitet maßgeblich von der Qualität des Empfangssignals ab. Die Qualität setzt sich dabei aus der Empfangsleistung des Mobilfunksignals, dem Störabstand und einer möglichen zeitlichen Variation der Signaleigenschaften ab.

Bei einem stationären Empfang sind können einige störende Auswirkungen auf die Empfangsqualität wie z. B. schnellveränderliche Mehrwegeausbreitung⁶ aufgrund der Teilnehmermobilität weitgehend ausgeschlossen werden. Weiterhin lässt sich die Empfangsleistung durch den Einsatz und die optimierte Platzierung von Außenantennen bei den betroffenen Universaldienst Haushalten verbessern. Unter Umständen kann bereits durch die Verwendung von z. B. am Fenster angebrachten Zusatzantennen eine signifikante Verbesserung der Empfangsbedingungen erreicht werden. Dadurch erhöhen sich die Reichweiten (Zellgrößen) ebenso wie die erzielbaren Datenraten. Gleichermaßen wird der relative Kapazitätsbedarf für den Universaldienst innerhalb der versorgenden Funkzelle minimiert.

Als weitere technisch mögliche Option wird kurz auf die Möglichkeit zur Nutzung gespeicherter Richtstrahlcharakteristiken eingegangen, um die Empfangsbedingungen zu verbessern.

2.3.1 Einsatz von Außenantennen

Eine Möglichkeit, die Empfangssituation generell zu verbessern, stellt der Einsatz von Außenantennen an Gebäuden bzw. externen (abgesetzten) Antennen dar. Letztere können z. B. an Fenstern oder auf Balkonen installiert werden.

Durch den Einsatz von Außenantennen, insbesondere an einer höher gelegenen Stelle eines Gebäudes, kann die Empfangsleistung am Endgerät deutlich verbessert werden. Besonders mit einer optimierten Ausrichtung der Antenne auf die Basisstation kann die lokale Empfangsgüte erhöht werden.

Von der Außenantenne erfolgt die Weiterleitung des Funksignals über geeignete Hochfrequenzkabel in das Innere von Gebäuden oder Wohnungen ohne zusätzliche Dämpfungsverluste bei der Durchdringung von Wänden oder Decken. Das entsprechend starke Funksignal steht auf diese Weise auch am Standort des 4G/5G-Router zur Verfügung. Ein Praxisversuch berichtet in [19] in diesem Zusammenhang von einer Verbesserung des Mobilfunkempfangs um 18 dB, was einer mehr als 60-fachen Empfangsleistung entspricht.

Es wird bei der weiteren Analyse davon ausgegangen, dass sich durch den Einsatz von Außenantennen im Mittel Gewinne von 5 dB bis 10 dB erzielen lassen, mit denen sich entsprechend Abbildung 7 und Abbildung 10 entweder die erreichbaren Datenraten für den Download bzw. Upload erhöhen lassen oder – bei einer angenommenen begrenzten garantierten Datenrate – der relative Kapazitätsbedarf der Universaldienstverbindung reduziert wird. Die Ausnutzung dieser Möglichkeit bedingt allerdings die grundsätzliche Verfügbarkeit von Mobilfunkdiensten für den/die betrachteten Universaldienstempfänger.

⁶ Unter einer Mehrwegeausbreitung versteht man die Ausbreitung von ungerichteten Funkfrequenzen. Solche ungerichtete Funkfrequenzen breiten sich beim Senden in verschiedene Richtungen aus und legen durch Beugung, Brechung, Fading und Reflexion unterschiedlich lange Wege zurück, bevor sie beim Empfänger mit unterschiedlichen Phasenlagen eintreffen.

2.3.2 Bekannte/vorbestimmte Richtstrahlbündelung (,Beamforming')

In der Praxis gestaltet sich die gleichzeitige Nutzung gerichteter Funksignale für viele unterschiedliche Bewegungsmuster der Teilnehmer in einer Funkzelle im kommerziellen Mobilfunk herausfordernd. So lassen sich nicht zu jeder Zeit die optimalen Richtstrahlbündel für alle Nutzer gleichzeitig realisieren oder deren Nachführung entsprechend der Teilnehmermobilität gestaltet sich schwierig. In der Konsequenz kann nicht der vollständig mögliche Gewinn dieser Technik ausgenutzt werden. Dies gilt insbesondere auch für die in Abschnitt 3.3.4 dargestellten Ergebnisse der Crowd-Daten.

Für die stationäre Anwendung in Mobilfunknetzen ist ,Beamforming' grundsätzlich einfacher zu realisieren, da die Mobilität des Teilnehmers nicht mehr vorhanden ist. Ein „Nachführen“ der Richtstrahlbündel ist für stationäre Teilnehmer also nicht mehr notwendig. Darüber hinaus lassen sich die für den stationären Teilnehmer entsprechend optimierten Ansteuerungsparameter für die Mehrantennentechnik in bekannten Profilen speichern und stehen insofern a-priori zur Verfügung. Eine Konfiguration basierend auf aktuellen Messungen des Funkkanals ist nicht oder lediglich zur Feinabstimmung der Steuerparameter notwendig.

Es wird angenommen, dass sich bei bekannter geografischer Verteilung der Universaldienstempfänger innerhalb einer Funkzelle unter Ausnutzung vordefinierter Antennenprofile der praktisch realisierbare Gewinn gegenüber einem mobilen Teilnehmer um 2 dB bis 4 dB steigern lässt. Dieser Umstand würde die Reichweite einer entsprechend ausgestatteten 5G-Funkzelle erhöhen oder den relativen Kapazitätsbedarf eines Universaldienstteilnehmers in dieser Funkzelle reduzieren. Die Ausnutzung dieser Möglichkeit bedingt allerdings die Verfügbarkeit einer solchen Technik in der betroffenen 5G-Funkzelle für den/die betrachteten Universaldienstempfänger.

3. Bewertung der Mobilfunkversorgung zur Erbringung des Universaldienstes

Worum geht es in diesem Kapitel?

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Analyse von Crowd-Daten, Daten des Breitbandatlas und Daten des Mobilfunk-Monitorings der Bundesnetzagentur zur Analyse der Mobilfunkversorgung potenzieller Universaldiensthaushalte erläutert. Hierfür werden die Haushalte ermittelt,

- die bereits über eine ausreichende leitungsgebundene Versorgung verfügen, um den Universaldienst zu erbringen,
- bei denen die bestehende Mobilfunkversorgung der etablierten Mobilfunknetzbetreiber ausreichend ist und insoweit die Erbringung des Universaldienstes prinzipiell möglich erscheint,
- bei denen die bestehende Mobilfunkversorgung der etablierten Mobilfunknetzbetreiber nicht ausreichend ist und insoweit die Erfüllung des Universaldienstes mit einer Erhöhung von Übertragungskapazitäten an bestehenden Mobilfunksendeanlagen einhergeht bzw.
- bei denen der Universaldienst nur dann über öffentlichen Mobilfunk angeboten werden könnte, wenn sie für diese Haushalte (vor allem in weißen Flecken) neue Mobilfunksendeanlagen errichten würden.

Im Ergebnis der Analysen wird abgeschätzt, welcher Anteil der potenziellen Universaldiensthaushalte möglicherweise über Mobilfunk versorgt werden könnten.

3.1 Vorgehensweise

In Kapitel 2 wurde ausgeführt, dass 4G- und 5G-Technologien grundsätzlich die zu erwartenden technischen Mindestkriterien für die Erbringung des Universaldienstes erfüllen. Offen ist hingegen, welche technischen und wirtschaftlichen Aufwände resultieren, wenn der Universaldienst über die fraglichen Mobilfunknetze erbracht wird. Um diese Frage beantworten zu können, gilt es zu modellieren, wo die öffentlichen Mobilfunknetze in Abhängigkeit der technischen Mindestparameter:

- bereits über ausreichende Übertragungskapazitäten verfügen, um den Universaldienst zu erfüllen,
- die bestehende Mobilfunkversorgung der etablierten Mobilfunknetzbetreiber nicht ausreichend ist und insoweit die Erfüllung des Universaldienstes mit einer Erhöhung von Übertragungskapazitäten an bestehenden Mobilfunksendeanlagen einhergeht oder
- die Universaldienste nur dann von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern angeboten werden können, wenn für diese Haushalte neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden.

Weiterhin gilt es abzuschätzen, welcher Kapazitätsbedarf durch die potenziellen Universaldiensthaushalte zusätzlich zur üblichen Mobilfunknutzung zu erwarten ist und ob dieser durch die bestehende Frequenzausstattung bedient werden kann.

Da die Analysen im Weiteren insbesondere darauf basieren, welche Haushalte potenziell den Universaldienst nachfragen könnten, ist zunächst zu ermitteln, welche Haushalte hinsichtlich ihrer Festnetz-anbindung als unterversorgt einzustufen sind. Hierzu werden Daten des Breitbandatlas ausgewertet.

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Studie im Auftrag der BNetzA, Kennziffer 2021/003a/Z25-7

Dabei werden die Haushalte als unzureichend versorgt angenommen, die über keinen Breitbandanschluss mit einer Downlink-Datenübertragungsrate von mindestens 30 Mbit/s verfügen. Damit wird der Kreis von Universaldiensthaushalten zunächst potenziell überschätzt, wenn für den Universaldienst eine geringere Datenrate festgelegt werden sollte.

Die Daten über die erwartet unzureichend versorgte Haushalte werden dann mit den Crowd-Daten sowie den Daten des Mobilfunk-Monitoring zur aktuellen Mobilfunkversorgung räumlich verschnitten. Die Auswertung erfolgt entlang der oben genannten drei Fragestellungen. Dazu wird auch ermittelt, in welchen Gebietskategorien (städtisch, halbstädtisch, ländlich) die Haushalte angesiedelt sind.

Hinsichtlich der Haushalte, die vom öffentlichen Mobilfunk auf Basis der verwendeten Daten als nicht versorgt anzusehen sind, wird geprüft, ob diese Haushalte aufgrund der derzeit geltenden Versorgungsaufgaben künftig von Mobilfunknetzbetreibern versorgt werden. Dies gilt insbesondere für Haushalte entlang der Verkehrswege, die Gegenstand der Versorgungsaufgabe aus dem Frequenzvergabeverfahren des Jahres 2019 sind.

Um die Analyse hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Kapazität in den Mobilfunknetzen weiter zu detaillieren, wird in Abschnitt 3.6 exemplarisch die Versorgungssituation für einen Mobilfunknetzbetreiber im Münsterland modelliert. Daten über potenzielle Universaldiensthaushalte werden mit einem modellierten Mobilfunknetz verschnitten, um Aussagen darüber treffen zu können, wie viele Haushalte bei einer gegebenen Mindestdatenrate im Downlink von einem realen Mobilfunknetz bedient werden könnten.

3.2 Erhebung der relevanten Festnetzversorgung (Bedarfsermittlung)

Die Anzahl und geografische Verteilung der potenziellen Universaldiensthaushalte wurde auf Basis von Daten des Breitbandatlas erhoben. Der Breitbandatlas basiert auf Rasterzellen mit einer Größe von 250 m x 250 m, für die jeweils die Verfügbarkeit von Breitbandanschlüssen mit unterschiedlicher Mindestdatenrate angegeben wird. Es werden folgende Verfügbarkeiten im Breitbandatlas ausgewiesen⁷:

- 0% – 10%: Rasterzelle wird nicht versorgt.
- >10% – 50%: Rasterzelle wird teilweise versorgt (maximal 50% der Haushalte in der Rasterzelle).
- >50% – 75%: Rasterzelle wird überwiegend versorgt (maximal 75% der Haushalte in der Rasterzelle).
- >75% – 95%: Rasterzelle wird weitestgehend versorgt (maximal 95% der Haushalte in der Rasterzelle).
- >95%: Rasterzelle ist versorgt (maximal 100% der Haushalte in der Rasterzelle).

⁷ Bei den verwendeten Breitbandatlasdaten handelt es sich um einen Auszug mit Datenstand September 2020. Zur Eingrenzung der Versorgungslage lag auch eine geografische Eingrenzung der beantragten Gebiete der Bundesförderung Breitband vor, ebenfalls mit Stand Ende des Jahres 2020. Von einer Verwendung dieser Informationen wurde im Rahmen der Studie abgesehen, weil den vorliegenden Daten lediglich die Beantragung zu entnehmen war, aber nicht, ob eine Genehmigung vorliegt oder ob die jeweilige Maßnahme bereits im Bau befindlich oder bereits erschlossen ist. Es konnte daher nicht eingeschätzt werden, ob die betreffenden Haushalte gem. § 160 Abs. 1 Nr. 1 als versorgt angesehen werden können. Insbesondere durch den geförderten Ausbau wird sich die Zahl der potenziellen Universaldiensthaushalte tendenziell weiter reduzieren.

Adressscharfe Angaben über die Verfügbarkeit von Breitbandanschlüssen sind im Breitbandatlas nicht gegeben. Daher kann nicht exakt festgestellt werden, welche Haushalte über welche Art von Breitbandanschluss verfügen. Um daraus trotzdem eine Aussage über potenziell mit einem Universaldienst zu versorgende Haushalte ableiten zu können, wurde folgender Ansatz gewählt.

