

Abschätzung des Bedarfs an 5 G Mobilfunkstandorten für den Frequenzbereich von 3,6 GHz zur Füllung von Lücken zwischen den bestehenden Mobilfunkstandorten

Autoren:
Konrad Zoz
Dr. Thomas Plückerbaum
Dr. Bernd Sörries
Ahmed Elbanna

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Standortdaten im Status Quo	2
3	Modellierung der Nachfrage	6
3.1	Bestimmung der Nachfrager	6
3.2	Bestimmung der Nachfrage	8
4	Bestimmung der Kapazität der Funkzellen	11
4.1	Verteilung des Frequenzspektrums	12
4.2	Funkzell-Kapazitäten	13
4.3	Funkzellgröße	15
5	Berechnung des zukünftigen Standortbedarfs	16
5.1	Räumliche Abdeckung der bestehenden Antennenstandorte	17
5.2	Ermittlung des Standortbedarfes	18
5.2.1	Betrachtung von 5G im sub 3,4 GHz Spektrum an allen Standorten	19
5.2.2	Betrachtung von 5G bei Ergänzung von 3,6 GHz an allen bestehenden Standorten	20
5.2.3	Ermittlung der Bedarfslücken außerhalb der 3,6 GHz Abdeckung an den Bestandsstandorten	22
6	Zusammenfassung	23
	Literaturverzeichnis	25

1 Einleitung

Die Politik in Deutschland und in der europäischen Union fordert den Ausbau eines leistungsfähigen 5G Mobilfunks tief in den ländlichen Raum hinein. Implizit besteht die Erwartung, dass auch die neu vergebenen 3,6 GHz Frequenzen dafür zum Einsatz kommen. Es stellt sich die Frage, was das für den weiteren Netzausbau bedeuten würde und insbesondere, ob dies gleichbedeutend sein muss mit einem flächendeckenden Ausbau von 3,6 GHz, denn die Funkzellen für 3,6 GHz mit einem Radius von weniger als 1 km sind verhältnismäßig klein. Sie dienen eher dem Bereitstellen sehr hoher Kapazität an Stellen hoher Nachfrage als einem flächendeckendem Ausbau. Neue 3,6 GHz Standorte müssten, schon wegen der hohen Bandbreiten, die übertragen werden sollen (mehrere Gbit/s), mit Glasfasern erschlossen werden. Ein Ausbau mit derart kleinen Zellen in die Fläche hinein würde die Profitabilität eines solchen Vorhabens schon wegen der zusätzlich benötigten Antennenstandorte und deren Glasfaseranbindung in Frage stellen.

In Ihren neuen State-Aide Guidelines¹ sieht die europäische Kommission eine Förderung für den Mobilfunk vor, in einem separaten, komplementären Markt, losgelöst vom Festnetz. Dies birgt die Gefahr von hohen Subventionszahlungen, wenn das Ausbauziel eine Flächendeckung mit Funkzellen mit 3,6 GHz sein sollte.

Die vorliegende Studie geht für das Ziel einer ausreichend flächendeckenden Versorgung mit 5G in Deutschland nicht von einem flächendeckenden 3,6 GHz, sondern von einem differenzierteren Ansatz aus. Es berücksichtigt, dass alle bestehenden Frequenzen über 5G New Radio Funkschnittstellen für die 5G Dienste mitgenutzt werden können. Diese Frequenzen, je niedriger desto besser, eignen sich insbesondere zur Flächenabdeckung. Der Ausbau von 3,6 GHz Zellen soll (und wird in der Realität) nur dort erfolgen, wo entsprechende Dienste und Kapazitätsnachfragen erwartet werden.

Wir unterstellen, dass zunächst die bestehenden Mobilfunkstandorte mit 3,6 GHz ausgestattet werden. Unter Abgleich mit der bestehenden Nachfrage (über die Bevölkerungsverteilung und Nachfrage-Wachstumsannahmen bis 2032) wird ermittelt, wo unter verschiedenen Wachstumsannahmen und Zeitpunkten der Ausbau des bestehenden Antennenmastbestandes bei Nutzung der alten Frequenzen ausreicht (von uns hier sub 3,4 GHz genannt), wo dort mit 3,6 GHz nachgerüstet werden muss, und wo jenseits der bestehenden Antennenstandorte und der sich daraus ergebenden 5G Abdeckung zusätzliche 3,6 GHz Standorte ergänzt werden müssen. Dies wird, je Nachfragewachstumsannahme zu differenzierteren Ergebnissen führen als große Flächen mit 3,6 GHz Zellen abzudecken.

¹ Mitteilung der Europäischen Kommission: „Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen“, C(2022) 9343 final, vom 12.12.2022, https://competition-policy.ec.europa.eu/sectors/electronic-communications/legislation_en.

2 Standortdaten im Status Quo

Wir erheben zunächst den Status Quo der Standortausstattung aller Funkzellen für ganz Deutschland für alle Betreiber² und brechen diese auf einen hypothetischen Betreiber mit einem Drittel des Marktanteiles herunter.

Eine Auswertung der Standortliste nach den Standorten und Technologien am Standort zeigt, dass es im März 2022 in Deutschland 122.872 Mobilfunkstandorte aller Betreiber gab. 13.492 hiervon werden von 2 oder mehr Mobilfunknetzbetreibern (11%) gemeinsam genutzt.

An 42.485 Standorten wurden 5G Antennen beantragt, das sind 34,6 % der Standorte; an 10.159 Standorten sind auch 3,6 GHz-Antennen verbaut (8,27 % der Standorte).

Den größten Anteil an beantragten Antennen-Technologien macht LTE mit 77,8 % der Standorte aus, dicht gefolgt von GSM mit 78,8 % der Standorte und UMTS auf 29,1 % der Standorte. Mit wie vielen Antennen in welcher Bandbreite übertragen wird, ist aus der vorliegenden Antennenliste nicht zugänglich.

Tabelle 2-1: Auswertung der Standortliste nach Standort und Technologie

	Anzahl Mobilfunkstandorte	Anteil an Gesamt	Anzahl Standorte mit 2 oder mehr MNO	Anteil an Gesamt
Gesamtzahl an Standorten	122.872	100,0%	13.492	11,0%
Anzahl Standorte mit 5G Technologie	42.485	34,6%	1.520	3,6%
-davon Standorte mit 5G in 3,6 GHz	10.159	8,27%		
Anzahl Standorte mit LTE Technologie	95.642	77,8%	10.078	10,5%
Anzahl Standorte mit UMTS Technologie	35.724	29,1%	929	2,6%
Anzahl Standorte mit GSM Technologie	94.425	76,8%	9.646	10,2%
Summe Basisstationen	268.276	218,3%		

Quelle: WIK, Auswertungen auf Grundlage der Standortliste der Bundesnetzagentur

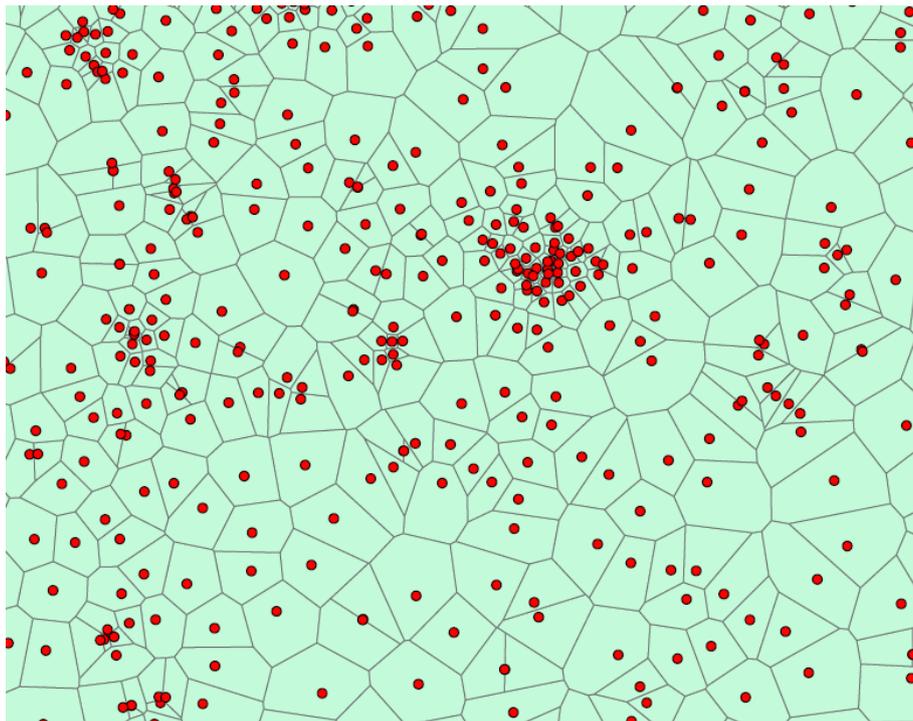
² Quelle: BNetzA, betreiberanonymisierte Daten. 2022.

Die Geokoordinaten der Standorte erlauben eine Verarbeitung in einem geografischen Informationssystem (GIS), insbesondere

- die Darstellung und den Verschnitt mit anderen geographischen Informationen (Nachfragepotential) und
- die Modellierung von Funkzellen und Abdeckungen.

Für die Modellierung von Funkzellen und deren Gebietsabdeckung legen wir die Standorte in die Fläche und ziehen die Grenzlinie der Abdeckungsgebiete zwischen den Zellen immer auf der Linie gleichen Abstandes zum nächst-benachbarten Antennenstandort. Derartige Zellbildungen werden auch Voronoi-Zellen genannt (Abbildung 2-1) und bezeichnen nur eine geografische Abdeckung. Diese bildet eine modellhafte Ableitung der realen Funkzelle mit ihren Ausbreitungsbedingungen über eine geometrische Näherung. Wir gehen davon aus, dass die zugehörige Funkausstattung eines Antennenstandortes mit sub 3,4 GHz Frequenzen ausreicht, dieses Gebiet auch zu versorgen. Wie man sieht, ist die Zellgröße abhängig von der Lage aller Nachbarstandorte. Je dichter die Standorte im Raum liegen, umso kleiner werden die Zellen und umgekehrt.

