

Elektromagnetische Felder in NRW – Feldmessungen im Umfeld von 5G-Mobil- funksendeanlagen

Zwischenbericht zu AP1 und AP2

erstellt für das

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucher-
schutz NRW

15.11.2021

Projektleitung beim Auftragnehmer

Thomas Kopacz, M.Sc., Anna-Malin Schiffarth, M.Sc.
Institut für Hochfrequenztechnik
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Melatener Straße 25
52074 Aachen
Tel: 0241 80-27944
Fax: 0241 80-22641
E-Mail: [kopacz\(at\)ihf.rwth-aachen.de](mailto:kopacz(at)ihf.rwth-aachen.de)

Prof. Dr. Matthias Wuschek
EM-Institut GmbH
Carlstraße 5
93049 Regensburg
Tel: 0941/2983651
Fax: 0941/2983652
E-Mail: [matthias.wuschek\(at\)em-institut.de](mailto:matthias.wuschek(at)em-institut.de)

Dr. Christian Bornkessel
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
Tel: 03677/69-1592
Fax: 03677/69-1586
E-Mail: [christian.bornkessel\(at\)tu-ilmenau.de](mailto:christian.bornkessel(at)tu-ilmenau.de)

Autoren

Thomas Kopacz, M.Sc.
Anna-Malin Schiffarth, M.Sc.
Prof. Dr. Matthias Wuschek
Dr. Christian Bornkessel

Projektleitung beim Auftraggeber

Rainer Kindel
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Fachbereich 45: Umweltradioaktivität und Überwachung kerntechnischer Anlagen, Licht,
EMF, Geräusche und Erschütterungen
Wallneyer Straße 6
45133 Essen
E-Mail: [rainer.kindel\(at\)lanuv.nrw.de](mailto:rainer.kindel(at)lanuv.nrw.de)

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1 Beschreibung der 5G-Mobilfunktechnik im Hinblick auf die emissions- und immissionsrelevanten Eigenschaften	5
1.1 Kompakter Überblick zur 5G-Technik und –Luftschnittstelle.....	5
1.1.1 Luftschnittstelle	5
1.1.2 Netzstruktur.....	10
1.1.3 Antennentypen.....	10
1.1.4 Sendeleistungen	12
1.2 Derzeitig genutzte und zukünftig zu erwartende spezielle Techniken bei 5G.....	13
1.2.1 Dynamic Spectrum Sharing (DSS).....	13
1.2.2 Smart Power Lock (SPL).....	13
1.3 Aktuelle und zukünftige Frequenzbereiche bei 5G	14
1.3.1 Einfluss auf die Feldausbreitung in der Praxis	15
1.4 5G-Ausbau in NRW.....	17
1.4.1 Deutsche Telekom	17
1.4.2 Telefónica Deutschland	18
1.4.3 Vodafone Germany.....	19
1.5 Nationale und internationale Messempfehlungen	20
1.5.1 Messanweisung der Bundesnetzagentur	20
1.5.2 Schweizer Messempfehlung (METAS).....	21
1.5.3 IEC 62232.....	22
1.6 Erläuterung einschlägiger 5G-typischer Fachbegrifflichkeiten.....	24
2 Durchführung der Immissionsmessungen	33
2.1 Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder	33
2.2 Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien	35
2.3 Eingesetzte Messgeräte	35
2.4 Verwendete Messverfahren	36
3 Messungen im Umfeld von 5G-Basisstationen.....	38
3.1 Beschreibung der Standorte und Messpunkte	39
3.1.1 Anlage 1: Übach-Palenberg, Martin-Luther-Straße 8	39
3.1.2 Anlage 2: Lippstadt, Gaußstraße 17	40
3.1.3 Anlage 3: Düsseldorf, Am Wald 130	41
3.1.4 Anlage 4: Essen, Frielingsdorfweg 1.....	42
3.1.5 Anlage 5: Oberhausen, Bismarckstraße 53	43
3.1.6 Anlage 6: Köln, Richard-Wagner-Straße 42	44
3.1.7 Anlage 7: Simmerath, Kranzbruchstraße 15.....	45

3.1.8	Anlage 8: Bonn, Am Stingenberg	46
3.1.9	Anlage 9: Münster, Münzstraße 13	47
3.1.10	Anlage 10: Dortmund, Leierweg 65.....	48
3.2	Ergebnisse: Maximalimmissionen	49
3.3	Ergebnisse: Momentanimmissionen	53
3.4	Ergebnisse: Typische Immission und Vergleich mit momentaner sowie maximaler Immission bei 5G im 3,6-GHz-Band (MB36)	57
3.5	Vergleich der Immissionen von 5G, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM	61
3.6	Immissionsänderung an früher untersuchten Messpunkten.....	65
3.7	Horizontaler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage	66
3.8	Vertikalwinkel zwischen Messpunkt und Sendeanlage.....	66
3.9	Zusammenfassung und Fazit	68
	Abkürzungsverzeichnis	70
	Literaturverzeichnis	73

1 Beschreibung der 5G-Mobilfunktechnik im Hinblick auf die emissions- und immissionsrelevanten Eigenschaften

1.1 Kompakter Überblick zur 5G-Technik und –Luftschnittstelle

1.1.1 Luftschnittstelle

1.1.1.1 Frequenzbereiche und Bandbreiten

Im Zuge der derzeitigen Standardisierung des 5G-Mobilfunks (Stand: 2021) wurden sowohl für 5G-fähige Endgeräte (User Equipment, UE) [TS 38.101-1] als auch für 5G-Basisstationen [TS 38.104] Frequenzbereiche für den Betrieb spezifiziert, die sich in folgende zwei Blöcke unterteilen lassen:

- FR1 (Frequency Range 1): 410 - 7.125 MHz
- FR2 (Frequency Range 2): 24.250 - 52.600 MHz

Da der aktuelle kommerzielle 5G-Ausbau in Nordrhein-Westfalen und Deutschland sich auf FR1 beschränkt, wird im Folgenden der Fokus auf diesen Frequenzbereich gelegt. Für UEs und Basisstationen sind je nach Frequenzbereich unterschiedliche Kanalbandbreiten für das belegte Spektrum spezifiziert. In FR1 können 13 verschiedene Kanalbandbreiten zwischen 5 MHz und 100 MHz angenommen werden. Dabei fällt die eigentliche Signalbandbreite aufgrund von mindestens einzuhaltenden Schutzabständen zu Nachbarbändern etwas kleiner aus. Dadurch wird die maximale Signalbandbreite bzw. die maximale Anzahl an Resource Blocks (RBs) festgelegt, wie es in Tabelle 1.1 für in FR1 typischerweise verwendete Trägerabstände von 15 kHz bzw. 30 kHz dargestellt ist.

Kanalbandbreite in MHz	Max. Signalbandbreite in MHz	Max. Signalbandbreite in #RBs		Max. Signalbandbreite in #REs	
		SCS = 15 kHz	SCS = 30 kHz	SCS = 15 kHz	SCS = 30 kHz
5	3,96	22	11	264	132
10	8,64	48	24	576	288
15	13,68	79	38	912	456
20	18,36	102	51	1224	612
25	23,40	130	65	1560	780
30	28,08	156	78	1872	936
40	38,16	212	106	2544	1272
50	47,88	266	133	3192	1596
60	58,32	324	162	3888	1944

70	68,04	378	189	4536	2268
80	78,12	434	217	5208	2604
90	88,20	490	245	5880	2940
100	98,28	546	273	6552	3276

Tabelle 1.1: Maximale Signalbandbreite in MHz als Vielfache von Resource Blocks (RB) und Resource Elements (RE) in Abhängigkeit von der Kanalbandbreite für Trägerabstände von SCS = 15 kHz und SCS = 30 kHz [TS 38.101-1],[TS 38.104]. Ein Resource Block beinhaltet immer 12 Subcarrier.

1.1.1.2 Modulationsschemata und Zugriffsverfahren

Je nach Anforderung, was die Robustheit der Übertragung angeht, werden folgende Modulationsschemata für den Downlink (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) bzw. für den Uplink (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) verwendet:

Modulationsschema	Anzahl Bits pro Symbol	Downlink (PDSCH)	Uplink (PUSCH)
$\pi/2$ -BPSK	1	nein	ja
QPSK	2	ja	ja
16-QAM	4	ja	ja
64-QAM	6	ja	ja
256-QAM	8	ja	ja

Tabelle 1.2: In PDSCH (Downlink) und PUSCH (Uplink) unterstützte Modulationsschemata sowie die jeweilige Anzahl der Bits pro übertragenem Symbol [TS 38.211].

Je weniger Bits pro Symbol übertragen werden, desto robuster ist das Modulationsschema gegenüber Störungen. Daher werden wichtige physikalische Übertragungskanäle zur Signalisierung immer mit QPSK moduliert, z.B. Physical Broadcast Channel (PBCH), Physical Downlink Control Channel (PDCCH) und Physical Uplink Control Channel (PUCCH). Eine größere Anzahl an Bits pro Symbol bedeutet hingegen eine größere Datenübertragungskapazität. Bei 256-QAM ist sie theoretisch um den Faktor 8 größer als bei Binary Phase Shift Keying (BPSK).

Mit OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) wird bei 5G ein Zugriffsverfahren verwendet, das bereits bei LTE (4G) eingesetzt wird und das sowohl zeitlich als auch spektral Ressourcen aufteilen und zur Verfügung stellen kann. Die im Frequenzbereich entstehenden Unterträger sind dabei so geformt, dass sie andere Unterträger möglichst wenig stören. Die kürzest mögliche Übertragungsdauer im Zeitbereich wird "OFDM-Symbol" genannt.

1.1.1.3 Numerologie und Frame-Struktur

5G bietet bezüglich der Numerologie, d.h. bezüglich des Trägerabstands (SCS) bzw. der Symboldauer eine hohe Flexibilität: Für den Trägerabstand sind Werte von 15 kHz (wie bei LTE), 30 kHz und 60 kHz in FR1 spezifiziert [TS 38.211]. Der Trägerabstand ist unmittelbar mit der

Dauer eines OFDM-Symbols bzw. mit der Struktur eines 5G-Frames verknüpft. Aus der zeitlichen Perspektive setzt sich ein 5G-Frame aus den folgenden Teilen zusammen (siehe auch Tabelle 1.3):

- Ein (OFDM-)Symbol repräsentiert die kürzeste zeitliche Einheit. Dessen Dauer hängt unmittelbar vom Trägerabstand ab. Bei einem Trägerabstand von 30 kHz beträgt die Symboldauer bei normalem zyklischen Präfix („normal cyclic prefix“) im Mittel 35,7 µs, bei einem Trägerabstand von 15 kHz beträgt sie entsprechend im Mittel 71,4 µs.
- Ein Slot beinhaltet immer 14 Symbole; dessen Dauer hängt vom Trägerabstand ab.
- Ein Subframe besteht immer aus 10 Slots, sodass dessen Dauer ebenfalls vom Trägerabstand abhängt.
- Ein Halb-Frame hat immer eine Dauer von 5 ms.
- Ein Frame hat immer eine Dauer von 10 ms und beinhaltet zwei Halb-Frames bzw. je nach Trägerabstand 1 bis 16 Subframes.

Trägerabstand	Anzahl zeitlich sukzessiver Symbole pro Slot	Anzahl Slots pro Frame	Anzahl Subframes pro Frame
15 kHz	14	10	1
30 kHz	14	20	2
60 kHz	14	40	4

Tabelle 1.3: Anzahl zeitlich aufeinanderfolgender OFDM-Symbole pro Slot, Slots pro Frame und Subframes pro Frame für normalen zyklischen Präfix [TS 38.211].

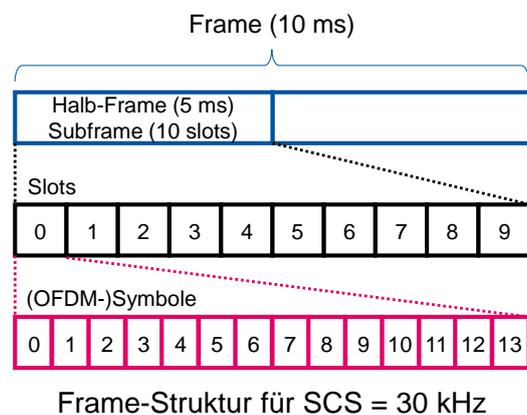


Bild 1.1: Aufbau eines 5G-Frames beispielhaft für einen Trägerabstand von 30 kHz.

In Bild 1.1 ist der Aufbau eines 5G-Frames auf allen Ebenen im Zeitbereich beispielhaft für einen Trägerabstand von 30 kHz dargestellt.

Das *OFDM-Symbol*, das im Trägerfrequenzbereich existiert und sich aus der Summe aller modulierten Träger zusammensetzt, ist vom *komplexen Symbol* zu unterscheiden, das im Basisband vorliegt und durch seine Amplituden- und Phaseninformation im komplexen Signalraum ein oder mehrere Bit kodieren kann (siehe Teilkapitel 1.1.1.2). Das OFDM-Symbol kann somit eine zur Anzahl der Träger proportionale große Menge von zu übertragenden komplexen Symbolen beinhalten.

1.1.1.4 Resource Grid

Wie bei LTE besteht bei 5G NR die kleinste Einheit auf der Frequenzachse aus einem Träger (Subcarrier) und auf der Zeitachse aus einem Symbol. Diese elementare Einheit wird „Resource Element“ (RE) genannt. Die kleinste einem UE zuweisbare Einheit sind sogenannte Resource Blocks (RB). Spektral umfassen sie analog zu LTE zwölf Träger, zeitlich hingegen nur ein einzelnes OFDM-Symbol (bei LTE umfassen sie sieben Symbole) [TS 38.211]. Je nach Signalbandbreite ergibt sich eine andere maximale Anzahl gleichzeitig übertragbarer Resource Blocks (siehe Tabelle 1.1). Die Träger im Frequenzbereich und die Symbole im Zeitbereich werden im Resource Grid zusammengefasst (siehe Bild 1.2).

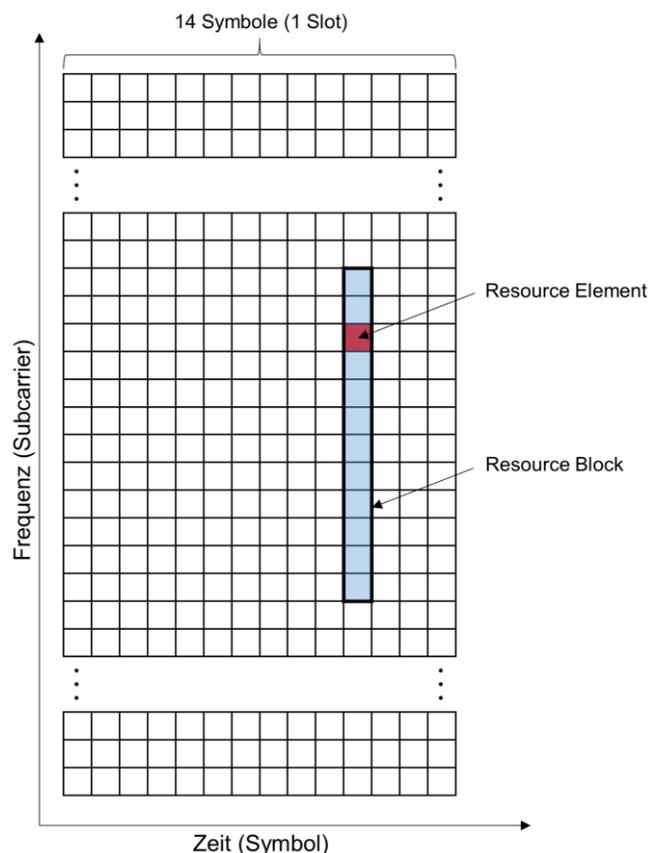


Bild 1.2: 5G Resource Grid im Frequenz- und Zeitbereich (y- bzw. x-Achse). Dargestellt sind 14 Symbole (ein Slot) im Zeitbereich. Ein Quadrat entspricht einem Resource Element (RE). Im Frequenzbereich werden zwölf Resource Elements zu einem Resource Block (RB) zusammengefasst.

1.1.1.5 Duplex-Verfahren

Im Mobilfunk erfolgt die Übertragung von Daten in beide Richtungen, d.h. sowohl von der Basisstation zum Endgerät (Downlink) als auch vom Endgerät zur Basisstation (Uplink). Die Trennung zwischen beiden Kommunikationsrichtungen geschieht entweder im Frequenzbereich, indem Uplink- und Downlink-Übertragung auf unterschiedlichen Frequenzen erfolgen (Frequency Division Duplex, FDD). Oder die Trennung geschieht im Zeitbereich, indem Uplink- und Downlink-Übertragung zwar auf derselben Frequenz, aber zeitlich separiert erfolgen (Time Division Duplex, TDD). Im Standard wird für jedes spezifizierte 5G-Frequenzband vorgegeben, welches Duplexverfahren (FDD oder TDD) verwendet werden darf [TS 38.104].

1.1.1.6 Aus Immissionssicht relevante physikalische Kanäle

Im Downlink werden folgende aus Immissionssicht relevante physikalische Kanäle spezifiziert [TS 38.211][TS 38.212]:

- Im Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) wird primär der Verkehr im Downlink übertragen. Des Weiteren erfolgt dort eine Übertragung UE-spezifischer Kontrollinformationen.
- Im Physical Broadcast Channel (PBCH) werden die grundlegenden Informationen über die Basisstation übertragen. Er ist Teil des Synchronization Signal Block (SSB, siehe Teilkapitel 1.1.1.7).

Das Pendant zum PDSCH im Uplink ist der Physical Uplink Shared Channel (PUSCH). Über diesen physikalischen Kanal wird primär der Verkehr im Uplink übertragen. Darüber hinaus erfolgt dort eine Übertragung von Kontrollinformationen [TS 38.211][TS 38.212].

1.1.1.7 SS/PBCH Block (SSB)

Der Synchronization Signal/PBCH Block (SS/PBCH Block, SSB) dient zur Synchronisation zwischen Endgerät und Basisstation und dem initialen Verbindungsaufbau. Der SSB hat eine Dauer von 4 aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen im Zeitbereich und besteht aus 127 bis 240 Trägern im Frequenzbereich (siehe Bild 1.3) [TS 38.211]. Die Periodizität, mit der der SSB ausgesendet wird, kann unterschiedliche Werte zwischen 5 ms und 160 ms annehmen, sie liegt aber üblicherweise bei 20 ms.

Es können mehrere aufeinanderfolgende SSB innerhalb eines Halb-Frames ausgesendet werden [TS 38.213]. Deren maximale Anzahl L_{\max} ist abhängig vom Frequenzband sowie vom Duplexverfahren und beträgt für FR1:

- $L_{\max} = 4$ für Frequenzen $f \leq 3$ GHz (FDD) bzw. $f \leq 2,4$ GHz (TDD)
- $L_{\max} = 8$ für Frequenzen $f > 3$ GHz für FDD und $f > 2,4$ GHz für TDD

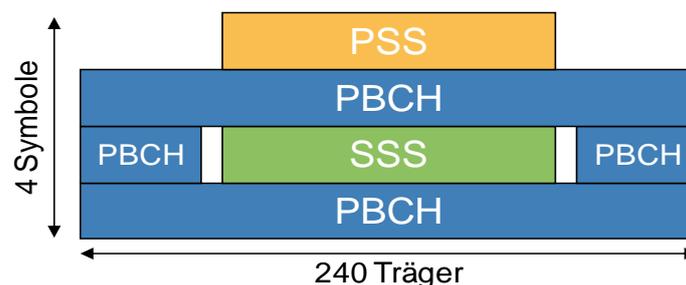


Bild 1.3: Schematische Darstellung eines SSB bestehend aus den Signalen PSS, SSS sowie dem PBCH, die im Zeitbereich 4 OFDM-Symbole und im Frequenzbereich bis zu 240 Träger umfassen.

Bei Abstrahlung eines SSB ($L = 1$) wird die gesamte Zelle mit dem SSB versorgt. Bei Abstrahlung mehrerer SSB ($L > 1$) werden diese in unterschiedliche Richtungen abgestrahlt und weisen zur Unterscheidbarkeit verschiedene Beam-Indizes auf (siehe Teilkapitel 1.1.3)

1.1.2 Netzstruktur

Im Standard werden drei unterschiedliche Klassen von Basisstationen definiert, anhand derer eine Aussage über die Netzstruktur ableitbar ist [TS 38.104]. Dabei wird zwischen „Wide Area Base Stations“, „Medium Range Base Stations“ sowie „Local Area Base Stations“ unterschieden. Gemessen an den Anforderungen hinsichtlich des Mindestabstands zwischen Basisstationsantenne und Endgerät, entsprechen diese Klassen den Zelltypen „Macro Cell“ (Mindestabstand von 35 m), „Micro Cell“ (Mindestabstand von 5 m) sowie „Pico Cell“ (Mindestabstand von 2 m).

Für die Versorgung größerer Flächen mit geringer Nutzerdichte werden aufgrund ihres großen Zellradius Makrozellen verwendet. Die zugehörigen Basisstationsantennen befinden sich meist auf Hausdächern oder auf Masten. Mit zunehmender Nutzerdichte können Mikrozellen verwendet werden, um den Versorgungsbedarf üblicherweise im städtischen Umfeld zu decken. Die zugehörigen Basisstationsantennen befinden sich meist niedriger als bei den Makrozellen auf Hausdächern. Bei einer sehr hohen Nutzerdichte im Außenbereich oder zur Versorgung von abgeschirmten Innenbereichen werden meist Pikozellen verwendet. Die zugehörigen Basisstationsantennen befinden sich in der Regel in geringen Höhen auf "Stadtmöbeln" (z.B. Reklametafeln, Litfaßsäulen), an Hauswänden im Außenbereich bzw. an Decken im Innenbereich. Entsprechend der kleineren Versorgungsradien fällt die Sendeleistung der Basisstationen bei Mikro- und insbesondere bei Pikozellen üblicherweise deutlich geringer aus. Die beiden letztgenannten Zelltypen werden häufig auch „Small Cells“ genannt.

1.1.3 Antennentypen

1.1.3.1 Differenzierung zwischen Antennentypen

Generell muss bei Basisstationsantennen zwischen zwei Antennentypen unterschieden werden:

Passive Mobilfunkantennen basieren auf Antennengruppen im klassischen Sinne, d.h. sie sind lediglich eine Anordnung mehrerer passiver Antennenelemente. Die Abstrahlung erfolgt durch Speisung der gesamten Antenne mit dem auf die gewünschte Sendeleistung verstärkten hochfrequenten Signal. Im Mobilfunk bestehen diese Antennengruppen in der Regel aus mehreren vertikal übereinanderliegenden Antennenelementen, sodass hauptsächlich in der Vertikalebene eine Bündelung der Richtcharakteristik (d.h. sowohl für den Sende- als auch für den Empfangsfall) stattfindet. Durch geschickte leicht verzögerte Ansteuerung der einzelnen Antennenelemente mithilfe vorgeschalteter Phasenschieber ist es möglich, die Richtcharakteristik in der Vertikalebene um typisch bis zu etwa 15° zu kippen (elektrischer Tilt). Dies erfolgt in der Regel nicht dynamisch im Betrieb, sondern wird zur Netzoptimierung fest eingestellt. Die Richtcharakteristik von passiven Antennen ändert sich also nicht während des Betriebs.

Bei aktiven Antennen handelt es sich um aktive Antennensysteme (d.h. Sender und Antenne bilden eine Einheit), die sowohl Antennengruppen bestehend aus passiven Antennenelementen als auch den Teil beinhalten, in dem die Basisbandsignale auf unterschiedliche Signalfade aufgetrennt sowie auf einen hochfrequenten Träger moduliert und verstärkt werden.

Im Mobilfunk bestehen die Antennengruppen aktiver Antennensysteme üblicherweise aus sowohl vertikal als auch horizontal nebeneinanderliegenden Antennenelementen, sodass eine erhebliche Bündelung der Richtcharakteristik sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung erfolgen kann. Neben dem auch bei passiven Antennen einstellbaren festen elektrischen Tilt, kann die Richtcharakteristik aktiver Antennen im Betrieb durch Gewichtung der Signale im Basisband hochdynamisch geändert werden und an sich ständig wechselnde Empfangsbedingungen bzw. Nutzeranforderungen angepasst werden (Beamforming).

In Bild 1.4 ist schematisch der Aufbau eines aktiven Antennensystems dargestellt. Diese Umsetzung wird auch Hybrid-Beamforming genannt, da es sowohl Basisband-Beamforming (digitales Beamforming) als auch HF-Beamforming (analoges Beamforming) unterstützt. In der Variante „sub-array“ werden hierzu im linken Teil des Antennensystems K Datenströme auf S Hochfrequenzsignalpfade abgebildet. Diese Signalpfade sind nicht mit allen, sondern jeweils nur mit einer Untermenge von Antennenelementen verbunden, den sogenannten Subarrays.