Es wurden zunächst sämtliche Rasterzellen für einen Anschlussbandbreite von 30 Mbit/s im Downlink ausgewertet.⁸ Da diese Datenrate die erwartete benötigte Datenrate für den Universaldienst deutlich übersteigt, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der jeweils maximale Anteil Haushalte in einer Rasterzelle als im Hinblick auf einen Universaldienst versorgt betrachtet werden kann. Für die weitere Analyse wird dann als eher optimistische Annahme also jeweils der maximale Wert der Verfügbarkeit für die im Rasterelement enthaltenen Haushalte angesetzt.⁹

Hinsichtlich der Quantifizierung von Haushalten in den jeweiligen Rasterzellen in den oben genannten Verfügbarkeiten wurde dabei insofern wie folgt vorgegangen:

- Kategorie 0% – 10%:
90% der Haushalte in der Rasterzelle werden als un- bzw. unterversorgt angesehen.
- Kategorie > 10% – 50%:
50% der Haushalte in der Rasterzelle werden als un- bzw. unterversorgt angesehen.
- Kategorie > 50% – 75%:
25% der Haushalte in der Rasterzelle werden als un- bzw. unterversorgt angesehen.
- Kategorie > 75% – 95%:
5% der Haushalte in der Rasterzelle werden als un- bzw. unterversorgt angesehen.
- Kategorie > 95%:
alle Haushalte in der Rasterzelle werden als versorgt angesehen, somit werden hier keine un- bzw. unterversorgten Haushalte bei den weiteren Berechnungen berücksichtigt.

Tabelle 3 weist die damit in den Modellrechnungen enthaltenen Haushalte je Kategorie für Ende 2020 aus.

Breitbandverfügbarkeit	Anzahl aller Haushalte innerhalb der jeweiligen Kategorie	Annahme über die Anzahl unzureichend versorgter Haushalte
Kategorie > 95%	34.012.529	0
Kategorie > 75% – 95%	5.214.423	260.721
Kategorie > 50%– 75%	787.285	196.821
Kategorie > 10% – 20%	629.589	314.795
Kategorie 0% – 10%	1.513.300	1.361.970
Summe	42.157.126	2.134.307

Tabelle 3: Anzahl der Haushalte je Kategorie der Verfügbarkeit von Breitbandanschlüssen

⁸ Zu Beginn der Analysen stand kein Datensatz für eine Mindestdatenrate von 10 Mbit/s zur Verfügung, so dass in einem ersten Ansatz diese Mindestdatenrate gewählt wurde.

⁹ Der optimistische Wert wurde gewählt, um dem Aspekt Rechnung zu tragen, dass der Universaldienst wahrscheinlich auch mit niedrigeren Datenraten als 30 Mbit/s realisiert werden kann.

Insgesamt werden gemäß dieser Vorgehensweise 2.134.307 Haushalte identifiziert, die über einen Breitbandanschluss mit (ggf. deutlich) weniger als 30 Mbit/s im Downlink verfügen. Dies entspricht 5,06% aller Haushalte in Deutschland. Diese etwa 2,1 Mio. Haushalte stellen die Grundgesamtheit der Haushalte dar, die im Rahmen dieser Analyse als potenzielle Universaldiensthaushalte angesehen werden.

Im Weiteren ist hinsichtlich einer Versorgung dieser Haushalte mit 4G- oder 5G-Technologien zu untersuchen, wie viele von diesen Haushalten über:

- eine vermutlich ausreichende Mobilfunkversorgung,
- eine ggf. unzureichende Mobilfunkversorgung bzw.
- über keine Mobilfunkversorgung

verfügen. Hierzu wird im Folgenden der aktuelle Stand der Mobilfunkversorgung in Deutschland auf Basis von Crowd-Daten analysiert.

3.3 Erhebung der nationalen Mobilfunkversorgung

Für die Erhebung der aktuellen Mobilfunkversorgung (Ist-Stand) kommt eine Crowdsourcing-Lösung zum Einsatz, bei der reguläre Mobilfunknutzer im Hintergrund ihrer alltäglichen Smartphone-Nutzung zusätzliche Informationen und Messdaten der jeweils genutzten Mobilfunknetze bzw. Übertragungstechniken sammeln.

Die Crowdsourcing-Lösung von umlaut basiert auf einem Software-Baustein, welcher in über 1.000 Smartphone-Anwendungen (Apps) für das Betriebssystem Android integriert ist. Sobald eine dieser Anwendungen auf einem Smartphone installiert wird, erfolgt die Datenerfassung auf dem Smartphone des Nutzers kontinuierlich, passiv und im Hintergrund. Die Datenerfassung wird nur dann unterbrochen, wenn das Smartphone ausgeschaltet ist, und beendet, wenn die Anwendung vom Benutzer deinstalliert wird.

Die Anwendung erfasst aktuell über 200 Leistungskenngrößen für die verschiedenen Mobilfunktechnologien GSM (2G), UMTS (3G), LTE (4G), NR (5G) und WLAN (Wi-Fi), einschließlich Parametern zu Datenverbindungen und Sprachanrufen. Viele Kenngrößen werden dabei mehrfach pro Minute erfasst. Die erfassten Parameter beinhalten sowohl Versorgungsinformationen, die die Signalqualität für das Smartphone widerspiegeln, Informationen zum Durchsatz von Datendiensten sowie Standortinformationen.

Die erhobenen Daten werden für vielseitige Untersuchungen und Analysen herangezogen, u. a. werden die Daten für einen europaweiten Vergleich der Mobilfunkversorgung genutzt. Die Fachzeitschrift „connect“ analysiert basierend auf diesen Daten die Qualität der Mobilfunknutzung durch Discounter („*Mobile Virtual Network Operator*“, MVNO) in der DACH-Region [26].

Die dieser Studie zugrundeliegenden Daten wurden mit Hilfe dieser Anwendung im ersten und zweiten Quartal 2021 erhoben. Der Untersuchungszeitraum umfasst demnach die Monate Januar bis Juni 2021.

3.3.1 Erfassungsmethodik

Die Anwendung zur Datenerfassung läuft auf den Smartphones der Nutzer im Hintergrund und erfordert keinerlei Interaktion mit dem Nutzer. Sie greift dabei auf die Positions- und Verbindungsdaten

des Smartphones zurück. Zu jeder Positionsinformation (i. d. R. GPS-Koordinaten) werden die Informationen über die genutzte Netzverbindung gespeichert. Hierzu zählen u. a.:

- Mobilfunknetzbetreiber,
- Mobilfunktechnologie (GSM, UMTS, LTE, NR-NSA, NR-SA, Wi-Fi) sowie
- Empfangsleistung.

Für die Empfangsleistung werden je nach Mobilfunktechnologie vom Smartphone unterschiedliche Messgrößen berichtet. Die *Reference Signal Received Power* (RSRP) ist die anhand von LTE-Referenzsignalen ermittelte Empfangsleistung. Der Wertebereich des RSRP liegt zwischen -140 dBm (sehr schlechte Versorgung) und -50 dBm (sehr gute Versorgung).

Die beschriebene Messgröße für die LTE-Mobilfunktechnologien wird auf dem Smartphone erhoben und georeferenziert gespeichert. Bei vorhandener WLAN-Verbindung, spätestens aber nach ein paar Tagen, werden die gesammelten Daten komprimiert an einen zentralen Datenserver übertragen.

Die ermittelte Empfangsleistung ist dabei abhängig von den für das Smartphone vorherrschenden Funkausbreitungsbedingungen. Die Nutzer verwenden dabei das Smartphone in der für die jeweilige Nutzung üblichen Umgebung. Fußgänger tragen ihr Smartphone üblicherweise in der Hosentasche oder in der Handtasche. Während Telefonaten wird das Smartphone dagegen meist auf Kopfhöhe getragen, wobei es Ausnahmen im Fall des Einsatzes von Headsets gibt. Für Nutzer in Fahrzeugen verbleibt das Smartphone üblicherweise entweder in der Tasche oder wird in der Mittelkonsole abgelegt. In jedem Fall findet das Smartphone die Empfangsbedingungen einer typischen In-Car-Umgebung mit normalerweise deutlicher Signalabschwächung im Innenraum vor. Ähnliches gilt für die Nutzung innerhalb von Gebäuden, wobei hierbei anzumerken ist, dass in Gebäuden die Verfügbarkeit von GPS und damit auch die Verfügbarkeit von Positionsdaten deutlich eingeschränkt ist.

Insgesamt stehen auf Basis der Crowd-Daten Versorgungsdaten für eine realistische Nutzung von Smartphones insbesondere außerhalb von Gebäuden in üblicher Trageweise bereit. Um auf eine Versorgung von Universaldiensthaushalten (stationär und mit ggf. größerer Empfängerhöhe) schließen zu können, müssen die abgeleiteten Versorgungsstatistiken oder die Annahmen bzgl. der Anforderungen an die notwendige Empfangsleistung ggf. noch korrigiert werden.

3.3.2 Auswertemethodik

Für die weitere Analyse werden die erhobenen Daten einer umfangreichen Qualitätskontrolle und Konsistenzprüfung unterzogen. Hierbei wird u. a. ausgeschlossen, dass Nutzer in die Bewertung der LTE-Funkversorgung eingehen, die vertraglich oder aufgrund ihres Smartphones nicht die Möglichkeit haben, eine Verbindung zum LTE-Netz aufzubauen.

In einem weiteren Schritt werden alle als valide ermittelten Messwerte für die Funkversorgung (Empfangsleistung) getrennt für jeden Betreiber und für jede Mobilfunktechnologie durch einen mathematischen Algorithmus extrapoliert. Hierzu werden Methoden der räumlichen Statistik angewandt, die die Funkausbreitung bzw. erwartete Empfangsleistung in der Fläche prognostizieren. Hierzu wird zunächst die zu bewertende Fläche in ein Raster von $12,5$ m x $12,5$ m unterteilt.

Auf Basis der erhobenen Stichproben dienen einige der Rasterelemente als Stützstellen für die Datenextrapolation. Für dazwischenliegende bzw. außerhalb von Stützstellen liegende Rasterelemente wird je Technologie und Mobilfunknetzbetreiber eine jeweils zu erwartende Empfangsleistung

prognostiziert. Diese basiert anhand der tatsächlichen erfassten Werte an den Stützstellen auf den erwarteten Funkausbreitungsbedingungen in einem räumlich begrenzten Gebiet.

Zusätzlich berechnet der Algorithmus für jeden Prädiktionwert einen Prognosefehler (*Root Mean Square Error*, RMSE), über den die Genauigkeit der Extrapolation in die Fläche abgeschätzt wird. Anhand dieses geschätzten Prognosefehlers wird der extrapolierte Bereich für nachgelagerte Analysen in der Fläche limitiert. In Anlehnung an die üblicherweise erreichbare mittlere Genauigkeit bei der Funknetzplanung [27] wird ein RMSE von 8,5 dBm als oberer Grenzwert für den zulässigen Prognosefehler angesetzt¹⁰. Damit werden höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Extrapolation gestellt, als sie im Rahmen der Funknetzplanung erreicht werden. Für Rasterelemente, für die der ermittelte Prognosefehler über dem Grenzwert liegt, werden im Weiteren keine Aussagen getroffen [27].

Das Ergebnis dieser Datenextrapolation sind digitale Karten für die zu bewertende Fläche im Rasterformat (GeoTIFF), die pro Mobilfunknetzbetreiber und Mobilfunktechnologie vorliegen und die Grundlage für die weitere Bewertung und Analyse der Funkversorgung bilden.

Auf Basis der extrapolierten Daten erfolgt im Anschluss die Bewertung der Funkversorgung. Für das Erreichen einer ausreichenden Verbindungsqualität müssen dabei für die verschiedenen Mobilfunktechnologien unterschiedliche Schwellwerte für die **minimal erforderliche Empfangsleistung** angesetzt werden. Für die Verfügbarkeit von LTE wird für eine ausreichende Funkversorgung ein RSRP von mindestens -120 dBm angenommen. Bei den genannten Empfangsleistungen ist aus der Analyse umfangreicher Messdaten bekannt, dass Mobilfunkdienste in einer hinreichenden Qualität für die Nutzer zur Verfügung stehen. Je nach Anforderung der betrachteten Mobilfunkdienste kann die tatsächlich benötigte Empfangsleistung aber auch höher oder niedriger ausfallen (vgl. hierzu auch Analysen in Abschnitt 2.2).

3.3.3 Datenbasis

Die Datenbasis für die Analyse bilden insgesamt fast 529 Mio. Stichproben, davon 124 Mio. Stichproben im Netz der Telekom, 153 Mio. Stichproben im Netz von Vodafone und 252 Mio. Stichproben im Netz von Telefónica (vgl. Tabelle 4).¹¹

	Telekom	Vodafone	Telefónica	Kombiniert
Stichproben	124.121.238	152.903.141	252.226.222	529.250.601

Tabelle 4: Anzahl der Stichproben für die Ermittlung der Mobilfunkversorgung

Die von den analysierten Crowd-Daten erfassten Haushalte zeigt Abbildung 11. Für jeden Mobilfunknetzbetreiber werden jeweils 95% bis 96% aller Haushalte abgedeckt. In der kombinierten Sicht über alle Mobilfunknetzbetreiber werden knapp 98% aller Haushalte erfasst.

¹⁰ Ein Wert von 8,5 dB für den RMSE liegt in der Größenordnung der bei der Funknetzplanung üblicherweise erzielten mittleren Genauigkeit in städtischem Gebiet. In ländlichen Gebieten sind bei der Funknetzplanung auch größere Ungenauigkeiten bis zu einem mittleren RMSE von 15 dB üblich.

¹¹ Die unterschiedliche Anzahl Stichproben für die jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber begründen sich dabei mit der unterschiedlichen Anzahl Mobilfunkkunden, der Durchdringung der jeweiligen Kundschaft mit den entsprechenden Apps zur Erfassung der Crowd-Daten, dem Nutzungs- und Mobilitätsverhalten dieser Kunden und nicht zuletzt mit dem Anteil von Android-Smartphones im Markt des jeweiligen Mobilfunknetzbetreibers.