Abbildung 2-1: Standorte und Voronoi-Zellen



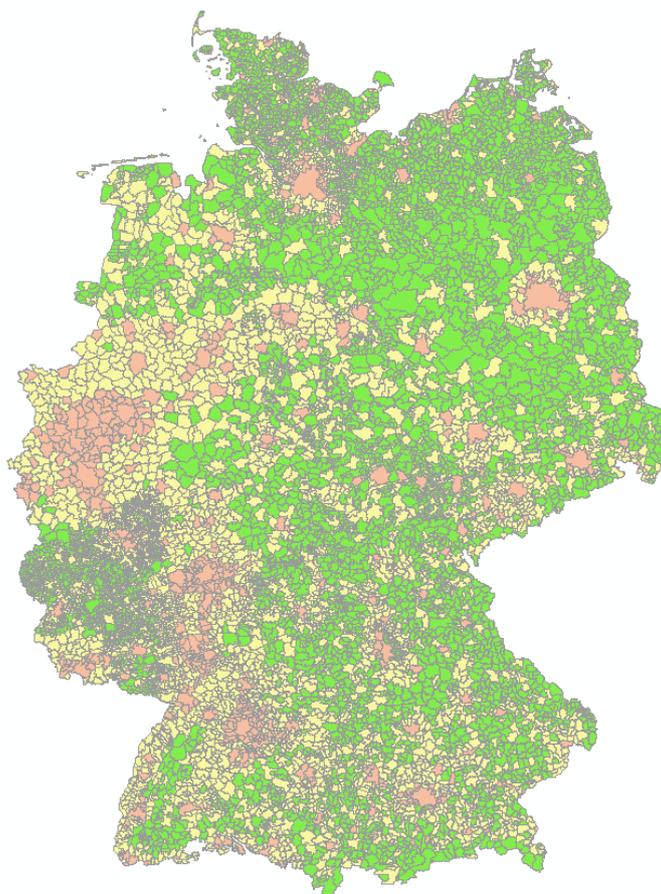
Quelle: WIK

Dieser Verteilung der Funkzellen unterlegen wir die Verteilung der Bevölkerung in der Fläche und clustern (gruppieren) die Funkzellstandorte in drei Gruppen: städtisch, halbstädtisch und ländlich. Für die weiteren Untersuchungen konzentrieren wir uns auf die ersten beiden Cluster (städtisch und halbstädtisch), davon ausgehend, dass für die ländlichen Gebiete eine Bedarfsabdeckung über die sub 3,4 GHz Frequenzen für den Betrachtungszeitraum der nächsten 10 Jahre (bis 2032) ausreicht.

Die Abgrenzung erfolgt auf Grundlage der Gemeindegebiete (Abbildung 2-2) gemäß Einwohnerdichte nach folgenden Kriterien³:

- städtische Gemeinde: Einwohner / km² \geq 500 (rot) (s)
- halbstädtische Gemeinde: 100 \leq Einwohner / km² < 500 (gelb) (h)
- ländliche Gemeinde: Einwohner / km² < 100 (grün) (l)

Abbildung 2-2: *Gemeinden Deutschlands nach Gemeindeprägung*

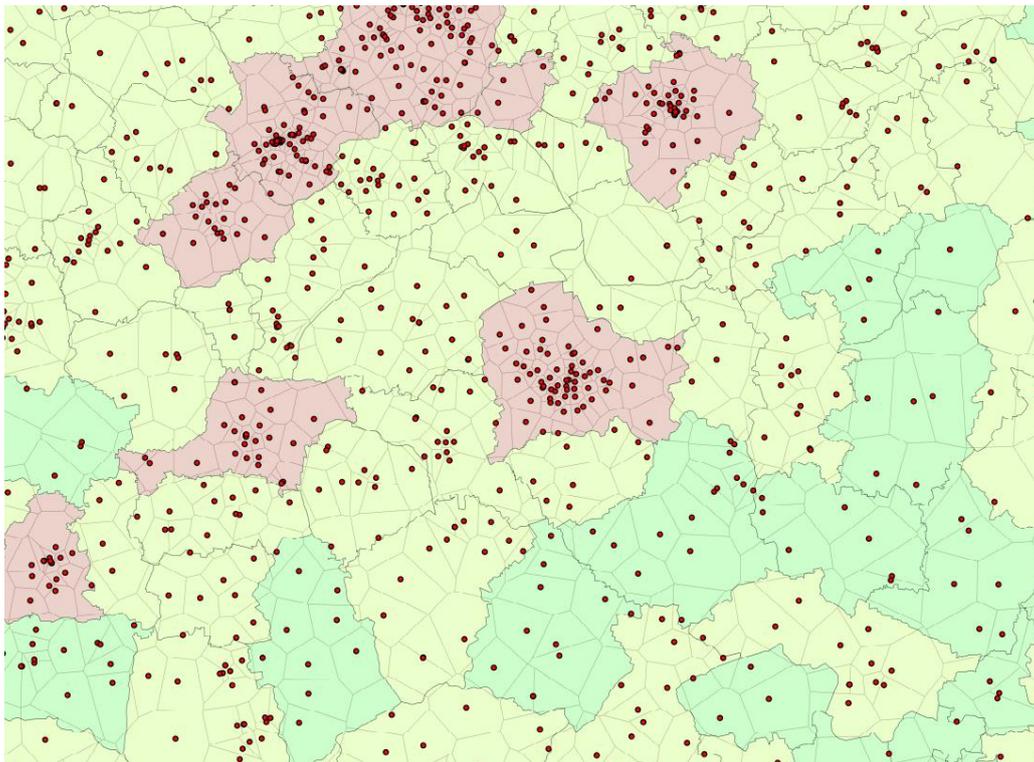


Quelle: Darstellung WIK, auf Basis VG250 BKG 2022

Die Mobilfunkstandorte werden in einem weiteren Schritt nach ihrer Zugehörigkeit zu einer Gemeinde dem Typ städtisch, halbstädtisch und ländlich zugeordnet (Abbildung 2-3). Für Standorte in städtischen Gemeinden (rote Gebiete) und halbstädtischen Gemeinden (gelbe Gebiete) gehen wir demnach davon aus, dass sie in 3,6 GHz ausgebaut werden. Die Standorte innerhalb der ländlichen Gemeinden (grüne Gebiete) werden in den Berechnungen zum 3,6 GHz-Ausbau nicht berücksichtigt. Durch die Zuordnung der Standorte erfolgt auch die Zuordnung der Voronoi-Zellen zur Gemeinde und deren Dichtekategorie.

³ Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an die Stadt-/Landgliederung nach der Zuordnung von Eurostat 2000 (Stadt-/Landgliederung (destatis.de)). Die Einteilung ist in unserem Kontext zweckdienlich und bietet eine einfache und transparente Zuordnung der Gemeinden zur Gebietsklasse. Sie wird auch vom BMDV im Rahmen der Auswertungen zur Breitbandversorgung des Breitbandatlas verwendet (siehe [Bericht zum Breitbandatlas Teil 1: Ergebnisse \(bund.de\)](#), S. 10.

Abbildung 2-3: Standorte, Voronoi-Zellen und Gemeinden nach Gemeindeprägung



Quelle: WIK

Das Bild zeigt im stärkeren Strich die Gemeindegrenze, im dünneren Strich die Grenzen der Voronoi (Funk)-Zellen und in der Färbung die Dichteklassifizierung einer Gemeinde und den ihr zugeordneten Voronoi-Zellen (s.o.).

Den Antennenstandorten wird modellhaft ein Funkzellenradius zugeordnet, bei dem die sich daraus ergebende Kreisfläche der Fläche der Voronoi-Zelle entspricht. Dieser Radius wird später für die Abdeckung der verschiedenen Frequenzen in einer Zelle verwendet und ist natürlich nur eine Näherung, denn in der Realität wird die effektive Abdeckung von den Geländebedingungen in der Zelle wesentlich mitbestimmt, die wir aber in diesem Modellansatz nicht berücksichtigen können. Man kann sagen: Je weniger dicht besiedelt ein Gebiet ist, desto größer sind die so abgeleiteten Zellradien.

Tabelle 2-2: Mittelwerte und Mediane der flächengleichen Radien in Meter und zugehöriger Voronoi-Flächen in km²

	Radius [m] Mittelwert	Fläche [km ²] Mittelwert	Radius [m] Median	Fläche [km ²] Median
städtisch	596,1	1,12	486,0	0,74
halbstädtisch	1665,3	8,71	1650,7	8,56
ländlich	2556,5	20,53	2587,5	21,03
Gesamt	1011,0	3,21	1275,9	5,11

Quelle: WIK Berechnungen

3 Modellierung der Nachfrage

3.1 Bestimmung der Nachfrager

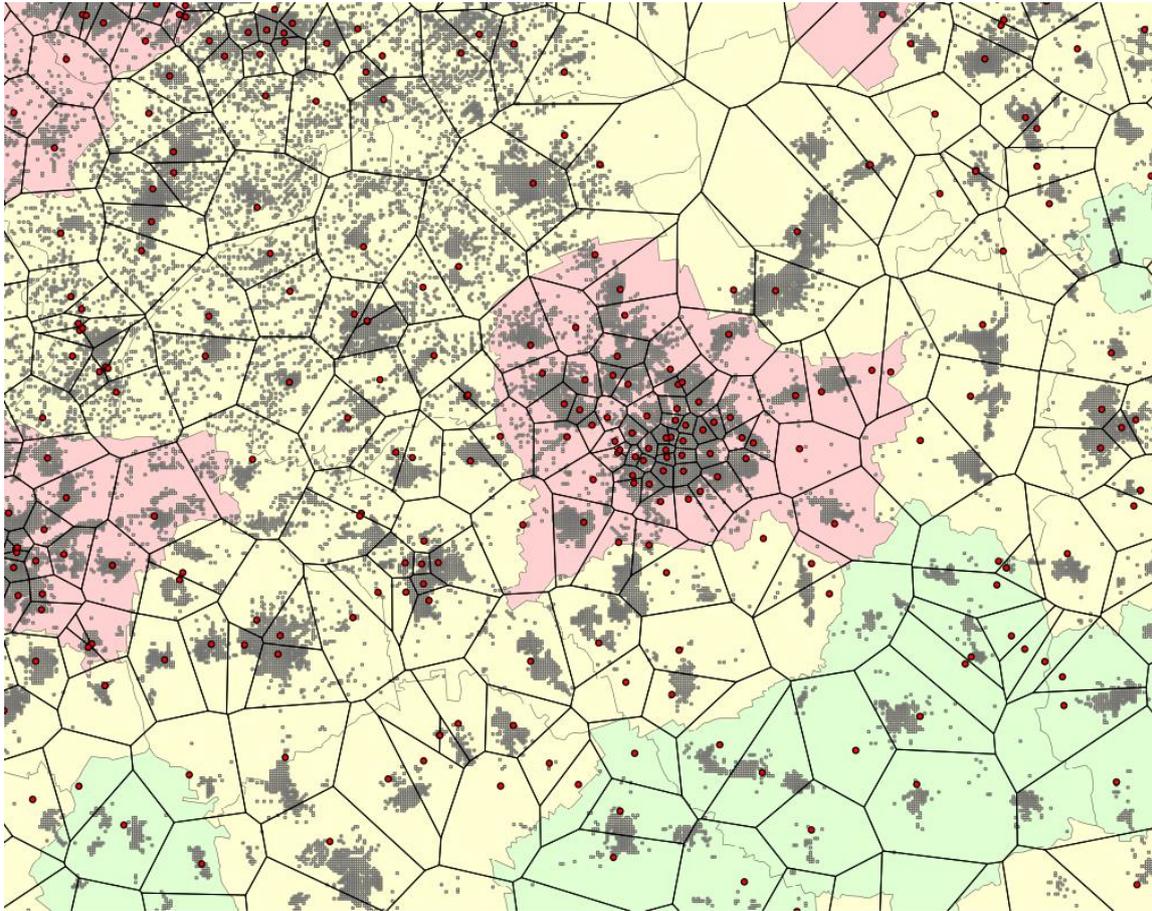
Die räumliche Nachfragemodellierung beruht auf zwei wesentlichen Nachfrageblöcken, der Wohn- und Arbeitsbevölkerung (inklusive Touristen) und der Hot-Spot Nachfrage. Die Wohn- und Arbeitsbevölkerung wird auf Basis eines 100 x 100 Meter Raster räumlich verortet und zugeordnet. Die Nachfrage aus den Hot-Spots wird direkt über die Lage der Hot-Spots (Flughäfen, Bahnhöfe und Stadien) den Zellen zugeordnet. Zur Untersuchung hinzugezogen werden die Arbeitsstätten, und abhängig von der Zahl der Erwerbstätigen wird über ein Bewegungsmodell der Wechsel zwischen Wohnsitz und Arbeitsstätten nachgebildet. Über die Zahl der Betten in den Beherbergungsbetrieben wird eine touristische Nutzung abgeleitet. Größere Flughäfen, Bahnhöfe und Stadien wurden als hot spots berücksichtigt, ähnliches gilt für Messegelände. Allerdings sind diese Standorte bereits heute mit kleinen, dicht aufgebauten Funkzellen ausgestattet, so dass sich aus diesen Daten nur ein begrenztes Zellverdichtungspotential (ergänzende Zellstandorte) ergibt.