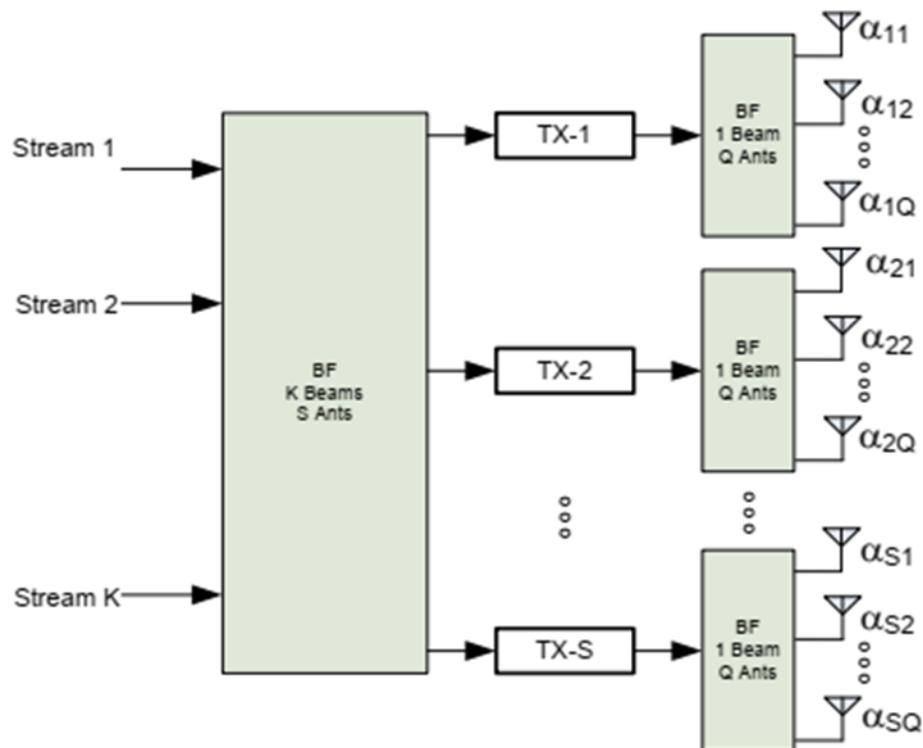


Bild 1.4: Aktives Antennensystem: Hybrid-Beamforming in der Variante „sub-array“ (aus [R1-165362]).

1.1.3.2 Aussendung eines oder mehrerer SSB

Bei Verwendung passiver Antennen wird bei 5G unabhängig vom Netzausrüster lediglich ein SSB abgestrahlt, da es mit diesen Antennen nicht möglich ist mehrere SSB in unterschiedliche Richtungen auszusenden. Ein SSB versorgt somit den gesamten Zellsektor wie beim Broadcast Control Channel BCCH (GSM) oder dem zellspezifischen Referenzsignal CRS (LTE). Für den Fall einer Koexistenz mit LTE kann die Lage des SSB im 5G-Frame bzw. damit einhergehend der SSB-Beam-Index nur bestimmte Werte annehmen (für Details hierzu siehe Teilkapitel 1.2.1).

Bei Verwendung aktiver Antennen ist es in FR1 möglich, bis zu acht SSB in verschiedene Richtungen des Zellsektors auszusenden. Die einzelnen SSB werden dabei sequenziell ausgesendet und weisen unterschiedliche Beam-Indizes auf. Die unterschiedlichen Ausrichtungen können sowohl in unterschiedlichen Vertikalebene als auch in unterschiedlichen Horizontalebene angeordnet sein.

In Nordrhein-Westfalen werden von den Netzbetreibern im 5G-Netz aktive Antennen der Netzausrüster Ericsson, Huawei und Nokia verbaut. Mit den Antennen ist es je nach Anforderung an die Versorgung prinzipiell möglich, verschiedene Konstellationen sowohl hinsichtlich Anzahl von SSB-Ausrichtungen als auch hinsichtlich ihrer Anordnungen einzustellen. Üblicherweise werden aktuell ein SSB (Ericsson), sechs SSB (Nokia) bzw. sieben SSB (Huawei) in einer SSB-Periode abgestrahlt.

1.1.4 Sendeleistungen

Bei den Sendeleistungen muss zwischen der Senderausgangsleistung und der äquivalenten isotropen Strahlungsleistung unterschieden werden. Bei der Senderausgangsleistung handelt es sich um die Leistung, die der Leistungsverstärker vor der Antenne erzeugt hat und die leistungsgebunden in die Antenne gespeist wird. Bei der äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) handelt es sich um das Produkt der von der Antenne tatsächlich abgestrahlten Leistung und dem Antennengewinn, d.h. dem Faktor, der den Grad der Bündelung der Antenne angibt (je stärker die Bündelung, desto größer der Antennengewinn). In Abhängigkeit davon, um welchen Basisstationstyp (für Details hierzu sei auf [TS 38.104] verwiesen) es sich handelt, wird im Standard entweder die Senderausgangsleistung oder die EIRP limitiert [TS 38.141-1], [TS 38.141-2].

Bei Wide Area Basisstationen, die beim Zelltyp Makrozelle eingesetzt werden, gibt es unabhängig vom Basisstationstyp keine Limitierung der Sendeleistung. Bei Medium Range Basisstationen, die beim Zelltyp Mikrozelle eingesetzt werden, liegt die maximale Senderausgangsleistung bei 38 dBm (6,3 W) für einfache Antennen und bei $38 \text{ dBm} + 10 \cdot \log_{10}(N_{\text{TXU}})$ für Antennensysteme mit N_{TXU} Sende-/Empfangspfaden. Die maximale EIRP liegt bei 47 dBm (50 W). Bei Local Area Basisstationen, die beim Zelltyp Pikozelle eingesetzt werden, beträgt die maximale Senderausgangsleistung 24 dBm (0,25 W) für einfache Antennen und $24 \text{ dBm} + 10 \cdot \log_{10}(N_{\text{TXU}})$ für Antennensysteme mit N_{TXU} Sende-/Empfangspfaden. Die maximale EIRP liegt bei 33 dBm (2 W).

Die im Standard vorgegebenen Leistungsbegrenzungen dienen nicht zum Zwecke des Immissionsschutzes, sondern zur Auswahl aufseiten des Netzbetreibers im Hinblick unter anderem auf die Minimierung von Störungen anderer Anlagen (z.B. in benachbarten Zellen oder Frequenzbändern).

1.2 Derzeitig genutzte und zukünftig zu erwartende spezielle Techniken bei 5G

1.2.1 Dynamic Spectrum Sharing (DSS)

Bei Dynamic Spectrum Sharing (DSS) handelt es sich um eine Technologie, die es erlaubt, in ein und demselben Frequenzband parallel 4G (LTE) und 5G zu betreiben. Möglich wird dies erst durch den Umstand, dass die im Rahmen der Frequenzauktionen ersteigerten Frequenzen mittlerweile größtenteils abstrakt vergeben werden, d.h. ihre Nutzung ist nicht an einen bestimmten Funkdienst gebunden. Bei der mit DSS eingeführten Koexistenz von 4G und 5G wird in einem LTE-Frequenzband die Signalisierung beider Funkdienste abgestrahlt (das zell-spezifische Referenzsignal RS bei 4G sowie der SSB bei 5G), sodass Endgeräte je nach technischer Unterstützung 4G- oder 5G-Dienste nutzen können. Aufseiten der Basisstation werden hierbei je nach Bedarfsanforderung durch die Endgeräte die zur Verfügung stehenden Ressourcen dynamisch zwischen 4G und 5G aufgeteilt [5G 21].

Hinsichtlich der Bestimmung der aktuellen Immission (Momentanimmission), kann bei DSS-Anlagen aufgrund der Koexistenz von 4G und 5G sowie der dynamischen Aufteilung der Ressourcen untereinander nicht unterschieden werden, zu welchen Anteilen die gemessene Immission durch 4G oder 5G hervorgerufen wurde. Hinsichtlich der Maximalimmission ist es unerheblich, zu welchen Anteilen die Ressourcen aufgeteilt werden. Der hochgerechnete Immissionswert bleibt davon unberührt, ob die DSS-Anlage bei höchster betrieblicher Auslastung zu 100 % mit 4G, zu 100 % mit 5G oder mit einer Aufteilung dazwischen ausgelastet ist.

1.2.2 Smart Power Lock (SPL)

5G-Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen sind in der Lage, die Richtcharakteristik ihrer Antennen hochdynamisch an die Anforderungen im Netz anzupassen. Konkret bedeutet dies, dass es mithilfe dieser Antennen innerhalb eines gewissen Rahmens möglich ist, einen Beam in Richtung eines Nutzers auszurichten (Beamforming). Durch die gezielte Ausleuchtung kleinerer Zellbereiche ist es möglich die übertragbaren Datenraten zu steigern, da dadurch die Interferenzen benachbarter Beams reduziert werden können, wodurch sich bei konstanter Datenmenge die benötigte Übertragungszeit gegenüber passiven Antennen reduzieren lässt.

Für den Aufbau und Betrieb von Basisstationen mit mehr als 10 Watt EIRP ist in Deutschland eine Zulassung in Form einer Standortbescheinigung vonseiten der Bundesnetzagentur erforderlich. Hierbei wird anhand der Sendeleistungen und der Richtcharakteristik der eingesetzten Antennen im Regelfall sowohl ein Sicherheitsabstand in Hauptstrahlrichtung (in Richtung des maximalen Antennengewinns) als auch ein vertikaler Sicherheitsabstand bestimmt und in der Standortbescheinigung ausgewiesen. Bei der Bestimmung der Sicherheitsabstände wird angenommen, dass die Basisstation bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung betrieben wird, d.h. maximale Sendeleistung (EIRP) abstrahlt. Beim Betrieb der Anlagen wird sichergestellt, dass außerhalb der Sicherheitsabstände die Grenzwerte der 26. BImSchV eingehalten werden. Bei den Grenzwerten handelt es sich um quadratisch über sechs Minuten zu mittelde Feldstärkewerte. Bei passiven Basisstationsantennen bedeutet der Terminus „höchste betriebliche Anlagenauslastung“, dass die Basisstation mit maximal möglicher beantragter Sen-

deleistung sendet. Bei 5G-Basisstationen mit aktiven Antennen wird zusätzlich das Beamforming berücksichtigt. Hierbei wird zwar ebenfalls angenommen, dass die Antenne mit maximaler Sendeleistung sendet. Zusätzlich wird aber auch noch angenommen, dass diese Abstrahlung im Prinzip in alle möglichen Beam-Ausrichtungen, aber auch konstant in eine Beam-Ausrichtung geschehen kann. D.h. hinsichtlich der Richtcharakteristik der Antenne wird die Einhüllende aller Beam-Ausrichtungen angenommen. Durch diese zusätzliche „Worst Case“-Betrachtung und durch den mit Beamforming einhergehenden höheren Antennengewinn kommt es bei aktiven Antennen im Vergleich zu passiven Antennen bei gleicher Sendeleistung zu größeren Sicherheitsabständen. Dies hat zur Folge, dass 5G-Basisstationsantennen mit Beamforming höher bzw. weiter entfernt von zugänglichen Bereichen montiert werden müssen. Oder andersherum: Bei im Vergleich zu passiven Antennen vergleichbaren Sicherheitsabständen muss die Sendeleistung reduziert werden, was unmittelbar zu einer höheren Dichte an Basisstationsantennen bzw. zu einer Verkleinerung der Zellradien führt.

Aus praktischer Sicht ist der Fall, dass ein Beam mit maximaler Sendeleistung konstant in eine Richtung ausgesendet wird, sehr unwahrscheinlich. Nichtsdestotrotz muss dieses Szenario im Sinne einer konservativen Abschätzung betrachtet werden, um den Anforderungen der 26. BImSchV in angemessener Weise Rechnung zu tragen. Daher gibt es seitens der Netzausrüster Konzepte zur Berücksichtigung dieses Umstands. Der Begriff „Smart Power Lock“ oder „Safe Power Lock“ steht sinnbildlich für diese Konzepte. Hierbei handelt es sich um einen Regelkreis, in dem die Sendeleistung vonseiten der Basisstation überwacht wird. Sobald festgestellt wird, dass die über sechs Minuten gemittelte Sendeleistung bei gleichbleibender Abstrahlung in eine feste Richtung über einem Schwellwert liegt, wird die Sendeleistung reduziert, um den Sollwert der über sechs Minuten gemittelten Sendeleistung nicht zu überschreiten. Wird dadurch zuverlässig sichergestellt, dass die über sechs Minuten gemittelte Sendeleistung beispielsweise um 6 dB (Faktor 4) geringer ausfällt, als die maximal mögliche Sendeleistung ohne Eingriff durch den Smart Power Lock, lassen sich die Sicherheitsabstände um die Wurzel aus Faktor 4, d.h. um Faktor 2 reduzieren [Sch 19].

1.3 Aktuelle und zukünftige Frequenzbereiche bei 5G

Derzeit wird 5G von den Netzbetreibern Deutsche Telekom, Telefónica Deutschland und Vodafone Germany in folgenden Frequenzbändern betrieben:

Bezeichnung	Duplex-Verfahren	Frequenzbereich (bei FDD: Downlink)	5G oder 4G/5G (DSS)?	Grenzwert in V/m (Bandunterkante)
MB07	FDD	758-788 MHz	5G (Telefónica) 4G/5G (Telekom, Vodafone)	37,8
MB18	FDD	1,805-1,88 GHz	4G/5G (Vodafone, Telefónica ¹)	58,4
MB21	FDD	2,11-2,17 GHz	4G/5G (Telekom)	61,0
MB36	TDD	3,4-3,7 GHz	5G (Telekom, Vodafone, Telefónica)	61,0

Tabelle 1.4: Für 5G und 4G/5G (DSS) von den Netzbetreibern genutzte Frequenzbänder und die entsprechenden Grenzwerte der 26. BImSchV [DT 20a][VF 20][Bri 20][Str 21].

¹ Telefónica betreibt DSS bei 1,8 GHz nur in ausgewählten Gebieten [Bri 21]

Während die Netzbetreiber Telekom und Vodafone für 5G ohne die Koexistenz mit 4G (DSS) ausschließlich auf das 3,6-GHz-Band mit Beamforming-Antennen setzen, betreibt Telefónica 5G zusätzlich im 700-MHz-Band, das die beste Flächenversorgung ermöglicht (siehe hierzu Teilkapitel 1.3.1). In diesem Band wird im Telekom- sowie im Vodafone-Netz 4G/5G (DSS) betrieben. Im 1,8-GHz-Band wird 4G/5G (DSS) außerdem von Vodafone sowie in ausgewählten Regionen auch von Telefónica betrieben. Die Telekom verwendet hierfür das ehemalige 3G-Frequenzband bei 2,1 GHz. DSS, d.h. die Koexistenz von 5G und 4G, ist nicht zu verwechseln mit dem 5G-Betriebsmodus „Non Standalone“, womit ein reines 5G-Netz gemeint ist, das mit einem 4G-Netz verankert ist („Anchoring“), damit sich Endgeräte einbuchen können. Jede 5G-Basisstation im Non Standalone Betrieb impliziert somit, dass eine 4G-Basisstation in der Regel am selben Standort vorhanden ist. Für Details zu den entsprechenden Begriffen sei auf Teilkapitel 1.6 verwiesen.

Wann der vierte Netzbetreiber 1&1 Drillisch, der sich noch im Aufbau seines eigenen Mobilfunknetzes befindet und ebenfalls Spektrum im 3,6-GHz-Band ersteigert hat, 5G in Betrieb nimmt, ist derzeit ungewiss [Dri 21][Lüc 21]. Zugleich kann 1&1 einen 10 MHz-Kanal im 2,1-GHz-Band von Telefónica in Form von National Roaming zur Überbrückung nutzen. Allerdings handelt es sich hierbei um 4G.

Die bislang genannten Frequenzbereiche sind allesamt im Frequenzbereich 1 (FR1) von 5G angesiedelt. Wie in Teilkapitel 1.1.1.1 bereits erwähnt, wird im Standard auch der Frequenzbereich 2 (FR2) spezifiziert, der Frequenzen von 24,25 GHz bis 52,6 GHz umfasst. 2018 gab es seitens der Bundesnetzagentur erste Erwägungen zur Nutzung von FR2. Dabei geht es konkret um den Frequenzbereich 24,25 GHz bis 27,5 GHz [BNetzA 20a], der mittlerweile auch ausgeschrieben wurde. Wann das Antragsverfahren beginnt, ist derzeit noch nicht bekannt. Es wird lediglich erwähnt, dass die Zuteilung der Frequenzen auf bis zu 15 Jahre befristet werden soll, jedoch maximal bis Ende 2040. Des Weiteren ist im Rahmen von FR2 eine Bereitstellung des Frequenzbands um 42 GHz (40,5 GHz bis 43,3 GHz) europaweit in der Umsetzung.

1.3.1 Einfluss auf die Feldausbreitung in der Praxis

Grundsätzlich gilt: Je höher die Frequenz, desto niedriger fällt üblicherweise die Reichweite der Zelle aus. Dies hängt mit den mit steigenden Frequenzen zunehmenden Ausbreitungsverlusten von elektromagnetischen Wellen zusammen. Der entscheidende Grund ist, dass bei einer Verdopplung der Frequenz bei gleichen Antennenabmessungen die Wirkfläche der Antenne um den Faktor $2 \cdot 2 = 4$ abnimmt, was zu einer Verringerung der dem Empfänger zugeführten Empfangsleistung von 6 dB führt (Beispiel: GSM-900 im Vergleich zu GSM-1800). So geht der Netzbetreiber Vodafone davon aus, dass sich mit einer Mobilfunkzelle im derzeit niedrigsten Frequenzband bei 700 MHz eine etwa fünfmal größere Fläche versorgen lässt, als im derzeit höchsten Frequenzband bei 3,5 GHz [Bau 20]. Daher werden die niedrigen Frequenzbänder eher in dünn besiedelten Gebieten eingesetzt, die hohen Frequenzbänder bevorzugt in dichter besiedelten Gebieten. Da die Wellenlänge umgekehrt proportional zur Frequenz ist, sind bei höheren Frequenzen selbst kleinere Objekte (u.a. auch Blätter von Bäumen) in der Größenordnung einer Wellenlänge, sodass sie einen signifikanten Einfluss auf die Wellenausbreitung haben. Bei Millimeterwellen (mm-Wellen), d.h. Frequenzen zwischen 30 GHz und

300 GHz, wird bei Vegetation von einer spezifischen Dämpfung von 4-5 dB/m Vegetation ausgegangen [ITU-R P.1410]. Hinzu kommt, dass die Eindringtiefe von elektromagnetischen Wellen in Materialien mit zunehmender Frequenz sinkt, sodass z.B. eine Versorgung von Innenbereichen in Gebäuden im Vergleich zu niedrigen Frequenzen schwieriger wird.

Bisher im Mobilfunk verwendete Frequenzen im FR1 sind nicht auf eine Sichtverbindung zwischen Basisstationsantenne und Endgerät (LOS) angewiesen. D.h. auch in einer Umgebung ohne direkte Sichtverbindung (NLOS) mit Mehrwegeausbreitung z.B. durch Reflexionen an Gebäuden oder Beugung der Signale an Gebäudekanten, ist eine Versorgung möglich und im städtischen Umfeld auch notwendig, da häufig die direkte Sichtverbindung zwischen Basisstationsantenne und Endgerät fehlt. Für mm-Wellen ist eine Versorgung neben der erwünschten LOS-Verbindung auch über NLOS vorgesehen, allerdings lediglich über Reflexionen und ggf. Streuungen an Objekten. Ausbreitung über Beugung an Kanten wird für diese hohen Frequenzen immer unwahrscheinlicher, da es bei der Beugung zu verhältnismäßig hohen Verlusten kommt [ITU-R P.1411]. Daher wird mit zunehmender Frequenz mit einem höheren Anteil von LOS-Ausbreitung zur Gewährleistung einer Versorgung gerechnet [ITU-R P.1410].

Der Einfluss atmosphärischer Gase auf die Wellenausbreitung für den Frequenzbereich von 0 GHz bis 1000 GHz ist in Bild 1.5 dargestellt [ITU-R P.676]. Hierbei ist der Bereich jenseits von FR2, d.h. Frequenzen größer als 52,6 GHz ausgegraut. Die blaue Kurve stellt den frequenzabhängigen Dämpfungsverlauf für eine trockene Atmosphäre, die rote Kurve den für

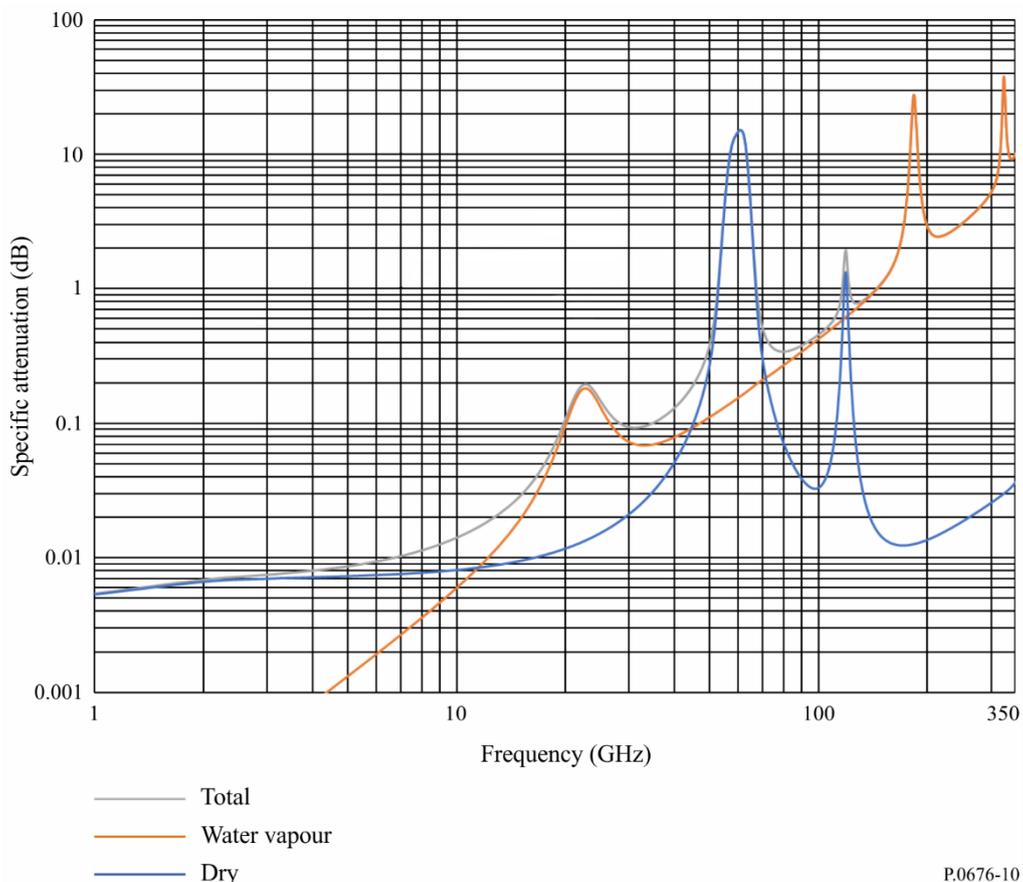


Bild 1.5: Spezifische Dämpfung durch atmosphärische Gase zwischen 0 GHz und 1000 GHz [ITU-R P.676] (blau: trockene Atmosphäre; rot: Standardatmosphäre). Ausgegraut ist hier der Bereich jenseits von FR2 (Frequenzen größer als 52,6 GHz).

eine Standardatmosphäre dar. Überlagert sind die Effekte der Resonanzabsorption durch Wasserdampf (u.a. bei 22,2 GHz, 183,3 GHz und 325,2 GHz) sowie durch Sauerstoffmoleküle (u.a. bei 60 GHz und 118,8 GHz). Für FR1 weisen die atmosphärischen Gase keine nennenswerte dämpfende Wirkung auf (im Bereich von weniger als 0,01 dB/km). In FR2 kommt es aufgrund der Resonanzfrequenz von Sauerstoff bei 60 GHz zwar zu einer steigenden Flanke der spezifischen Dämpfung. Diese liegt angesichts der bei diesen Frequenzen stark begrenzten Zellradien mit Dämpfungswerten von maximal wenigen dB/km auf einem verhältnismäßig geringen Niveau.

Durch Regen kommt es bei der Wellenausbreitung zu zusätzlichen Dämpfungen. Bei moderaten Niederschlägen von 1 mm/h ist die Dämpfung bei FR1 zu vernachlässigen, im oberen Bereich von FR2 beträgt sie wenige Zehntel dB/km. Bei sehr starken Niederschlägen von 30 mm/h sind die Dämpfungswerte bei FR1 weiterhin vernachlässigbar, während sie im oberen Bereich von FR2 Werte von bis zu 10 dB/km annehmen können [ITU-R P.838].