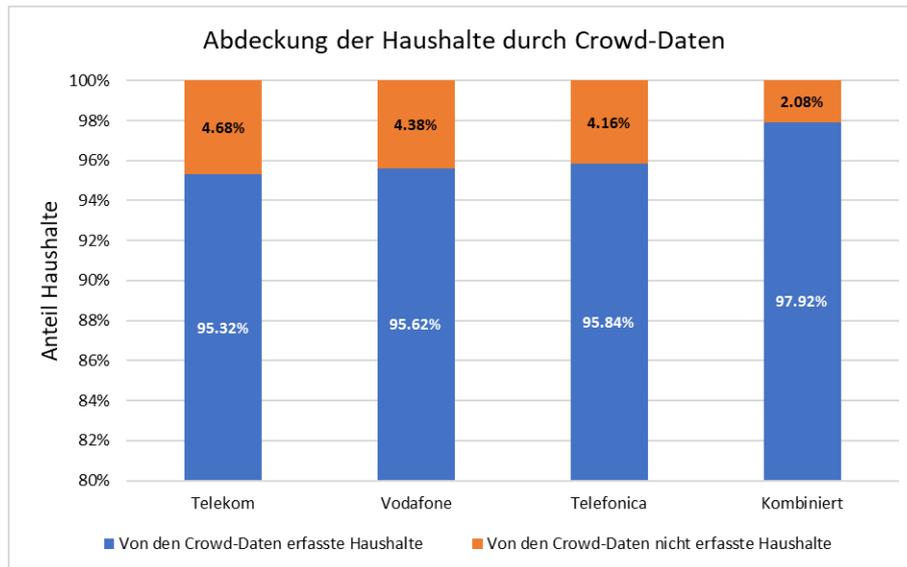


Abbildung 11: Von Crowd-Daten erfasste Haushalte Deutschlands

3.3.4 Ergebnisse der Datenanalyse der Mobilfunkversorgung

Auf Basis der Crowd-Daten aus dem Zeitraum Januar bis Juni 2021 sind im Folgenden die Ergebnisse der Analysen der extrapolierten Stichproben dargestellt. Die Ergebnisse für die Mobilfunkversorgung der Haushalte in Deutschland sind in Tabelle 5 für die einzelnen Mobilfunknetzbetreiber sowie für die Kombination aller Netze zusammengefasst.

Die jeweilige Basis für die nachfolgenden Analysen ist bei den Ergebnissen separat ausgewiesen. Die entsprechende Zeile in Tabelle 5 gibt dabei die bereits in Abschnitt 3.3.3 erläuterte Datenbasis wieder. Für die einzelnen Betreiber werden dabei zwischen 95,3% (Telekom) und 95,8% (Telefónica) aller Haushalte von den Crowd-Daten erfasst. In der Kombination aller drei Betreiber sind es nahezu 98% der Haushalte in Deutschland. Die LTE-Versorgung für die erfassten Haushalte liegt für die Telekom bereits bei 99,6% und sowohl für Vodafone als auch Telefónica bei 99,4%. In der Kombination aller drei Betreiber können 99,9% der erfassten Haushalte als ausreichend versorgt betrachtet werden.

		Telekom	Vodafone	Telefónica	Kombiniert
Basis der Analyse (erfasste Anteile bezogen auf Deutschland)	Haushalte:	95,3%	95,6%	95,8%	97,9%
Versorgung mit LTE (4G)	Haushalte:	99,6%	99,4%	99,4%	99,9%

Tabelle 5: Mobilfunkversorgung in Deutschland

Abbildung 12 detailliert die Ergebnisse zur Versorgung der Haushalte im Hinblick auf unterschiedliche Empfangsleistungen. Dabei wird ersichtlich, dass von der Telekom etwa 98,7% der erfassten Haushalte ausreichend mit LTE versorgt werden, d. h. über einen Empfangsleistung (RSRP) von -120 dBm oder besser verfügen. Bei Vodafone verfügen 97,1% der erfassten Haushalte über ein Empfangsleistung von mindestens -120 dBm. Bei Telefónica wird bei 97,7% der erfassten Haushalte eine Empfangsleistung von -120 dBm oder besser festgestellt.

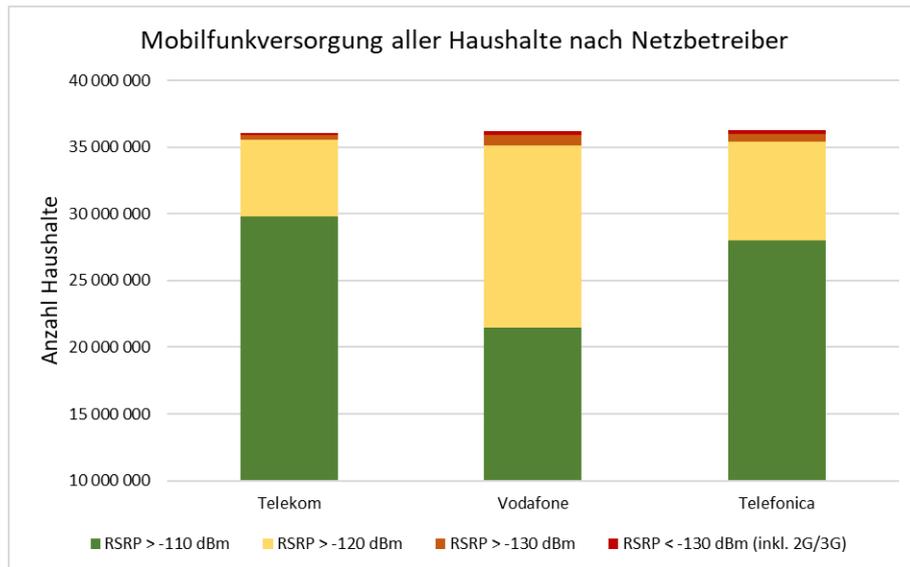


Abbildung 12: Mobilfunkversorgung in Deutschland der Haushalte je Pegel nach Netzbetreiber

Im Folgenden interessiert allerdings vor allem, wie sich die aktuelle Mobilfunkversorgung für die potenziellen Universaldiensthaushalte (vgl. Abschnitt 3.2) darstellt. Da die konkreten Anforderungen an den Universaldienst noch nicht abschließend definiert sind und darüber hinaus Verbesserungspotenzial im Hinblick auf die Versorgung der Haushalte besteht (z. B. durch Außenantennen in größerer Höhe), werden die Haushalte dabei je nach den ermittelten Empfangsbedingungen unterschieden.

In Abbildung 13 ist die kumulierte Anzahl unzureichend versorgten potenziellen Universaldiensthaushalte in Abhängigkeit zur ermittelten Empfangsleistung (RSRP) dargestellt. Wie in Abschnitt 2.2 hergeleitet und in der gewählten Auswertemethodik entsprechend berücksichtigt, wird ab -120 dBm von einer ausreichenden Empfangsleistung ausgegangen. Basierend auf dieser Annahme lassen sich somit 27.963 unzureichend versorgte Haushalte identifizieren.

Würden sich zur Erbringung des Universaldienstes aufgrund steigender Anforderungen höhere Empfangsleistungen als notwendig herausstellen, steigt die Anzahl unzureichend versorgter Haushalte schnell an. Bei einer erforderlichen Empfangsleistung von -115 dBm müssten bereits 55.669 Haushalte als unzureichend versorgt betrachtet werden, bei einer Empfangsleistung von -110 dBm wären es 130.195 Haushalte.

Wird dagegen das Potenzial einer Mitwirkungspflicht des Universaldienstempfängers ausgeschöpft, könnte die Anzahl der über Mobilfunk nur unzureichend versorgten Haushalte weiter reduziert werden. Wird bei unzureichenden Empfangsbedingungen z. B. aufgrund der Verwendung von Außenantennen ein Gewinn von mindestens 5 dB erzielt, verblieben nur noch 19.665 Haushalte, für die eine Versorgung über Mobilfunk ohne weitere Maßnahmen nicht ausreichen würde. Ließe sich der Gewinn durch weitere Optimierungsmaßnahmen (Antennenausrichtung) auf 10 dB steigern, so würden noch 16.646 Haushalte als unzureichend versorgt gelten.

Allerdings ist auch bei weiteren Maßnahmen beim Universaldienstempfänger nicht davon auszugehen, dass alle Haushalte ohne weitere Mobilfunkausbaumaßnahmen über Mobilfunk zu erreichen wären. Für etwa 15.000 Haushalte erscheint die aktuelle Mobilfunkversorgung nicht ausreichend. Für diese Haushalte müssten vermutlich ergänzende Mobilfunkstandorte erschlossen werden.

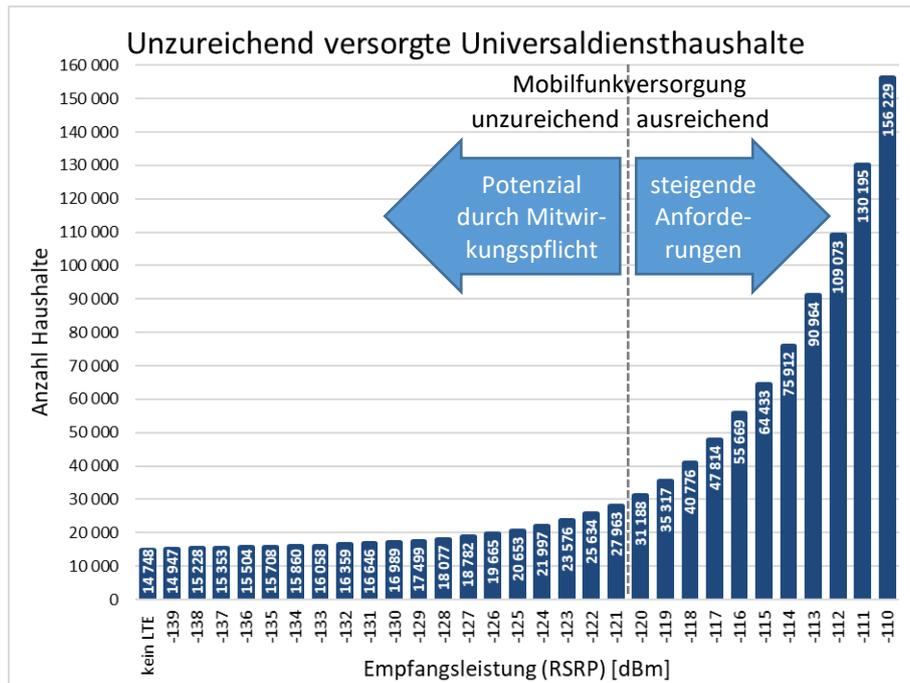


Abbildung 13: Anzahl der unzureichend versorgten potenziellen Universaldienst Haushalte in Abhängigkeit von der erforderlichen Empfangsleistung (RSRP)

Zusammenfassend kann bereits für insgesamt 2.060.041 der gemäß Abschnitt 3.2 identifizierten 2.134.307 potenziellen Universaldienst Haushalte die aktuell vorliegende Mobilfunkversorgung als ausreichend zur Erbringung des Universaldienstes angesehen werden (unter der Annahme einer minimal erforderlichen Empfangsleistung von -120 dBm).

Allerdings lassen sich auf Basis der Crowd-Daten keine Aussagen für sämtliche potenziellen Universaldienst Haushalte ableiten. Für 46.302 Haushalte liegen keine ausreichenden Daten vor, um die dort zu erwartende LTE-Versorgung zuverlässig vorherzusagen. Für diese Haushalte wird im Folgenden eine ergänzende Bewertung anhand der Daten des Mobilfunk-Monitoring vorgenommen.

3.4 Ergänzende Daten aus dem Mobilfunk-Monitoring

Zur Absicherung der Informationslage, insbesondere innerhalb der Gebiete ohne eine ausreichende Verfügbarkeit von Crowd-Daten (hier: nicht erfasste Haushalte) wurde im Rahmen der Auswertung ergänzend auf die Daten des Mobilfunk-Monitoring der Bundesnetzagentur zurückgegriffen. Diese basieren auf einem deutschlandweiten Raster der Auflösung $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ und geben die Verfügbarkeit von LTE gemäß Betreiberangaben innerhalb jeder Rasterzelle an. Die Information ist binär codiert und gibt lediglich an, ob LTE in der Zelle verfügbar ist (Wert = 1) oder nicht (Wert = 0). Eine Aussage über die zu erwartende Qualität der LTE-Versorgung ist anhand der Daten nicht möglich. Die Informationen sind frei zugänglich und wurden mit dem Stand 04/2021 verwendet.

Für die Analyse wurden die Daten des Mobilfunk-Monitoring mit den Daten zu den potenziellen Universaldienst Haushalten, für die auf Basis der Crowd-Daten keine Aussage getroffen werden konnte, überlagert. Die Information, ob für die entsprechenden Haushalte eine LTE-Versorgung als verfügbar ausgewiesen wird, wurde dann bei den weiteren Auswertungen berücksichtigt.

Von den 46.302 potenziellen Universaldiensthaushalten, für die keine ausreichenden Crowd-Daten zur Verfügung stehen, können basierend auf den Daten des Mobilfunk-Monitoring 42.483 Haushalte identifiziert werden, für die gemäß Aussagen der Mobilfunknetzbetreiber eine ausreichende Versorgung vorliegen sollte. Es verbleiben demnach 3.820 weitere Haushalte, bei denen die aktuelle Mobilfunkversorgung als nicht ausreichend anzusehen ist.