Abbildung 3-1 zeigt beispielhaft die Überlagerung der Voronoi Funkzellen mit dem Gebäuderaster, auf Basis dessen die Nachfrager Verteilung abgeleitet wird.

Tabelle 3-1 zeigt die aggregierten Zahlen für das Bundesgebiet für die Wohn- und Arbeitsbevölkerung nach der Zuordnung sowie die Bettenzahl in touristischen Betrieben. Auf rd. 3,7 Mio. Rasterzellen wurden demnach für die Wohnbevölkerung 82.631.715 Personen gezählt und 45.399.708 Erwerbstätige auf 4.203.943 Betriebsstätten zugeordnet. Diese befinden sich innerhalb von rd. 2 Mio. Rasterzellen. Den touristischen Betrieben wurden 3.902.615 Betten bzw. Schlafgelegenheiten zugeordnet.

In unseren Daten wurden die Bewegungsdaten aus Auto- und Bahnverkehr, sowie der Verkehr in Fußgängerzonen nicht mitberücksichtigt. Für Auto- und Bahnverkehr gehen wir davon aus, dass dieser nur durch sub 3,4 GHz Frequenzen mit größerer Reichweite befriedigt wird, zumal die Nutzerdichte mit Ausnahme von Punkten hohen Verkehrs (z.B. typische Staugebiete) eher gering ist. Dies ist bei Fußgängerzonen in Großstädten u.U. anders. Aber dort, wie bei den Messegeländen (s.o.) gibt es bereits kleine Zellen, die ggf. nachgerüstet werden. Dabei ist die Nachverdichtung mit neuen Antennenstandorten eher vernachlässigbar.

Abbildung 3-1: Überlagerung von Funkzellen und bebauten Flächen (Nachfragerverteilung)



Quelle: WIK

Tabelle 3-1: Ergebnis der Zuordnung für Deutschland, alle Nutzer

	Anzahl
Rasterzellen	3.711.135
Wohnbevölkerung / Personen	82.631.715
Anzahl Raster mit Betriebsstätten	1.954.691
Betriebe	4.203.943
Erwerbstätige am Arbeitsort	45.399.708
Betten/Schlafgelegenheiten	3.902.615

Quelle: WIK

Tabelle 3-2: Zahl der modellierten Nutzer des hypothetischen Betreibers (ein Drittel der Gesamtzahl) nach Gemeindeprägung

	Anzahl Nutzer	Anteil an Gesamt
städtisch	18.560.129	56,7%
halbstädtisch	10.779.390	32,9%
ländlich	3.389.668	10,4%
Gesamt	32.729.187	100,0%

Quelle: WIK

3.2 Bestimmung der Nachfrage

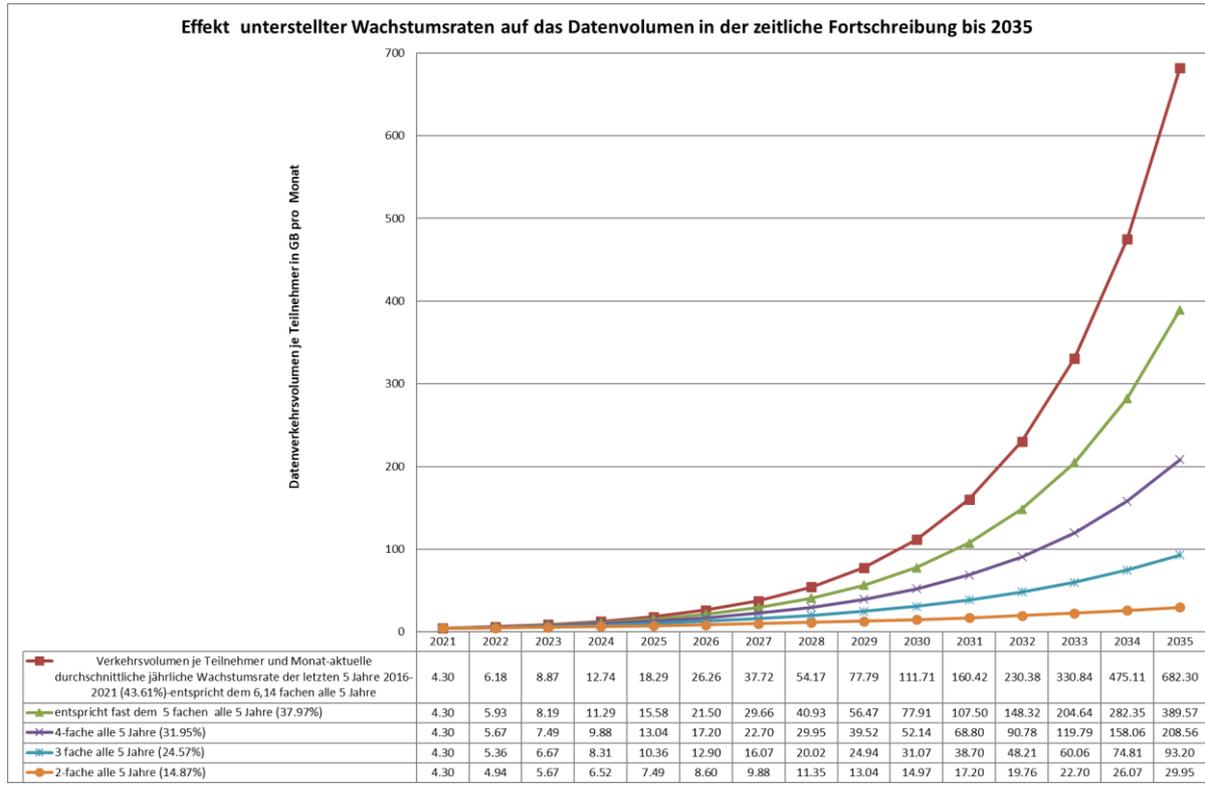
Die Nachfragebestimmung geht von der derzeitigen Nachfrage aus und wird mit unterschiedlichen Wachstumsannahmen aus der Literatur in die Folgejahre projiziert. Wir nutzen eine obere und eine untere Nachfrageentwicklung, die den Rahmen für die weiteren Untersuchungen aufspannt. Daraus werden anschließend die Nachfragen in der Hauptverkehrszeit (Busy Hour) abgeleitet, die die zur Dimensionierung der Netze relevante Kapazitätsanforderung definiert.

Abbildung 3-2 zeigt die Kurvenschar der zeitlichen Entwicklung der Datenvolumina pro SIM-Karte und Monat für die Jahre 2021-2035 für Wachstumsraten, die dem Zweifachen (knapp 15 % Wachstum) bis zum Sechsfachen alle 5 Jahre entsprechen (43,6%).⁴ Andere Quellen legen niedrigere Wachstumsraten nahe, so dass wir einen Korridor zwischen der roten Linie (durchschnittliche 5-Jahres Wachstumsrate 43,6%) und der blauen Linie (durchschnittliche 5-Jahres Wachstumsrate 23,02%)⁵ weiter betrachten.

⁴ Das entspricht dem durchschnittlichen Wachstum von 2016 bis 2021 (Jahresbericht BNetzA 2021).

⁵ Ericsson Mobility Report 2022, S. 17, Goldmedia/Fraunhofer IIS 2021 liegen etwas darüber, PERSPEKTIVEN ZUR NUTZUNG DES UHF-BANDS 470-694 MHZ NACH 2030, 2021 für BNetzA (S.40),

Abbildung 3-2: Effekt der Wachstumsrate auf das prognostizierte Datenvolumen



Quelle: WIK

Ein fortgesetztes jährliches Wachstum mit der 5-Jahres Wachstumsrate von 2021 - 43,6%, rote Kurve - führt in 10 Jahren zu einem monatlichen Datenvolumen von 230 MB / Nutzer und Monat (Faktor 6 gegenüber heute). Eine Verdreifachung des Volumens alle 5 Jahre (blaue Kurve) liegt in der Größenordnung des von Ericsson sehr konservativ vorausgesagten mobilen Datenwachstums für Europa in den Jahren 2021-2027 von 23.02% und führt zu rd. 20% dessen (48 MB anstelle 230 MB) für das Jahr 2032. Das hat erhebliche Auswirkungen auf die Dimensionierung der Mobilfunknetze der Zukunft und die in dieser Studie gestellte Frage.