1.4 5G-Ausbau in NRW

Generell werden auf den Seiten der 5G-betreibenden Netzanbieter Deutsche Telekom, Telefónica Deutschland und Vodafone Germany keine spezifischen Angaben zum Ausbauzustand von 5G nur für Nordrhein-Westfalen gemacht, sondern lediglich für ganz Deutschland. Über Kartendarstellungen des Netzausbaus lassen sich jedoch zumindest die abgedeckten Flächen in NRW anzeigen. Derzeit ist ein Großteil der 5G-Standorte noch im Non-Standalone-Betrieb.

1.4.1 Deutsche Telekom

In Bild 1.6 ist die derzeitige (Stand 10.11.2021) 5G-Abdeckung im Netz der Deutschen Telekom für NRW dargestellt. Hierunter fallen sowohl die Versorgungsgebiete der Basisstationen bei 3,6 GHz, über die ausschließlich 5G betrieben wird, sowie die Basisstationen bei 700 MHz und 2,1 GHz, über die neben 5G auch 4G (DSS) betrieben wird. 5G ist in großen Teilen NRWs bereits verfügbar, nennenswerte Lücken gibt es in Südwestfalen, dem Sauerland sowie in der Eifel.

Laut [Kes 21], das den Stand vom 30.08.2021 widerspiegelt, gibt es deutschlandweit 2.400 Antennen an 800 Standorten bei 3,6 GHz im Telekom-Netz. Inklusiv der für DSS verwendeten Antennen sind es 55.000 Antennen. 85 % der Bevölkerung (gut 70 Mio.) können vom 5G-Netz der Telekom versorgt werden. Bis Ende 2021 sollen es sogar 90 % werden (entsprechend rund 75 Mio. Einwohnern). Derzeit (Stand: 03.11.2021) werden vier Standalone-Standorte getestet, bis zur kompletten Umstellung sind laut der Telekom allerdings noch einige Entwicklungsschritte notwendig, da u.a. die Kompatibilität mit Endgeräten gewahrt bleiben muss [Gaj 21].

Auf der Netzkarte ist zu erkennen, dass die 5G-Abdeckung in NRW im Vergleich zu anderen Teilen Deutschlands am dichtesten ist. Insofern ist davon auszugehen, dass die oben genannten Bevölkerungsversorgungsgrade mindestens auch für NRW zutreffen.

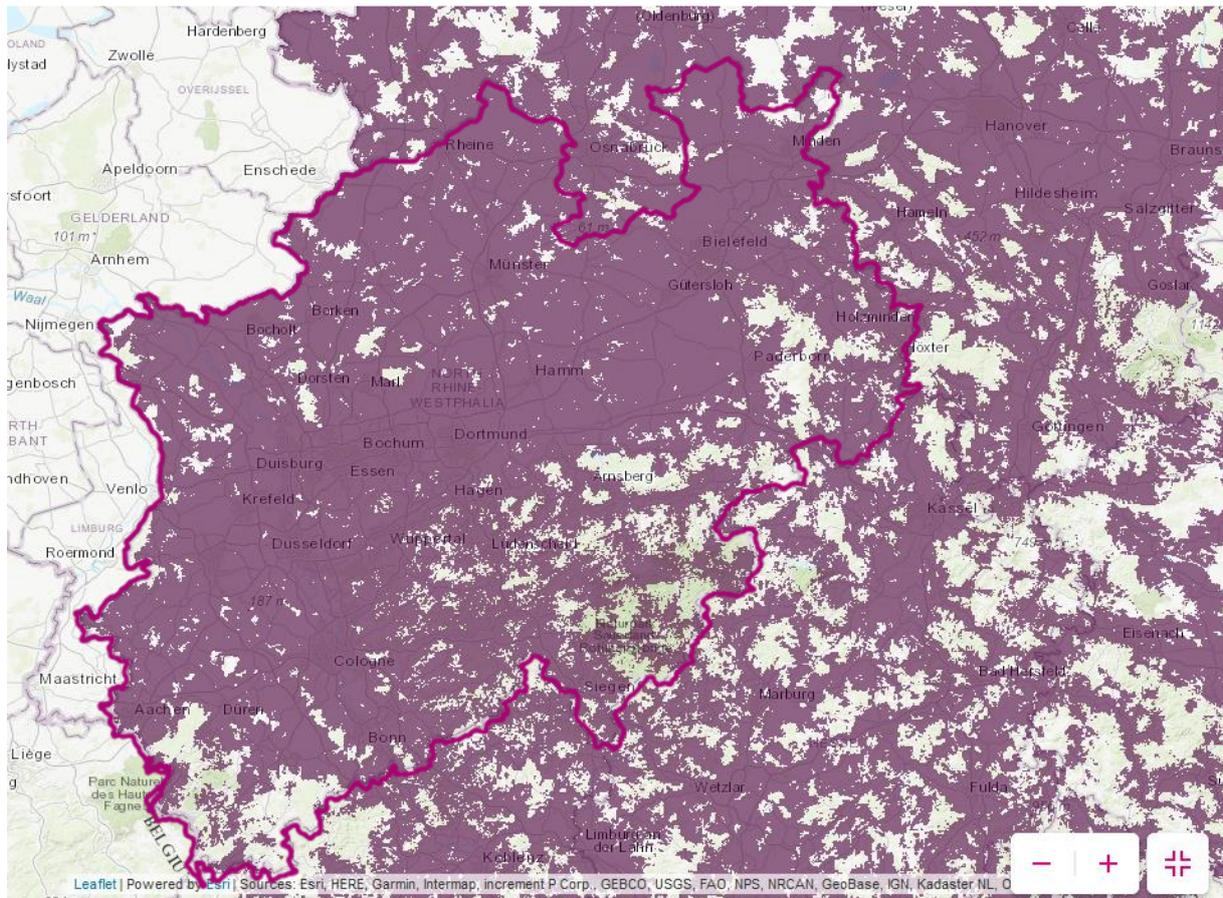


Bild 1.6: 5G-Netzabdeckung der Deutschen Telekom in NRW [DT 21].

1.4.2 Telefónica Deutschland

Auf den Internetseiten von Telefónica gibt es keine Netzabdeckungskarte, über die sich die Verfügbarkeit von ausschließlich 5G anzeigen lassen lässt. Es gibt lediglich Zahlenangaben zum 5G-Versorgungsgrad, die sich allerdings auf ganz Deutschland beziehen.

Nachfolgende Werte spiegeln den 5G-Ausbauzustand im Telefónica-Netz vom 11.06.2021 wider. Mitte 2021 wurde die 1.500ste 5G-Antenne bei 3,6 GHz in Betrieb genommen. Bis Ende 2021 sollen über 30 % der Bevölkerung (25 Mio.) mit 5G versorgt werden können [Str 21a]. Im Gegensatz zu den Mitbewerbern Deutsche Telekom und Vodafone Germany betreibt Telefónica 5G bislang hauptsächlich im 3,6-GHz-Band. DSS bei 1,8 GHz wird nur in ausgewählten Regionen betrieben (siehe hierzu Teilkapitel 1.3), kann jedoch per Software-Update einfach aktiviert werden. In Zukunft setzt Telefónica für die Flächenversorgung dünner besiedelter Gebiete auch auf das 700-MHz-Band, in dem im Gegensatz zu Vodafone nur 5G ohne DSS betrieben werden soll.

Im Telefónica-Netz sind bereits erste 5G-Mobilfunkstandorte im Standalone-Betrieb. Dadurch, dass Telefónica ein eigenes 5G-Kernnetz betreibt, ist eine Aktivierung rein technisch möglich, wird aber hinausgezögert, bis genügend Endgeräte den Standalone-Modus unterstützen [Gaj 21].

1.4.3 Vodafone Germany

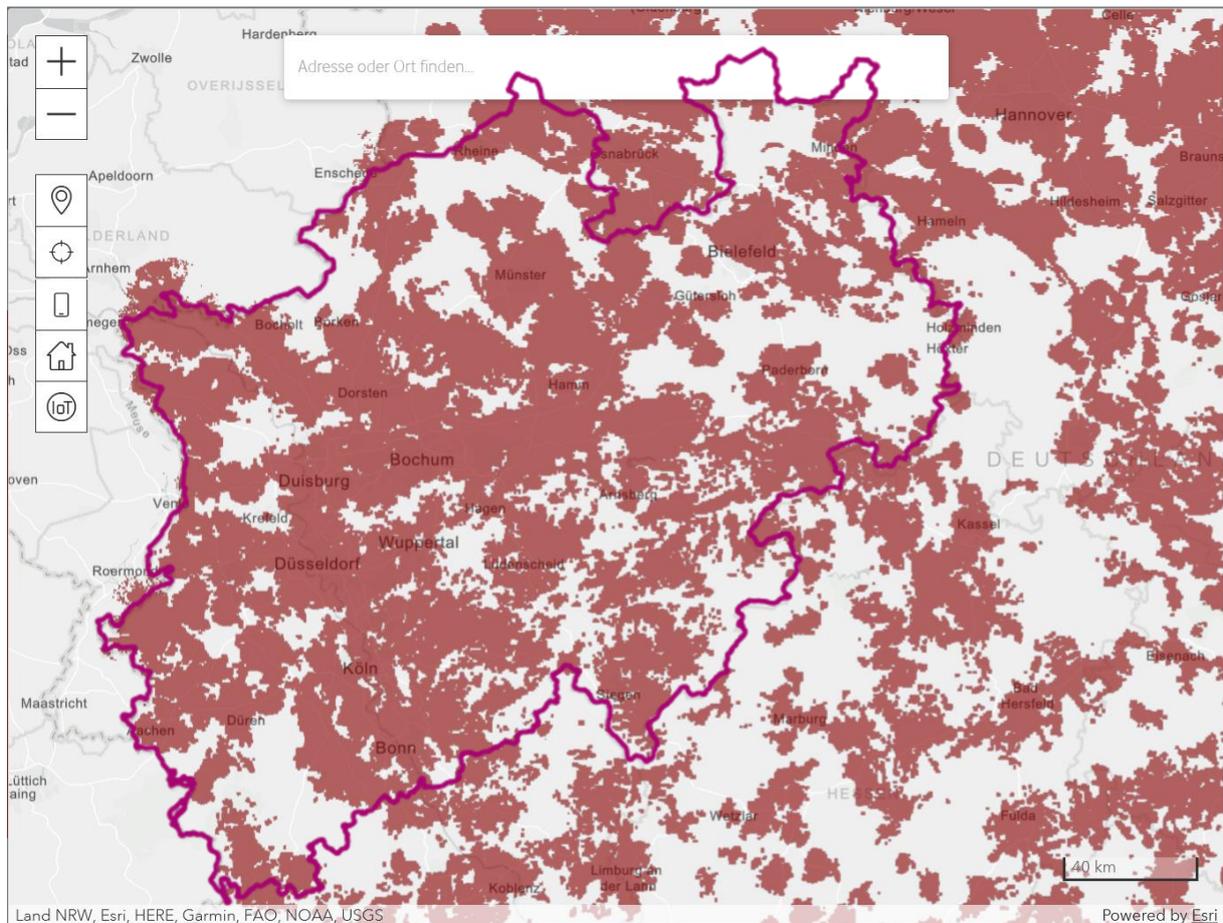


Bild 1.7: 5G-Netzabdeckung von Vodafone Germany in NRW [VF 21b].

In Bild 1.7 ist die derzeitige (Stand 10.11.2021) 5G-Abdeckung im Netz von Vodafone Germany für NRW dargestellt. Hierunter fallen sowohl die Versorgungsgebiete der Basisstationen bei 3,6 GHz, über die ausschließlich 5G betrieben wird, sowie die Basisstationen bei 700 MHz und 1,8 GHz, über die neben 5G auch 4G (DSS) betrieben wird. 5G ist in weiten Teilen NRWs bereits verfügbar insbesondere in den Ballungsgebieten rund um Rhein und Ruhr. Größere Lücken gibt es in dünner besiedelten Gebieten wie dem Münsterland, Westfalen sowie der Eifel.

Laut [VF 21a], das den Stand vom 14.06.2021 widerspiegelt, gibt es deutschlandweit mehr als 3.100 5G-Antennen bei 3,6 GHz. An den meisten Standorten und vor allem in Städten wird 5G durch das 1,8-GHz-Band in Koexistenz mit 4G bereitgestellt (DSS) [Bau 21]. 5G ist für etwa 25 Mio. Einwohner (30 % der Bevölkerung) verfügbar, bis Ende 2021 soll die Verfügbarkeit auf 30 Mio. Einwohner (36 % der Bevölkerung) ausgedehnt werden. Laut eigenen Angaben werden deutschlandweit bereits 10 Mio. Einwohner durch 5G-Standalone-Standorte erreicht. Bis 2023 soll das gesamte 5G-Netz auf Standalone umgerüstet werden [VF21].

Auf der Netzkarte ist zu erkennen, dass die 5G-Abdeckung in NRW ähnlich dicht wie in anderen Teilen Deutschlands ist. Insofern ist davon auszugehen, dass die oben genannten Bevölkerungsversorgungsgrade in etwa auch für NRW zutreffen.

1.5 Nationale und internationale Messempfehlungen

In diesem Teilkapitel werden nationale und internationale Messempfehlungen zur Bestimmung der Immissionen durch 5G-Basisstationen vorgestellt. Hierbei wird grundsätzlich zwischen der Bestimmung der aktuellen Immission (Momentanimmission) und der maximal möglichen Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung (Maximalimmission) unterschieden. Während bei der erstgenannten Messart in der Regel keine speziellen technischen Betriebsdaten vom Anlagenbetreiber geliefert werden müssen, ist zur Bestimmung der maximal möglichen Immission bei 5G-Anlagen, vor allem für Anlagen mit Beamforming-Antennen, die Unterstützung der Betreiber bei der Auswertung der Messungen unverzichtbar. Wie auch schon bei 2G-, 3G- und 4G-Basisstationen, müssen bestimmte Leistungsangaben der betrachteten Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Bei Beamforming-Antennen sind zudem unter Umständen Antennendiagramme erforderlich.

In den nächsten Teilkapiteln werden folgende drei Messempfehlungen vorgestellt:

- Vorläufige Messanweisung (BNetzA MA 09/EMF/01) des Prüf- und Messdienstes der Bundesnetzagentur für EMVU-Messungen im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens [BNetzA 20].
- Empfehlung zur Messung von Immissionen an 5G-Basisstationen im Frequenzbereich bis 6 GHz, veröffentlicht als technischer Bericht vom nationalen Schweizer Metrologischen Institut METAS [METAS 20].
- Aktueller Entwurf der dritten Ausgabe des Standards IEC 62232 "Methods for the Assessment of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields associated with Human Exposure" [IEC 62232].

1.5.1 Messanweisung der Bundesnetzagentur

Methoden zur Bestimmung der Momentanimmission bei 5G-Basisstationen werden in dieser Messanweisung nicht behandelt.

Zur Bestimmung der maximal möglichen Immission werden zwei Methoden vorgeschlagen:

- Messung der Maximalimmission durch Erzwingen eines Beams in Richtung des Messpunkts mit maximal möglicher EIRP unter Zuhilfenahme der Betriebsart „SimuLoad“ der Basisstation.
- Extrapolation auf Maximalimmission basierend auf der *frequenzselektiven* Messung des SSB.

Die erste Alternative kann derzeit nur bei den Basisstationen eines Netzausrüsters angewendet werden und erfordert die Unterstützung des Netzbetreibers. Für alle anderen Stationen ist nur die zweite Alternative möglich.

Da der Bundesnetzagentur zum Zeitpunkt der Erstellung der Messanweisung noch keine codeselektiven Messgeräte zur Verfügung standen, wird lediglich auf die Hochrechnung basierend auf einer *frequenzselektiven Messung* eingegangen. Als Basis für die Extrapolation auf maximal mögliche Immission wird die Immission des SSB (im Falle von mehreren SSB die des immissionsstärksten SSB) bzw. ein Teil davon, nämlich das Secondary Synchronization

Signal (SSS) innerhalb einer Messbandbreite von 2 MHz gemessen. Damit die Messergebnisse nicht durch überlagernden Verkehr beeinflusst werden, wird von der BNetzA ein sehr umfangreicher Messaufbau zur zeitlichen Separierung des SSB verwendet. Es ist daher zu erwarten, dass die BNetzA baldmöglichst auf codeselektive Messverfahren umstellen wird. Nach frequenzselektiver Messung der Immission des SSS sind folgende Schritte zur *Hochrechnung auf Maximalimmission* erforderlich:

- Die ermittelte Immission des SSS wird von der Messbandbreite auf die maximal mögliche Signalbandbreite bei Belegung aller Träger extrapoliert.
- Bei Beamforming-Antennen: Für die maximale Immission ist üblicherweise der Traffic (PDSCH), der mit einer anderen Antennenrichtcharakteristik als der SSB abgestrahlt wird, verantwortlich. Daher wird der Antennengewinnunterschied zwischen Traffic und SSB als zusätzlicher Extrapolationsfaktor berücksichtigt. Dies bedeutet strenggenommen, dass die Antennendiagramme dreidimensional (d.h. für die komplette Kugel) vorliegen müssen.
- Bei TDD-Signalen: Je nach Duty Cycle ist ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor (≤ 1) zu berücksichtigen oder es ist auf die Immission für den Fall einer Übertragung mit den kürzest möglichen Uplink-Lücken zu referenzieren (worst-case-Betrachtung).

Bei der Hochrechnung für Beamforming-Antennen ist das von der BNetzA vorgeschlagene Verfahren zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Antennendiagramme von SSB und Traffic (PDSCH) einfach, in dem der Gewinnunterschiedsfaktor zwischen Traffic und SSB ermittelt wird. Im Vergleich zur Schweizer Messempfehlung erfolgt hier keine Fallunterscheidung je nach Lage des Messpunktes relativ zur Antenne (Detail hierzu siehe in Teilkapitel 1.5.2).

Spezielle Überlegungen zu Mess- und Auswerteunsicherheiten bei Immissionsermittlungen an 5G-Anlagen werden im Dokument nicht angestellt. Es wird auf die bisher bei älteren Mobilfunktechnologien angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Mess- und Konformitätsunsicherheit, die sich stark an die in der Schweiz geltende Praxis anlehnt, verwiesen. Insbesondere die Frage, wie mit der Unsicherheit bei der Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors umgegangen werden soll, wird nicht thematisiert.

1.5.2 Schweizer Messempfehlung (METAS)

Methoden zur Bestimmung der Momentanimmission bei 5G-Basisstationen werden in der Schweizer Messempfehlung nicht behandelt.

Die messtechnische Bestimmung der Maximalimmission wird sehr detailliert behandelt. Als Basis für die Extrapolation auf maximal mögliche Immission wird die Immission des SSB bzw. ein Teil davon, nämlich das Secondary Synchronization Signal (SSS) vorgeschlagen.

Bei der *frequenzselektiven Messung* wird mittels eines Spektrumanalysators der RMS-Wert des SSS-OFDM-Symbols geeignet ermittelt, während die Messantenne mit Hilfe der „Schwenkmethode“ in einem Höhenbereich zwischen 0,5 m und 1,75 m bewegt wird, um das räumliche Maximum zu ermitteln. Die Messungen basieren nicht auf der Messung des immisionsstärksten SSS, sondern auf der leistungsbezogenen Summenimmission aller von einer Antenne abgestrahlten SSB bzw. SSS. Da mehrere SSB mithilfe von Beamforming-Antennen

sequenziell in unterschiedliche Bereiche der Zelle abgestrahlt werden (siehe Teilkapitel 1.1.3.2), kann durch eine frequenzselektive Messung die Summenimmission gar nicht direkt ermittelt werden. Hierzu schlägt die Schweizer Messempfehlung vor, die Immission des stärksten SSB bzw. SSS um 3 dB zu erhöhen, wodurch die Immissionsanteile der anderen SSB-Beams grob berücksichtigt werden sollen.

Bei der *codeselektiven Messung*, die als einziges der beiden Messverfahren empfohlen wird, da nur damit die zellspezifische Maximalimmission ermittelt werden kann, wird analog zur frequenzselektiven Messung im Falle mehrerer sequenziell abgestrahlter SSB ebenfalls die Summenimmission aller SSB bzw. SSS gebildet.

Die *Hochrechnung auf Maximalimmission* geschieht in folgenden Schritten:

- Zuerst wird die leistungsbezogene Summenimmission aller SSS einer Zelle auf die maximal genehmigte Sendeleistung der Zelle hochgerechnet. Konsequenterweise wird hierfür nicht wie üblich die Einhüllende der Antennendiagramme der einzelnen SSB-Ausrichtungen, sondern das Summendiagramm aller SSB-Ausrichtungen angenommen. Durch die Summenbildung im Antennendiagramm lassen sich die im Hüllkurvendiagramm vorkommenden Einzüge zwischen den SSB-Ausrichtungen reduzieren.
- Bei Beamforming-Antennen: Da SSB und Traffic (PDSCH) mit unterschiedlichen Antennendiagrammen abgestrahlt werden, der Traffic aber verantwortlich für die Maximalimmission ist, wird der Antennengewinnunterschied abhängig vom Aspektwinkel (Horizontal- und Vertikalwinkel) zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt bestimmt (Antennenkorrekturfaktor). Zur Vereinfachung des Vorgehens werden hier abhängig von Horizontal- und Vertikalwinkelbereichen zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt drei Zonen eingeführt, die teilweise pauschale Antennenkorrekturfaktoren ermöglichen. Dennoch sind auch hierfür 3D-Antennendiagramme erforderlich.
- Bei TDD-Signalen: Der Duty Cycle des Downlinks (≤ 1) wird als zusätzlicher Korrekturfaktor berücksichtigt.
- Zusätzlich erlaubt die Empfehlung prinzipiell die Verwendung eines auf statistischen Überlegungen basierenden Reduktionsfaktors für Beamforming-Antennen („actual maximum exposure“, siehe Teilkapitel 1.5.3).

Spezielle Überlegungen zu Mess- und Auswerteunsicherheiten bei Immissionsermittlungen an 5G-Anlagen werden im Dokument nicht angestellt. Man verweist auf die bisher bei älteren Mobilfunktechnologien angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Mess- und Konformitätsunsicherheit. Insbesondere die Frage, wie mit der Unsicherheit bei der Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors umgegangen werden soll, wird nicht thematisiert.

1.5.3 IEC 62232

Die IEC 62232 Ed. 3.0 beschäftigt sich in Anhang B.3 mit Möglichkeiten zur Bestimmung der *Momentanimmission* bei 5G. Diese kann durch Verwendung eines Breitbandmessgeräts mit isotroper Antenne oder frequenzselektiv erfolgen. Die frequenzselektive Messung kann mit einem Messempfänger oder einem Spektrumanalysator und geeigneter Messantenne durch-

geführt werden. Hierbei wird empfohlen aufgrund der durch OFDM bedingten starken kurzzeitigen Schwankungen der Momentanleistung eine RMS-Mittelwertbildung vorzunehmen. Zur Berücksichtigung der im Messvolumen vorhandenen räumlichen Feldstärkeschwankungen wird vorgeschlagen, die Messung an mehreren Punkten über dem Volumen einer Person mit anschließender Mittelwertbildung oder alternativ die Bestimmung der maximal im betrachteten Volumen vorhandenen Feldstärkewerte mittels der "Schwenkmethode" durchzuführen.

Bei der messtechnischen Bestimmung der Maximalimmission wird als *Basis für die Extrapolation* die Messung der Immission des SSB vorgeschlagen. Grundsätzlich wird auch das CSI-RS als geeignete Basis für eine Hochrechnung angesehen. Jedoch wird einschränkend angemerkt, dass dieses Signal hinsichtlich der Konfiguration und der notwendigen permanenten oder periodischen Abstrahlung nicht notwendigerweise geeignet ist. Vielmehr wird eine Extrapolation basierend auf dem CSI-RS für einen speziellen Betriebsmodus der Basisstation für Immissionsmessungen als geeignet angesehen (siehe hierzu auch „SimuLoad“ in Teilkapitel 1.5.1). Da hierfür jedoch ein Eingriff in das Funknetz erforderlich ist und dies bei der Bestimmung der Maximalimmission nicht erwünscht ist, wird die Extrapolation basierend auf dem CSI-RS in der Messempfehlung nicht weiterverfolgt.