In Kombination mit der Analyse der Crowd-Daten verbleiben insofern $27.963 + 3.820 = 31.783$ Haushalte, bei denen die aktuelle Mobilfunkversorgung als nicht ausreichend anzusehen ist (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Im Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in den kommenden Jahren nicht zuletzt aufgrund der Versorgungsaufgaben mit einem weiteren Mobilfunkausbau zu rechnen ist. Hierdurch ist eine Mobilfunkversorgung für einige der aktuell nicht ausreichend versorgten potenziellen Universaldiensthaushalte zu erwarten.

3.5 Prognose über die künftige nationale Mobilfunkversorgung

3.5.1 Versorgungsaufgaben

Da die Mobilfunknetzbetreiber Versorgungsaufgaben aus der Frequenzvergabe des Jahres 2019 [29] erfüllen müssen, ist bei der Modellierung zu berücksichtigen, dass im Zuge des weiteren Netzausbaus entlang der Verkehrswege noch zusätzliche Haushalte versorgt werden können. Die Versorgungsaufgaben sehen u.a. folgende Versorgungsziele vor:

- **Haushalte:** bis Ende 2022 mindestens 98% je Bundesland (mind. 100 Mbit/s)
- **Verkehrswege:**¹²
 - bis Ende 2022 alle Bundesautobahnen und Bundesstraßen (0/1) mind. 100 Mbit/s und höchstens 10 ms Latenz
 - bis Ende 2024 alle übrigen Bundesstraßen mind. 100 Mbit/s und höchstens 10 ms Latenz
 - bis Ende 2024 alle Landes- und Staatsstraßen mind. 50 Mbit/s
 - bis Ende 2024 die Seehäfen sowie das Kernnetz der Wasserstraßen im Binnenbereich mind. 50 Mbit/s
 - bis Ende 2022 die Schienenwege mit mehr als 2.000 Fahrgästen pro Tag mind. 100 Mbit/s
 - bis Ende 2024 alle übrigen Schienenwege mind. 50 Mbit/s
- **Aufbau Basisstationen:**
 - 1.000 5G-Basisstationen
 - 500 Basisstationen mit mindestens 100 Mbit/s in weißen Flecken
- **Besonderheiten**

Während Versorgungsaufgaben pro Haushalt betreiberindividuell zu erfüllen sind, können andere Auflagen gemeinsam von den Zuteilungnehmern erbracht werden (keine Anrechenbarkeit).

¹² Bei den Versorgungsaufgaben für die Verkehrswege ist eine Anrechnung der Versorgung von anderen Mobilfunknetzbetreibern vorgesehen.

Um diese künftige Versorgung zu modellieren, wurde die Annahme getroffen, dass die Senderstandorte zur Erfüllung von Versorgungsaufgaben so gewählt werden, dass entlang der Verkehrswege eine Versorgung von einem Kilometer links und rechts des jeweiligen Verkehrsweges erreicht werden kann. In der Praxis hängt die konkrete Versorgung der Fläche davon ab, ob die Topografie die Errichtung von Basisstationen in jedem Fall zulässt und eine entsprechende Versorgung auch tatsächlich erzielt werden kann. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Modellannahmen weitgehend in der Praxis umgesetzt werden können.

Von den anhand der Crowd-Daten identifizierten 27.963 Haushalte, die aktuell eine ggf. nicht ausreichende Versorgung aufweisen, ist auf Basis dieser Annahmen noch für etwa die Hälfte der Haushalte (13.787 Haushalte) noch damit zu rechnen, dass sie über den zukünftig erwarteten Mobilfunkausbau entlang der Verkehrswege erschlossen werden. Die verbleibenden 14.176 Haushalte werden vermutlich über die erwarteten Ausbaumaßnahmen nicht erreicht werden.

Für die anhand der Daten des Mobilfunk-Monitoring identifizierten 3.820 Haushalte, bei denen die aktuelle Mobilfunkversorgung als nicht ausreichend anzusehen ist, können unter dieser Annahme noch 1.100 Haushalte ermittelt werden, bei denen aufgrund der Erfüllung der Versorgungsaufgaben bis Ende 2024 noch eine ausreichende Mobilfunkversorgung zu erwarten ist. Die verbleibenden 2.720 Haushalte werden vermutlich auch über künftige Ausbaumaßnahmen nicht erreicht werden.

Somit ist insgesamt zu erwarten, dass über die Ausbaumaßnahmen zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben zusätzlich zu den bereits aktuell 2.060.041 ausreichend versorgten potenziellen Universaldiensthaushalte (vgl. Abschnitt 3.3.4) weitere 14.887 Haushalte zukünftig versorgt sein werden. Die verbleibenden 16.896 Haushalte sind vermutlich auch zukünftig als nicht ausreichend versorgt anzusehen.

3.5.2 Mobilfunkförderprogramme

Bei der Modellierung wurden die Auswirkungen von Mobilfunkförderprogrammen nicht berücksichtigt, da es dazu noch keine gesicherte Datenbasis gibt. Aus diesem Grund könnte die vorliegende Analyse die Anzahl unzureichend versorgter Haushalte überschätzen.

3.6 Analyse des Kapazitätsbedarfs zur Versorgung der Universaldiensthaushalte über Mobilfunk am Beispiel des Münsterlandes

3.6.1 Modellierungsansatz

Die technische Realisierung von Mobilfunkprodukten für stationäre Anwendungen, die sich von mobilen Datendiensten hinsichtlich ihrer technischen Anforderungen und dem vom Endkunden genutzten Datenvolumen unterscheiden, beeinflusst heute die grundsätzliche Funknetzplanung nicht. Von den Mobilfunknetzbetreibern wird allein die Nachfrage nach mobilen Datendiensten außerhalb von „Fixed-Wireless-Access“-Produkten bei der Netzplanung und Netzdimensionierung betrachtet. Damit sind die Mobilfunknetze heute in Deutschland zunächst einmal nicht auf eine Substitution des Festnetzes ausgelegt. Gleichwohl haben die Mobilfunknetzbetreiber Produkte im Markt, die auf eine Festnetzsubstitution angelegt sind. Die Mobilfunknetzbetreiber geben hierbei an, dass im Vorfeld eines entsprechenden Vertragsabschlusses technische Verfügbarkeitsprüfungen durchgeführt werden.

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Studie im Auftrag der BNetzA, Kennziffer 2021/003a/Z25-7

Inwieweit Universaldienst Haushalte über LTE- oder 5G-Netze in der Praxis versorgt werden können, hängt zellspezifisch von den folgenden Parametern ab:

- eingesetztes Frequenzspektrum und verwendete Mobilfunktechnologie(n),
- Anzahl der in einer Funkzelle zu erwartenden Mobilfunkteilnehmer und deren Nutzungsverhalten bzw. die Auslastung der Funkzelle,
- Anzahl der Universaldienst Haushalte in der Funkzelle,
- Abstand des jeweiligen Haushalts von Mobilfunksendeanlagen bzw. vorhandene Mobilfunkversorgung,
- Einsatz von Außenantennen bei Haushalten,
- festgelegte Mindestdatenrate und Verfügbarkeitsvorgaben für den Universaldienst.

Bis auf die noch festzulegende Mindestdatenrate des Universaldienstes gibt es im öffentlichen Raum für die weiteren Parameter keine Primärdaten, da die Mobilfunknetzbetreiber sämtliche Daten als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse einstufen. Dies gilt auch für die Lage der Mobilfunkstandorte sowie die von einem Mobilfunkstandort versorgte Flächen mit ihren jeweiligen Funkkapazitäten.

Wie sich die Anzahl von Haushalten, die den Universaldienst nutzen, auf die Kapazität von Funkzellen auswirkt, kann somit allein von Modellberechnungen abgeschätzt werden. Hierzu wurden anonymisierte Daten über Mobilfunkstandorte im Münsterland (Stadt Münster sowie die Kreise Borken, Coesfeld, Steinfurt und Warendorf) als Ausgangspunkt der Modellierung von Funkzellen genommen und mit den Daten des Breitbandatlas [28] verglichen. Dieses regionale Beispiel wurde gewählt, weil es über die Mobilfunkversorgung im Münsterland öffentlich verfügbare Daten gibt [25], die zur Validierung der Modellberechnungen herangezogen werden können. Die Analyse erhebt somit keinen Anspruch auf Repräsentativität für das gesamte Bundesgebiet. Die Standortdaten wurden von der Bundesnetzagentur bereitgestellt. Sie beinhalten neben den Standortkoordinaten auch Daten über die am Standort verfügbaren bzw. beantragten Frequenzen. Die geografische Lage der modellierten Funkzellen ist in Abbildung 14 dargestellt (BuG).

Um die innerhalb des Analysegebietes vorhandenen Mobilfunkzellen zu modellieren, wurden sämtliche Haushalte dem jeweils nächstgelegenen Mobilfunkstandort zugeordnet. Daraus ergeben sich potenzielle Versorgungsbereiche der betrachteten Funkzellen. Die Verteilung der jeweiligen Flächen wie in Tabelle 6 gezeigt ist mit der Analyse in Lüders/Sörries [25] vergleichbar.

Versorgungsbereich der Funkzelle	Anteil
Fläche < 1,5 km ²	14%
Fläche 1,5 km ² bis < 11 km ²	47%
Fläche 11 km ² bis < 30 km ²	33%
Fläche > 30 km ²	6%

Tabelle 6: Anteil Funkzellen in Abhängigkeit ihres Versorgungsbereiches

Die Fläche, die ein Standort im Mittel typischerweise versorgt, ist in ländlichen Regionen deutlich größer als in Städten. Zusätzlich unterscheiden sich die ländlichen Standorte von städtischen Standorten auch durch die jeweils eingesetzten Frequenzen. Wenn Standorte Flächen oberhalb von 11 km² versorgen, dann deutet dies aufgrund von physikalischen Gründen sehr stark auf den Einsatz von Frequenzen unterhalb von 1 GHz hin.

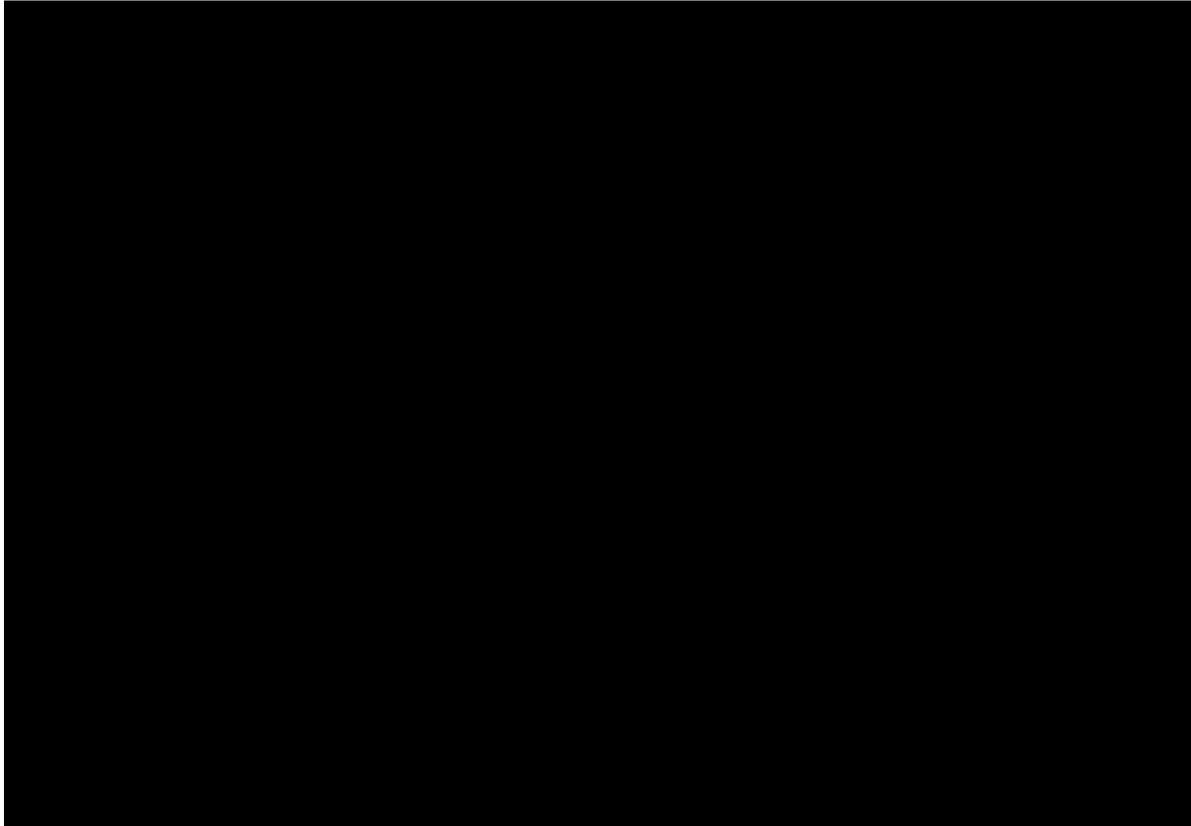


Abbildung 14: Modellierung der Mobilfunkversorgung im Münsterland (BuG)

Nachfolgend kann für die so identifizierten Funkzellen eine zellspezifische Kapazitätsanalyse durchgeführt werden, mit der sich ermitteln lässt, welchen Anteil der potenziellen Universaldiensthaushalte die jeweilige Funkzelle möglicherweise noch zusätzlich tragen kann. Hierzu muss zunächst die Gesamtkapazität der Funkzelle anhand der verfügbaren Frequenzausstattung und danach sowohl der Kapazitätsbedarf der kommerziellen Mobilfunkteilnehmer als auch der erwartete Bedarf der Universaldienstempfänger quantifiziert werden.