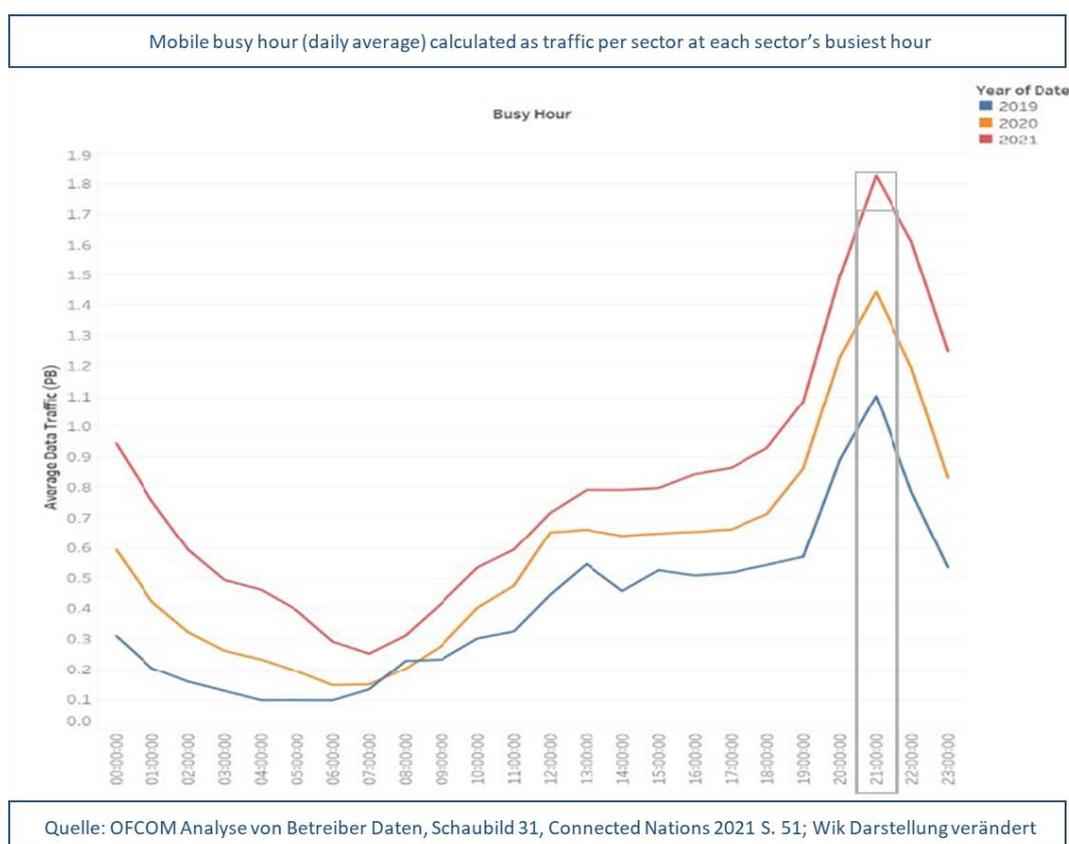
Das Verkehrsverhalten der Nutzer individuell und in Ihrer Menge ist über den Tag nicht gleich. Es gibt eine Hauptverkehrszeit, zu der viele Nutzer gleichzeitig kommunizieren. Dies unterscheidet sich zudem von Tag zu Tag und über die Jahreszeiten, und folgt zudem dem generellen, gerade zuvor beschriebenen Wachstumstrend. Für diese Spitzenbelastung muss ein Telekommunikationsnetz ausgelegt werden, damit die Nutzer keine deutlich Spürbaren Qualitätseinbußen erfahren. Die Update und Erweiterungszyklen eines Netzes bestimmen zudem auch, wieviel Nachfragewachstum im Voraus ausgerüstet werden muss, damit die Kapazität nicht vor dem nächsten Zyklus erschöpft ist.

Die Spitzenlastverkehre sind Ausdruck des Nachfragverhaltens der Nutzer. Obwohl die Betreiber genaue Messungen der Verkehrslast über das Jahr vornehmen sind diese Zahlen nur selten öffentlich zugänglich und werden als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse behandelt.

Wir greifen daher auf eine der wenigen Veröffentlichungen derartiger Daten zurück: Der englische Regulierer OFCOM veröffentlicht eine über Lastspitzen gemittelte Tagesverkehrskurve für den

Mobilfunkverkehr, die in Abbildung 3-3 dargestellt ist.⁶ Demnach liegt die Hauptverkehrsstunde in Großbritannien stabil über die dargestellten Jahre um 21 Uhr. Relevant für unsere Ableitungen ist der Anteil, den die Hauptverkehrsstunde am Tagesverkehr ausmacht (busy hour ratio), bzw. welches Vielfache des durchschnittlichen Stundenverkehrs den busy hour Verkehr ergibt (busy hour (BH)-Faktor): Dieser kann auf die für Deutschland bekannten durchschnittlichen Tages- oder Stundenverkehre angewendet werden. Aus der OFCOM Quelle leiten wir eine obere Busy Hour Ratio von 9,25% und einen BH-Faktor von 2,25 ab, aus der Goldmedia/ Fraunhofer Quelle den unteren konservativeren Wert des BH-Faktors von 7,41% und einen BH-Faktor von 1,77.⁷

Abbildung 3-3: Tagesverkehrskurve und BH-Ratio



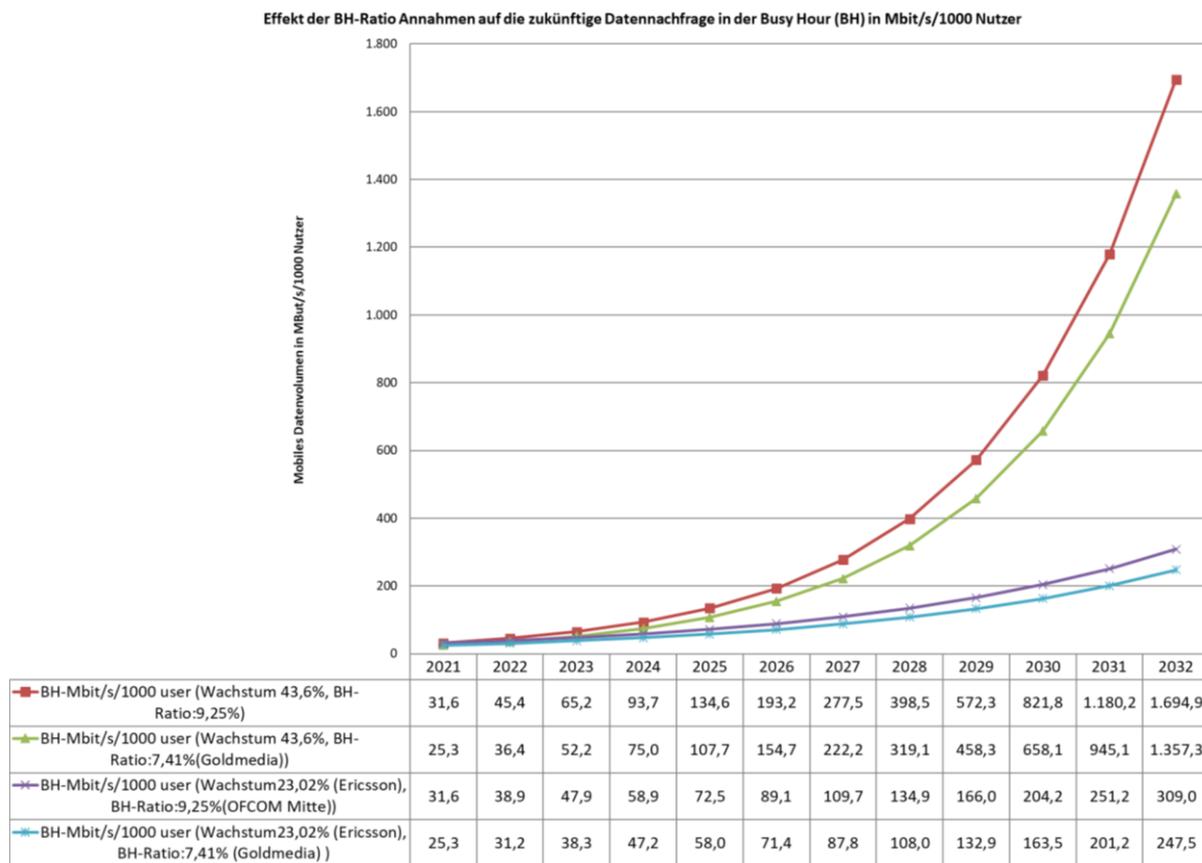
Quelle: WIK

Wir wenden das BH-Verhältnis auf die in Abbildung 3-2 beschriebenen Wachstumskurven an. Abbildung 3-4 zeigt die Verkehrsnachfrage in der Spitzenlast umgerechnet in Mbit/s pro 1000 Nutzer für 2021 bis 2032, als Kombination von unterstellter Wachstumsrate (43,6% oder 23,02%) und unterstellten BH-Ratios (9,25% oder 7,41%). Klar dominant ist in den Zeitreihen der Effekt des Nachfragewachstums, der Effekt unterschiedlicher BH-Werte ist sichtbar, aber in Relation dazu von untergeordneter Bedeutung.

⁶ OFCOM, Connected Nations 2021, UK Report, 16.12.2021, S.51.

⁷ Goldmedia/Fraunhofer (PERSPEKTIVEN ZUR NUTZUNG DES UHF-BANDS 470-694 MHz NACH 2030, 2021 für BNetzA, S. 36 ff).

Abbildung 3-4: Prognostizierte Verkehrsnachfragen



Quelle: WIK

Die dargestellten Werte spannen den Nachfragekorridor auf, der für die weitere Analyse verwendet wird. Im Jahr 2022 bewegen sich die Prognosewerte zwischen 31,2 Mbit/s pro 1000 Mobilfunknutzer und 45,4 Mbit/s pro 1000 Nutzer. Die Spreizung liegt beim 1,46-Fachen des unteren Wertes. Schaut man jedoch auf die Unterschiede in 10 Jahren (2032), dann liegen die Nachfragewerte um das 6,8-Fache auseinander. Noch gravierender ist die Vervielfachung wenn man die Verläufe über die Jahre vergleicht (2022 zu 2032). Im untersten Verlauf (blaue Kurve) ist der Nachfragewert von 247,5 Mbit/s/1000 Nutzer in 2032 fast das Achtfache des Wertes von 2022. Schaut man auf den obersten Verlauf (rote Kurve), dann ist die Nachfrage von 1694,9 Mbit/s/1000 Nutzer in 2032 sogar das 37-Fache des Wertes aus 2022.

4 Bestimmung der Kapazität der Funkzellen

Für die Kapazitätsbestimmung eines Mobilfunknetzes ist zunächst dessen Frequenzausstattung von Bedeutung (Abschnitt 4.1). Wir bestimmen die Abdeckung der Funkzellen (Zellradien) aus den grundlegenden Daten zur Frequenzausstattung für den sub 3,4 GHz Bereich und für die 3,6 GHz Zellen. Gleichfalls werden in diesem Arbeitsschritt die Kapazitäten der Funkzellen bestimmt. Dabei wird angenommen, dass an den bestehenden Standorten alle Frequenzen genutzt werden können, mit der typischen Anzahl Kanäle des hypothetischen Betreibers.