Bei der *frequenzselektiven Messung* wird die Immission des SSB innerhalb einer kleinen Messbandbreite mithilfe eines Spektrumanalysators bestimmt und auf die Breite eines Resource Elements bzw. OFDM-Trägers bezogen. Es werden ausführliche Hinweise zur Einstellung gegeben, um einen RMS-Wert für die SSB-OFDM-Symbole zu erhalten. Bei Schwierigkeiten bei der Zeitsynchronisation mit dem SSB z.B. aufgrund von starkem Verkehr (PDSCH), wird empfohlen, Spektrumanalysatoren zu verwenden, die über eine Spektrogramm-Anzeige verfügen. Alternativ wird die Möglichkeit einer Trigger-Funktion zur Zeitsynchronisation als Abhilfe bei zeitlicher Überdeckung des SSB durch Traffic vorgeschlagen.

Bei der *codeselektiven Messung* wird die Immission des Secondary Synchronization Signal (SSS) zellspezifisch bezogen auf ein Resource Element bestimmt.

Die *Hochrechnung auf Maximalimmission* geschieht in folgenden Schritten:

- Die frequenz- oder codeselektiv und auf ein Resource Element bezogene Immission wird spektral auf die maximale Signalbandbreite extrapoliert.
- Bei Beamforming-Antennen: Da SSB und Traffic (PDSCH) mit unterschiedlichen Antennendiagrammen abgestrahlt werden, der Traffic aber verantwortlich für die Maximalimmission ist, wird der Antennengewinnunterschied bestimmt. Hierfür wird vorgeschlagen abhängig vom Aspektwinkel (Horizontal- und Vertikalwinkel) zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt direkt den Unterschiedsfaktor der EIRP-Werte des SSB und des PDSCH zu ermitteln, wodurch nicht nur die Unterschiede im Antennendiagramm, sondern auch Unterschiede der spektralen Leistungen beider Signale erfasst würden. Der Unterschiedsfaktor kann zum einen rechnerisch durch Auswertung der vom Betreiber gelieferten 3D-Antennendiagramme unter Einbeziehung der spektralen Leistungen von SSB und PDSCH ermittelt werden. Zum anderen wird vorgeschlagen den EIRP-Unterschiedsfaktor messtechnisch zu ermitteln, indem die Immission des SSB mit der des PDSCH verglichen wird. Hierbei wird offensichtlich angenommen,

dass während der Messdauer ein Traffic Beam mit maximaler EIRP zumindest kurzzeitig auf den Messpunkt ausgerichtet ist. Alternativ kann die Beam-Ausrichtung auch mithilfe eines Endgeräts erzwungen werden.

- Bei TDD-Signalen: Der Duty Cycle des Downlinks (≤ 1) kann als zusätzlicher Korrekturfaktor berücksichtigt werden.
- Zusätzlich erwähnt die Empfehlung prinzipiell die Verwendung eines auf statistischen Überlegungen basierenden Reduktionsfaktors für Beamforming-Antennen, der auf der Annahme beruht, dass es aufgrund des sich permanent ändernden Abstrahlverhaltens der Antennen sehr unwahrscheinlich ist, die maximal mögliche Immission an einem Messpunkt für einen Zeitraum von sechs Minuten oder mehr anzutreffen („actual maximum exposure“, meist das 95%-Perzentil der Sendeleistung, welches etwa einem Viertel der maximal möglichen Leistung entspricht [IEC 62669]). Dieser Immissionswert kann als realistischere Beschreibungsgröße für die typisch am Messpunkt zu erwartende Maximalimmission herangezogen werden, während der theoretisch maximal mögliche Immissionswert primär für die Bestimmung von Sicherheitsabständen des Personenschutzes verwendbar ist.

Spezielle Überlegungen zu Mess- und Auswerteunsicherheiten bei Immissionsermittlungen an 5G-Anlagen werden im Dokument nicht angestellt.

1.6 Erläuterung einschlägiger 5G-typischer Fachbegrifflichkeiten

Einschlägige Fachbegrifflichkeiten bzgl. 5G werden in folgender Tabelle alphabetisch sortiert erläutert.

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
<i>5G NR</i>	Bei 5G New Radio handelt es sich um die Bezeichnung der Funkschnittstelle des Mobilfunkstandards 5G.
<i>5G ready</i>	In Bezug auf Endgeräte bedeutet „5G ready“, dass diese ein 5G-Modem sowie ggf. leistungsfähigere Hardware besitzen, um höhere Datenraten in 5G abwickeln zu können. Die Bezeichnung wurde vor dem Rollout von 5G verwendet, um herauszustellen, dass die entsprechenden Endgeräte auch im 5G-Netz einsetzbar sind.
<i>Anchoring</i>	Anchoring ist eine Technik, die verwendet wird, um die bislang größtenteils aufgebauten 5G-Basisstationen im Non-Standalone-Betrieb (NSA) für 5G-Endgeräte überhaupt erst zugänglich zu machen. Dabei dient eine 4G-Basisstation als Anker für die 5G-Basisstation, indem sie u.a. den Verbindungsaufbau zwischen 5G-Basisstation und Endgerät vermittelt, zur Aufrechterhaltung der 5G-Verbindung aber auch permanent aktiv sein muss. Dieser 4G-Anker liegt üblicherweise in einem niedrigeren Frequenzband als die 5G-Zelle im NSA-Betrieb.
<i>Bandbreiten-Adaption</i>	Mithilfe von Bandwidth Parts kann einem Endgerät adaptiv eine Bandbreite zugewiesen werden, die kleiner als die Signalbandbreite ist, sodass endgeräteseitig aufgrund der niedrigeren Anzahl zu dekodierender Resource Blocks der Energieverbrauch reduziert werden kann.
<i>Bandwidth Part (BWP)</i>	Ein Bandwidth Part (BWP) ist eine zusammenhängende Menge von Resource Blocks für eine bestimmte Numerologie (d.h. für einen bestimmten Trägerabstand). Theoretisch kann jedem BWP eine unterschiedliche Numerologie zugeteilt werden, sodass auf einem 5G-Kanal in Form von mehreren BWPs hinsichtlich der Anforderungen an Datenraten, Latenzzeiten und Verlässlichkeit unterschiedliche Nutzungsszenarien abgebildet werden können.
<i>Beamforming</i>	Beamforming wird in der Literatur als Oberbegriff für Strahlformung (Beamforming) und Strahlschwenkung (Beamsteering) verwendet. Dabei handelt es sich um die adaptive Anpassung der Richtcharakteristik einer Antenne sowohl für den Sende- als auch für den Empfangsfall. Je nach Beamforming-Typ stehen feste Beam-Ausrichtungen bzw. Kombinationen davon zur Verfügung (Codebook-basiertes Beamforming) oder es wird basierend auf einer Kanalschätzung dynamisch eine optimale Richtcharakteristik bestimmt (reziprozitätsbasiertes Beamforming). Bei den in 5G bei 3,6 GHz eingesetzten Massive-MIMO-Antennen werden je nach Hersteller und Kanalbedingungen beide Arten von Beamforming verwendet. Die Antennen sind aufgrund ihres Aufbaus in der Lage ihre Richtcharakteristik sowohl in der Horizontalebene als auch in der Vertikalebene anzupassen (horizontales und vertikales Beamforming).

<p><i>Carrier Aggregation (CA)</i></p>	<p>Bei Carrier Aggregation (CA) handelt es sich um ein Verfahren, wodurch nicht nur ein Frequenzträger zur Übertragung zur Verfügung gestellt wird, sondern mehrere Frequenzträger. Dies kann sowohl innerhalb eines Frequenzbands geschehen (Intra-Band-Aggregation, z.B. im für 4G verwendeten 1,8-GHz-Band der Deutschen Telekom, in dem es sowohl einen 20-MHz-Träger als auch einen benachbarten 10-MHz-Träger gibt), als auch frequenzbandübergreifend (Inter-Band-Aggregation, z.B. zwischen einem Träger im 1,8-GHz-Band und mehreren anderen Frequenzbändern). Intra- und Inter-Band-Aggregation können auch gleichzeitig verwendet werden. Durch CA lässt sich die nutzbare Bandbreite teilweise deutlich erhöhen, was sich unmittelbar auf die erzielbare Datenrate auswirkt.</p>
<p><i>Coordinated Multipoint Transmission and Reception (CoMP)</i></p>	<p>Coordinated Multipoint Transmission and Reception (CoMP) war eine Neuerung, die im Zuge der LTE-Erweiterung LTE-Advanced eingeführt wurde. Hierbei wird ermöglicht, dass ein Nutzer, der sich beispielsweise am Zellrand befindet und dem aufgrund der schlechten Empfangsbedingungen nur niedrige Übertragungsraten Verfügung gestellt werden, auch Nachbarbasisstationen zur Übertragung desselben Signals genutzt werden, um die Signalqualität zu verbessern, wodurch wiederum die Datenrate erhöht werden kann.</p>
<p><i>Downtilt</i></p>	<p>Der Downtilt bezeichnet die Absenkung von Antennen im Mobilfunkbereich mit dem Ziel eine leicht nach unten gerichtete Abstrahlung zu erzielen. Hierbei muss zwischen dem mechanischen Downtilt und dem elektrischen Downtilt unterschieden werden. Während beim mechanischen Downtilt die gesamte Antenne leicht nach unten gekippt wird, wird beim elektrischen Downtilt das Signal über die einzelnen Antennenelemente in der Basisstationsantenne mit einem leichten Versatz ausgesendet, sodass sich dadurch eine leicht nach unten gerichtete Abstrahlung ergibt. Während der mechanische Downtilt bei der Montage der Antennen eingestellt wird und daher nur vor Ort angepasst werden kann, kann der elektrische Downtilt z.B. zur Netzoptimierung aus der Ferne geändert werden. Bei Beamforming-Antennen kommt zusätzlich ein digitaler Tilt hinzu. Dieser wird durch Gewichtung des Signals im Basisband hinzugefügt, umfasst einen bestimmten Schwenkbereich (d.h. nach unten und nach oben) und kann im Gegensatz zum mechanischen sowie elektrischen Downtilt im Regelbetrieb hochdynamisch an die Anforderungen angepasst werden.</p>
<p><i>Dynamic Spectrum Sharing (DSS)</i></p>	<p>Bei Dynamic Spectrum Sharing (DSS) handelt es sich um Verfahren zur dynamischen Ressourcenteilung zwischen 4G (LTE) und 5G auf ein und demselben Träger. Hierbei wird sowohl die Signalisierung von 4G als auch von 5G ausgesendet, sodass 5G-inkompatible Endgeräte die Ressourcen in Form von 4G und 5G-kompatible Endgeräte die Ressourcen in Form von 5G nutzen können (für weitere Details hierzu auch zur DSS-Nutzung der Netzbetreiber in NRW sei auf die Teilkapitel 1.2.1 und 1.3 verwiesen).</p>

<i>eMBB</i>	eMBB (enhanced Mobile Broadband) stellt eines der drei Nutzungsszenarien dar, auf die der 5G-Mobilfunkstandard zugeschnitten wurde. eMBB ist das für den konventionellen Smartphone-Nutzer relevanteste Szenario, da das Versorgungsziel sehr hohe Datenraten selbst an den Zellgrenzen sowie hohe übertragbare Datenvolumina in der gesamten Zelle beinhaltet. Die beiden anderen Nutzungsszenarien sind massive Machine Type Communication (mMTC) und ultra Reliable and Low Latency Communication (uRLLC).
<i>Frequency Division Duplex (FDD)</i>	Bei Frequency Division Duplex (FDD) handelt es sich um ein gängiges u.a. im Mobilfunk eingesetztes Duplexverfahren zur Trennung der Downlink- sowie Uplink-Übertragungskanal hinsichtlich der Frequenz. Hierfür werden üblicherweise zwei voneinander getrennte Frequenzbänder verwendet. Bis auf eine Ausnahme (800-MHz-Band) hat der Uplink-Übertragungskanal im Mobilfunk aufgrund der günstigeren Wellenausbreitung die niedrigere Frequenz, wodurch sich der endgeräteseitige Energieverbrauch reduzieren lässt. Das Gegenstück zu FDD stellt TDD (Time Division Duplex) dar.
<i>Inter-Site-Anchoring</i>	Beim Anchoring ist es aufgrund der ähnlichen Abdeckungsbereiche gewünscht, dass sich 5G-Basisstation und 4G-Anker-Basisstation am selben Standort befinden. Wie unter „Anchoring“ bereits erwähnt, weist die 4G-Zelle dabei eine niedrigere Frequenz als auf die 5G-Zelle auf. Besonders bei den für DSS verwendeten Frequenzen (2,1 GHz, 1,8 GHz sowie 700 MHz) ist die Auswahl möglicher 4G-Ankerzellen beschränkt. Hinzu kommt, dass bestimmte Frequenzkombinationen beim Anchoring zwischen 5G und 4G nicht von allen Endgeräten unterstützt werden. Hierfür wird das sogenannte „Inter-Site-Anchoring“ verwendet. Dabei wird als 4G-Ankerzelle keine Zelle derselben Anlage verwendet, sondern eine Zelle einer an einem anderen Standort befindlichen Anlage, d.h. das Anchoring geschieht an dieser Stelle standortübergreifend (Inter-Site).
<i>LTE</i>	LTE (Long Term Evolution) ist der Mobilfunkstandard der vierten Generation (4G) und ist somit die Vorgängermobilfunkgeneration von 5G. Streng genommen erfüllt LTE nicht vollumfänglich die Spezifikationen für 4G. Daher hat sich für das ursprüngliche LTE mittlerweile die inoffizielle Bezeichnung 3.9G etabliert.
<i>LTE Advanced</i>	Bei LTE Advanced (LTE-A) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des LTE-Mobilfunkstandards, wodurch die 4G-Spezifikationen nun vollumfänglich erfüllt werden konnten. Mit LTE-A lässt sich gegenüber LTE die Datenübertragungsrate steigern. Die größten positiven Auswirkungen auf die Datenübertragungsraten hatten aber die Neuerungen „Carrier Aggregation (CA)“ und „Coordinated Multipoint Transmission and Reception (CoMP)“.

<i>Massive MIMO</i>	<p>Massive MIMO stellt im Allgemeinen ein MIMO-Übertragungssystem dar, das mindestens auf einer Seite eine Vielzahl von Sende-/Empfangsantennen aufweist. Im Mobilfunk wird Massive MIMO seit 5G aufseiten der Basisstationen nennenswert eingesetzt. Durch die hohe Anzahl von Antennenelementen weisen Massive-MIMO-Antennensysteme eine vergleichsweise starke Bündelung der Richtcharakteristik (d.h. einen hohen Antennengewinn) auf. Durch geschickte zeitversetzte Ansteuerung der einzelnen Antennenelemente im Frequenzträgerbereich direkt vor den Antennen (analoges Beamforming), durch komplexe Gewichtung der Signalpfade im Basisband (digitales Beamforming) oder durch eine Kombination beider Verfahren ist es mithilfe von Massive-MIMO-Antennen möglich, einen Großteil der Signalleistung nur in bestimmte Zellbereiche abzustrahlen bzw. nur aus bestimmten Zellbereichen zu empfangen. Dabei kann die Ausrichtung der sogenannten Beams dynamisch an die endgeräteseitigen Anforderungen sowie die Übertragungsbedingungen angepasst werden. Dadurch lassen sich im gewünschten Versorgungsbereich die erzielbaren Datenraten aufgrund einer Reduzierung von Interferenzen benachbarter Beams steigern. Im Bereich des 5G-Mobilfunks werden Massive-MIMO-Antennen derzeit im 3,6-GHz-Band eingesetzt.</p>
<i>MIMO</i>	<p>MIMO (Multiple Input Multiple Output) bezeichnet allgemein die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen zur Ausnutzung der Kapazitäten des Übertragungskanal. Im Bereich des Mobilfunks wird MIMO typischerweise sowohl für „Transmit Diversity“ als auch „Spatial Multiplexing“ verwendet.</p>
<i>mMTC</i>	<p>mMTC (massive Machine Type Communication) stellt eines der drei Nutzungsszenarien dar, auf die der 5G-Mobilfunkstandard zugeschnitten wurde. mMTC ist das relevante Szenario für IoT- und Smart-Meter-Anwendungen, da es einerseits eine hohe Dichte von Geräten zulässt, andererseits eine Übertragung über große Distanzen mit niedrigen Datenraten, aber auch niedrigem Energieverbrauch ermöglichen soll. Die beiden anderen Nutzungsszenarien sind enhanced Mobile Broadband (eMBB) und ultra Reliability and Low Latency Communication (uRLLC).</p>
<i>Modulationsverfahren</i>	<p>Die Modulation ist zur Übertragung von Signalen per Funk unerlässlich, da es das niederfrequente zu übertragende Signal (z.B. Sprache) auf eine höherfrequente Trägerfrequenz verschiebt. Erst durch die Modulation auf die Trägerfrequenz wird die Übertragung eines Signals überhaupt sinnvoll möglich. Im Mobilfunk sind die Trägerfrequenzen diejenigen Frequenzbänder, welche die Mobilfunknetzbetreiber im Rahmen der Frequenzauktionen der Bundesnetzagentur ersteigert haben. Es gibt diverse Modulationsverfahren, die das Trägersignal durch die Informationen des zu modulierenden Signals hinsichtlich Amplitude, Frequenz oder Phase verändern. Der Empfänger kann bei Kenntnis der Trägerfrequenz und des Modulationsverfahrens das</p>

	<p>Nutzsignal wieder extrahieren. Im Bereich des Mobilfunks werden digitale Modulationsverfahren verwendet. Hierbei wird das zu modulierende komplexe digitale Signal (Amplitude und Phase) auf sogenannte "Symbole" abgebildet. Diese Symbole repräsentieren dabei je nach Modulationsart hinsichtlich Amplitude, Frequenz oder Phase diskrete Zustände des Trägersignals. Je mehr Zustände durch ein Symbol abgebildet werden können, desto mehr Information (Bit) lässt sich mit einem Symbol übertragen, aber desto empfindlicher wird die Übertragung auch gegenüber Störungen.</p>
<p><i>Multibandantennen</i></p>	<p>Multibandantennen sind Antennensysteme, die aus jeweils einzelnen Antennen oder Antennengruppen für verschiedene Frequenzbänder bestehen. Im Mobilfunk haben sich mittlerweile passive Multibandantennen durchgesetzt, die alle sieben Frequenzbänder zwischen 700 MHz und 2,6 GHz unterstützen (Heptabandantennen). Dadurch lässt sich die Anzahl von Antennen an einem Antennenträger auf ein Minimum reduzieren bei gleichzeitiger Unterstützung aller gängigen Frequenzbänder. Lediglich im 3,6-GHz-Band, in dem Beamforming betrieben wird, wofür also aktive Antennen benötigt werden, werden die passiven Multibandantennen derzeit nicht eingesetzt.</p>
<p><i>Network Slicing</i></p>	<p>Ausgehend von der homogenen Nutzung des Mobilfunks für Sprachtelefonie bei 2G (GSM), sind die Anforderungen an das Mobilfunknetz hinsichtlich der Anforderungen an Datenraten, -volumina, Latenzen und Robustheit mittlerweile sehr heterogen. Bei der Standardisierung von 5G wurde diese Heterogenität explizit eingeplant (siehe Nutzungsszenarien eMBB, mMTC und uRLLC). Bei 5G ist es daher möglich, das Mobilfunknetz virtuell in mehrere Scheiben (Slices) zu unterteilen, die individuell auf die unterschiedlichen und teils gegensätzlichen Anforderungen der verschiedenen Nutzergruppen angepasst sind.</p>
<p><i>Non Standalone</i></p>	<p>Bei 5G-Basisstationen im Non-Standalone-Betrieb (NSA) benötigt die 5G-Zelle eine 4G-Zelle als sogenannten Anker, damit 5G-kompatible Endgeräte überhaupt eine Verbindung mit der 5G-Zelle aufbauen und diese aufrechterhalten können (siehe „Anchoring“). NSA ist eine Brückentechnologie, welche die Netzbetreiber genutzt haben, um 5G möglichst schnell ausrollen zu können. Langfristig werden aber nur noch Standalone-Standorte (SA) ausgerollt, die keinen 4G-Anker mehr benötigen. Hiervon gibt es vonseiten der Netzbetreiber bereits erste Basisstationen. Erst mit 5G im Standalone-Betrieb lassen sich die Vorteile von 5G hinsichtlich Datenraten und vor allem hinsichtlich der kürzeren Latenzzeiten vollumfänglich nutzen.</p>
<p><i>OFDMA</i></p>	<p>OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ist ein Zugriffsverfahren, das bei 4G und 5G zum Einsatz kommt, und mithilfe dessen Ressourcen sowohl zeitlich als auch spektral aufgeteilt und zur Verfügung gestellt werden können. Spektral werden die Ressourcen in sogenannte Unterträger (subcarrier) aufgeteilt, die die Besonderheit aufweisen, dass sie</p>

	näherungsweise "orthogonal" zueinander sind, wodurch Störungen zwischen Unterträgern minimiert werden können. Ein großer Vorteil von OFDMA ist der Umstand, dass die zu übertragenden Unterträger im Prinzip einzeln ausgewählt werden können, wodurch auf frequenzselektive Störungen im Übertragungskanal sehr gezielt reagiert werden kann.
<i>QAM</i>	Die Quadraturamplitudenmodulation (QAM) ist ein gängiges und üblicherweise auch im Mobilfunk verwendetes digitales Modulationsverfahren zur Übertragung von Signalen. Hierbei werden die Informationen des zu modulierenden digitalen Datenstroms in Symbole des hochfrequenten Trägersignals kodiert, die verschiedenen diskreten Amplituden- sowie Phasenzuständen der Trägerschwingung entsprechen. Je mehr Zustände die Symbole jeweils annehmen können, desto mehr Information (Bit) lässt sich in einem Symbol kodieren, aber desto empfindlicher wird das Trägersignal auch gegenüber Störungen. Zur Übertragung von Signalen bei 5G werden folgende QAM-Schemata verwendet: 4-QAM (wird auch QPSK genannt, 4 Zustände, Kodierung von 2 Bit pro Symbol), 16-QAM (16 Zustände, Kodierung von 4 Bit pro Symbol), 64-QAM (64 Zustände, Kodierung von 6 Bit pro Symbol) und 256-QAM (256 Zustände, Kodierung von 8 Bit pro Symbol). Hinweis: Unterschieden werden müssen hierbei die Informationsmenge [bit] und binäre Symbole eines Datenstroms [Bit]
<i>QPSK</i>	QPSK (Quadraturphasenumtastung bzw. Quaternary Phase Shift Keying) ist ein gängiges digitales Modulationsverfahren zur modulierten Übertragung von digitalen Signalen. Hierbei werden die Informationen des zu modulierenden binären Datenstroms in Symbole kodiert, die vier verschiedenen diskreten Phasenzuständen des Trägersignals entsprechen. Daher können mit einem QPSK-Symbol vier Zustände bzw. 2 Bit des binären Datenstroms übertragen werden. QPSK und 4-QAM sind äquivalent. Aufgrund der niedrigen Anzahl von Zuständen, die ein Symbol bei QPSK annehmen kann, ist diese Modulationsart robust gegenüber überlagerten Störungen. Daher wird es im Mobilfunk zur Übertragung wichtiger Signale (bei 5G z.B. dem PBCH als Teil des SSB) oder bei schlechten Empfangsbedingungen verwendet. Damit geht eine im Vergleich zu höherwertigeren Modulationsschemata wie 16-QAM niedrigere Datenrate einher.
<i>Smart Power Lock (SPL)</i>	Smart Power Lock (SPL) stellt eine Regelschleife aufseiten von Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen dar, welche die aktuelle Sendeleistung der Antennen adaptiv anpasst, um sicherzustellen, dass für die über sechs Minuten gemittelte Sendeleistung ein Sollwert nicht überschritten wird (für Details hierzu sei auf Teilkapitel 1.2.2 verwiesen).
<i>Spatial Diversity</i>	Spatial Diversity ist eine typische Nutzungsform bei MIMO-Übertragungssystemen z.B. im Bereich des Mobilfunks. Es stellt eine spezielle Form von Spatial Multiplexing dar, indem sende- oder empfängerseitig

	mehrere räumlich voneinander getrennte Antennen verwendet werden, die die Robustheit der Übertragung erhöhen.
<i>Spatial Multiplexing</i>	Spatial Multiplexing (oder Space Division Multiplexing) ist eine typische Nutzungsform bei MIMO-Übertragungssystemen z.B. im Bereich des Mobilfunks. Dabei lässt sich die erzielbare Datenrate durch Übertragung unterschiedlicher Informationen über voneinander unabhängige räumlich getrennte Übertragungskanäle steigern. Durch die geringe Korrelation der Übertragungswege lassen sich damit mehrere Datenströme über dieselben Ressourcen (Frequenz, Zeit) übertragen.
<i>Standalone</i>	Siehe „Non Standalone“
<i>Time Division Duplex (TDD)</i>	Bei Time Division Duplex (FDD) handelt es sich um ein gängiges u.a. im Mobilfunk und bei WLAN eingesetztes Duplexverfahren zur Trennung der Downlink- sowie Uplink-Übertragungskanals hinsichtlich der zeitlichen Ressourcen. Uplink- und Downlink-Übertragung findet zwar im selben Frequenzband statt, jedoch sind sie zeitlich getrennt. Von den derzeit im Mobilfunkbereich <i>nennenswert genutzten</i> Frequenzbändern findet TDD lediglich im 3,6-GHz-Band (5G) statt. Prinzipiell ist eine Nutzung von TDD auch im 1,5-GHz-Band, bei 2 GHz (zwischen den voneinander getrennten Downlink- und Uplink-Frequenzbändern des 2,1-GHz-Bandes, FDD) sowie bei 2,6 GHz (zwischen den voneinander getrennten Uplink- und Downlink-Frequenzbändern des 2,6-GHz-Bandes, FDD) möglich. Das Gegenstück zu TDD stellt FDD (Time Division Duplex) dar.
<i>Transmit Diversity</i>	Transmit Diversity ist eine typische Nutzungsform bei MIMO-Übertragungssystemen z.B. im Bereich des Mobilfunks. Dabei werden über mehrere Sendeantennen die gleichen Nutzdaten leicht zeitversetzt übertragen, wodurch es aus Sicht des Empfängers zu einer Mehrwegeausbreitung kommt, die – sofern die jeweils empfangenen Signale empfängerseitig kombiniert werden können – die Robustheit der Übertragung erhöht.
<i>uRLLC</i>	Ultra Reliable and Low Latency Communication (uRLLC) stellt eines der drei Nutzungsszenarien dar, auf die der 5G-Mobilfunkstandard zugeschnitten wurde. Ein typisches Beispiel hierfür ist das autonome Fahren, welches im Gegensatz zu eMBB keine so hohen Datenraten erfordert, dafür aber darauf angewiesen ist, dass die Daten sowohl sehr verlässlich als auch mit einer kürzest möglichen Latenz übertragen werden. Die beiden anderen Nutzungsszenarien sind enhanced Mobile Broadband (eMBB) und massive Machine Type Communication (mMTC).
<i>Zugriffsverfahren</i>	Zugriffsverfahren bezeichnen in der Nachrichtentechnik Verfahren, die den Zugriff auf ein Übertragungsmedium koordinieren. Im Mobilfunk wird es häufig als Synonym für Vielfachzugriff (multiple access) verwendet, wonach die Frequenz- und/oder Zeitressourcen auf mehrere Teilnehmer in einer Zelle

	aufgeteilt werden. Bei 4G und 5G wird das Zugriffsverfahren OFDMA verwendet.
--	--

2 Durchführung der Immissionsmessungen

2.1 Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder

Für den Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor sowie zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder besteht in Deutschland seit dem 16. Dezember 1996 mit der „Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“ und den darin festgelegten Grenzwerten eine gesetzliche Regelung. Diese Verordnung wurde im Jahr 2013 novelliert [26. BImSchV]. Sie gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen.