3.6.2 Verfügbares Frequenzspektrum (Kapazität)

Der Einsatz von Frequenzen bzw. Frequenzspektrum an einem Standort hängt im Wesentlichen von der Nachfrage nach mobilen Datendiensten im Versorgungsbereich des jeweiligen Standortes ab. Von der konkreten Auswahl an Frequenzen hängen wiederum die Zellgröße und damit die Dichte an Mobilfunkstandorten ab.

An den Mobilfunkstandorten wird gemäß der verfügbaren Standortinformationen im Durchschnitt ein Frequenzspektrum von [REDACTED] (BuG) eingesetzt. Es ist allerdings gängige Praxis, dass Mobilfunknetzbetreiber für die Frequenznutzung zwar Standortbescheinigungsverfahren anstrengen, die Frequenzen nach Vorliegen der Genehmigung aber nicht zwangsläufig auch alle einsetzen. Insoweit könnte die Abschätzung der vorhandenen Übertragungskapazität an den Standorten überschätzt werden.

Marktbefragungen ergeben, dass die etablierten Mobilfunknetzbetreiber in sehr unterschiedlicher Weise das ihnen zugeteilte Frequenzspektrum verwenden. [REDACTED]

[REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED] (BuG). Eine einfache Skalierung der Ergebnisse ist damit nicht möglich.

Der Aufbau zusätzlicher Kapazitäten erfolgt sowohl durch eine weitere Verdichtung von Mobilfunkse-
 deanlagen als auch durch den Einsatz zusätzlicher Frequenzen. In regelmäßigen Abständen werden
 deshalb auch Antennen an Bestandsstandorten ausgetauscht, sodass zusätzliche Frequenzen am
 Standort eingesetzt werden können. [REDACTED]

[REDACTED] (BuG). Die
 genaue Quantifizierung ist aus Gründen von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen im Rahmen dieser
 Studie nicht möglich.

3.6.3 Kapazitätsbedarf für kommerzielle Mobilfunkdienste

Über die aktuelle Auslastung der Mobilfunknetze veröffentlichen die Mobilfunknetzbetreiber keine Da-
 ten. Somit können auch keine generellen Aussagen über Engpässe oder nicht genutzte Kapazitäten
 getroffen werden. Ebenso wird die Verkehrslast in den Mobilfunknetzen der etablierten Mobilfunknetz-
 betreiber vor dem Hintergrund ihrer regionalen oder lokalen Marktanteile sehr unterschiedlich ausfal-
 len.

Die Abschätzung des künftigen Mobilfunkverkehrs basiert daher auf den folgenden generischen An-
 nahmen. Die Nachfrage nach mobilen Datendiensten [33] ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich
 angestiegen. Tabelle 7 zeigt, dass Wachstumsraten in einer Größenordnung von 50% bestehen.

Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Datenverkehr pro Jahr (in Petabyte)	575	913	1.388	1.993	2.757	3.972
Datenverkehr pro Monat (Ø) (in Petabyte)	48	76	116	166	230	331
Anstieg zum Vorjahr	46%	59%	52%	44%	38%	44%
Datennutzung pro User/Monat (in Gigabyte)	0,44	0,70	1,06	1,53	2,14	3,08

Tabelle 7: Übersicht des Datenverkehrs pro Jahr 2015 – 2020

Die Entwicklung des Datenverkehrs bei den etablierten Mobilfunknetzbetreibern in den vergangenen
 drei Jahren zeigt Abbildung 15.

Im Jahresbericht der Bundesnetzagentur ist für das Jahr 2020 in Deutschland eine mobile Datennut-
 zung von ca. 4.000 Mio. Gigabyte angegeben. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Datennutzung
 von 4 GByte pro Monat und Einwohner. Unter der Annahme, dass jeder Nutzer kontinuierlich Daten-
 dienste abrufen würde sich so eine mittlere Datenrate von 12 Mbit/s pro 1.000 Einwohner ergeben. Bei
 einer Verdoppelung der Datenrate alle zwei Jahre würde dieser durchschnittliche Wert auf etwa
 100Mbit/s pro 1.000 Einwohner bis Ende des Jahres 2026 ansteigen.

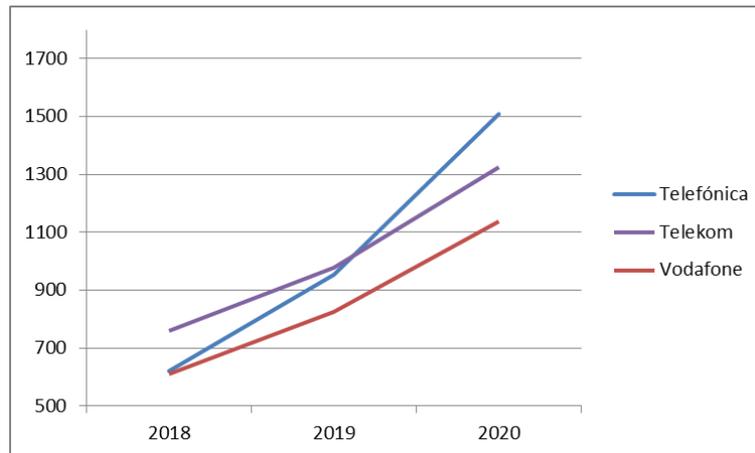


Abbildung 15: Datenverkehr nach Mobilfunknetzbetreibern (in Petabytes)¹³

In der Literatur wird ausgeführt, dass die vorzuhaltenden Kapazitäten an einem Standort bei dem Fünf- bis Zehnfachen des Mittelwerts liegen [34], [35]. Demnach ist zu erwarten, dass künftig eine Datenrate von bis zu 1 Gbit/s pro 1.000 Einwohner an den Standorten verfügbar sein wird.

Um den Kapazitätsbedarf bei gegebener Nachfrage abzuschätzen wird die Nachfrage in der Hauptverkehrsstunde¹⁴, auch ‚Busy Hour‘ genannt, herangezogen. Die Nutzernachfrage in der Hauptverkehrsstunde wird durch Multiplikation der täglichen Nutzernachfrage mit dem „Busy Hour Anteil“ am Tag berechnet, woraus sich die maximale Nutzernachfrage in der Hauptverkehrsstunde ergibt. Unter der Annahme, dass sich der [REDACTED]¹⁵ (BuG) beläuft, beträgt die [REDACTED]¹⁶ (BuG).

Mit der Datenrate in der Hauptverkehrsstunde wird unter Berücksichtigung des Sachverhalts, dass je nach Spezifika in der Funkzelle ein unterschiedlicher Umfang von Frequenzen zur Erbringung einer Datenrate notwendig ist, berechnet, wie viele Universaldiensthaushalte bei einer theoretischen, jederzeit gegebenen Verfügbarkeit von 100% der Mindestdatenrate im Downlink von dieser Funkzelle versorgt werden können.

Eine Überbuchung von Mobilfunkhaushalten wird nicht modelliert, da keine Informationen über die Gleichzeitigkeit der Nutzung vorliegen. Da Mobilfunkzellen nie voll ausgelastet sein sollten, wird die Kapazität, die Teilnehmern in der Funkzelle zur Verfügung steht, auf 80% begrenzt. Dieser Wert resultiert aus Expertenbefragungen.

¹³ Quelle: Konzernberichte Telefónica und Vodafone, Telekom basiert auf einer Schätzung auf Basis von Konzernberichten und Daten der Bundesnetzagentur.

¹⁴ Unter der Hauptverkehrsstunde („Busy Hour“) versteht man einen Tageszeitabschnitt von vier aufeinanderfolgenden Viertelstunden, in dem die betrachtete Verkehrsgröße, beispielsweise der Verkehrswert, maximal ist.

¹⁵ Der „Busy Hour Anteil“ basiert auf Berechnungen im Rahmen des WIK Mobilfunkkostenmodell zur Bestimmung der MTR (Mobile Termination Rates) im Verfahren 2019.

¹⁶ [REDACTED] (BuG).

3.6.4 Kapazitätsbedarf für den Universaldienst

Der Kapazitätsbedarf für die in die jeweilige Funkzelle fallenden potenziellen Universaldiensthäushalte hängt maßgeblich von den Empfangsbedingungen für diesen Teilnehmer ab. Die Abbildung der Empfangsleistung am Ort des Universaldiensthäushaltes in den Bandbreitenbedarf zur Bereitstellung der benötigten Datenrate beruht auf den Analysen in Abschnitt 2.2 und ist in Abbildung 16 illustriert.

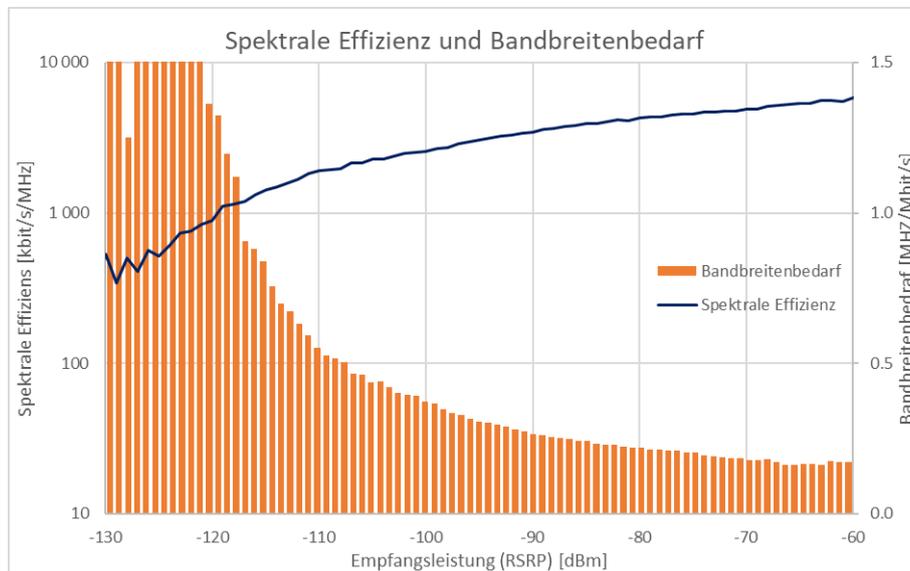


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen spektraler Effizienz und Bandbreitenbedarf in Abhängigkeit von der Empfangsleistung (RSRP)

Die spektrale Effizienz entspricht der anhand der Mobilfunkmessungen festgestellten Leistungsfähigkeit von LTE (vgl. Abbildung 7). Der Kehrwert der spektralen Effizienz entspricht dem Bandbreitenbedarf, der im Diagramm in der Einheit MHz pro Mbit/s dargestellt ist. Für die Erbringung eines Mobilfunkdienstes mit einer Datenrate von 10 Mbit/s im Downlink sind demnach bei einer Empfangsleistung von -108 dBm 5 MHz Bandbreite erforderlich. Bei einer Empfangsleistung von -120 dBm wird dagegen bereits eine Bandbreite von 11 MHz belegt.

Da die tatsächlich am Standort genutzte Frequenzausstattung nicht bekannt ist, wird in der Praxis die Anzahl der versorgbaren Universaldiensthäushalte unter diesem modellierten Maximalwert liegen, sofern alle potenziellen Universaldiensthäushalte auch einen Universaldienst beanspruchen.

An dieser Stelle sei bereits darauf verwiesen, dass die nachfolgenden Modellrechnungen eine Einzelfallprüfung nicht ersetzen können. Um detailliertere Aussagen über das Zusammenspiel von vorhandenen Kapazitäten in Funkzellen und einer (ggf. priorisierten) Datennutzung von Universaldiensthäushalten treffen zu können, sind exakte Daten (z. B. über den Verkehrsverlauf in den Funkzellen) auszuwerten, die den Autoren der Studie nicht vorliegen.

3.6.5 Ergebnisse der regionalen Kapazitätsanalyse

Von potenziell 52.332 Haushalten, die einen Universaldienst in der betroffenen Region beanspruchen könnten, könnte ein Mobilfunknetzbetreiber ohne weitere Maßnahmen weniger als 12% mit LTE und/oder 5G versorgen. Können bei den Universaldienstempfängern geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Empfangsbedingungen getroffen werden (vgl. Abschnitt 2.3), erhöht sich der Anteil der

Universaldiensthaushalte nur gering. Können Maßnahmen zu einer Verbesserung der Empfangsbedingungen um im Mittel 5 dB umgesetzt werden, kann ein Anteil von 14% erzielt werden. Bei Verbesserungsmaßnahmen mit im Mittel 10 dB Gewinn werden etwas mehr als 16% der Universaldiensthaushalte innerhalb der verfügbaren Kapazitäten bedienbar.

Eine vollständige Versorgung sämtlicher Universaldiensthaushalte durch die drei etablierten Mobilfunknetzbetreiber ist somit ohne weitere Maßnahmen nicht möglich, wenn die Mindestdatenrate jederzeit für den Universaldiensthaushalt verfügbar sein muss. Die Analyse für das Münsterland zeigt des Weiteren, dass eine Prüfung der vorhandenen und künftigen Übertragungskapazitäten für fast alle Mobilfunkstandorte mit ihren versorgten Flächen notwendig ist.

Darüber hinaus hängt der Anteil der vom Mobilfunk erreichbaren Universaldiensthaushalte stark von den zukünftigen Anforderungen an den Universaldienst ab. Wird (künftig) die erforderliche Mindestdatenrate beispielsweise auf 20 Mbit/s erhöht und verändert sich der Umfang der am jeweiligen Standort eingesetzten Frequenzen nicht, so können pro Mobilfunknetzbetreiber nur noch 6% bis 8% der Haushalte versorgt werden. Reduziert sich dagegen die festgelegte Mindestdatenrate auf beispielsweise 5 Mbit/s, so kann ein Mobilfunknetzbetreiber je nach genutzten Verbesserungsmaßnahmen einen Anteil von 24% bis 32% der Universaldiensthaushalte versorgen.