4.1 Verteilung des Frequenzspektrums

Die für den Mobilfunk vorgesehenen Frequenzbereiche werden in Deutschland seit 2000 über nacheinander folgende Auktionsverfahren zugeteilt. Die Lizenzen sind grundsätzlich technologieneutral ausgestaltet. Mit diesen Lizenzen werden 2-, 3-, 4- und 5G-Netze betrieben. Die 3G-Netze (UMTS) aller Betreiber sind nach Angaben der Bundesnetzagentur seit Ende 2021 vollständig abgeschaltet.⁸ Die dadurch freiwerdenden Frequenzen werden vor allem zur Kapazitätssteigerung des bestehenden 4G-Netzes sowie zum Aufbau des 5G-Netzes eingesetzt. Die bestehenden Nutzungsrechte von Frequenzen in den Bereichen bei 800 MHz, 1.800 MHz und 2.600 MHz laufen zum Ende des Jahres 2025 aus und werden vermutlich erneut in einer Auktion zugeteilt werden.⁹ Wir gehen für unseren hypothetischen Betreiber davon aus, dass dieser über derartige Frequenzen weiterhin verfügen wird.

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick zu dem aktuell verfügbaren Spektrum der 4 Mobilfunknetzbetreiber in Deutschland in den lizenzierten Frequenzbereichen, sowie deren Nutzung nach Technologien (Spalte Netzstandard).

Tabelle 4-1: 5G relevantes verfügbares Spektrum in MHz nach Lizenznehmer

Frequenzbänder	Netzstandard	Telekom	Vodafone	Telefonica	1&1
700 MHz	4G, 5G				
800 MHz	4G	2x35	2x30	2x30	
900 MHz	2G, 4G				
1500 MHz	4G	10	10		
1800 MHz	2G, 4G				
2100 MHz	3G, 4G, 5G	2x70	2x65	2x70	2x10
2600 MHz	4G				
3,4-3,6 GHz	5G	90	90	70	50
3,7-3,8 GHz	5G	für Industrieunternehmen Vergabe auf Antrag			
24,5-26,5 GHz	5G	lokale Nutzung und für Fixed Wireless Access (FWA)			

Quelle: WIK

1&1 spielt bei unseren Untersuchungen noch keine Rolle, weil sie noch keine relevante Anzahl Standorte aufweisen können.

⁸ Bundesnetzagentur - Mobiles Breitband, Bereich Mobilfunkmonitoring, abgerufen 15.12. 2022.

⁹ Bundesnetzagentur - Mobiles Breitband, Bereich künftig verfügbare Frequenzen; es wird für die Bereiche 800 und 900 MHz ein Frequenztausch erwogen, abgerufen 15.12.2022.

4.2 Funkzell-Kapazitäten

Wir gehen davon aus, dass unser hier betrachteter hypothetischer 5G Netzbetreiber über die Zeit 100 MHz Frequenzspektrum im sub 3,4 GHz Bereich für 5G NR Anwendungen zur Verfügung haben wird und zusätzlich 90 MHz im 3,6 GHz-Band. Tabelle 4-2 weist die Zellkapazitäten bei unterschiedlicher Frequenzausstattung aus. Rot umrahmt sind die zuvor beschriebenen Annahmen. Unterstellt sind Antennenstandorte mit 3 Sektoren. Dies liegt eher am unteren Rande des erwartbaren (konservativ). Die spektrale Effizienz für 5G NR ist in den sub 3,4 GHz Bändern mit 4 bzw. 5 Bit/s je Hz beschrieben. Die Zahl der Layer ist mit 2 und alternativ 4 unterstellt. Für das 3,6 GHz Band liegt die spektrale Effizienz bei 8 bzw. 10 Bit/s je Hz, die Zahl der Layer bei 8 bzw. 10, um den massiven Kapazitätswachstum durch massive MIMO Antennen zu berücksichtigen.

Tabelle 4-2: Zellkapazitäten im sub 3,4 GHz Bereich und bei 3,6 GHz

Verfügbares Spektrum unterhalb 3,4 GHz	durchschnittliche Spektrale Effizienz bei 5G Umrüstung in Mbit/s pro MHz Spektrum	durchschnittlich verfügbare Anzahl Layer	Kapazität je Sektor in Mbit/s/s	Kapazität je Standort bei 3 Sektoren in Mbit/s/s	maximale Auslastung bezogen auf den Sektor 20% Sicherheitsreserve	maximale Auslastung bezogen auf den Standort bei 40% Reserven
30	4	2	240	720	192	432
30	5	2	300	900	240	540
30	4	4	480	1440	384	864
30	5	4	600	1800	480	1080
50	4	2	400	1200	320	720
50	5	2	500	1500	400	900
50	4	4	800	2400	640	1440
50	5	4	1000	3000	800	1800
80	4	2	640	1920	512	1152
80	5	2	800	2400	640	1440
80	4	4	1280	3840	1024	2304
80	5	4	1600	4800	1280	2880
100	4	2	800	2400	640	1440
100	5	2	1000	3000	800	1800
100	4	4	1600	4800	1280	2880
100	5	4	2000	6000	1600	3600
Zusätzliche Kategorien für das 3,6 GHz Spektrum und resultierende Kapazitäten						
50	5	8	2000	6000	1600	3600
50	5	16	4000	12000	3200	7200
50	8	8	3200	9600	2560	5760
50	8	16	6400	19200	5120	11520
50	10	8	4000	12000	3200	7200
50	10	16	8000	24000	6400	14400
70	5	2	700	2100	560	1260
70	5	4	1400	4200	1120	2520
70	5	8	2800	8400	2240	5040
70	5	16	5600	16800	4480	10080
70	8	8	4480	13440	3584	8064
70	8	16	8960	26880	7168	16128
70	10	8	5600	16800	4480	10080
70	10	16	11200	33600	8960	20160
90	5	2	900	2700	720	1620
90	5	4	1800	5400	1440	3240
90	5	8	3600	10800	2880	6480
90	5	16	7200	21600	5760	12960
90	8	8	5760	17280	4608	10368
90	8	16	11520	34560	9216	20736
90	10	8	7200	21600	5760	12960
90	10	16	14400	43200	11520	25920

Quelle: WIK, eigene Berechnungen

4.3 Funkzellgröße

Die Abdeckung/ Größe einer Funkzelle hängt von vielen Parametern ab, die wir in der Modellierung nicht berücksichtigen können. Für den sub 3,4 GHz Bereich greifen wir auf typische Werte aus der Literatur zurück und unterstellen, dass die Antennenstandorte des Betreibers so gewählt wurden, dass eine Flächenabdeckung zumindest mit den niedrigen Frequenzen (s. Tabelle 4-1) erreicht werden kann (Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1: Funkzellradien bei unterschiedlichen Frequenzen



Quelle: <https://itemobile.de/5g-sendereichweiten-mit-unterschiedlichen-frequenzen>

Für die 3,6 GHz Zellen wurden die Zellradien anhand eines Wellenausbreitungsmodells für 5G-NR von 3GPP¹⁰ für die städtischen und halbstädtischen Gebiete bestimmt.

Tabelle 4-3: Pfadverluste und Zellradien für 3,6 GHz in städtischen und halbstädtischen Gebieten

	Pfadverlust [dB]	Zellradius [m]
Städtisches Gebiet	129,00	450
Halbstädtisches Gebiet	136,39	750

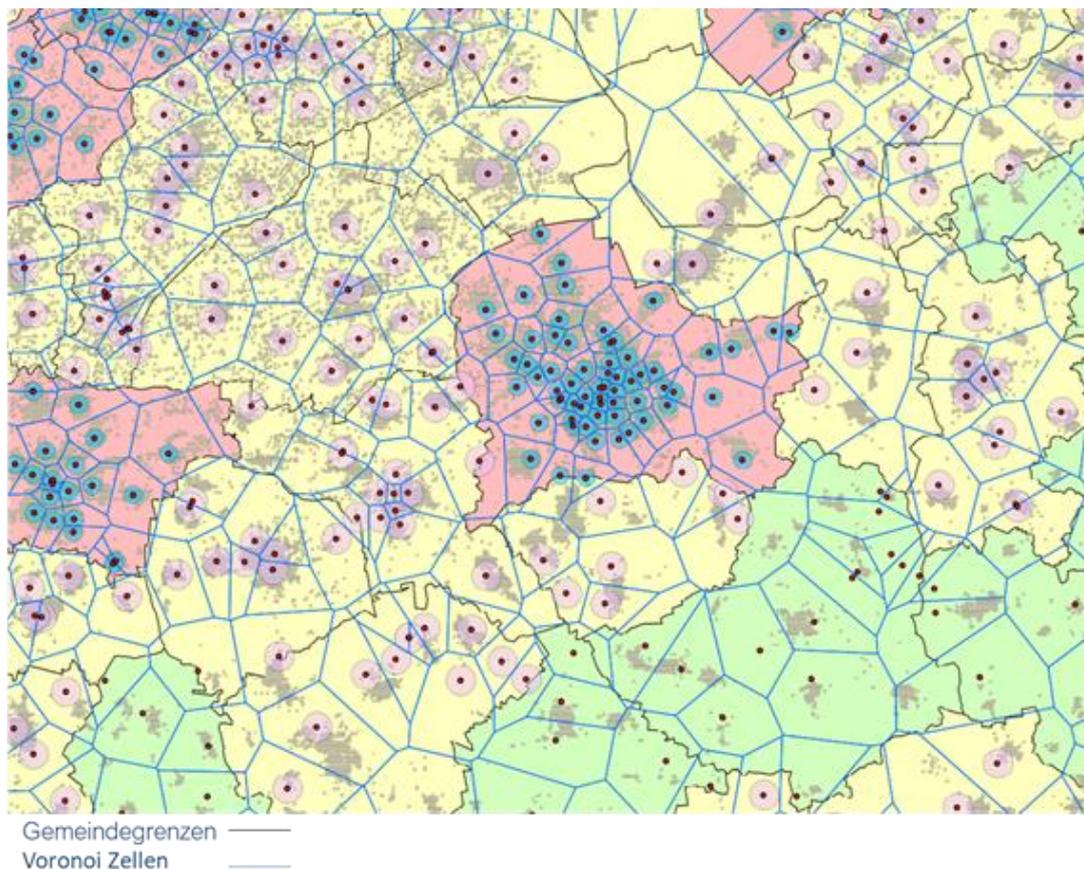
WIK: eigene Berechnungen

Eine grobe erste Überlegung auf Basis dieser Reichweite-Daten zeigt: Würde ein Betreiber die gesamte Fläche der Bundesrepublik Deutschland mit 3,6 GHz Zellen abdecken wollen und nehmen wir vereinfacht einen Zellradius von 750m an, dann müsste er ca. 200.000 derartige Zellen ausbauen.¹¹ Nach den Daten von Tabelle 2-1 hat er bereits ca. 41.000 Standorte, es müssten also noch ca. 160.000 Standorte für eine Flächendeckung ergänzt werden. Ggf. kann er einen Teil oder alle Standorte mit den anderen Betreibern teilen (Mast-Sharing), sofern es die zulässigen Sendeleistungen erlauben. Wir wollen uns der Fragestellung jedoch differenzierter nähern, und wir klammern die ländlichen Gebiete aus.

¹⁰ ETSI TR 138 901 V16.1.0 (2020-11), S.25 ff.

¹¹ Fläche des Bundesgebietes: 357.000 km², dividiert durch $\pi \cdot (0,75\text{km})^2 = 202.000$, bei 450m Zellradius wären es 561.000.