Im Hochfrequenzbereich gilt die 26. BImSchV für ortsfeste Sendeanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) oder mehr, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz erzeugen. Sie gilt ebenfalls für Anlagen mit einer Sendeleistung von weniger als 10 W EIRP, wenn diese an einem Standort errichtet werden, an dem unter Berücksichtigung der neuen Anlage die Grenze von 10 W EIRP überschritten wird. Die in diesem Projekt untersuchten 5G-Anlagen sind ortsfeste Sendeanlagen im Sinne der 26. BImSchV. Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind die unter die Verordnung fallenden Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung die nachfolgend bestimmten Grenzwerte für den jeweiligen Frequenzbereich unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Hochfrequenzanlagen sowie Niederfrequenzanlagen nicht überschritten werden. Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz, wie z.B. von Radaranlagen, darf zusätzlich der Spitzenwert für die elektrische und magnetische Feldstärke das 32-fache der Werte nach Tabelle 2.1 nicht überschreiten.

Frequenz f in MHz	Effektivwert, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle	
	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m
0,1 – 1	87	
1 – 10	$87/\sqrt{f}$	
10 - 400	28	0,073
400 - 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000 - 300000	61	0,16

Tabelle 2.1: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV. Für f ist der Zahlenwert in MHz einzusetzen.

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im Fernfeld einer Strahlungsquelle über den Wellenwiderstand des Freiraumes, $Z_0 \approx 377 \Omega$, ineinander überführbar und beinhalten die-

selbe Information. Deswegen ist es hier ausreichend, lediglich die Größe des elektrischen Feldes zu messen und anzugeben. Der prozentuale Ausschöpfungsgrad ist das mit 100 Prozent multiplizierte Verhältnis von Messwert und Grenzwert.

Wirken gleichzeitig Felder unterschiedlicher Frequenzen zusammen, dann wird in Anlehnung an Anhang 2b der 26. BImSchV eine Summenfeldstärke (Gleichung 2.1) sowie ein grenzwertbezogener Ausschöpfungsgrad GW_ASG (Gleichung 2.2) gebildet.

$$E = \sqrt{\sum_{i=100\text{ kHz}}^{300\text{ GHz}} E_i^2} \quad (2.1)$$

$$GW_ASG_{thermisch} = \sqrt{\sum_{i=100\text{ kHz}}^{300\text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2} \quad (2.2)$$

E_i gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$ Grenzwert für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 2.1

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung 2.2 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen Feldstärke-Grenzwertes. Dieser darf den Wert 100 nicht überschreiten. In den Auswertungen der nachfolgenden Teilkapitel wird zusätzlich zur elektrischen Summenfeldstärke in Volt pro Meter auch der Grenzwert-Ausschöpfungsgrad in Prozent angegeben.

Tabelle 2.2 fasst die relevanten Grenzwerte der 26. BImSchV für die Abstrahlung der Basisstationen (Downlink) in den Mobilfunkbereichen MB07, MB08, MB09, MB18, MB21, MB26 und MB36 zusammen. Für die Auswertung in diesem Bericht wird je System derjenige Grenzwert verwendet, der für die Banduntergrenze des jeweiligen Frequenzbereiches gültig ist. „MB“ ist dabei die Abkürzung für „Mobile Broadband“ und berücksichtigt die Tatsache, dass in denen durch die nachfolgenden beiden Ziffern codierte Frequenz („MB09“ entspricht Mobile Broadband 900 MHz) durch die technologieneutrale Vergabe der Frequenzen unterschiedliche Mobilfunksysteme betrieben werden können (z.B. GSM-900 und LTE-900 bei MB09).

Mobilfunksystem	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m
MB07	37,8	0,10
MB08	38,6	0,10
MB09	41,8	0,11
MB18	58,4	0,15
MB21	61,0	0,16
MB26	61,0	0,16
MB36	61,0	0,16

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Mobilfunkfrequenzbereiche nach 26. BImSchV. Der Grenzwert wird bei der Auswertung in diesem Bericht als konstant über dem gesamten Frequenzbereich des jeweiligen Funksystems angesetzt.

2.2 Beschreibung der gemessenen Immissionszenarien

Bei den Messungen an den 5G-Basisstationen wurden jeweils folgende Immissionen bestimmt:

- **Maximalimmission:** Hierfür wurden die Immissionen der unmittelbar an dem Anlagenstandort in Betrieb befindlichen Funkdienste und Frequenzbänder aller Netzbetreiber gemessen und mithilfe von Betreiberdaten auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.
- **Momentanimmission:** Zusätzlich zur Maximalimmission wurde für alle Frequenzbänder aller Netzbetreiber die jeweilige Momentanimmission gemessen. Im Gegensatz zur Maximalimmission wurden hierbei alle am Messpunkt innerhalb der Messempfindlichkeit des Messgerätes nachweisbaren Immissionen erfasst, d.h. eine Trennung von Quellen an der Anlage vor Ort und Quellen an umliegenden Standorten war nicht möglich. Die Momentanimmission wurde über etwa 30 Messdurchläufe (entsprechend einer Dauer von etwa 3-4 Minuten) gemittelt, während die isotrope Messantenne in einem Höhenbereich von etwa 1,0 m bis 1,75 m kontinuierlich durch das Messvolumen geschwenkt wurde.
- **Typische Immission (nur an Anlagen mit 5G im 3,6-GHz-Band):** An Basisstationen mit 5G-Beamforming-Antennen wurde zusätzlich die Momentanimmission während einer typischen Nutzung gemessen. Hierfür wurde mithilfe eines 5G-fähigen Endgeräts der ARD-Livestream [ARD] abgespielt und dadurch regelmäßig die Ausrichtung eines Traffic Beams auf den Messpunkt provoziert.

2.3 Eingesetzte Messgeräte

Für die Immissionsmessungen wurde Tabelle 2.3 aufgeführtes Messequipment eingesetzt.

Gerät	Hersteller	Art	Serien. Nr.
SRM-3006	Narda Safety Test Solutions	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz–6 GHz mit codeselektiver LTE- und 5G NR-Messoption	G-0258
3502/01	Narda Safety Test Solutions	3-Achsen-E-Feld Antenne 420 MHz–6 GHz	E-0133

Tabelle 2.3: Für die Messungen eingesetzte Messgeräte.

Die Messunsicherheit für die hier durchgeführten Immissionsmessungen mit dem Narda SRM-3006 ist mit ± 3 dB anzusetzen (erweiterte Messunsicherheit für den Erweiterungsfaktor $k = 2$, d.h. Vertrauensintervall 95 %). Hierbei sind sowohl die Unsicherheitsbeiträge für die Kalibrierung von Messantenne, Messkabel und Spektrumanalysator, als auch die Unsicherheit der Probennahme berücksichtigt. Die Messunsicherheit wurde nicht zu den Messergebnissen addiert.

2.4 Verwendete Messverfahren

Im Rahmen von vorangegangenen wissenschaftlichen Untersuchungen und einem Forschungsvorhaben wurden im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz seitens der Projektnehmer bereits Verfahren zur Bestimmung der Momentan- und Maximalimmission von 5G-Basisstationen entwickelt, validiert und unter Feldbedingungen angewendet [BKS+ 19], [BKS+ 20], [BKH+ 20], [KBS+ 20], [SKB+ 20], [KBW 22].

Für die Ermittlung der Momentanimmission wird die Verwendung eines Spektrumanalysators (Laborspektrumanalysator oder portabler Spektrumanalysator) vorgeschlagen, dessen Einstellungen eine korrekte RMS-Erfassung ermöglichen. Das Verfahren basiert somit auf derselben Grundidee, wie die in Teilkapitel 1.5.3 vorgestellte Messanweisung der IEC (in den beiden anderen vorgestellten Messempfehlungen wurde nicht auf die Messung der Momentanimmission eingegangen).

Für die Bestimmung der Maximalimmission wird der SSB (frequenzselektiv) bzw. der SSS (codeselektiv) als geeignete Basis für eine Hochrechnung vorgeschlagen. Bei der Hochrechnung ist zuerst auf die maximale Signalbandbreite unter Beachtung ggf. unterschiedlicher spektraler Leistungen von SSB und Traffic (PDSCH) zu extrapolieren, da der PDSCH ursächlich für die Maximalimmission ist. Da PDSCH und SSB bei Beamforming mit unterschiedlichen Antennendiagrammen abgestrahlt werden, ist der Antennengewinnunterschied individuell für jeden Messpunkt zu berücksichtigen. Bei TDD-Signalen kann zudem der Duty Cycle des Downlinks berücksichtigt werden. Dies entspricht im Wesentlichen auch der Grundidee der Messempfehlung der IEC (siehe Teilkapitel 1.5.3) sowie der Messanweisung der BNetzA (siehe Teilkapitel 1.5.1), wobei die BNetzA die Messung der SSB-Immission lediglich frequenzselektiv dokumentiert hat, da zum Zeitpunkt der Erstellung der Messanweisung keine codeselektiven Messmöglichkeiten bestanden.

Eine Alternative zur SSB/SSS-Messung mit anschließender Hochrechnung bei Beamforming stellt die gezielte Provozierung der Maximalimmission am Messort mithilfe eines 5G-fähigen Endgeräts dar, auf dem während der Messung ein FTP-Download durchgeführt wird, wodurch ein Beam auf den Messort ausgerichtet wird. Dieses Verfahren wurde zusätzlich zur codeselektiven Messung angewendet.

Das für die Messungen eingesetzte Feldstärkemessgerät SRM-3006 verfügt über verschiedene Messmodi, die sich optimal auf das zu messende Signal konfigurieren lassen. In den nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Geräteeinstellungen für die Messungen der Mobilfunkimmissionen von GSM, LTE, 4G/5G (DSS) und 5G bei 3,6 GHz sowohl für die Bestimmung der Maximalwerte als auch der Momentanwerte aufgelistet. Die Momentanimmission wird hierbei nach den Frequenzbändern mit den Bezeichnungen MB07 bis MB36 aufgelistet, da diese Frequenzbänder größtenteils technologieneutral verwendet werden können und teilweise auch verschiedene Funkdienste in einem Frequenzband in Betrieb sein können. 3G (UMTS) konnte im Rahmen dieser Studie an keinem der Standorte mehr nachgewiesen werden.

Mobilfunk-system	Messmodus	Frequenzbereich	Weitere Einstellungen	Ablesewert	Hochrechnung
5G-3600	5G NR	Mittenfrequenz des SSB	-	Max ($SSS_{i,max}$)	Mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zur eingestellten SSS-Leistung sowie ggf. Antennengewinnunterschied zwischen PDSCH und SSB
	Level Recorder	Mittenfrequenz auf Kanalmitte (Vodafone: 3445 MHz, Drillisch: 3515 MHz, Telefónica: 3575 MHz, Telekom: 3655 MHz)	RBW 3,2 MHz, VBW 16 kHz	Max Peak	Mit Verhältnis Signalbandbreite zu RBW sowie Verhältnis der bei der BNetzA beantragten zur eingestellten Sendeleistung
4G/5G (DSS)	LTE FDD	Mittenfrequenz auf Signalmitte	CBW 1,4 MHz	Max (RS_{max})	Mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zu eingestellter RS-Leistung
LTE	LTE FDD	Mittenfrequenz auf Signalmitte	CBW 1,4 MHz	Max (RS_{max})	
GSM	Spectrum	918,1 – 960 MHz	RBW 200 kHz, VBW 2 kHz	Max	Mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zur BCCH-Leistung

Tabelle 2.4: Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006 zur Bestimmung der Maximalimmission in Abhängigkeit vom Mobilfunksystem

Frequenzband	Messmodus	Frequenzbereich	Weitere Einstellungen	Ablesewert
MB07	Safety Evaluation	758 – 788 MHz	RBW 10 kHz	Average
MB08		791 – 821 MHz		
MB09		918,1 – 960 MHz		
MB18		1.805 – 1.880 MHz		
MB21		2.110 – 2.170 MHz		
MB26		2.570 – 2.690 MHz		
MB36		Start- und Stopfrequenz entsprechend Betreiber (Vodafone: 3400-3490 MHz, Drillisch: 3490-3540 MHz, Telefónica: 3540-3610 MHz, Telekom: 3610-3700 MHz)	RBW 20 kHz	

Tabelle 2.5: Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006 zur Bestimmung der Momentanimmission in Abhängigkeit vom Frequenzband

3 Messungen im Umfeld von 5G-Basisstationen

Im Rahmen vorliegenden Projekts wurden an zehn vom LANUV NRW ausgewählten 5G-Basisstationen in Nordrhein-Westfalen an jeweils vier Messpunkten systematische Messungen der Immissionen elektromagnetischer Felder nach 26. BImSchV durchgeführt, die Ergebnisse auf maximal mögliche Betriebslast extrapoliert und im Hinblick auf die Grenzwertausschöpfung überprüft. Ebenfalls wurde die im Messzeitraum vorherrschende Momentanimmission des Mobilfunk-Downlinks aufgenommen. An 5G-Basisstationen im 3,6-GHz-Band wurde zusätzlich die Momentanimmission für ein typisches Nutzungsszenario (TV-Livestream) bestimmt. Der Fokus bei der Auswahl der Messpunkte lag auf Orten, an denen sich Menschen dauerhaft oder über einen längeren Zeitraum aufhalten können und an denen aufgrund ihrer Lage mit höheren Immissionen zu rechnen ist. Bei zwei Messpunkten handelt es sich um Orte, die bereits in der früheren Messreihe zu UMTS hinsichtlich ihrer Immissionen untersucht wurden [BOR 05].

Die Messungen wurden im Zeitraum vom 18.10. bis 03.11.2021 von Anna-Malin Schiffarth, Thomas Kopacz und Lennart Verhas vom Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen durchgeführt. In nachfolgender Tabelle sind die untersuchten 5G-Basisstationen aufgeführt:

Nr.	Adresse (Ort, Straße)	5G oder 4G/5G (DSS)?	Andere Frequenzbänder (Anzahl Betreiber)
1	Übach-Palenberg, Martin-Luther-Straße 8	MB07 (4G/5G), MB21 (4G/5G)	MB08 (1), MB09 (1), MB18 (1)
2	Lippstadt, Gaußstraße 17	MB21 (4G/5G)	MB08 (2), MB09 (2), MB18 (2), MB21 (1)
3	Düsseldorf, Am Wald 130	MB18 (4G/5G), MB21 (4G/5G), MB36 (5G)	MB08 (2), MB09 (2), MB18 (2), MB21 (1), MB26 (1)
4	Essen, Frielingsdorfweg 1	MB21 (4G/5G)	MB08 (2), MB09 (2), MB18 (2)
5	Oberhausen, Bismarckstraße 53	MB21 (4G/5G), MB36 (5G)	MB08 (2), MB09 (2), MB18 (1), MB21 (2)
6	Köln, Richard-Wagner-Straße 42	MB21 (4G/5G), MB36 (5G)	MB09 (1), MB18 (1), MB26 (1)
7	Simmerath, Kranzbruchstraße 15	MB07 (4G/5G)	MB08 (1), MB09 (1), MB21 (1)
8 ¹	Bonn, Am Stingenberg	MB21 (4G/5G), MB36 (5G)	MB08 (1), MB09 (2), MB18 (2), MB21 (2), MB26 (1)
9	Münster, Münzstraße 13	MB36 (5G)	MB08 (1), MB09 (1), MB18 (1), MB21 (1), MB26 (1)
10	Dortmund, Leierweg 65	MB36 (5G)	MB09 (1), MB18 (1)

Tabelle 3.1: Im Rahmen der Feldmessungen untersuchte 5G-Basisstationen

¹ Beim Standort 8 (Bonn) handelt es sich um zwei benachbarte Masten, die hier zusammengefasst betrachtet werden.

3.1 Beschreibung der Standorte und Messpunkte

Im Folgenden wird ein Überblick über die Standorte mit den Ausrichtungen der 5G-Antennen, sowie der Lage der Messpunkte gegeben.

3.1.1 Anlage 1: Übach-Palenberg, Martin-Luther-Straße 8

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
1.1	Vor dem Tor zur Glückauf-Kampfbahn	30 m	Ja	43°
1.2	Schulhof Grundschule Boscheln	105 m	Ja	13°
1.3	Spielplatz Holunderplatz	302 m	Nein	4°
1.4	Auf Höhe Gartenstraße 12	392 m	Ja	6°

Tabelle 3.2: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 1 in Übach-Palenberg.

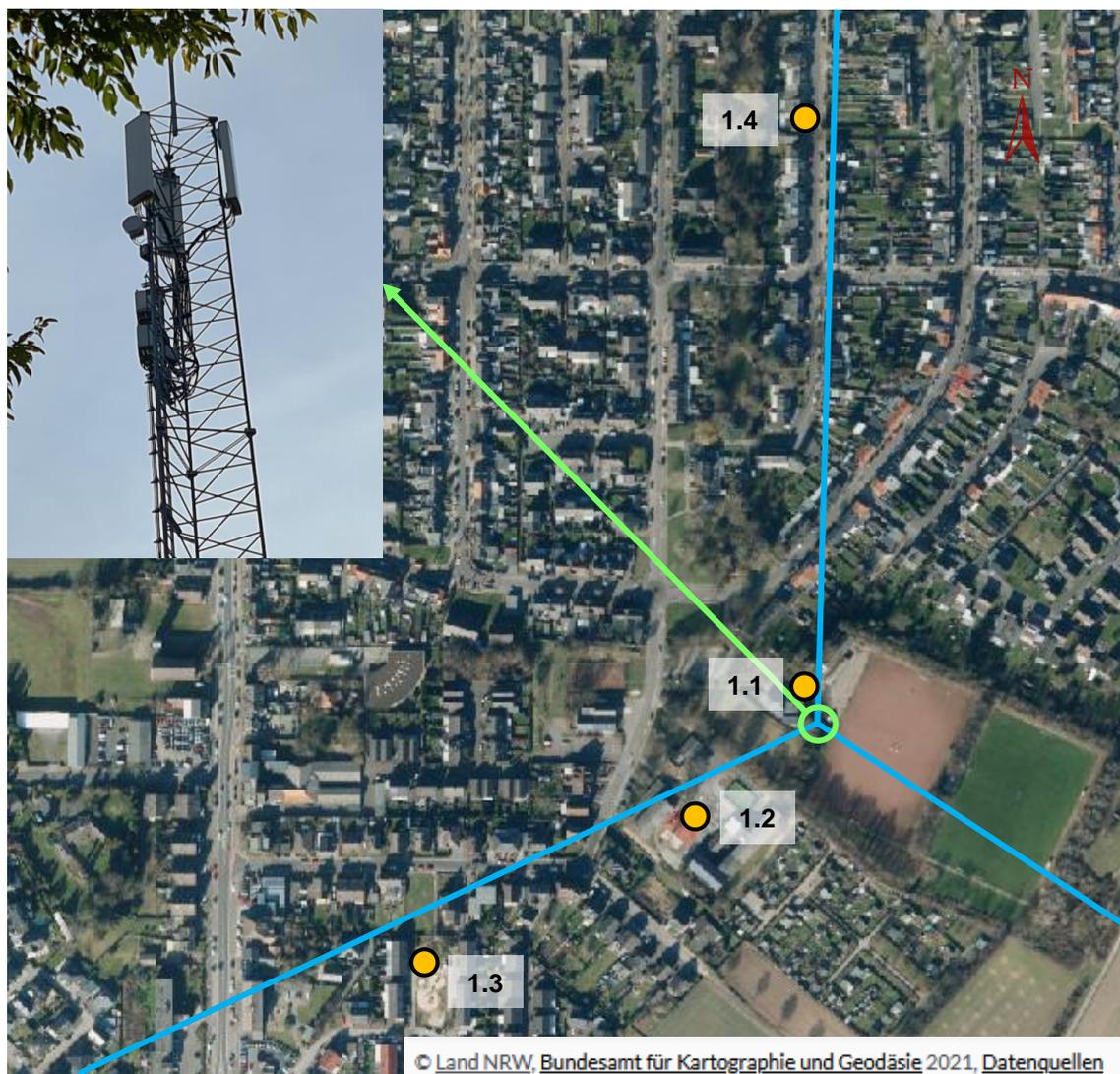


Abbildung 3.1: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 1. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Anlagenstandort und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.2 Anlage 2: Lippstadt, Gaußstraße 17

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
2.1	Auf Höhe Leberstraße 28	47 m	Ja	33°
2.2	Volkshochschule Lippstadt	156 m	Nein	10°
2.3	Spielplatz Kirchnerstr./Beckstr.	321 m	Nein	5°
2.4	Sportplatz	80 m	Ja	21°

Tabelle 3.3: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 2 in Lippstadt.



Abbildung 3.2: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 2. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.3 Anlage 3: Düsseldorf, Am Wald 130

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
3.1	Außenbereich Kita Wunderwald	70 m	Ja	18°
3.2	Tribüne Sportplatz	30 m	Ja	36°
3.3	Auf Höhe Hoxbachstraße 28	165 m	Ja	8°
3.4	Eingang von Sonderschule für Sehbehinderte	167 m	Nein	8°

Tabelle 3.4: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 3 in Düsseldorf.