Vor dem Hintergrund der weiter steigenden Nachfrage nach Mobilfunkdienste, wird sich auch der Kapazitätsbedarf für kommerzielle Mobilfunkdienste erhöhen. Unter der Annahme, dass die Nachfrage nach mobilen Datendiensten pro Jahr um 50% steigt, läge die mittlere Datenrate von 1000 Kunden Ende des Jahres 2026 bei ca. 100 Mbit/s. Die Nachfrage in der Hauptverkehrsstunde läge dann bei 200 Mbit/s. Bei unveränderter Frequenzausstattung könnten dann bei 10 Mbit/s als Mindestdatenrate nur noch 4% bis 5% der Universaldiensthaushalte versorgt werden.

Steigt dagegen die Mindestdatenrate auf 20 Mbit/s im Jahr 2026, so verringert sich der Anteil an versorgbaren Universaldiensthaushalten auf rund 2%. Diese Abschätzung kann eine Einzelfallprüfung von vorhandenen und künftigen Übertragungskapazitäten in Funkzellen nicht ersetzen.

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Von den in Abschnitt 3.2 ermittelten 2.134.307 Haushalten, die derzeit über einen leitungsgebundenen Anschluss von weniger als 30 Mbit/s im Downlink verfügen, können 2.060.041 Haushalte gemäß den Crowd-Daten über eine Mobilfunkversorgung erreicht werden, die grundsätzlich mindestens 10 Mbit/s im Downlink ermöglicht. 27.963 Haushalte verfügen aktuell über keine ausreichende Mobilfunkversorgung.

Für 46.302 Haushalte kann auf Basis der Crowd-Daten keine verlässliche Aussage über deren Mobilfunkversorgung getroffen werden. Für diese Haushalte weist das Mobilfunk-Monitoring der Bundesnetzagentur aus, dass 42.483 Haushalte über eine Mobilfunkversorgung mit LTE verfügen müssten, deren Qualität jedoch unbekannt ist. Für die verbleibenden 3.820 Haushalte zeigen die Daten des Mobilfunk-Monitoring, dass derzeit keine LTE-Versorgung in ausreichender Qualität vorliegt.

Insofern befinden sich anhand der Crowd-Daten und der ergänzenden Daten des Mobilfunk-Monitoring aktuell 31.783 potenzielle Universaldiensthaushalte in sogenannten weißen Flecken des Mobilfunks.

Für einige dieser Haushalte ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren mit einer ausreichenden Mobilfunkversorgung gerechnet werden kann, da sie in der Nähe von Verkehrswegen liegen und insofern zu erwarten ist, dass die Versorgungsaufgaben aus dem Jahr 2019 greifen werden. Unter dieser

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Annahme ist damit zu rechnen, dass weitere 14.887 Haushalten zukünftig ausreichend mit Mobilfunk versorgt sein werden. Damit verbleiben 16.896 potenzielle Universaldiensthaushalte, die auch künftig nicht von LTE- und/oder 5G-Netzen versorgt werden.

Für die weitere Interpretation der Ergebnisse ist eine Aufschlüsselung der zu versorgenden Haushalte in die im Mobilfunk üblicherweise verwendeten Gebietskategorien hilfreich. Dies hängt damit zusammen, dass sich typischerweise die Frequenzausstattung (z. B. Frequenzen unterhalb und oberhalb von 1 GHz) und die Menge des eingesetzten Frequenzspektrums an Standorten in den jeweiligen Gebietskategorien unterscheiden. Bei der Planung von Mobilfunknetzen wird zwischen städtischen (urbane), vorstädtischen (suburbane) und ländlichen (rurale) Gebieten unterschieden. Die Aufteilung der potenziellen Universaldiensthaushalte auf die verschiedenen Gebietskategorien ist in Tabelle 8 gezeigt¹⁷:

Gebietskategorie	Anteil Haushalte
Städtisch (städtische Region)	27,4%
Vorstädtisch (Region mit Verstädterungsansätzen)	38,5%
Ländlich (ländliche Region)	34,1%

Tabelle 8: Übersicht der Gebietskategorien der potenziellen Universaldiensthaushalte

In Tabelle 9 sind die wesentlichen Ergebnisse der Datenanalyse zusammengefasst, wobei ergänzend die Gesamtergebnisse für die drei Gebietskategorien aufgeschlüsselt sind.

Kategorie	Siedlungsstrukturelle Regionstypen gemäß BBSR 2017							
	Gesamt		Städtisch		Vorstädtisch		Ländlich	
	Haushalte	Potenzielle Universaldiensthaushalte	Haushalte	Potenzielle Universaldiensthaushalte	Haushalte	Potenzielle Universaldiensthaushalte	Haushalte	Potenzielle Universaldiensthaushalte
Grundgesamtheit (vgl. Abschnitt 3.2):								
Gesamt	42.157.126	2.134.307	20.596.732	585.648	12.903.680	820.803	8.655.235	727.470
Analyse der Crowd-Daten (vgl. Abschnitt 3.3):								
Haushalte mit einer prinzipiell ausreichenden Mobilfunkversorgung	41.896.665	2.060.041	20.571.581	578.695	12.805.209	790.644	8.518.836	690.506
Haushalte mit einer unzureichenden Mobilfunkversorgung	110.321	27.963	12.501	2.727	47.400	13.271	50.372	11.957
Haushalte in Gebieten, für die nicht ausreichend Crowd-Daten vorliegen	150.140	46.302	12.650	4.226	51.071	16.888	86.027	25.007

¹⁷ Die Gebietsaufteilung beruht auf den Siedlungsstrukturellen Regionstypen gemäß BBSR von 2017 (siehe BBSR – Raumbeobachtung – Laufende Raumbeobachtung – Raumabgrenzung (bund.de)).

	Siedlungsstrukturelle Regionstypen gemäß BBSR 2017							
	Gesamt		Städtisch		Vorstädtisch		Ländlich	
Analyse Mobilfunk-Monitoring für Haushalte in Gebieten, für die nicht ausreichend Crow-Daten vorliegen (vgl. Abschnitt 3.4):								
Haushalte, die laut Mobilfunk-Monitoring über eine prinzipiell ausreichende LTE-Versorgung verfügen	137.415	42.483	11.225	3.879	45.437	14.720	80.377	23.709
Haushalte die laut Mobilfunk-Monitoring über keine ausreichende LTE-Versorgung verfügen	12.725	3.820	1.425	347	5.634	2.168	5.650	1.298
Analyse Ausbauprognose für unzureichend versorgte Haushalte gemäß Crow-Daten bzw. Mobilfunk-Monitoring (vgl. Abschnitt 3.5):								
Haushalte, die erwartet über Versorgungsaufgaben entlang von Verkehrswegen erschlossen werden	58.653 + 4.287 62.940	13.787 + 1.100 14.887	6.514 + 821 7.335	1.555 + 157 1.712	26.668 + 1.887 28.555	6.803 + 601 7.404	25.432 + 1.570 27.002	5.423 + 339 5.762
Haushalte, die erwartet nicht über Versorgungsaufgaben entlang von Verkehrswegen erschlossen werden	51.688 + 8.438 60.106	14.176 + 2.720 16.896	5.987 + 604 6.591	1.172 + 190 1.362	20.732 + 3.747 24.479	6.467 + 1.567 8.034	24.940 + 4.080 29.020	6.533 + 959 7.492
damit:								
Haushalte, die prinzipiell über Mobilfunk mit einem Universaldienst versorgt werden könnten	41.896.665 + 137.415 + 62.940 42.097.020 (99,9%)	2.060.041 + 42.483 + 14.887 2.117.411 (99,2%)	20.571.581 + 11.225 + 7.335 20.590.141 (99,9%)	578.695 + 3.879 + 1.712 584.286 (99,8%)	12.805.209 + 45.437 + 28.555 12.879.201 (99,8%)	790.644 + 14.720 + 7.404 812.769 (99,0%)	8.518.836 + 80.377 + 27.002 8.626.215 (99,7%)	690.506 + 23.709 + 5.762 719.977 (99,0%)
Haushalte, die ohne weitere Ausbaumaßnahmen vermutlich nicht über Mobilfunk mit einem Universaldienst versorgt werden können	60.106 (0,1%)	16.896 (0,8%)	6.591 (0,1%)	1.362 (0,2%)	24.479 (0,2%)	8.034 (1,0%)	29.020 (0,3%)	7.493 (1,0%)

Tabelle 9: Ergebnisse der Datenanalyse hinsichtlich der Haushalte je Siedlungstyp

Von der Grundgesamtheit der potenziellen Universaldienstnachfrage könnten zum Zeitpunkt dieser Analyse 98,6% der Haushalte grundsätzlich Telekommunikationsdienste auf Basis von LTE mit einer ausreichenden Qualität nutzen. Durch zukünftige Ausbaumaßnahmen zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben könnte dieser Anteil auf 99,2% gesteigert werden. Die Frage, ob in der Praxis die an den Mobilfunkstandorten vorhandene Übertragungskapazität zur Versorgung sämtlicher in der jeweiligen Funkzelle angesiedelten Universaldiensthäushalte ausreicht, kann mit diesen Daten noch nicht beantwortet werden.

Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes

Anhand der für das Münsterland vorgenommenen Abschätzung (vgl. Abschnitt 3.6), kann erwartet werden, dass ein Netzbetreiber etwa 12% bis 16% der potenziellen Universaldiensthaushalte mit dem jeweils zur Verfügung stehenden und entsprechend an den Standorten angemeldeten Spektrum versorgen können müsste. Unterstellt man (mittelfristig) einen vergleichbaren Ausbau der drei Mobilfunknetze in Deutschland, können demnach zwischen einem Drittel und der Hälfte der potenziellen Universaldiensthaushalte über Mobilfunk erreicht werden. Bei der Versorgung weiterer Universaldiensthaushalte über Mobilfunk würden die aktuell geplanten Kapazitäten nicht ausreichen, um sowohl den Universaldienst in der geforderten Qualität zu erbringen als auch die bestehenden Mobilfunkkunden mit der gewohnten Qualität zu bedienen.

Für 0,8% der potenziellen Universaldiensthaushalte (entspricht etwa 17.000 Haushalten in Deutschland) stellt der Mobilfunk sowohl derzeit als auch in absehbarer Zukunft aufgrund der zu erwartenden Versorgungssituation keine geeignete Alternative zur Erbringung des Universaldienstes dar.

4. Interpretation der Ergebnisse

Worum geht es in diesem Kapitel?

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Datenanalyse dargestellt und interpretiert. Von der Grundgesamtheit von 2,1 Mio. Haushalten ohne eine ausreichende Festnetzversorgung befinden sich mehr als 2 Mio. Haushalte (und damit mehr als 98%) in Gebieten mit einer Mobilfunkversorgung, die grundsätzlich – unter dem für Mobilfunk typischen Nutzungsverhalten – Datenraten von 10 Mbit/s und mehr erlaubt. Ob die Mobilfunkversorgung in jedem Fall geeignet ist, einen Universaldienst zu ermöglichen, ist damit noch nicht geklärt.

Für etwa 32.000 Haushalte stellt sich die aktuelle Mobilfunkversorgung als nicht ausreichend dar. Für etwa 15.000 dieser Haushalte ist über erwartete Ausbaumaßnahmen im Rahmen der Erfüllung der Versorgungsaufgaben zukünftig noch mit einer ausreichenden Mobilfunkversorgung zu rechnen. Für die verbleibenden 17.000 Haushalte müssten entweder die Bestandsinfrastruktur mit zusätzlichen Frequenzen aufgerüstet oder neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden.

Eine Abschätzung der aus einer Aufrüstung resultierenden Investitionen und betrieblichen Kosten kann ohne detaillierte Kenntnis über die Erweiterbarkeit von Bestandsstandorten für jeden der etablierten Mobilfunknetzbetreiber nicht erfolgen.

Auf Basis der Prognose über die Wirkung von Versorgungsaufgaben für die etablierten Mobilfunknetzbetreiber müssten für etwa 17.000 Haushalte neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden, sofern der Universaldienst über Mobilfunk erbracht werden sollte. Entsprechende Investitionen in Mobilfunkstandorten und eine Glasfaseranbindung der jeweiligen Standorte belaufen sich auf eine Größenordnung von mehr als 775 Mio. Euro. Pro Haushalt, der den Universaldienst bezieht, würden Investitionen in einer Größenordnung von ca. 46.000 Euro notwendig.

Eine Modellierung von vorhandenen Funkkapazitäten und potenziellen Universaldiensthaushalten für das Münsterland zeigt, dass ein (exemplarisch betrachteter) Mobilfunknetzbetreiber lediglich etwa 12% bis 16% der potenziellen Universaldiensthaushalte mit 10 Mbit/s versorgen könnte. Marktbefragungen zeigen, dass diese Größenordnungen nicht 1:1 auf die anderen Mobilfunknetzbetreiber übertragbar sind. Selbst wenn die anderen Mobilfunknetzbetreiber über vergleichbare Kapazitäten verfügten, könnten nicht sämtliche potenzielle Universaldiensthaushalte über LTE- und/oder 5G-Netze der etablierten Mobilfunknetzbetreiber versorgt werden.

Eine detaillierte Analyse über die Eignung der LTE- und/oder 5G-Netze hinsichtlich der Erbringung des Universaldiensts erfordert Einzelfallprüfungen, die voraussichtlich einen Großteil sämtlicher Mobilfunkstandorte in Deutschland erfassen würden.