Abbildung 4-2: Voronoi-Zellen und deren Abdeckung



Quelle: WIK, eigene Berechnungen. Der rosafarbene Kreis um die Maststandorte (rot) stellt die Abdeckung der (h)-Standorte dar (750m), der blaue Kreis die der von der Abdeckung her kleineren (s)-Standorte (450m).

5 Berechnung des zukünftigen Standortbedarfs

Über die GIS-basierte Modellierung der Nachfrageverteilung in der Fläche und über die Zeit und den Abgleich mit dem Kapazitätsangebot der bestehenden Funkzellen wird abgeleitet, ab wann und dann in welchem Umfang das örtliche Kapazitätsangebot nicht ausreicht, die dort vorhandene Nachfrage zu decken. Dabei werden zunächst

1. die Kapazitäten der bestehenden Standorte mit der im Zellgebiet jeweils prognostizierten Nachfrage abgeglichen, anschließend
2. die Kapazitäten der bestehenden Standorte um die Kapazität einer zusätzlichen 3,6 GHz Zelle am selben Standort erweitert und mit der noch ungedeckten Nachfrage abgeglichen.

Wenn dann noch (und das ist abhängig von dem gewählten Nachfragemodell) Lücken in der Deckung des Nachfragebedarfes bestehen, wird identifiziert, ob die Nachverdichtung durch 3,6 GHz Zellen

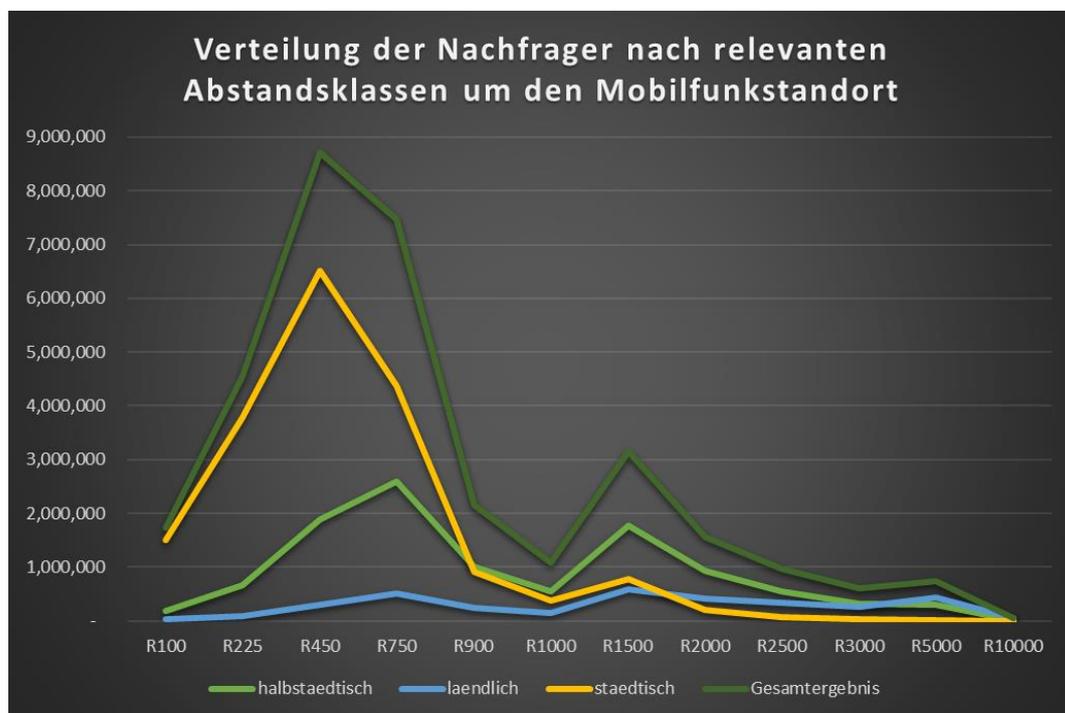
3. außerhalb der bestehenden 3,6 GHz Zellen oder
4. innerhalb der an den bestehenden, um 3,6 GHz Zellen bereits erweiterten Standorten erfolgen muss.

Für die letzten beiden Gruppen werden abschließend Überlegungen zur technischen Befriedigung derartiger Nachfragen angestellt.

5.1 Räumliche Abdeckung der bestehenden Antennenstandorte

Wir schalten jedoch noch einen Überblick über die räumliche Abdeckung der bestehenden Antennenstandorte voran: Abbildung 5-1 gibt die Summe der Nachfrager (inklusive der Nachfrager an hot spots) innerhalb vordefinierter Entfernungsbänder für den gesamten Datensatz wieder. Die Verteilung der Nachfrager ist getrennt nach der Gemeindeprägung städtisch, halbstädtisch und ländlich eingeteilter Standorte wiedergegeben. Dargestellt sind die Nachfrager des modellierten Betreibers (ein Drittel aller Nutzer). Die Entfernungskategorien folgen den Reichweiten der unterschiedlichen Frequenzen. Hier sind vor allem die 3,6 GHz Radien 100m - 450 m (s) bzw. 750 m (h) oder gar bis 1 km für das 3,6 GHz-Band insgesamt interessant, aber auch die relevanten Reichweiten bis 3 km (2GHz) und bis 10 km (700 MHz).

Abbildung 5-1: Abstandsverteilung der Nachfrage(r) um die Mobilfunkstandorte



Quelle: WIK, eigene Berechnungen

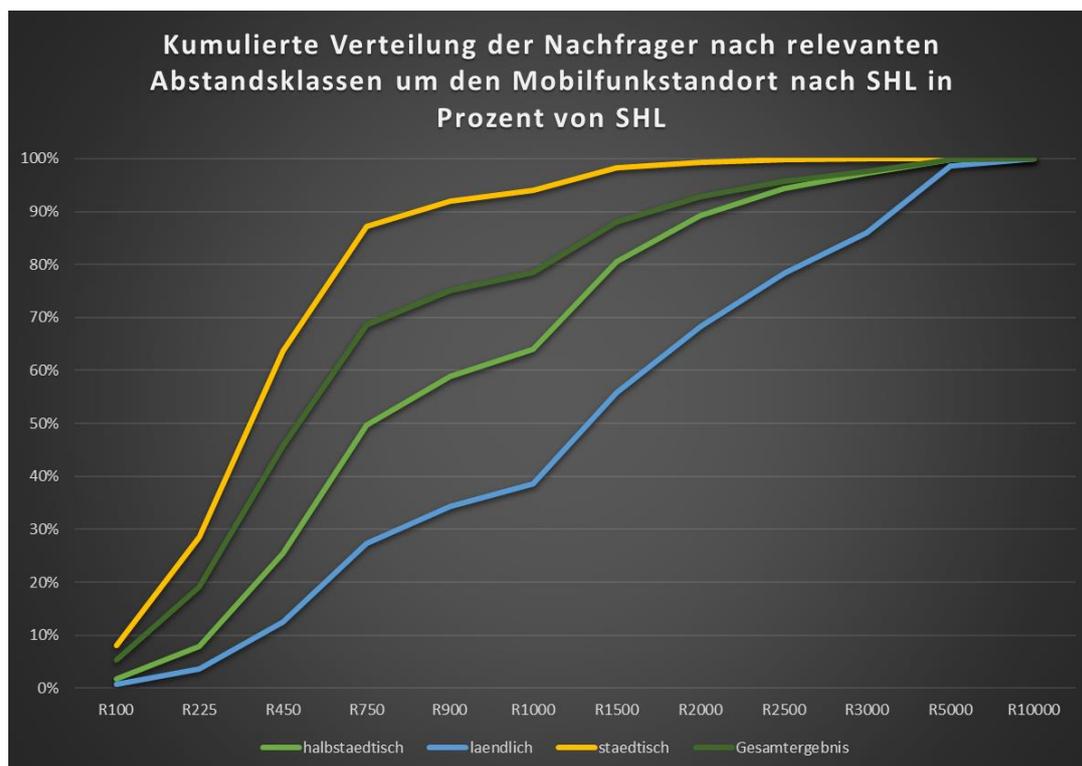
Insgesamt erreicht man in der Scheibe 0 bis 100 Meter rd. 1,7 Mio. Nachfrager, zwischen 100 bis 225 Meter weitere 4,5 Mio. Nutzer und zwischen 225 und 450 Meter zusätzliche 8,7 Mio. Nutzer sowie zwischen 450 und 750 Meter nochmals etwa 7,5 Mio. Innerhalb von 750 Meter um die Standorte liegen somit insgesamt 22,4 Mio. der insgesamt 32 Mio. Nutzer. Bis 1000 Meter um die Standorte sind insgesamt 25,7 Mio. der gesamten 32,7 Mio. Nutzer verortet, was 78,4% der Gesamtheit bedeutet.

Im Städtischen liegt die Masse der Nachfrage im Bereich bis 750 Meter, mit einem Peak bei 450 Meter. Im Halbstädtischen liegt der Nachfragepeak bei 750 Meter und ein zweiter bei 1500 Meter. Innerhalb der für den städtischen Bereich relevanten Reichweite für das 3,6 GHz-Band liegen kumuliert 11,8 Mio.

der 18,5 Mio. städtischen Nachfrager was 63,6% der städtischen Nachfrage entspricht (siehe Abbildung 5-2).

Im halbstädtischen Bereich erreicht man innerhalb der relevanten Reichweite von 750 Meter 5,3 Mio. der insgesamt 10,7 Mio. Nutzer, was rund 50% der halbstädtischen Nachfrager entspricht.

Abbildung 5-2: Kumulierte prozentuale Verteilung der Nachfrager nach Gemeindeprägung (SHL) in Prozent der Klasse



Quelle: WIK, eigene Berechnungen

Mit einer Reichweite von 1.000 Metern kann man den größten Teil der Nachfrage um die bestehende Mobilfunkstandorte herum abdecken. Bis dahin erreicht man 94,1% der städtischen, 64% der halbstädtischen und 38,6% der ländlichen Nutzer, und in der Gesamtheit 78,4% aller Nutzer.

5.2 Ermittlung des Standortbedarfes

Grundsätzlich erscheint die Standortstruktur weitgehend ausreichend, alle Teilnehmer mit einem hohen Kapazitätsangebot zu erreichen. Das ist auf Basis eines rein geographischen Flächen-Modells gesprochen, denn die Realität der abzudeckenden Gebiete belegt heute im Detail immer noch weiße Flecken und Funklöcher. Zudem bleibt die Frage nach ausreichender kapazitiver Ausstattung der Funkzellen noch ungeprüft.

Tabelle 5-1 zeigt noch einmal die in Abschnitt 3.2, Abbildung 3-4 abgeleitete obere und untere Verkehrsnachfrage zur Erinnerung. Diese Werte sind relevant für die nachfolgend dargestellten Auswertungen.