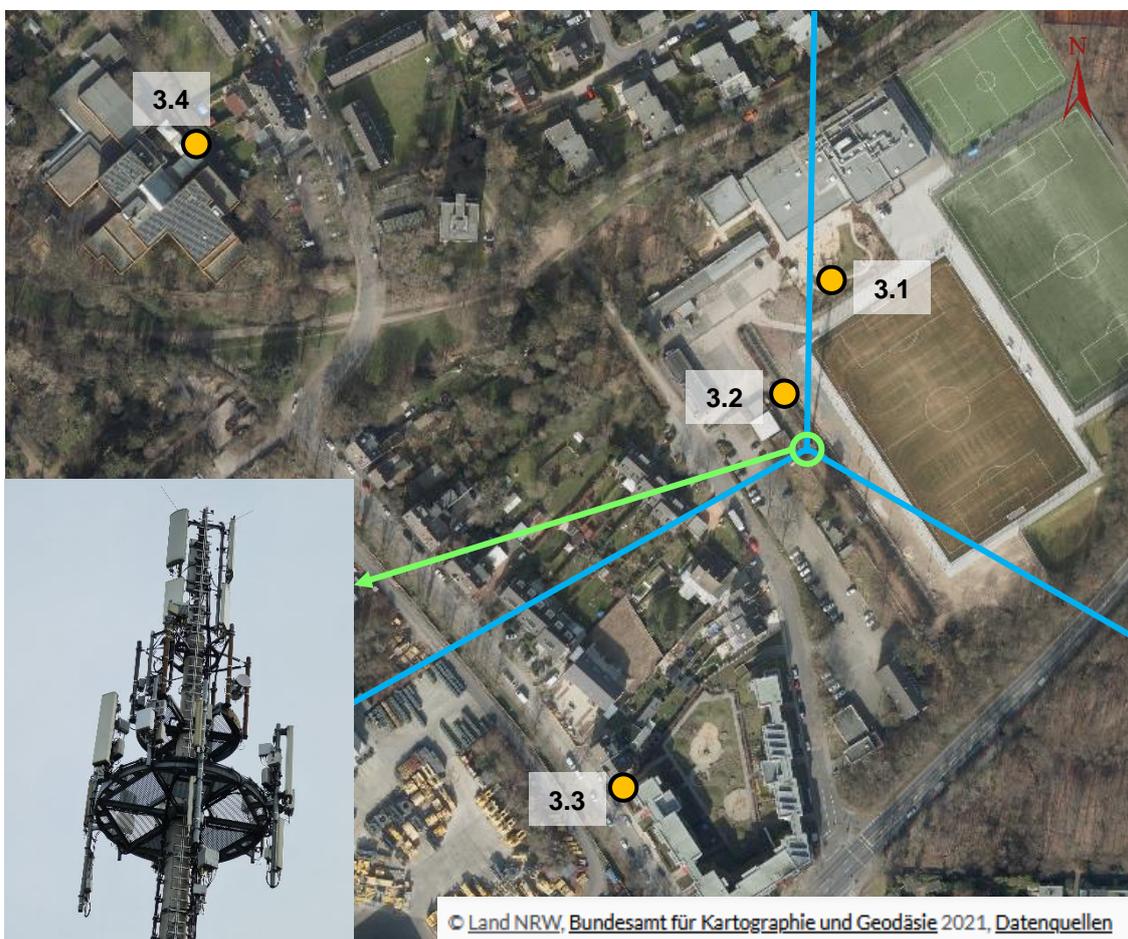


Abbildung 3.3: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 3. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.4 Anlage 4: Essen, Frielingsdorfweg 1

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
4.1	Auf Höhe Frielingsdorfweg 1	12 m	Ja	64°
4.2	Auf Höhe Kimmeskampfweg 21	144 m	Ja	7°
4.3	Auf Höhe des Kindergartens Christi-Himmelfahrt	330 m	Ja	3°
4.4	Spielplatz Brosweg	150 m	Ja	6°

Tabelle 3.5: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 4 in Essen.

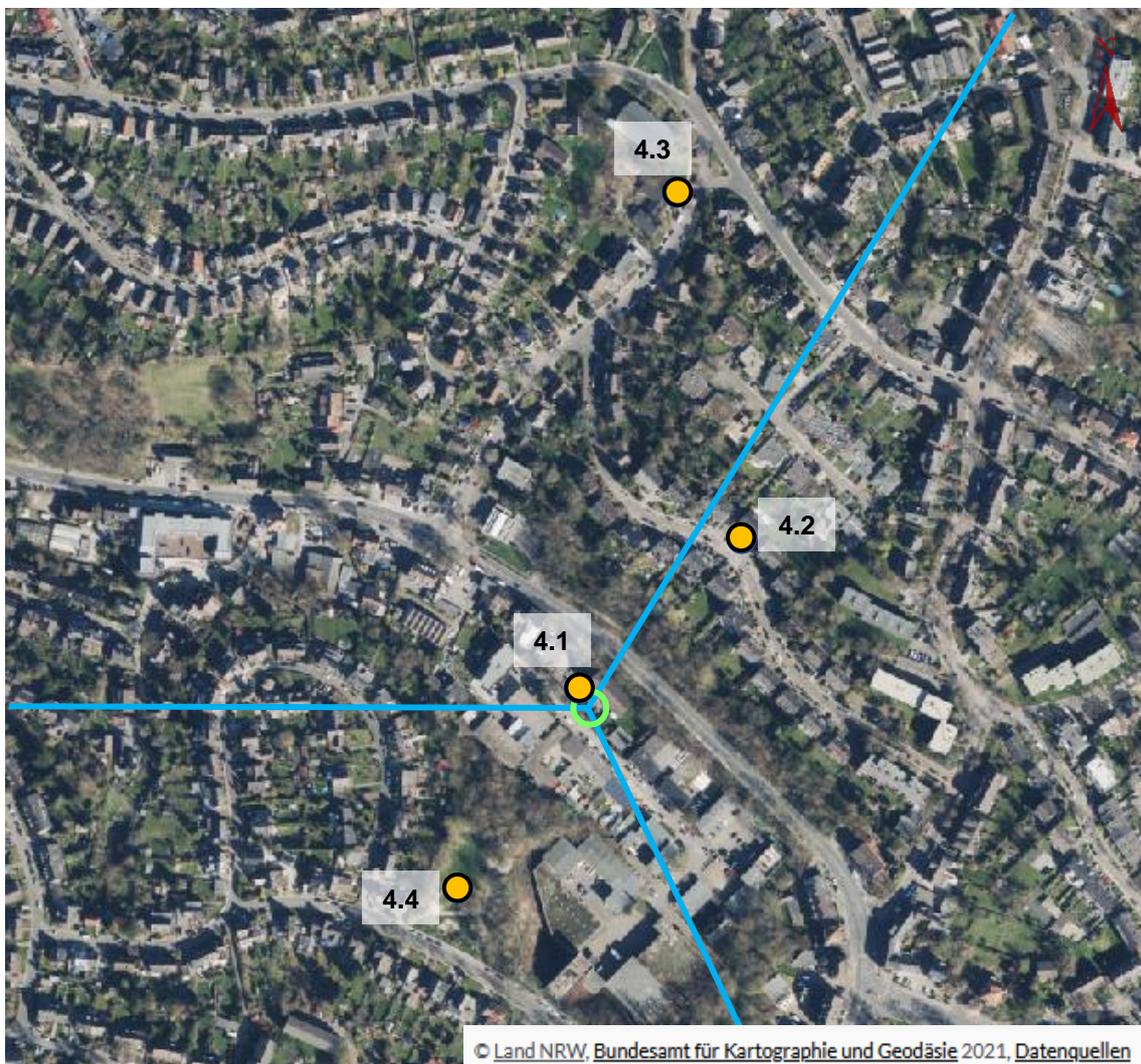


Abbildung 3.4: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 4. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.5 Anlage 5: Oberhausen, Bismarckstraße 53

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
5.1	Schulhof Bertha-von-Suttner-Gymnasium Tischtennisplatte (Wiederholungsmesspunkt)	68 m	Ja	23°
5.2	Schulhof Bertha-von-Suttner-Gymnasium Basketballfeld	44 m	Ja	33°
5.3	Vor der Lutherkirche	66 m	Nein (Vegetation)	23°
5.4	Straßenkreuzung vor der Klinik für Kinder und Jugendliche	213 m	Nein	8°

Tabelle 3.6: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 5 in Oberhausen.

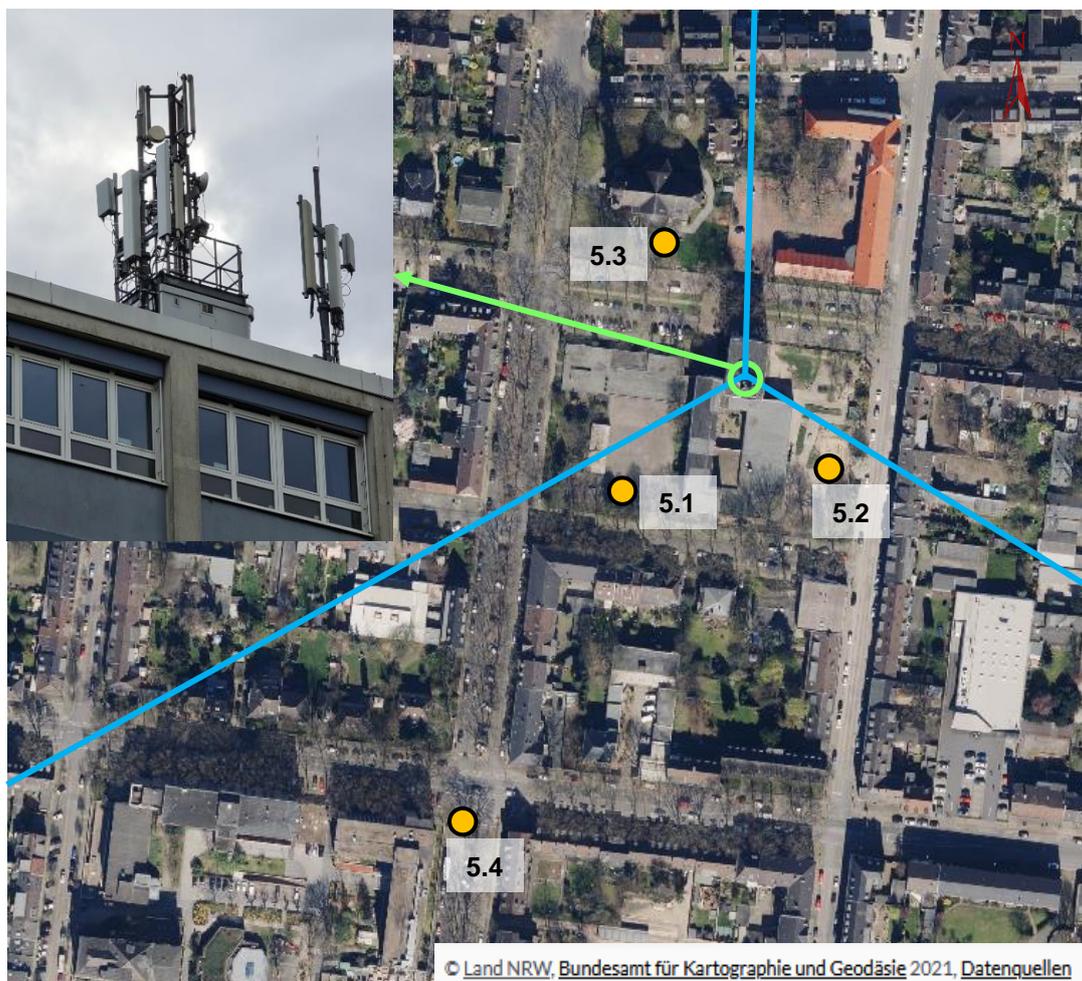


Abbildung 3.5: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 5. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.6 Anlage 6: Köln, Richard-Wagner-Straße 42

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
6.1	Berufskolleg an der Lindenstraße (Indoor, 5. Obergeschoss)	58 m	Ja	9°
6.2	Straßenbahnhaltestelle Moltkestraße	59 m	Ja	25°
6.3	Auf Höhe Richard-Wagner-Straße 39	31 m	Ja	42°
6.4	Auf Höhe Lützowstraße 39 (Straßenschlucht)	237 m	Ja	6°

Tabelle 3.7: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 6 in Köln.

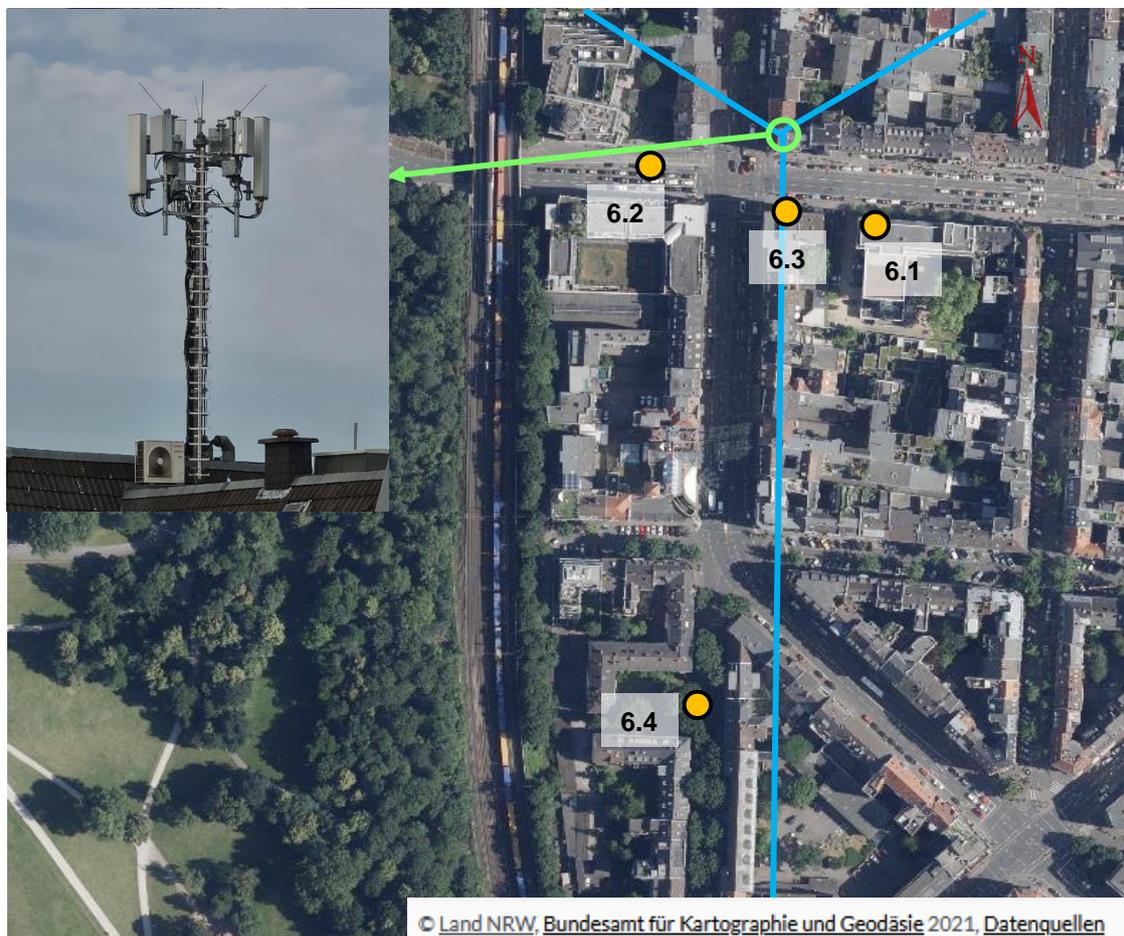


Abbildung 3.6: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 6. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.7 Anlage 7: Simmerath, Kranzbruchstraße 15

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
7.1	Oberstes Geschoss Anlagengebäude (Übungsturm Katastrophen- und Hilfeschutzzentrum)	Etwa 10 m	Nein	Nicht bestimmbar
7.2	Auf Höhe Arnikaweg 7	129 m	Nein (Vegetation)	13°
7.3	Heidestraße, Ecke Dohmenstraße	415 m	Nein (Vegetation)	7°
7.4	Bildungszentrum BGZ Simmerath	189 m	Ja	10°

Tabelle 3.8: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 7 in Simmerath.



Abbildung 3.7: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 7. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.8 Anlage 8: Bonn, Am Stingenberg

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
8.1	Meerhauser Straße 9 Balkon (Wiederholungsmesspunkt)	112 m	Ja (beide Anlagen)	15°
8.2	Vereinsheim Sportplatz Oberkassel	23 m	Nein (Vegetation)	32°
8.3	Auf Höhe Büchelstraße 73c	129 m	Nein (Vegetation)	11°
8.4	Auf Brücke in Flucht und auf Höhe mit 2. OG von „Am Stingenberg 30“	171 m	Ja (nördl. Anlage)	4°

Tabelle 3.9: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 8 in Bonn. Die Entfernung und der Vertikalwinkel zur Anlage wurde in Bezug zur 5G Massive-MIMO-Antenne bestimmt (nördliche der beiden Anlagen, siehe Abbildung 3.8).

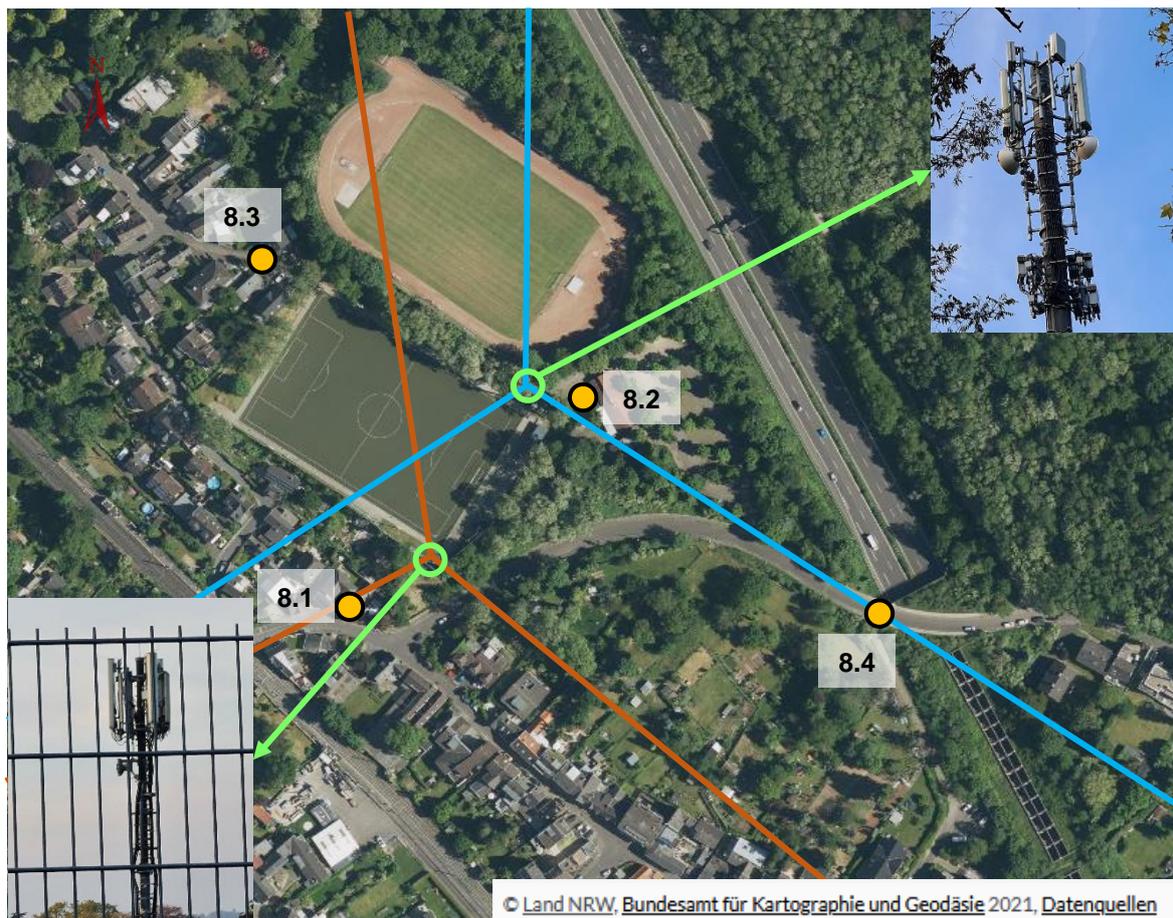


Abbildung 3.8: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 8. Die blauen Linien stellen die Hauptstrahlrichtungen der 5G Massive-MIMO-Antennen dar, die orangenen Linien die horizontale Antennenausrichtung der 5G DSS-Antennen, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.9 Anlage 9: Münster, Münzstraße 13

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
9.1	Auf Höhe Buddenstraße 10	57 m	Ja ¹	32°
9.2	Parkplatz der Observantenkirche (Zugang Rosenstraße)	133 m	Ja ¹	14°
9.3	Auf Höhe Breul 42	99 m	Ja ¹	18°
9.4	Auf Höhe Breul 23	316 m	Ja ¹	6°

Tabelle 3.10: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 9 in Münster.

¹ Die 5G-Antennen befinden sich im Dach des Buddenturms, dessen Dachpfannen für die Mobilfunksignale durchlässig sind. Es bestand daher keine direkte Sicht auf die Antennen, jedoch auf das Dach des Buddenturms.

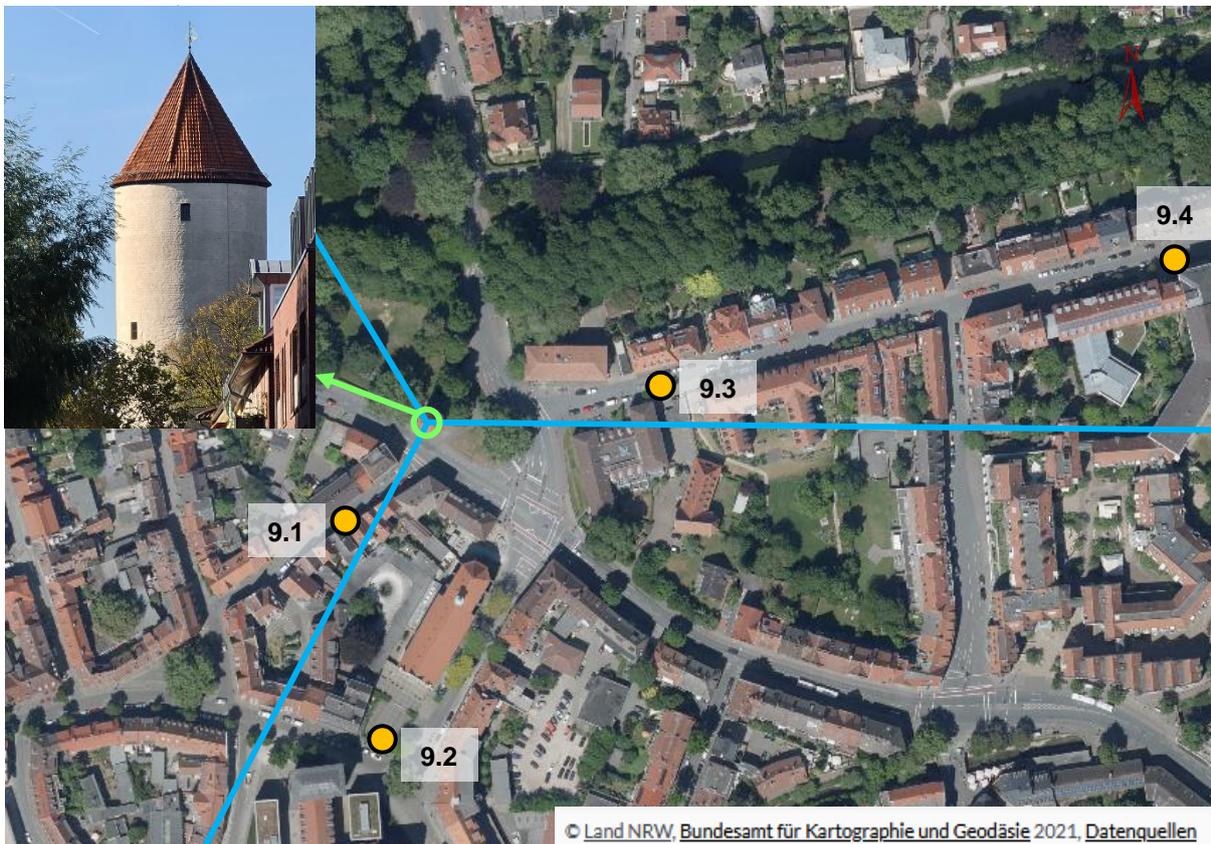


Abbildung 3.9: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 9. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.10 Anlage 10: Dortmund, Leierweg 65

Messpunkt	Adresse/Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung	Vertikalwinkel zur Anlage
10.1	Auf Höhe Tremoniabogen 5	120 m	Ja	9°
10.2	Leierweg, Ecke Tremoniabogen	85 m	Ja	13°
10.3	Leierweg 42, Balkon im obersten Geschoss	32 m	Ja	14°
10.4	Spielplatz Tremoniapark	268 m	Nein	5°

Tabelle 3.11: Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 10 in Dortmund.