4.1 Interpretation der Mobilfunkversorgung

4.1.1 Universaldienst in mit Mobilfunk ausreichend versorgten Flächen

Auf Basis der hier vorgenommenen Abschätzung über potenzielle Haushalte, die einen Universaldienst nachfragen könnten, zeigt sich, dass sich für mehr als 2,1 Mio. Haushalte oder 98,6% aller potenziellen Universaldiensthaushalte eine Mobilfunklösung ergeben könnte. Durch zukünftige Ausbaumaßnahmen zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben könnte dieser Anteil auf 99,2% gesteigert werden.

Ob die Bestandsinfrastrukturen bzw. die weiteren Ausbaumaßnahmen in jedem Fall auch über eine ausreichende Kapazität zur Erbringung des Universaldienstes verfügen, lässt sich mit den verwendeten Daten nicht klären. Da der Mobilfunk ein gemeinsam genutztes Medium (*Shared Medium*) darstellt, d. h. die sich in einer Funkzelle bestehende Übertragungskapazität auf die in der Funkzelle eingebuchten Nutzer aufteilt, hängt die technische Eignung des Mobilfunks und die Auswirkungen einer Priorisierung von Universaldienstkunden auf Mobilfunkteilnehmer in den Funkzellen von weiteren Parametern wie bspw. der Verkehrslast und den eingesetzten Frequenzen ab.

Sofern die vorhandenen Kapazitäten nicht ausreichen, die Universaldiensthaushalte mit entsprechenden Diensten zu versorgen, wäre entweder die Erhöhung der Kapazität (Standortausbau) oder die Neuerrichtung von Standorten notwendig. Eine Erhöhung der Kapazität ist dann vergleichsweise mit geringen Kosten verbunden, wenn bisher an dem Standort nur ein Frequenzband mit 10 MHz im Downlink eingesetzt wird. Angesichts der weiterhin steigenden Nachfrage nach mobilen Datendiensten ist nicht damit zu rechnen, dass der Einsatz von weiteren 10 MHz mit hohen Kosten verbunden sein wird.

4.1.2 Universaldienst in mit Mobilfunk unzureichend versorgten Flächen

Von der Grundgesamtheit an Haushalten, die im Rahmen dieser Studie betrachtet werden, befinden sich auf Basis der aktuellen Funkversorgungsanalyse etwa 32.000 Haushalte in Flächen, die eine Versorgung mit 10 Mbit/s aktuell nicht ermöglichen. Um diese Datenrate im Downlink dennoch anbieten zu können, müssten entweder

- die Empfangsbedingungen für die betroffenen Haushalte signifikant verbessert werden,
- der Einsatz zusätzlicher Frequenzen im Bereich unterhalb von 1 GHz in Betracht gezogen werden und/oder
- neue Mobilfunkstandorte errichtet werden (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Sofern sich die Dichte der Standorte am Einsatz von Flächenspektrum, d. h. Frequenzen unterhalb von 1 GHz, orientiert, bestehen zwei Optionen, Kapazitäten zu erhöhen, die jedoch mit unterschiedlichen Konsequenzen verbunden sind.

- Die notwendigen Kapazitätserhöhungen können nur mit dem Einsatz von Kapazitätsspektrum (Frequenzen oberhalb von 1 GHz) durchgeführt werden. Da diese Frequenzen aus physikalischen Gründen eine geringere Reichweite haben, müsste eine Netzverdichtung durch die Errichtung weiterer Standorte vorgenommen werden.
- Kurzfristig könnten jedoch, wenn noch technisch möglich, zusätzliche Flächenfrequenzen zur Kapazitätserhöhung eingesetzt werden. Damit wäre maximal der Einsatz von 2 x 20 MHz möglich.

Alternativ kann durch den zusätzlichen Einsatz von 5G und der Hilfe von *Beamforming* eine Verbesserung der Empfangssituation erreicht werden. Ob jedoch sämtliche davon betroffene Standorte auch tatsächlich mit zusätzlichen Frequenzen bzw. 5G-Technologie ausgestattet werden können, kann für das gesamte Bundesgebiet im Rahmen dieser Studie nicht festgestellt werden. Die Erhöhung von Übertragungskapazitäten hängt davon ab, ob zusätzliche Antennen am Standort angebracht werden können und ob mit zusätzlichen Antennen EMVU-Grenzwerte eingehalten werden können.

Auf Basis der Analysen in [30], [31], [32] werden die Investitionskosten zur Erweiterung eines bestehenden Mobilfunkstandorts pauschal mit 25.000 Euro angesetzt. An wie vielen Standorten solche Investitionen notwendig sein werden, kann im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Dazu müssten mehr Daten über die technische Beschaffenheit der Mobilfunkstandorte vorliegen.

Zusammenfassend hängt die Entscheidung, ob die Bestandsinfrastruktur erweitert werden kann oder es einen Neubau geben muss, vom Einzelfall ab.

4.1.3 Universaldienst in mit Mobilfunk nicht versorgten Flächen

Aus der Analyse geht hervor, dass etwa 17.000 Haushalte aktuell und voraussichtlich auch zukünftig über keine ausreichende LTE-Mobilfunkversorgung verfügen. Sofern diese Haushalte einen Universaldienst auf Basis des öffentlichen Mobilfunks erhalten sollen, müssen also neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden.

Um die Kosten der neuen Standorte abzuschätzen, wurde im Rahmen einer Modellrechnung, die die topografischen Besonderheiten nicht betrachtet, modelliert, dass voraussichtlich 2.153 neue Mobilfunkstandorte notwendig wären, eine entsprechende LTE-Versorgung aufzubauen. Hierbei wird angenommen, dass ein neuer Mobilfunkstandort eine Fläche von 12 km² abdeckt.¹⁸

Um die notwendigen Investitionskosten abgeschätzt zu können, liegen den weiteren Berechnungen folgende Annahmen zu Grunde [30], [31], [32]:

- Die Investitionen zur Errichtung eines neuen Mobilfunkstandorts werden pauschal mit 170.000 Euro angesetzt.
- Die Tiefbaukosten zur Verlegung von Leerrohren mit Glasfaser werden mit 85 Euro pro Meter angesetzt. Anbindungen über Richtfunk werden nicht betrachtet.

Bei der Modellierung der Tiefbaukosten werden zwei Szenarien betrachtet:

- Anbindung des Mobilfunkstandorts an den nächstgelegenen Hauptverteiler bzw.
- Anbindung an Glasfaserinfrastrukturen entlang von Verkehrswegen.

Letzteres Szenario begründet sich mit der Erfüllung von Versorgungsaufgaben und unterstellt, dass Standorte entlang von Verkehrswegen mit Glasfaser angebunden werden.

Bei Investitionen für passive und aktive Technik am Standort ergeben sich damit Investitionen in einer Größenordnung von 366 Mio. Euro (2.153 * 170.000 Euro). Zusätzlich sind die Investitionen in die Anbindung der Standorte an das Kernnetz des jeweiligen Mobilfunknetzbetreibers zu betrachten. Damit ausreichende Übertragungskapazitäten den Haushalten angeboten werden können, wird hierbei mit einer Glasfaseranbindung von Mobilfunksendeanlagen gerechnet. Die nächstgelegene

¹⁸ Dies ist eine typische Flächenversorgung eines Standorts in Deutschland.

Glasfaserinfrastruktur könnte dann entlang von Verkehrswegen liegen, weil hier die Versorgungsauf-lagen der BNetzA greifen. Alternativ wäre eine Anbindung über den nächstgelegenen Hauptverteiler im Festnetz möglich. Die Modellrechnungen zeigen, dass eine durchschnittliche Anbindungs-länge für die Standorte von 2,2 km besteht. Bei Kosten von 85 Euro pro Meter ergeben sich somit Investitionen in Tiefbauarbeiten in einer Größenordnung von durchschnittlich fast 190.000 Euro pro Standort. Damit müssten für die Anbindung aller Standorte Investitionen in einer Größenordnung von 409 Mio. Euro getätigt werden. Potenzielle Synergien mit dem Glasfaserausbau sind hierbei nicht berücksichtigt.

In Summe ergibt sich ein Investitionsvolumen von 775 Mio. Euro. Im Durchschnitt müssten für jeden der knapp 17.000 Universaldiensthaushalte also Investitionen von knapp 46.000 Euro getätigt wer-den.

4.2 Interpretation der Kapazitätsanalyse

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass die Frage, inwieweit LTE- und/oder 5G-Netze der etab-lierten Mobilfunknetzbetreiber zur Realisierung des Universaldiensts eingesetzt werden können, maß-geblich von der Festlegung der Mindestdatenrate und deren zeitlicher Verfügbarkeit abhängt. Hierbei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass LTE und auch 5G eine priorisierte Datenübertragung zwar technisch unterstützen, die Mobilfunknetze aber darauf nicht ausgelegt sind.

Die Analysen zeigen des Weiteren, dass bei einer Festlegung von 10 Mbit/s im Downlink und einer unbegrenzten Verfügbarkeit dieser Datenrate, alle drei etablierten Mobilfunknetzbetreiber in der Praxis weniger als die Hälfte der Universaldiensthaushalte versorgen könnten. Da die mittlere Datenrate pro 1.000 Einwohner bei ca. 12 Mbit/s liegt, ist es wenig überraschend, dass nur begrenzt Übertragungs-kapazitäten für einzelne Kunden, nämlich den Universaldienstkunden, von jederzeit 10 Mbit/s möglich sind. Somit müssten für die Erbringung des Universaldienstes noch weitere Netzbetreiber mit alterna-tiven Kommunikationsnetzen verpflichtet werden.

An dieser Stelle ist nochmals zu erwähnen, dass bei den Berechnungen als Referenz für die nutzbaren Frequenzen an einem Standort die für eine Nutzung beantragten Frequenzbänder gewählt wurden. Ob diese Frequenzen tatsächlich genutzt werden, ist nicht bekannt. Markterfahrungen zeigen, dass die tatsächliche Nutzung an bestimmten Standorten merklich geringer ist. [REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] (BuG).

Im Übrigen müsste vor der Erbringung des Universaldienstes geprüft werden, welche Kapazitäten in den jeweiligen Mobilfunknetzen zur Erbringung des Universaldiensts tatsächlich vorhanden sind. Da die etablierten Mobilfunknetzbetreiber über regional sehr unterschiedliche Marktanteile verfügen, ist damit zu rechnen, dass die Auslastung der Funkzellen unterschiedlich ausfällt. Sofern eine solche be-treiberindividuelle Kapazitätsprüfung unterbleibt, könnte es im Rahmen der Erbringung des Universaldiensts dazu kommen, dass ein verpflichteter Mobilfunknetzbetreiber Kapazitäten aufrüstet und ent-sprechende Investitionen über den Universaldienstfond refinanziert, die angesichts von verfügbaren Kapazitäten in anderen Mobilfunknetzen hätten vermieden werden können.

Das Konzept des Universaldienstes ist im TKG dynamisch angelegt. Die Festsetzung der Mindestan-forderungen ist zunächst nach oben beschränkt (siehe Abschnitt 1.1): So sollen jeweils aktuell (bzw. in naher Zukunft) bereits über 80% der Bevölkerung einen Breitbandanschluss faktisch nutzen, der den

Anforderungen an einen Universaldienst genügt.¹⁹ Hinsichtlich der künftigen Penetration von Breitbandanschlüssen zeigt sich der Trend, dass Anschlüsse mit Datenraten oberhalb von 100 Mbit/s zunehmend attraktiver werden. Eine Prognose über die Entwicklung der vermarkteten Downstream-Datenraten in Deutschland bis zum Jahr 2025 zeigt, dass im Jahr 2023 mehr als 80% der Haushalte einen Breitbandanschluss mit mindestens 30 Mbit/s vermarkteter Bandbreite nutzen werden [36]. Somit ist absehbar, dass kurz- bis mittelfristig die Mindestdatenrate für den Universaldienst angepasst werden könnte. Weitergehende Analysen für das Münsterland zeigen, dass bereits bei einer Anhebung der Mindestdatenrate im Downlink auf 20 Mbit/s nur noch maximal 18% der Universaldiensthushalte versorgt werden könnten. Um dann Haushalte, die bereits über Mobilfunk einen Universaldienst auf Basis einer Datenrate von 10 Mbit/s bezögen, nicht schlechter zu stellen, müssten die verpflichteten Mobilfunknetzbetreiber die entsprechenden Übertragungskapazitäten erhöhen oder eine Netzverdichtung vornehmen.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass in Abhängigkeit der tatsächlichen Parameter (u. a. Mobilfunkteilnehmer in der Funkzelle, Verkehrslast in der Funkzelle, Anzahl Universaldiensthushalte) am jeweiligen Standort das Risiko besteht, dass andere Mobilfunkteilnehmer bei ihrer Mobilfunknutzung Einschränkungen wahrnehmen werden. Ohne Kenntnis der relevanten Parameter lässt sich deshalb auch nicht abschätzen, ab welcher Verfügbarkeitsrate der Mindestdatenrate keine negativen Auswirkungen auf andere Nutzer in der Funkzelle ausgehen.

¹⁹ Die Bandbreite muss, um Marktverzerrungen möglichst gering zu halten, von 80% der angeschlossenen Haushalte auch tatsächlich genutzt werden. Vergleiche hierzu auch Europäische Kommission, Arbeitspapier COCOM10–31 Final, S. 4.

5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Zukünftig wird in Deutschland ein novelliertes Universaldienstregime für den Internetzugang gelten. Bei der Festlegung des novellierten Universaldienstes stellt sich die Frage, ob dieser Dienst auch durch öffentliche Mobilfunknetze durch den Einsatz von 4G- und/ oder 5G-Technologien möglich ist bzw. sein wird.