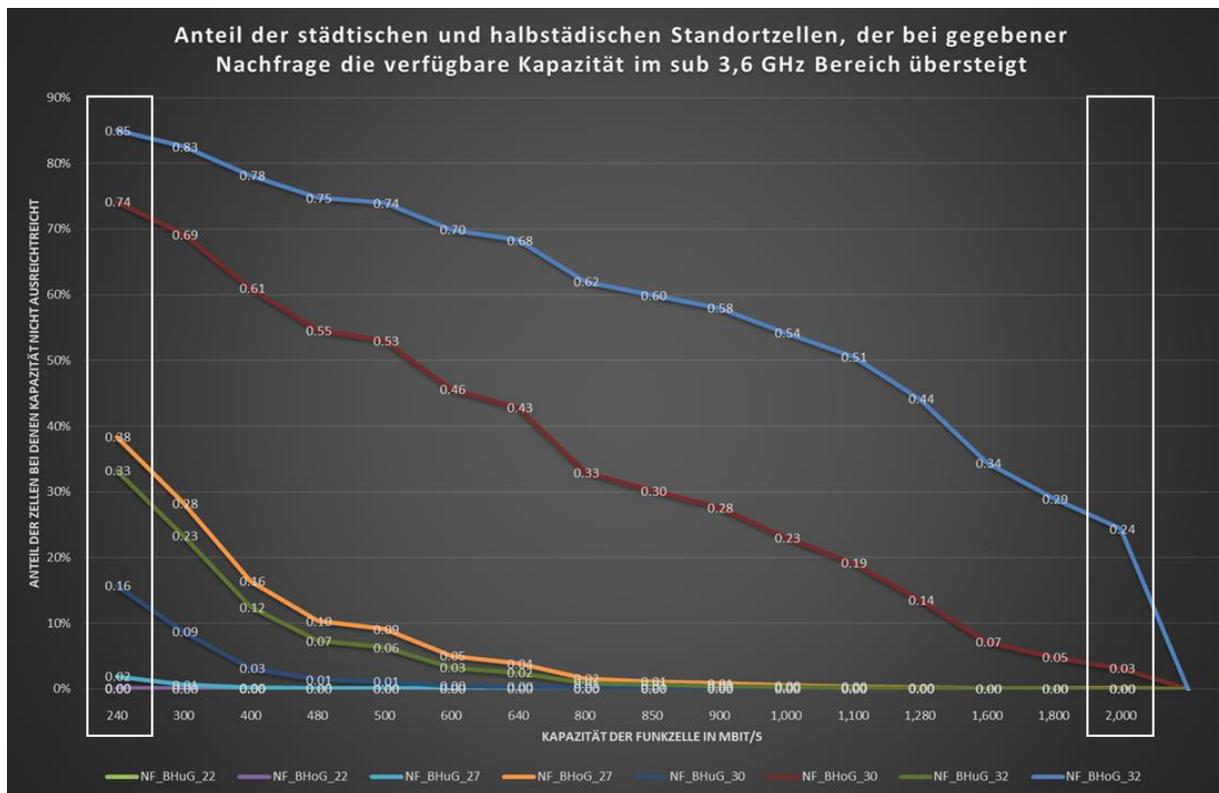
Tabelle 5-1: Verkehrsnachfrage über die Zeit

Jahr	Obere/untere Nachfrage, (rote/blau Kurve, Abbildung 3-4)			
	2022	2027	2030	2032
Obere Nachfrage (oG) [Mbit/s je 1.000 Nutzer]	45,4	277,5	821,8	1694,9
Untere Nachfrage (uG) [Mbit/s je 1.000 Nutzer]	31,2	87,8	163,5	247,5

5.2.1 Betrachtung von 5G im sub 3,4 GHz Spektrum an allen Standorten

Für die Beantwortung der ersten Fragestellung, ob das sub 3,4 GHz Spektrum bei bestehenden Standorten ausreicht, die prognostizierte Nachfrage in den Zellen zu befriedigen, stellen wir für die in Tabelle 5-1 dargestellten Jahre den Kapazitätsbedarf (-nachfrage) und das Kapazitätsangebot je Standort (Abschnitt 4.2) gegenüber. Bei diesem Vergleich beschränken wir uns auf den Downlink. Wir untersuchen nur die städtischen und halbstädtischen Gebiete, weil wir uns im Grundsatz auf ergänzende 3,6 GHz Standorte fokussieren, die im ländlichen Raum wenig Sinn machen.

Abbildung 5-3: Nachfragebefriedigung durch Kapazitätsangebot im sub 3,4 GHz Bereich



Quelle: WIK, eigene Berechnungen. Die Kurven beziehen sich auf die in Tabelle 5-1 aufgeführten Nachfragen und sind über die Zeile (oG, uG) und die letzten beiden Ziffern der Jahreszahl (22 – 32, Spalte) abgekürzt.

Abbildung 5-3 zeigt über das mögliche Kapazitätsangebot einer sub 3,4 GHz Funkzelle (240 – 2.000 Mbit/s) auf der X-Achse für jede Nachfrage aus Tabelle 5-1, die in Linien unterschiedlicher Farbe dargestellt sind, wieviel Prozent der Gesamtheit der (s) und (h) Funkzellen die nachgefragte Kapazität nicht befriedigen können.

Dabei steht jede Linie für den Kapazitätsbedarf in einem Jahr. Die oberste blaue Linie steht für den Nachfragewert 1694,9 des Jahres 2032. Sie ist die in unserem Zusammenhang Wichtigste der Kurven. Die Prozentzahlen auf den Kurven über jeder Kapazitätskategorie geben den Anteil der Funkzellen wieder (Standorte), bei denen die Kapazitätsnachfrage größer als die verfügbare Kapazität ist.

Wenn beispielsweise an allen Funkzellen Kapazität von lediglich 240 Mbit/s bereitgestellt wird, dann werden bei einem Nachfragevolumen von 1694,9 Mbit/s / 1000 Nutzer des Jahres 2032 (oberste blaue Linie) 85% der Zellen unterversorgt sein. Wird allerdings eine Zellkapazität von 2000 Mbit/s bereit stehen, werden die sub 3,4GHz Frequenzen in nur 24% der Zellen nicht ausreichen, die Nachfrage zu befriedigen. Highlights der Ergebnisse fassen wir hier kurz zusammen:

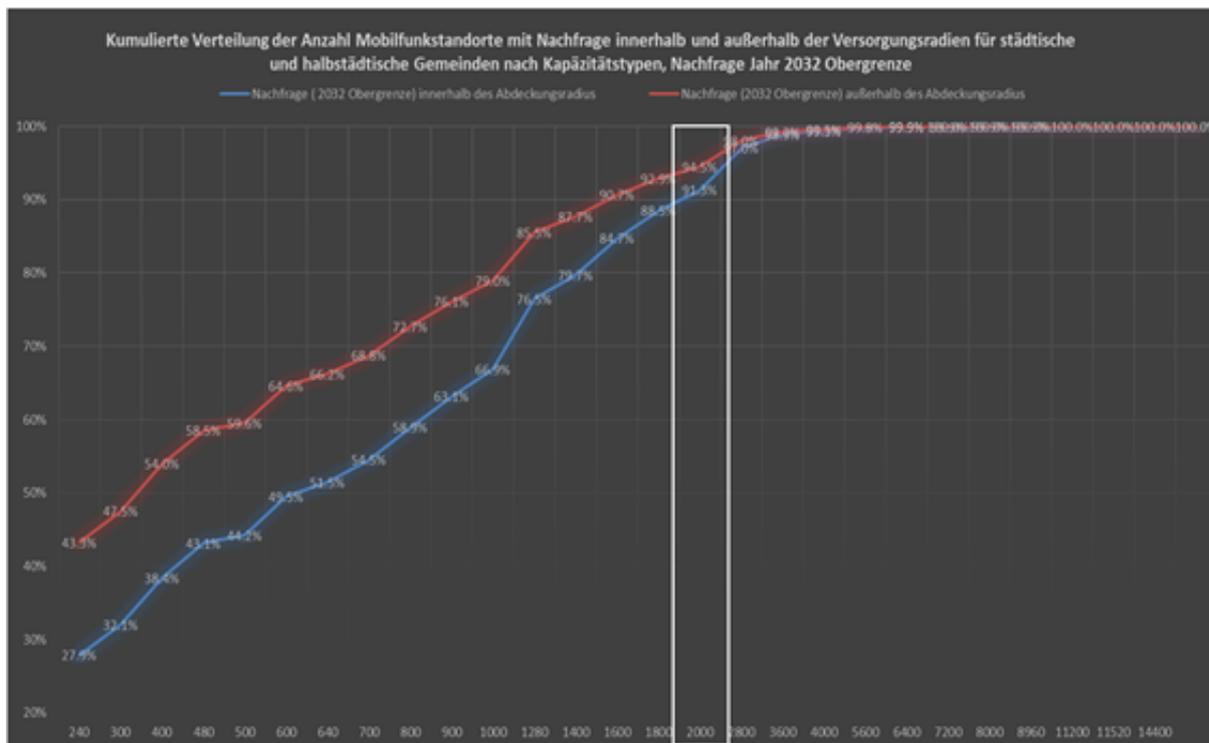
- Nachfragen von unterhalb 163 Mbit/s/1000 Nutzer (uG_30) können in jedem Fall ohne zusätzliche Frequenzen in 3,6 GHz-Band alleine durch den Umbau der bestehenden Standorte auf 5G in den vorhandenen Frequenzbändern kleiner 3,4 GHz befriedigt werden.
- Eine Widmung von 80 MHz Spektrum (der 100 verfügbaren) reicht aus, busy-hour-Nachfragen bis 277 Mbit/s/1000 Nutzer (oG_27) zu bedienen, was selbst dann erreicht wird, wenn man von einer dreifachen Überdimensionierung ausgeht (640 Mbit/s/Sektor = Auslegung auf die Kapazität eines Sektors bei drei Sektoren am Standort)
- Die Nachfrage für das Jahr 2032 im Extremszenario der Versechsfachung der Verkehrsnachfrage alle 5 Jahre (36-Fache in 10 Jahren) kann durch Nutzung der 100 MHz Spektrum an 74% aller Standorte erreicht werden, ohne 3,6 GHz Frequenzen zu installieren, wenn die Sektorkapazität 2000 Mbit/s ermöglicht. (Fall 100 MHz, 4 Layer, Spektrale Effizienz 5 Bit/s/Hz und dreifacher Überdimensionierung)
- Die Nutzung von 3,6 GHz Frequenzen ist danach auf absehbare Zeit keine Notwendigkeit.
- Erst im Jahr 2032 im hohen Nachfrageszenario wird in einem Umfang von 24% der Zellen die Versorgung mit 2000 Mbit/s nicht ausreichen, um die Nachfrage an allen Standorten zu decken.
- Dies gilt ebenso für einige Zellen sehr hoher Nachfrage (einige Zellen übersteigen auch extreme Kapazitäten des 3,6 GHz Bereichs-Thema hot-spot Nachfrage)

5.2.2 Betrachtung von 5G bei Ergänzung von 3,6 GHz an allen bestehenden Standorten

Für die Beantwortung der 2. Fragestellung, ob eine Nachrüstung von 3,6 GHz Zellen an den bestehenden Standorten ausreichend ist, gehen wir ähnlich vor, wie zuvor. Berücksichtigt werden die unterschiedlichen Zellgrößen (Radien von 450 m (s) bzw. 750 m (h) für 3,6 GHz) und die Verortung der Nachfrager. Wir vergleichen das Kapazitätsangebot und die Nachfrage innerhalb und außerhalb der 3,6 GHz Zellradien. Abbildung 5-4 beschreibt nur für die obere Nachfrage im Jahr 2032, bei welchem Kapazitätsangebot der Funkzelle (vgl. Tabelle 4-2) wieviel Prozent der Zellen die Nachfrage befriedigen

können, und damit auch, wie viele nicht, und dies für die Nachfrage innerhalb der Abdeckungsradien von 3,6 GHz (blaue Kurve) und außerhalb (rote Kurve). Bei niedrigerer Nachfrage steigt der ausreichende Versorgungsgrad entsprechend.