Abbildung 3.10: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 10. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.2 Ergebnisse: Maximalimmissionen

In Tabelle 3.12 sind die im Umfeld der 10 untersuchten 5G-Standorte gemessenen und gemäß Kapitel 2.4 auf Maximalauslastung hochgerechneten Immissionen dargestellt. Die Immissionen vom am selben Standort installierten 4G/5G- (DSS), LTE- und GSM Mobilfunkanlagen werden den Immissionen durch die 5G-Anlage gegenübergestellt. Angegeben ist jeweils die Maximalimmission für die in der BNetzA-Standortbescheinigung angegebene Maximalleistung bei Vollaustattung der Basisstation, die auftritt, wenn alle Ressourcen der Basisstation genutzt werden und diese den maximal möglichen Datenverkehr mit größtmöglicher Sendeleistung aussendet. In der Praxis ist die Immission je nach momentaner Auslastung und Ausbau der Basisstationen geringer als die Maximalimmission (siehe Ergebnisse zur Momentanimmission in Teilkapitel 0). In der Tabelle sind die Immissionen als elektrische Feldstärkewerte in V/m sowie in Prozent des Feldstärke-Grenzwertes der 26. BImSchV dargestellt.

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
1: Übach-Palenberg	1.1	/	/	1,97	3,99	2,99	5,32	3,58	6,65
	1.2	/	/	1,63	3,14	2,75	6,67	3,20	7,37
	1.3	/	/	1,23	2,32	1,02	2,11	1,60	3,14
	1.4	/	/	0,63	1,38	0,57	1,29	0,85	1,89
2: Lippstadt	2.1	/	/	1,25	2,05	2,91	6,63	3,17	6,94
	2.2	/	/	0,93	1,53	3,06	7,62	3,20	7,78
	2.3	/	/	0,25	0,41	0,58	1,34	0,63	1,40
	2.4	/	/	0,90	1,47	1,68	3,75	1,90	4,03

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtimmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
3. Düsseldorf	3.1	6,68	10,95	1,75	2,92	3,40	7,16	7,70	13,40
	3.2	3,01	4,93	1,28	2,15	4,04	7,99	5,20	9,63
	3.3	4,24	6,95	2,21	3,73	7,80	16,99	9,15	18,73
	3.4	3,90	6,39	0,08	0,14	0,38	0,83	3,92	6,45
4: Essen	4.1	/	/	0,95	1,56	2,08	4,68	2,29	4,94
	4.2	/	/	1,73	2,84	3,93	9,13	4,29	9,56
	4.3	/	/	0,10	0,16	0,63	1,45	0,64	1,46
	4.4	/	/	0,80	1,32	3,28	7,79	3,38	7,90
5: Oberhausen	5.1	1,16	1,91	0,40	0,66	2,69	5,88	2,69	6,22
	5.2	4,15	6,81	0,78	1,29	2,84	6,26	5,09	9,34
	5.3	1,20	1,96	0,41	0,67	1,75	4,03	2,16	4,53
	5.4	1,00	1,64	0,20	0,33	0,72	1,50	1,25	2,24

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
6: Köln	6.1	14,31	23,45	2,02	3,32	2,49	5,18	14,65	24,23
	6.2	4,55	7,46	0,86	1,42	1,67	3,26	4,84	8,13
	6.3	5,27	8,64	1,32	2,17	4,30	8,94	6,82	12,45
	6.4	11,59	19,00	2,97	4,87	3,02	5,75	12,30	20,38
7: Simmerath	7.1	/	/	0,19	0,48	0,44	1,02	0,48	1,13
	7.2	/	/	0,93	2,42	0,84	1,87	1,25	3,06
	7.3	/	/	0,31	0,80	0,93	1,61	0,98	1,80
	7.4	/	/	1,77	4,60	1,34	3,25	2,22	5,64
8: Bonn	8.1	1,25	2,04	0,85	1,39	2,52	5,52	2,94	6,04
	8.2	3,70	6,07	1,21	1,98	3,92	8,18	5,53	10,38
	8.3	1,96	3,21	0,47	0,77	2,54	5,58	3,24	6,49
	8.4	13,58	22,26	0,21	0,34	6,62	12,66	15,11	25,61

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtimmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
9: Münster	9.1	2,50	4,10	/	/	0,93	1,98	2,67	4,55
	9.2	5,77	9,46	/	/	1,56	3,32	5,98	10,03
	9.3	2,16	3,55	/	/	2,49	5,21	3,30	6,30
	9.4	4,41	7,23	/	/	1,18	2,40	4,56	7,62
10: Dortmund	10.1	4,38	7,18	/	/	1,73	3,61	4,71	8,04
	10.2	5,29	8,67	/	/	1,81	4,07	5,59	9,58
	10.3	28,66	46,99	/	/	10,25	22,77	30,44	52,22
	10.4	0,28	0,46	/	/	0,19	0,39	0,34	0,60

Tabelle 3.12: Maximalimmissionen jeweils von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM sowie die maximale Gesamtimmission für alle untersuchten Anlagen.

3.3 Ergebnisse: Momentanimmisionen

Neben der Erfassung der Maximalimmission wurde ebenfalls die zum Messzeitpunkt vorherrschende aktuelle Immission (Momentanimmision) des Mobilfunk-Downlinks wie in Teilkapitel 2.2 dargestellt gemessen. In Tabelle 3.13 sind die Immissionswerte pro Standort angegeben. Die Immissionen von 5G- (MB36), 4G/5G- (DSS) sowie von LTE- und GSM-Mobilfunkanlagen sind jeweils einzeln sowie als Gesamtimmision dargestellt.

Angegeben sind jeweils die Immissionen als elektrische Feldstärkewerte in V/m sowie in Prozent des Feldstärkegrenzwertes.

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtimmision Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
1: Übach-Palenberg	1.1	/	/	0,22	0,48	0,70	1,30	0,74	1,39
	1.2	/	/	0,20	0,38	0,62	1,54	0,65	1,59
	1.3	/	/	0,09	0,18	0,21	0,47	0,23	0,51
	1.4	/	/	0,07	0,17	0,14	0,32	0,15	0,36
2: Lippstadt	2.1	/	/	0,11	0,18	1,06	2,43	1,06	2,44
	2.2	/	/	0,11	0,19	1,15	2,84	1,15	2,84
	2.3	/	/	0,02	0,04	0,22	0,54	0,22	0,54
	2.4	/	/	0,08	0,13	0,67	1,49	0,68	1,49

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtimmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
3. Düsseldorf	3.1	0,24	0,40	0,21	0,36	0,78	1,78	0,85	1,86
	3.2	0,11	0,18	0,23	0,38	0,78	1,63	0,82	1,68
	3.3	0,22	0,36	0,57	0,95	1,66	3,60	1,77	3,74
	3.4	0,03	0,05	0,02	0,04	0,09	0,20	0,10	0,21
4: Essen	4.1	/	/	0,08	0,13	0,52	1,19	0,52	1,20
	4.2	/	/	0,15	0,24	0,94	2,26	0,95	2,27
	4.3	/	/	0,01	0,02	0,18	0,43	0,19	0,43
	4.4	/	/	0,10	0,16	0,84	2,02	0,85	2,03
5: Oberhausen	5.1	0,10	0,16	0,08	0,12	0,97	1,94	0,98	1,95
	5.2	0,10	0,17	0,12	0,19	0,67	1,43	0,69	1,45
	5.3	0,05	0,09	0,05	0,08	0,57	1,21	0,57	1,22
	5.4	0,04	0,06	0,04	0,06	0,24	0,48	0,25	0,49

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
6: Köln	6.1	0,24	0,40	0,17	0,28	0,62	1,26	0,69	1,36
	6.2	0,10	0,17	0,17	0,27	0,62	1,14	0,65	1,18
	6.3	0,14	0,23	0,19	0,32	1,28	2,42	1,30	2,45
	6.4	0,30	0,49	0,26	0,42	0,72	1,33	0,82	1,48
7: Simmerath	7.1	/	/	0,03	0,08	0,14	0,33	0,14	0,34
	7.2	/	/	0,12	0,32	0,11	0,26	0,17	0,41
	7.3	/	/	0,06	0,14	0,22	0,37	0,22	0,40
	7.4	/	/	0,22	0,57	0,23	0,56	0,32	0,80
8: Bonn	8.1	0,03	0,04	0,08	0,13	0,52	1,16	0,52	1,17
	8.2	0,11	0,18	0,14	0,24	0,94	2,10	0,96	2,12
	8.3	0,08	0,14	0,06	0,10	0,60	1,45	0,61	1,46
	8.4	0,09	0,15	0,03	0,05	1,26	2,39	1,27	2,40

Standort	Messpunkt	Immission durch 5G (MB36)		Immission durch 4G/5G (DSS)		Immission durch LTE und GSM		Gesamtimmission Mobilfunk	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
9: Münster	9.1	0,08	0,13	/	/	0,46	0,89	0,47	0,90
	9.2	0,06	0,10	/	/	0,57	1,22	0,57	1,23
	9.3	0,08	0,14	/	/	0,69	1,48	0,70	1,48
	9.4	0,08	0,14	/	/	0,29	0,58	0,30	0,59
10: Dortmund	10.1	0,07	0,11	/	/	0,52	1,18	0,53	1,18
	10.2	0,04	0,07	/	/	0,62	1,44	0,62	1,44
	10.3	0,19	0,32	/	/	2,93	6,26	2,94	6,27
	10.4	0,03	0,05	/	/	0,07	0,15	0,08	0,16

Tabelle 3.13: Jeweils zur Messzeit vorherrschende Momentanimmersionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM sowie die momentane Gesamtimmission für alle untersuchten Anlagen.

3.4 Ergebnisse: Typische Immission und Vergleich mit momentaner sowie maximaler Immission bei 5G im 3,6-GHz-Band (MB36)

Zusätzlich zur Maximalimmission sowie der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Momentanimmission wurde an 5G-Basisstationen im 3,6-GHz-Band (MB36, sechs der zehn untersuchten Anlagen) zusätzlich die Momentanimmission während eines typischen Nutzungsszenarios (Livestream des Fernsehprogramms der ARD [ARD]) bestimmt. In Tabelle 3.14 sind die entsprechenden Immissionswerte vergleichend gegenübergestellt.

Standort	Messpunkt	Momentanimmission durch 5G (MB36)		Typische Immission durch 5G (MB36)		Maximalimmission durch 5G (MB36)	
		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
		in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
3: Düsseldorf	3.1	0,24	0,40	0,47	0,77	6,68	10,95
	3.2	0,11	0,18	0,10	0,17	3,01	4,93
	3.3	0,22	0,36	0,11	0,19	4,24	6,95
	3.4	0,03	0,05	0,03	0,05	3,90	6,39
5: Oberhausen	5.1	0,10	0,16	0,04	0,07	1,16	1,91
	5.2	0,10	0,17	0,09	0,14	4,15	6,81
	5.3	0,05	0,09	0,04	0,07	1,20	1,96
	5.4	0,04	0,06	0,17	0,27	1,00	1,64
6: Köln	6.1	0,24	0,40	0,31	0,51	14,31	23,45
	6.2	0,10	0,17	0,14	0,23	4,55	7,46
	6.3	0,14	0,23	0,19	0,30	5,27	8,64
	6.4	0,30	0,49	0,20	0,34	11,59	19,00
8: Bonn	8.1	0,03	0,04	0,09	0,14	1,25	2,04
	8.2	0,11	0,18	0,16	0,26	3,70	6,07
	8.3	0,08	0,14	0,14	0,23	1,96	3,21
	8.4	0,09	0,15	0,34	0,55	13,58	22,26

9: Münster	9.1	0,08	0,13	0,10	0,16	2,50	4,10
	9.2	0,06	0,10	0,63	1,04	5,77	9,46
	9.3	0,08	0,14	0,19	0,31	2,16	3,55
	9.4	0,08	0,14	0,18	0,29	4,41	7,23
10: Dortmund	10.1	0,07	0,11	0,17	0,28	4,38	7,18
	10.2	0,04	0,07	0,21	0,35	5,29	8,67
	10.3	0,19	0,32	1,15	1,88	28,66	46,99
	10.4	0,03	0,05	0,03	0,05	0,28	0,46

Tabelle 3.14: Momentane, typische sowie maximale Immissionen durch 5G (MB36) an den sechs untersuchten Anlagen.

In Tabelle 3.15 erfolgt ein Überblick über die größten bzw. kleinsten gemessenen 5G-Immissionswerte im 3,6-GHz-Band sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten jeweils für die momentane, die typische und die maximale Immission. An sechs der 24 Messpunkte bestand keine bzw. nur eine stark eingeschränkte Sichtverbindung zur 5G-Antenne.

Kenngroße	Immissionswerte		
	Momentan	Typisch	Maximal
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,5	1,9	47,0
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04	0,05	0,5
Spannweite über alle MP [dB]	21,8	31,5	40,2
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,5	1,9	47,0
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04	0,07	1,9
Spannweite bei Sicht [dB]	21,8	28,6	27,8
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,2	0,3	6,4
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,05	0,05	0,5
Spannweite ohne Sicht [dB]	11,1	14,7	22,9

Tabelle 3.15: Extremwerte und Spannweiten der gemessenen 5G-Immissionen im 3,6-GHz-Band

Die höchste festgestellte 5G-Momentanimmission beträgt 0,5 % vom Feldstärkegrenzwert, die geringste 0,04 %. Die Spannweite der Immission beträgt knapp 22 dB (ca. Faktor 100 bezüglich der Leistung). Hinsichtlich der Klassifizierung in Messpunkte mit und ohne Sicht ist die Spannweite bei Messpunkten mit Sicht zur Antenne deutlich höher (ca. 22 dB) als bei Messpunkten ohne Sicht zur Antenne (ca. 11 dB) bedingt durch das geringere Maximum.

Die höchste festgestellte typische 5G-Immission beträgt 1,9 % vom Feldstärkegrenzwert und wurde an einem hinsichtlich Entfernung und Vertikalwinkel zur 5G-Antenne besonders stark exponierten Messpunkt aufgenommen. Die geringste typische Immission beträgt 0,05 % vom Feldstärkegrenzwert. Die Spannweite der Immission ist 10 dB größer als bei der Momentanimmission und liegt bei mehr als 30 dB (Faktor 1.000 bezüglich der Leistung). Dies liegt unter anderem daran, dass sich an einigen Messpunkten die Immission unterhalb des Rauschpegels des Messgeräts befunden hat und damit die Spannweite nach unten begrenzt ist. Bei den Messpunkten ohne Sicht zur 5G-Antenne ist die Spannweite bedingt durch das geringere Maximum mit knapp 15 dB (etwa Faktor 30 bezüglich der Leistung) signifikant kleiner.

Die höchste festgestellte 5G-Maximalimmission beträgt rund 47 % vom Feldstärkegrenzwert und wurde am selben Messpunkt wie das Maximum der typischen Immission aufgenommen. Die geringste Maximalimmission beträgt 0,5 % vom Feldstärkegrenzwert. Die Spannweite der Immission ist sehr groß, sie beträgt über alle Messpunkte mehr als 40 dB (Faktor 10.000 bezüglich der Leistung) und ist damit deutlich höher als die Spannweite bei der Momentanimmission. Interessanterweise unterscheiden sich die Spannweiten zwischen Messpunkten mit Sicht (27,8 dB) und ohne Sicht (22,9 dB) nicht sehr stark, dafür fallen Maximal- und Minimalwert bei Messpunkten ohne Sicht deutlich geringer aus als bei Messpunkten mit Sicht zur 5G-Antenne.

Die statistischen Mittelwerte für die momentane, typische sowie maximale Immission sind in Tabelle 3.16 aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde hierbei als leistungsbezogener Mittelwert errechnet.

Statistischer Mittelwert	Immissionswerte		
	Momentan	Typisch	Maximal
Durchschnittliche 5G-Immission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,22	0,53	13,52
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,15	0,27	6,88

Tabelle 3.16: Mittelwerte (Durchschnitt und Median) über alle Messpunkte jeweils für momentane, typische und maximale 5G-Immission im 3,6-GHz-Band.

In Abbildung 3.11 sind die Werte für momentane, typische sowie maximale Immission durch 5G im 3,6-GHz-Band nochmals in Form eines Balkendiagramms als Feldstärkegrenzwertauschöpfungen in Prozent linear sowie zur Erhöhung der Übersichtlichkeit in Abbildung 3.12 auch logarithmisch skaliert dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die typische Immission durch 5G im 3,6-GHz-Band deutlich näher an der Momentanimmission liegt, die, aufgrund der praktisch nicht vorhandenen Zellauslastungen während der Messungen, in guter Näherung der Minimalimmission im Leerlauf der Anlagen entspricht.

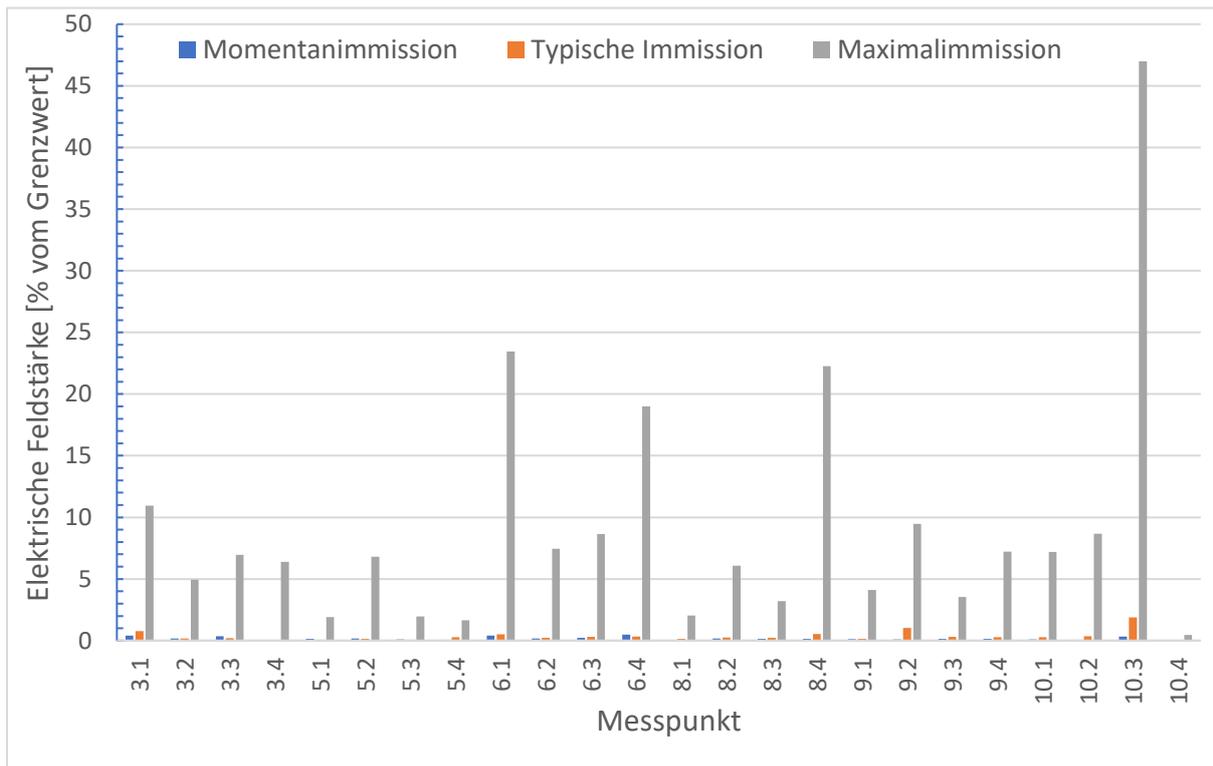


Abbildung 3.11: Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in linearer Skalierung.

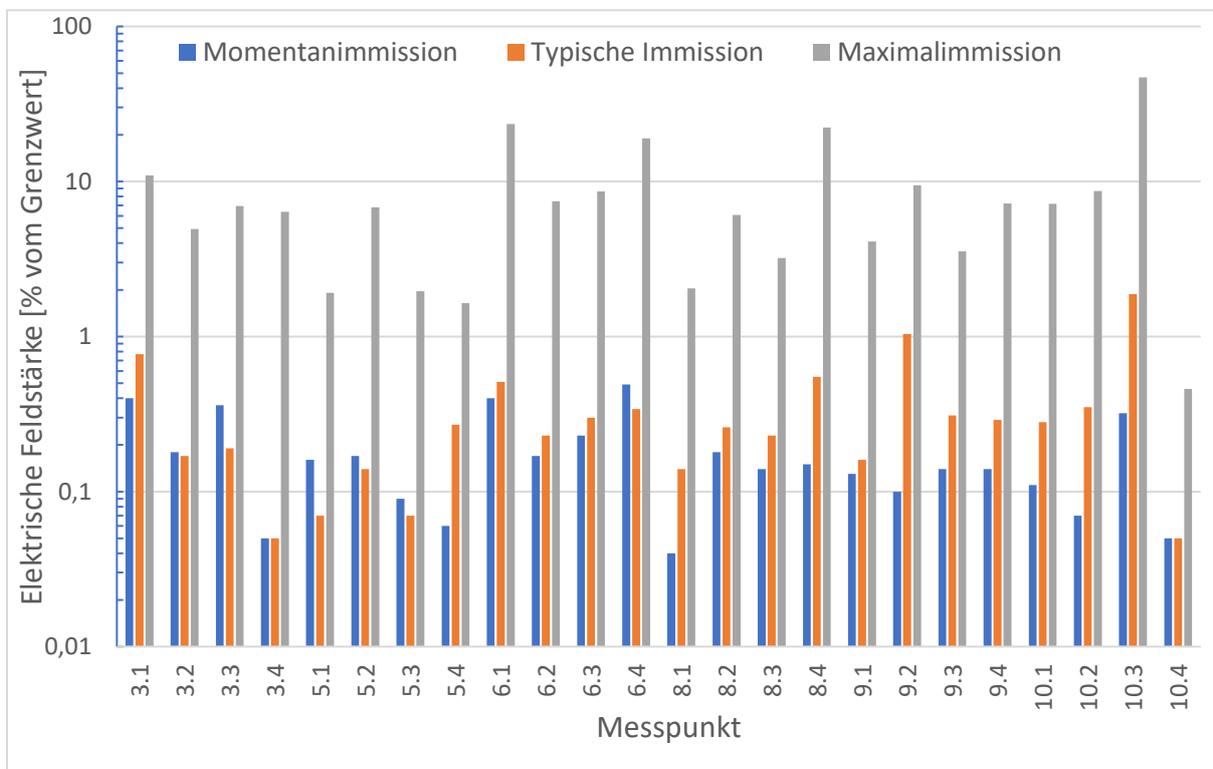


Abbildung 3.12: Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in logarithmischer Skalierung

Abschließend ist in Abbildung 3.13 die Verteilung der momentanen, typischen sowie maximalen Immissionen in Grenzwertausschöpfungsklassen dargestellt. Bei Betrachtung der momentanen sowie der typischen Immission, ergibt sich eine Verteilung, bei der sehr kleine Messwerte in der Größenordnung der Nachweisgrenze des Messgerätes stark dominieren. Bei der Maximalimmission ergibt sich eine deutlich gleichmäßigere Verteilung.

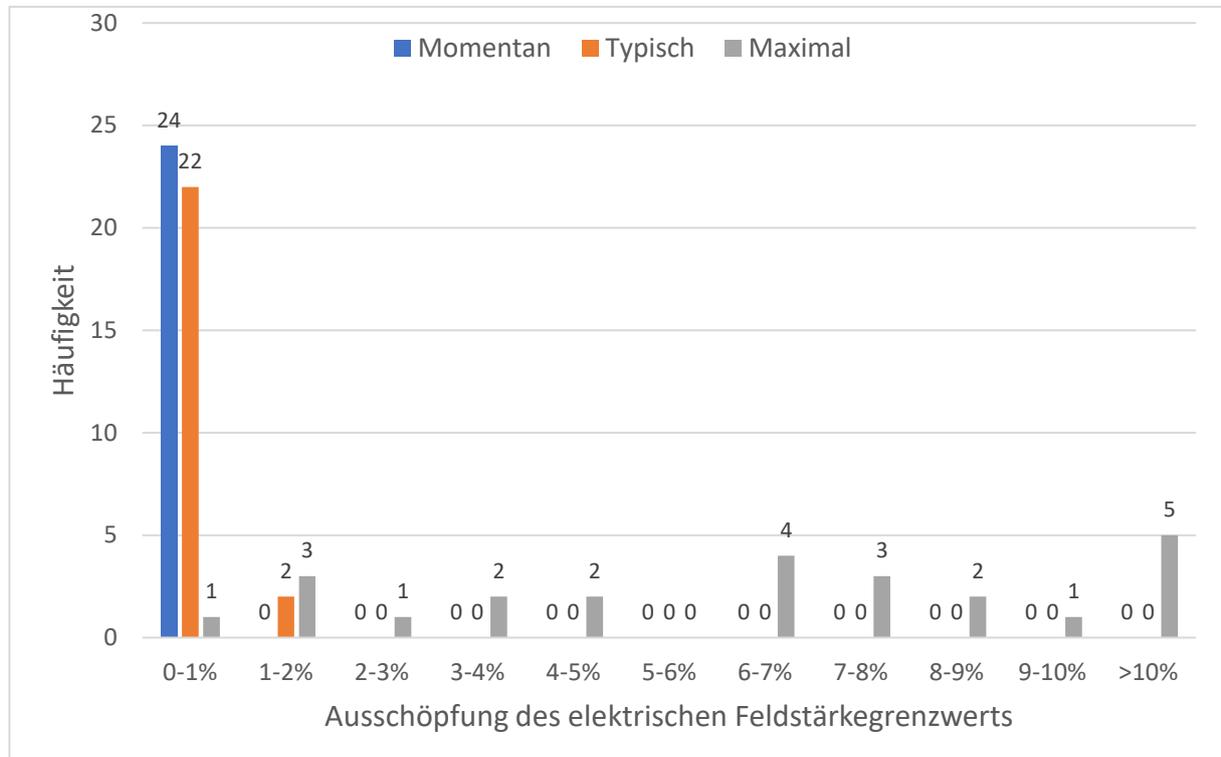


Abbildung 3.13: Verteilung der momentanen, typischen und maximalen 5G-Immission im 3,6-GHz-Band.