Im Rahmen dieser Analyse wurde zunächst die Mobilfunkversorgung für 2,1 Mio. Haushalte geprüft, die potenziell einen Universaldienst nachfragen könnten. Bei ca. 32.000 Haushalten ist, ohne die Analyse lokal verfügbarer Übertragungskapazitäten, festzustellen, dass die vorhandene Mobilfunkversorgung aller Mobilfunknetzbetreiber nicht ausreichen wird, einen Universaldienst mit garantierten 10 Mbit/s im Downlink zu erbringen. Damit könnte für etwa 98,6% der potenziellen Universaldiensthaushalte bereits über die bestehende Mobilfunkversorgung ein Universaldienst realisiert werden.

Etwa 15.000 Haushalte werden voraussichtlich kurz- bis mittelfristig vom erwarteten Mobilfunkausbau zur Erfüllung der Versorgungsaufgaben profitieren. Durch diese zukünftigen Ausbaumaßnahmen könnte der Anteil erreichbarer Universaldiensthaushalte somit auf 99,2% gesteigert werden. Weitere Haushalte könnten ggf. von Mobilfunkförderprogrammen profitieren. Hier sei insbesondere auf das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) konzipierte Mobilfunkförderprogramm verwiesen, welches mit Mobilfunk unzureichend versorgte Gebiete (in den nächsten drei Jahren) finanziell fördert.²⁰

Etwa 17.000 Haushalte werden kurz- bis mittelfristig nicht über Versorgungsaufgaben vom Mobilfunkausbau profitieren. Hier müssten entweder Bestandsstandorte mit zusätzlichen Frequenzen aufgerüstet oder neue Mobilfunksendeanlagen errichtet werden. Würden diese Haushalte aufgrund des Universaldienstes mit 4G und/oder 5G versorgt, müssten voraussichtlich ca. 2.150 Mobilfunkstandorte errichtet werden, womit Investitionen von ca. 46.000 Euro pro Universaldiensthaushalt verbunden wären.

Jedoch verdeutlicht eine beispielhafte regionale Analyse von Übertragungskapazitäten eines exemplarisch betrachteten Mobilfunknetzes eines Anbieters, dass unter Berücksichtigung des kapazitiven Mobilfunkausbaus derzeit lediglich zwischen 12% und 16% der potenziellen Universaldiensthaushalte mit Mobilfunk versorgt werden könnten. Damit müssten für das Gebiet mehrere Anbieter zur Erbringung des Universaldienstes verpflichtet werden. Zudem müsste für jede Funkzelle eine Prüfung der vorhandenen Übertragungskapazitäten vorgenommen werden.

Die tatsächliche Realisierung von Universaldienstanschlüssen über 4G/5G hängt somit von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl und Lage der Universaldiensthaushalte,
- Eingesetztes Frequenzspektrum am jeweils betrachteten Mobilfunkstandort,
- Verkehrsverlauf in der jeweiligen Mobilfunkzelle,
- Mindestdatenrate und Anforderungen an die Verfügbarkeit der Mindestdatenrate.

²⁰ Siehe hierzu <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/foerderprogramm-mobilfunkfoerderung.html>, zuletzt aufgerufen am 23.11.2021.

Da einzelne Mobilfunknetzbetreiber in ihren Funkzellen bisher nur wenige der zugeteilten Frequenzen einsetzen, wäre eine Erhöhung der Übertragungskapazitäten an einzelnen Standorten mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden.

Die Verbesserung der Versorgung eines spezifischen Haushaltes innerhalb einer bestehenden Mobilfunkzelle kann durch folgende Maßnahmen erreicht werden: Priorisierung, ‚Carrier Aggregation‘ (Frequenzbündelung), Nutzung von (optimal ausgerichteten) Außenantennen sowie ‚Network Slicing‘ bei 5G.

Im Fazit lässt sich zusammengefasst folgendes feststellen:

- Mobilfunk stellt sich prinzipiell als geeignet dar, den Universaldienst zu erbringen. Die konkrete Umsetzung und optimale Auswahl des Dienstleisters (Mobilfunknetzbetreibers) ist allerdings für jeden Universaldiensthaushalt im Einzelfall zu prüfen, um sowohl die Ausbaukosten zu minimieren als auch den Wettbewerb nicht bzw. geringstmöglich zu beeinflussen.
- Es wird erwartet, dass nur ein Teil der potenziellen Universaldiensthaushalte (ca. ein Drittel) ohne signifikante Netzausbaumaßnahmen über Mobilfunk erschlossen werden kann, da unter Annahme einer sehr hohen Verfügbarkeit der Mindestdatenrate (hier 10 Mbit/s) insgesamt der erwartete Kapazitätsbedarf aller potenziellen Universaldiensthaushalte die verfügbaren Mobilfunkkapazitäten übersteigen würde und ein weiterer Kapazitätsausbau nicht in allen Fällen wirtschaftlich erscheint.
- Im Hinblick auf in Zukunft steigende Kapazitätsbedarfe sollte Mobilfunk mittel- bis langfristig nur als Übergangslösung zur Erbringung des Universaldienstes angesehen werden. Universaldienstempfänger, denen zwischenzeitlich über Festnetz eine Möglichkeit zur Nutzung des Universaldienstes ermöglicht wird, sollten diese Möglichkeiten wahrnehmen, um Kapazitäten im Mobilfunknetz nicht unnötig zu belegen und somit für andere Nutzer freigeben.

Referenzen

- [1] Telekommunikationsmodernisierungsgesetz, verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/261/1926108.pdf>, zuletzt aufgerufen am 10.08.2021.
- [2] Richtlinie EU /2018/1972, verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972>, zuletzt aufgerufen am 10.08.2021.
- [3] Christian König: „Überschreitung der EU-Universaldienstvorgaben durch den Versorgungsumfang nach § 157 TKG 2021“, K&R, 07.08.2021, Kapitel II 2.
- [4] WK-Consult/zafaco: Mindestanforderungen Internetzugang, Studie für die Bundesnetzagentur, 25.11.2021.
- [5] Elektronik Kompendium: „5G-Mobilfunk-Netzarchitektur (3GPP)“, verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2402191.htm>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [6] 5G-Anbieter.info: „5G non stand alone“, verfügbar unter: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-non-standalone.html>, zuletzt aufgerufen am 26.11.2021.
- [7] GSMA: „Road to 5G: Introduction and Migration“, verfügbar unter: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [8] Rakuten: „Rakuten Mobile Successfully Verifies Data Transfer on 5G Standalone Mobile Network“, verfügbar unter: https://corp.mobile.rakuten.co.jp/english/news/press/2021/0712_01.
- [9] LTE-Anbieter.info: „5G-Frequenzen“, verfügbar unter: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [10] Bundesnetzagentur: „Frequenzauktion 2019“, verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/Mobiles-Breitband/Frequenzauktion/2019/Auktion2019.html, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [11] LTE-Anbieter.info: „5G-Reichweite“, verfügbar unter: <https://www.5g-anbieter.info/ratgeber/reichweite.html>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [12] LTEmobile: „5G-Senderreichweite mit unterschiedlichen Frequenzen“, verfügbar unter: <https://ltemobile.de/5g-sendereichweiten-mit-unterschiedlichen-frequenzen>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [13] LTE-Anbieter.info: „Ratgeber zum Highspeed-Internet per Funk“, verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/ratgeber/schnelligkeit-lte.php> und Vodafone: „GigaCube Basics“, verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/gigacube-basics-alles-was-du-wissen-solltest/#/>, zuletzt aufgerufen am 06.09.2021.
- [14] T. Neuhezki und H. Lücke (Inside Digital): „LTE-Geschwindigkeit im Vergleich“, verfügbar unter: <https://www.inside-digital.de/ratgeber/lte-cat-kategorien-geschwindigkeit> und Smartweb: „LTE-geschwindigkeit“, verfügbar unter: <https://www.smartweb.de/lte-geschwindigkeit>, zuletzt aufgerufen am 06.09.2021.
- [15] WK-Consult/Zafaco: „Mindestanforderungen Internetzugangsdienst“, Studie für die Bundesnetzagentur, 2021.
- [16] ENQT (2020): „LTE vs 5G: Latenzzeiten“, verfügbar unter: <https://enqt.de/2020/10/latenzzeiten5g/>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.

- [17] umlaut: „Mobilfunk Netztest DACH“, <https://www.umlaut.com/uploads/documents/Reports-Certificates/Mobilfunk-Netztest-DACH-connect-2021-umlaut.pdf>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [18] 3Gpp, Wannstrom, J.: „Carrier Aggregation explained“, verfügbar unter: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [19] FTS-Henning: „LTE-Signalstärke und Leistung“, verfügbar unter: <https://www.fts-henning.de/antennen/blog/lte-leistung/>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [20] 3GPP: TS 23.203, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture.
- [21] Nokia: „Network slicing explained“, verfügbar unter: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/network-slicing-explained/>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [22] ENQT: „LTE vs 5G: Reichweiten“, verfügbar unter: <https://enqt.de/2020/11/ltevs5g-reichweiten/> und 5G-Anbieter.info: „5G Frequenzen“, verfügbar unter: <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [23] Ghayas, A.: „What is Carrier Aggregation in 4G LTE Networks?“, verfügbar unter <https://commsbrief.com/what-is-carrier-aggregation-in-4g-lte-networks/> und Techplayon: „5G Carrier Aggregation – Bandwidth Classes“, verfügbar unter <https://www.techplayon.com/5g-carrier-aggregation-bandwidth-classes/>.
- [24] ENQT: „5G Datenübertragung“, verfügbar unter: <https://enqt.de/2020/11/5g-datenuebertragung/>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2021.
- [25] Lüders/Sörries (2021): „Zur Mobilfunkversorgung in Deutschland – ein Vergleich verschiedener Kriterien“, i.E.
- [26] Umlaut: „MVNO Crowd Test Connect“, verfügbar unter: <https://www.umlaut.com/uploads/documents/202011-MVNO-Crowd-Test-connect-umlaut-12.pdf>.
- [27] Caleb Phillips, Douglas Sicker, Dirk Grunwald: „Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods“, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 1, 2013, verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6165627>.
- [28] BMVI: „Breitbandatlas“, verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Breitbandausbau/Breitbandatlas-Karte/start.html>.
- [29] Entscheidung Präsidentenkammer Vergabe 2019, zuletzt abgerufen am 21.04.2021.
- [30] Sörries et al.: „Gutachterliche Betrachtung ausgewählter anreizwirksamer Parameter aus der Konzeption der Mobilfunkförderung und beratende Begleitung der Konsultations- und Genehmigungsverfahren“, 2020, verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/gutachterliche-betrachtung-mobilfunkfoerderung-konsultations-genehmigungsverfahren.pdf?__blob=publicationFile.
- [31] L. Nett, B. Sörries: „Ausgestaltung und Umsetzung eines Universaldienstregimes (insbesondere mit Blick auf die Realisierung einer Versorgung mit schnellem Internet) in anderen Ländern“, WK-Diskussionsbeitrag Nr. 474, Bad Honnef.
- [32] WK-Consult: „Der wirtschaftliche Wert von Frequenzen in den Bereichen 2,0 GHz, 3,6 GHz sowie 26 GHz“, Studie für die BNetzA (vertraulich), 2018.
- [33] VATM/Dialog-Consult: „23. TK-Marktanalyse Deutschland 2021“, 2021, verfügbar unter: https://www.vatm.de/wp-content/uploads/2021/10/VATM_TK-Marktstudie_281021_f.pdf.
- [34] Mahdy et al.: „A Clustering-Driven Approach to Predict the Traffic Load of Mobile Networks for the Analysis of Base Stations Deployment“, Journal of Sensor and Actor Networks, 2020.

- [35] B. Sörries, Franken: „Zukünftige Entwicklung des Mobilfunkdatenverkehrs in Deutschland“, Studie im Auftrag der Drillisch Netz AG, 2020.
- [36] Goldmedia: „Trendmonitor 2019“, verfügbar unter: <https://www.goldmedia.com/aktuelles/trendmonitor-2019/>.

Abkürzungen

3GPP	3 rd Generation Partnership Project	MTR	Mobile Termination Rate
BuG	Betriebs- und Geschäftsgeheimnis	MVNO	Mobile Virtual Network Operator
CA	Carrier Aggregation, Frequenzbündelung	NR	5G New Radio
CN	Core Network, Kernnetz eines Mobilfunknetzes	NSA	Non-Stand-Alone
DSS	Dynamic Spectrum Sharing	OTT	Over The Top
eMBB	enhanced Mobile Broadband	P2P	Point-to-Point
EPS	Evolved Packet System	QCI	QoS Class Identifier
EU	Europäische Union	QoS	Quality of Service
FTP	File Transfer Protocol	RAN	Radio Access Network
FTTB	Fibre to the Building	RMSE	Root Mean Square Error
FTTC	Fibre to the Cabinet	RSRP	Reference Signal Received Power
FTTH	Fibre to the Home	RTT	Round Trip Time, Paketumlaufzeit
FWA	Fixed Wireless Access	SA	Stand-Alone
GBR	Guaranteed Bit Rate	TCP	Transmission Control Protocol
GSM	Global System for Mobile	TKG	Telekommunikationsgesetz
GSMA	GSM Association	UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
HFC	Hybrid Fiber Coax	uRLLC	ultra Reliable Low Latency Communication
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	VDSL	Very High Speed Digital Subscribe Line
LoS	Line of Sight	WLAN	Wireless Local Area Network
LTE	Long Term Evolution	WWW	World Wide Web
MIMO	Multiple Input Multiple Output		



umlaut SE

Am Kraftversorgungsturm 3
52070 Aachen
Germany

www.umlaut.com
beyond@umlaut.com