Abbildung 5-4: *Befriedigte Kapazitätsnachfrage (2032, oberer Wert (oG)) an bestehenden Standorten mit ergänzten 3,6 GHz Zellen*



Quelle: WIK, eigene Berechnungen

Bei einer Kapazitätsnachfrage von 1694,9 Mbit/s je 1000 Nutzer im Jahr 2032 und einem Kapazitätsangebot je Funkzelle von 2.000 Mbit/s können 91,3% der Zellen die Nachfrage innerhalb der Zelleradien von 3,6 GHz bedienen, 8,7% jedoch nicht. Sie brauchen also eine kapazitiver Erweiterung innerhalb der 3,6 GHz Funkzellen (blaue Kurve). Dies ist durch kapazitative Maßnahmen in den 3,6 GHz Zellen (z.B. Antennentechnik) möglich (Frage 4.).

94,5% der Zellen können die Kapazitätsnachfrage außerhalb der (450 bzw 750 m Radien) der 3,6 GHz Funkzellen befriedigen, jedoch 5,5% nicht. Bei niedrigeren Nachfragen (z.B. in früheren Jahren oder anderen Wachstumsannahmen) verbessert sich die Situation. Gleiches gilt auch, wenn die Funkzelle nun durch 3,6 GHz zusätzliche höhere Kapazitäten bereitstellen kann (Tabelle 4-2). Dies kann die Belastung der sub 3,4 GHz Frequenzen im Innenraum entlasten. Eine Nachverdichtung innerhalb der Abdeckungskreise für das 3,6 GHz Spektrum mit Radius 450 m für städtische und Radius 750 Meter für halbstädtische Gebiete wird in sehr wenigen Fällen, etwa 0,13%, notwendig, nämlich bei einem Kapazitätsbedarf > 7200 Mbit/s. Das betrifft nur 44 Standorte.

Geht man vorsichtiger Weise außerhalb der 3,6 GHz Zellen nur von einem Kapazitätsangebot von 800 MHz aus, dann können ca. 27% der Funkzellen die (obere) Nachfrage für 2032 nicht bedienen.

5.2.3 Ermittlung der Bedarfslücken außerhalb der 3,6 GHz Abdeckung an den Bestandsstandorten

Die Analyse hat gezeigt, dass über die nächsten 10 Jahre eine Nachverdichtung nur in Fällen sehr hoher Nachfragen notwendig sein wird (Jahr 2032, obere Nachfragegrenze). Gehen wir vorsichtigerweise (konservativ) davon aus, dass im sub 3,4 GHz Spektrum Kapazität für maximal 800 Mbit/s an den Randlagen bereitgestellt werden können, dann wird eine Nachverdichtung außerhalb der Abdeckungskreise mit Radius 450 m für städtische und Radius 750 Meter für halbstädtische Gebiete in etwa 27% der Fälle notwendig (Kapazitätsbedarf > 800 Mbit/s).

Abbildung 4-2 zeigt, dass eine Nachverdichtung außerhalb der 3,6 GHz Zellen (blau und rosa) innerhalb der Voronoi-Zellen häufig nicht sinnvoll ist, weil sich Nachfragecluster an den Zellgrenzen ergeben. Eine Lösung könnte in der Bildung größerer Aggregate von Rasterzellen z.B. auf Gemeindeebene, liegen.

Zur Abschätzung der benötigten Standorte zur Nachverdichtung der Nachfrage außerhalb der 3,6 GHz Radien berechnen wir die nicht überdeckten bebauten Flächen in den 27% der nicht ausreichend versorgten Standorte und teilen diese durch die Kreisflächen für 3,6 GHz Zellradien für (s) und (h) Gebiete, um die Anzahl Standorte zu ermitteln, die eine Flächenversorgung mit 3,6 GHz in den betroffenen Voronoi-Zellen erlauben würden. Diese modellhafte Annahme wird die abzudeckende Fläche in manchen Fällen unterschätzen (und damit die benötigte Anzahl Standorte zur Nachverdichtung). Andererseits bieten sich für die Versorgung solcher Gebiete die Flächenfrequenzen an.

Die Aggregation der bebauten Flächen außerhalb der Radien für die 27% nicht ausreichend versorgten Standorte ergeben 4.137 km² in städtischen Gemeinden und 6.824 km² in halbstädtischen Gemeinden. Die Division mit den Zellflächen (0,64 km² für städtische Flächen und 1,77 km² für halbstädtische Gemeinden) führen zu 6.503 + 3.861 Standorten = 10.364 Standorte, die für die Nachverdichtung errichtet werden müssten. Dies ist im Vergleich zu der Überschlagsrechnung von Abschnitt 4.3 (> 160.000 Standorte) ein deutlich geringerer Wert.

6 Zusammenfassung

Die zu erwartenden Nachfragen der nächsten Zukunft stellen im 5G Kontext noch keine Herausforderung dar. 3,6 GHz Frequenzen an allen Standorten oder gar in der Fläche sind nach unseren Modellergebnissen für die kommenden 10 Jahre voraussichtlich nicht erforderlich. Jedoch ist die Nutzung von 3,6 GHz Frequenzen bereits heute sinnvoll zur Nachfragebefriedigung z.B. an hot spots. Zur Flächendeckung jedoch sind solche Frequenzen wenig geeignet. Die Nachfragen können zumeist über das sub 3,4 GHz Spektrum befriedigt werden. Eine Kombination der Frequenzbänder ist sinnvoll.

Da die Nachfrage im Bereich von 1000 m Radius um die bestehenden Standorte knapp 80% der gesamten Nachfrage der Mobilfunkbetreiber ausmacht, können Reichweitengewinne für das 3,6 GHz Spektrum große Nachfragepotentiale ohne Neubau von Standorten erschließen. Reichweitengewinne wären u.U. über Beamforming möglich, zumindest für feste Standorte.

Tabelle 6-1 fasst die Ergebnisse für die Nachfrage der oberen Kurve (Abbildung 3-4) zusammen. Selbst bei der von uns unterstellten höchsten Wachstumsannahme sind im Jahr 2032 nur verhältnismäßig wenige ergänzende Funkzellstandorte aus Kapazitätsgründen zu errichten.

Die Funknetzplanung hängt stark von den konkreten Gegebenheiten vor Ort ab (Anzahl der Nachfrager, Besiedlungsstruktur, Nutzerverhalten, Kapazität der Funkzellen), die wir so modellhaft nicht abgebildet haben.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse (obere Nachfragekurve)

	Nachfrageszenarien	NF_Bho(u)G_22	NF_Bho(u)G_27	NF_Bho(u)G_30	NF_Bho(u)G_32
Jahr		2022	2027	2030	2032
Nachfrage in Mbit/s/1000 Nutzer obere Grenze (oG)		45,4	277,5	821,8	1.694,9
Anzahl Standorte mit Kapazitätsnachfrage größer Angebot					
Anteil der S- und H-Standorte, der bei gegebener Nachfrage die verfügbare Kapazität im sub 3,4 GHz Bereich übersteigt	Kapazitätsgrenze	% Standorte nicht versorgt			
	240	0.0%	0.0%	74.0%	85.0%
	800	0.0%	2.0%	33.0%	69.0%
	2000	0.0%	0.0%	3.0%	24.0%
Anzahl Standorte mit Kapazitätsnachfrage größer Angebot innerhalb					
Anteil der S- und H-Standorte, der bei gegebener Nachfrage die verfügbare Kapazität innerhalb der 3,6 GHz Zelle übersteigt	Kapazitätsgrenze innerhalb	%Standorte nicht versorgt			
	2000	0.0%	0.0%	0.6%	8.7%
	7200	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
Anzahl Standorte mit Kapazitätsnachfrage größer Angebot außerhalb					
Anteil der S- und H-Standorte, der bei gegebener Nachfrage die verfügbare Kapazität außerhalb der 3,6 GHz Zelle übersteigt	Kapazitätsgrenze außerhalb	%Standorte nicht versorgt			
	2000	0.0%	0.0%	0.4%	5.5%
	800	0.0%	0.0%	8.7%	27.3%
Nachverdichtung zusätzliche Standorte/Sektoren					
Nachverdichtung außerhalb der 3,6 GHz Zelle	außerhalb Grenze (800)				10364
Nachverdichtung innerhalb der 3,6 GHz Zelle	innerhalb Grenze (7200)				44

Literaturverzeichnis

- Bericht zum Breitbandatlas Teil 1: Ergebnisse, S. 10,
https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-mitte-2021-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesnetzagentur - Mobiles Breitband, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Breitband/MobilesBreitband/start.html>
- Ericsson Mobility Report 2022, S. 17,
https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report?gclid=EAlaIQob-ChMI29W8m-uc_AIVBtxRCh10bg1PEAAAYASAAEgL5QPD_BwE&gclsrc=aw.ds
- ETSI TR 138 901 V16.1.0 (2020-11), S. 25 ff, https://www.etsi.org/de-liver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf
- Goldmedia/Fraunhofer IIS 2021: PERSPEKTIVEN ZUR NUTZUNG DES UHF-BANDS 470-694 MHZ NACH 2030, 2021 für BNetzA (S. 36, 40),
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Studien/StudieZukunftUHFBand.html
- Jahresbericht BNetzA 2021, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2021.pdf?__blob=publicationFile
- Mitteilung der Europäischen Kommission: „Leitlinien für staatliche Beihilfen zur Förderung von Breitbandnetzen“, C(2022) 9343 final, vom 12.12.2022,
https://competition-policy.ec.europa.eu/sectors/electronic-communications/legislation_en
- OFCOM, Connected Nations 2021, UK Report, 16.12.2021, S.51,
https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0035/229688/connected-nations-2021-uk.pdf