Aufgrund der derzeit geringen Zellauslastungen im 3,6-GHz-Band, kann angenommen werden, dass die Momentanimmissionen den Minimalimmissionen der Anlagen entsprechen. Das zeigt, dass eine 5G-Basisstation ohne Auslastung nur äußerst geringe Immissionen hervorruft. Zwischen den Medianwerten der gemessenen Momentanimmission und der Maximalimmission liegen 31,6 dB (mehr als Faktor 1.450 bezüglich der Leistung). Im Vergleich zu anderen Mobilfunksystemen ist der Immissionsanteil der Signalisierung bei 5G deutlich niedriger. Während der Anteil bei 5G im 3,6-GHz-Band bei weniger als 0,07 % liegt, beträgt der Anteil bei z.B. LTE 10 % bis 25 % [KBS+ 17].

3.5 Vergleich der Immissionen von 5G, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM

In den nachfolgenden Tabellen sind die Minima, Maxima und Spannbreiten sowie die Median- bzw. Durchschnittswerte der Immissionen durch 5G im 3,6-GHz-Band (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM dargestellt. Tabelle 3.17 bezieht sich auf die Maximalimmission, Tabelle 3.18 bezieht sich auf die Momentanimmission.

Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	5G (MB36)	4G/5G (DSS)	LTE/GSM	Mobilfunk gesamt
Maximalwert	46,99	4,87	22,77	52,22
Minimalwert	0,46	0,14	0,39	0,60
Spannbreite [dB]	40,2	30,8	35,3	38,8
Durchschnittswert	13,52	2,24	6,90	12,70
Medianwert	6,88	1,50	4,93	6,80

Tabelle 3.17: Statistische Auswertung der Maximalimmissionen durch 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM.

Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	5G (MB36)	4G/5G (DSS)	LTE/GSM	Mobilfunk gesamt
Maximalwert	0,49	0,95	6,26	6,27
Minimalwert	0,04	0,02	0,15	0,16
Spannbreite [dB]	21,8	33,5	32,4	31,9
Durchschnittswert	0,22	0,30	2,02	2,05
Medianwert	0,15	0,18	1,28	1,38

Tabelle 3.18: Statistische Auswertung der Momentanimmissionen durch 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM.

Bei der Maximalimmission liegt die Spannweite von 4G/5G (DSS) und LTE/GSM im Vergleich zu 5G im 3,6-GHz-Band etwas niedriger, was primär durch den Maximalwert bei 5G bedingt ist. Der Median der festgestellten Immissionen liegt bei 4G/5G (DSS) mit 1,5 % vom Feldstärkegrenzwert am niedrigsten, 5G im 3,6-GHz-Band und LTE/GSM liegen auf einem ähnlichen Niveau. Beim leistungsbezogenen Mittelwert aller Maximalimmissionen liegt 5G im 3,6-GHz-Band bei 13,5 % vom Feldstärkegrenzwert gefolgt von LTE/GSM mit 6,9 % und 4G/5G (DSS) mit 2,3 %.

Bei der Momentanimmission zeigt sich das gegensätzliche Bild: Die Spannweite von 5G im 3,6-GHz-Band liegt im Vergleich zu 4G/5G (DSS) und LTE/GSM deutlich niedriger. Dies ist primär durch die derzeit niedrige Netzauslastung im 3,6-GHz-Band gegeben, wodurch sich die Anlagen größtenteils im Leerlauf befinden und die Momentanimmission sehr nahe an der Minimalimmission liegt. So sind auch Median und Durchschnittswert über alle Messpunkte bei 5G im 3,6-GHz-Band geringer als bei 4G/5G (DSS) und LTE/GSM.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Verteilungen der Feldstärkegrenzwertausschöpfungen von 5G im 3,6-GHz-Band, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM dargestellt. Abbildung 3.14 bezieht sich auf die Maximalimmission und Abbildung 3.15 auf die Momentanimmission.

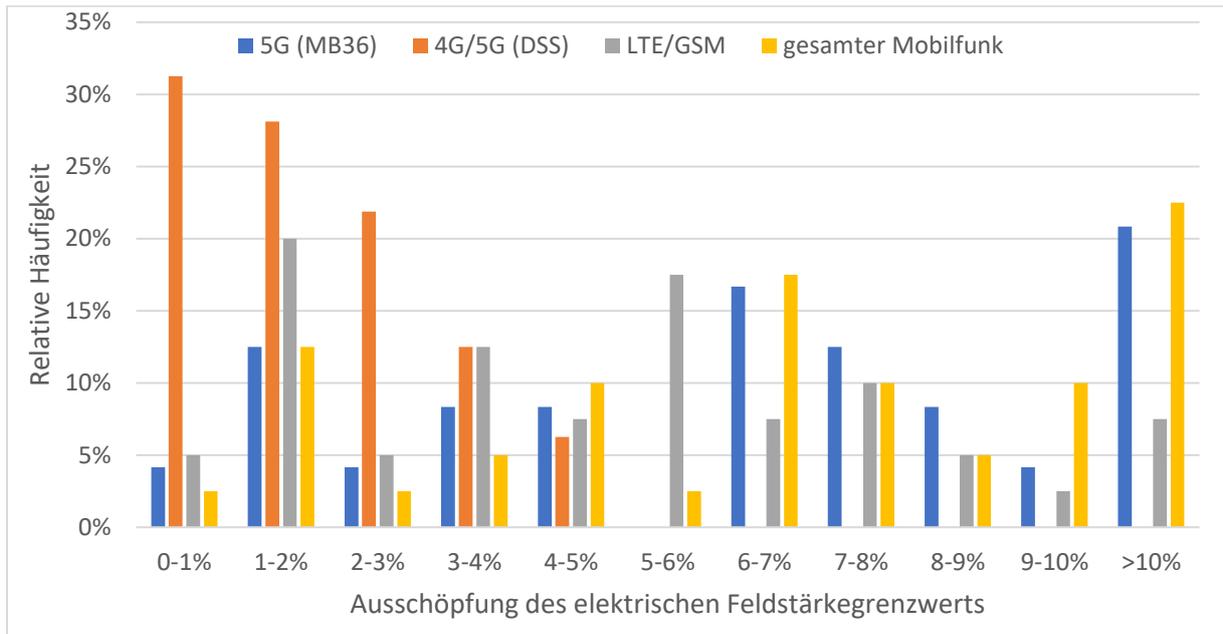


Abbildung 3.14: Verteilung der Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

Bei der Maximalimmission zeigt sich hinsichtlich der Grenzwertausschöpfungsklassen bei 5G im 3,6-GHz-Band und LTE/GSM eine ähnliche Verteilung. Bei 4G/5G (DSS) dominieren hingegen niedrigere Grenzwertausschöpfungen. Grenzwertausschöpfungen über 5 % wurden nicht erfasst.

Hinsichtlich der Momentanimmission liegen bei 5G im 3,6-GHz-Band und bei 4G/5G (DSS) alle festgestellten Immissionen unterhalb von 1 % Feldstärkegrenzwertausschöpfung. Bei LTE/GSM liegt knapp die Hälfte der festgestellten Momentanimmissionen in einem Bereich zwischen 1 % und 2 % Grenzwertausschöpfung.

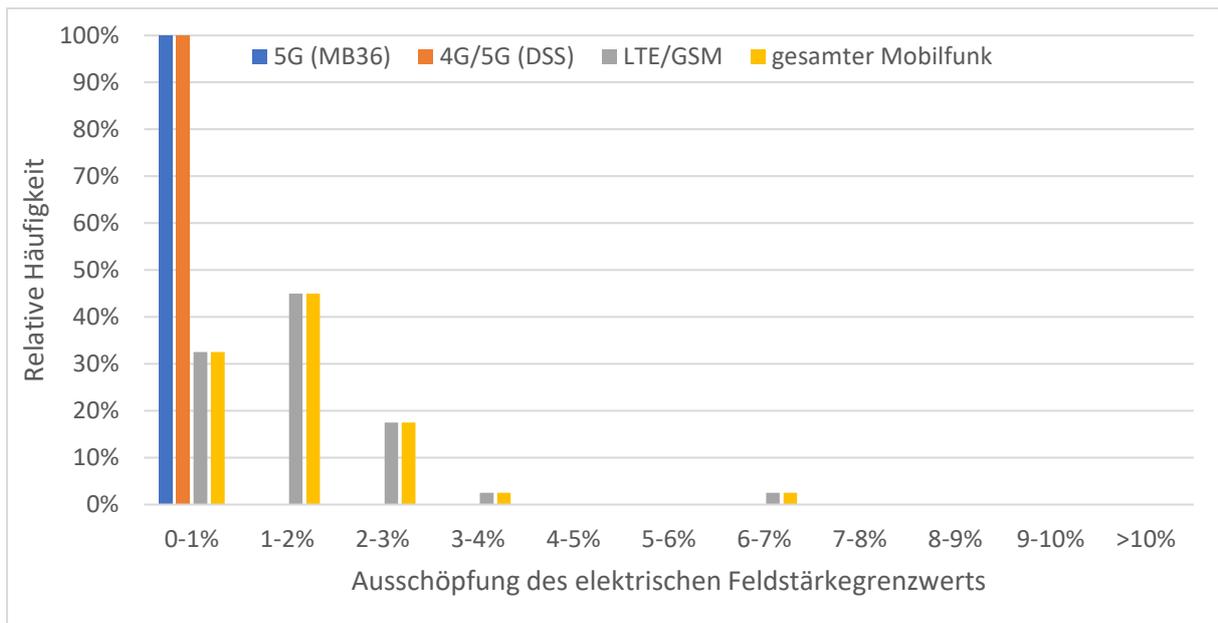


Abbildung 3.15: Verteilung der Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

Abschließend ist in den nachfolgenden Abbildungen eine Übersicht über alle festgestellten Immissionswerte für 5G im 3,6-GHz-Band, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM dargestellt. Abbildung 3.16 bezieht sich auf die Maximalimmission, Abbildung 3.17 auf die Momentanimmission.

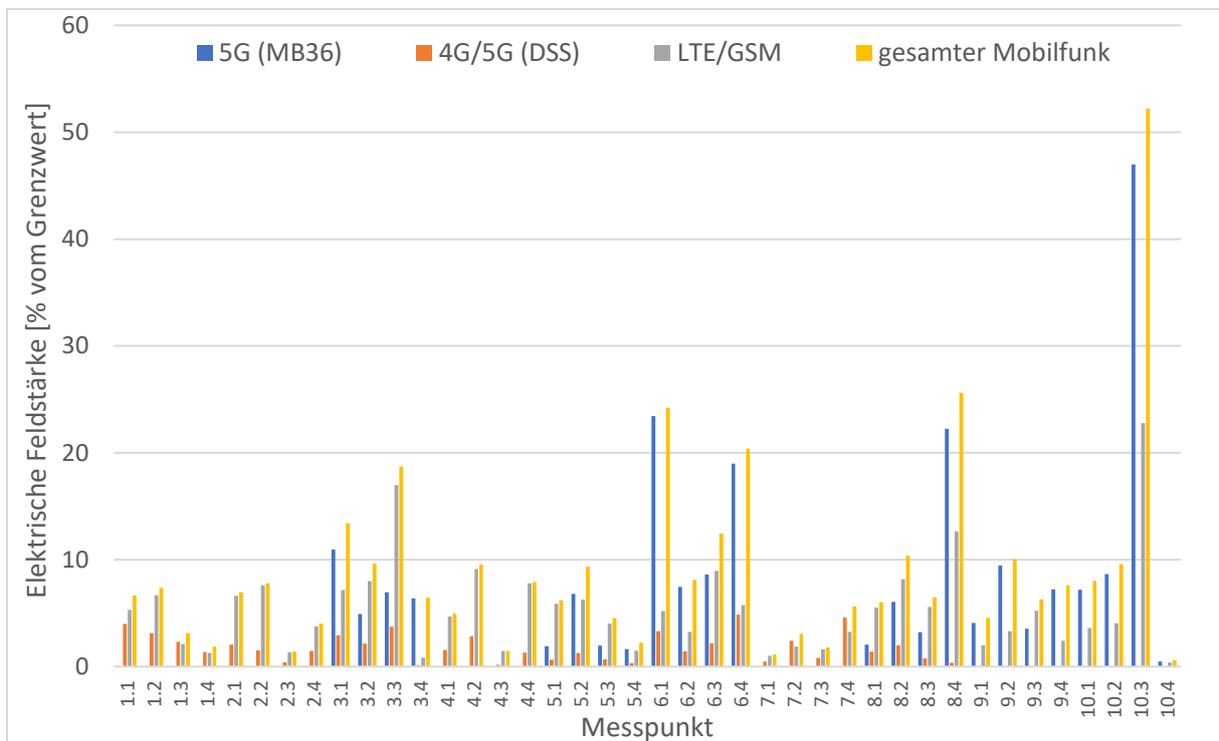


Abbildung 3.16: Übersicht über die Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

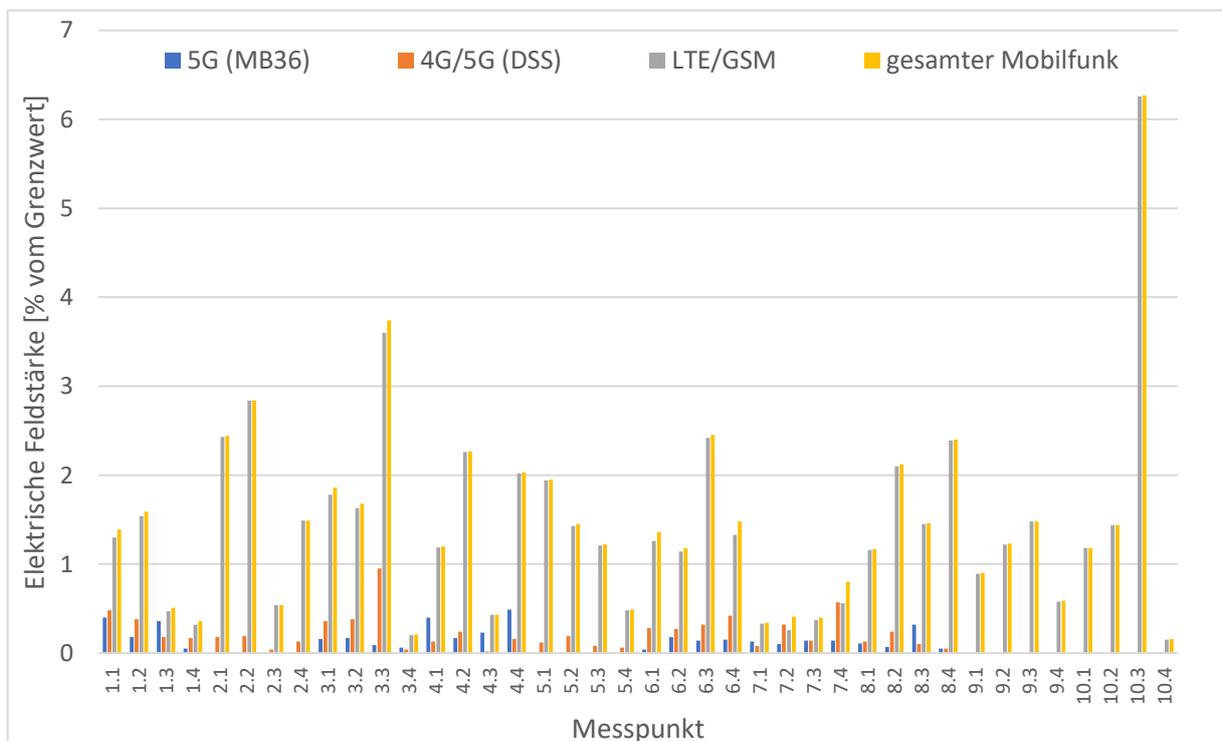


Abbildung 3.17: Übersicht über die Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

3.6 Immissionsänderung an früher untersuchten Messpunkten

Im Jahr 2004 wurde unter dem Titel „Elektromagnetische Felder in NRW – Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen“ Feldmessungen im Umfeld von GSM- und UMTS-Mobilfunkbasisstationen für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt [BOR 05]. An zwei der Messpunkte (Messpunkt 5.1 sowie Messpunkt 8.1) wurden auch in der vorliegenden Untersuchung Immissionsmessungen durchgeführt. In nachfolgender Tabelle sind die jeweils festgestellten Maximalimmissionen in Form der prozentualen Feldstärkegrenzwertausschöpfung angegeben.

Messpunkt	Jahr	Maximalimmission als Feldstärkegrenzwertausschöpfung			
		LTE/UMTS/GSM	4G/5G (DSS)	5G (MB36)	Gesamt
5.1 (2021) OB 1.1 (2005)	2021	5,88 %	0,66 %	1,91 %	6,22 %
	2005	3,13 %	-	-	3,13 %
8.1 (2021) BN 1.1 (2005)	2021	5,52 %	1,39 %	2,04 %	6,04 %
	2005	1,28 %	-	-	1,28 %

Tabelle 3.19: Vergleichende Gegenüberstellung der Maximalimmissionen an zwei Wiederholungsmesspunkten der vorliegenden Feldmessung (2021) und der Feldmessung zum UMTS-Ausbau (2005).

Die Gesamtimmissionen haben zwar um den Faktor 6 dB (Messpunkt 5.1) bzw. 13,5 dB (Messpunkt 8.1) zugenommen, der Anteil von 5G fällt dabei aber vergleichsweise gering aus. Der Zuwachs ist vornehmlich durch LTE bedingt (die derzeitigen DSS-Immissionen sind auch primär LTE zuzuordnen), auch durch die Abschaltung des UMTS-Netzes an beiden Anlagen.

Es wird darauf hingewiesen, dass eine Vergleichbarkeit der Messungen aus folgenden Gründen nur sehr eingeschränkt möglich ist:

- An Messpunkt 5.1 der vorliegenden Untersuchung hat sich die bauliche Situation am Messort gegenüber der Situation am Messpunkt OB 1.1 der Untersuchung aus 2005 signifikant geändert. Auf dem Schulhof in unmittelbarer Nähe zum Ort des ursprünglichen Messpunktes stehen aktuell mobile Klassenräume (Container), die einerseits die Sicht zur Anlage versperren und andererseits einen nennenswerten Einfluss auf die Feldsituation vor Ort haben dürften. Zur Minimierung des Einflusses der Stahlcontainer wurde der Messpunkt um wenige Meter versetzt.
- An Messpunkt 8.1 der vorliegenden Untersuchung hat sich die Mobilfunksituation am Messort gegenüber der Situation am Messpunkt BN 1.1 der Untersuchung aus 2005 grundlegend geändert. Zwar konnte die Messung am selben Messpunkt durchgeführt werden, doch der ursprünglich in der Nähe des Messpunktes befindliche Mobilfunkmast wurde durch einen weiter vom Messpunkt entfernten Mast ergänzt. Die auf dem älteren Mast betriebenen Mobilfunkdienste sind teilweise auf den neuen Mast umgezogen.

3.7 Horizontaler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage

Im nachfolgenden Abschnitt wird das Abstandsverhalten der gemessenen Immissionen näher beleuchtet. Hierzu sind in folgender Abbildung die Maximalimmissionen von 5G im 3,6-GHz-Band, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM aller Messpunkte *auf Bodenniveau sowie mit Sicht zur entsprechenden Sendeanlage* in Abhängigkeit ihres horizontalen Abstandes dargestellt.

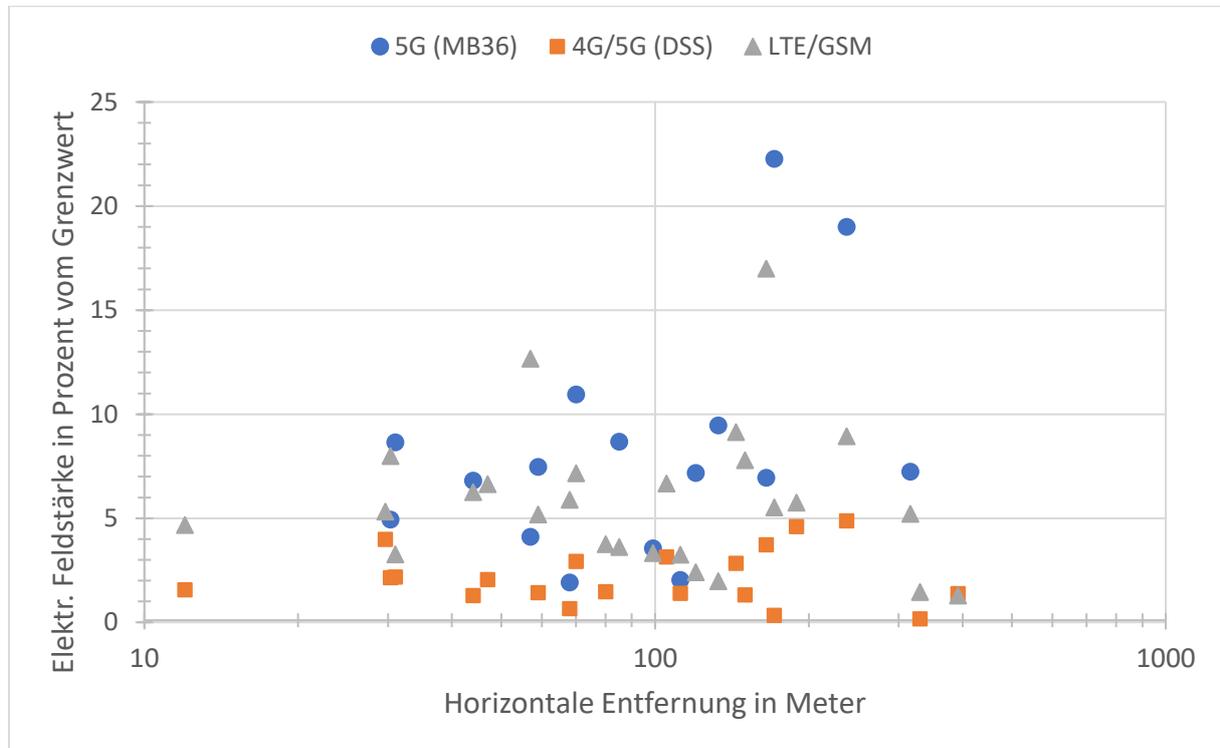


Abbildung 3.18: Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Abstandes zwischen Messpunkt und Sendeanlage.

Die Abbildung zeigt, dass der Abstand zur Sendeanlage kein geeignetes Kriterium zur Beurteilung der jeweiligen Immissionshöhe darstellt. Weder bei 5G im 3,6-GHz-Band, noch bei 4G/5G (DSS) oder LTE/GSM lässt sich ein klarer Trend feststellen. Bestätigt werden hier die Erkenntnisse aus Teilkapitel 0, wonach die Immissionen durch 5G und LTE/GSM größtenteils auf einem ähnlichen Niveau liegen, während die Immissionen durch 4G/5G (DSS) deutlich niedriger ausfallen. Es gibt zwei Ausreißer bei 5G im 3,6-GHz-Band. Hierbei handelt es sich um die Messpunkte 6.4 (Köln) und 8.4 (Bonn). Messpunkt 6.4 lag in einer Straßenschlucht und wies trotz der engen Bebauung und verhältnismäßig großen Entfernung Sicht zur Anlage auf. Messpunkt 8.4 lag zwar auf Bodenniveau, wies aufgrund der dortigen Topographie aber einen kleineren Vertikalwinkel zur Anlage auf.

3.8 Vertikalwinkel zwischen Messpunkt und Sendeanlage

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Einfluss des Vertikalwinkels auf die gemessenen Immissionen näher beleuchtet. Hierzu sind in Abbildung 3.19 die Maximalimmissionen von 5G im 3,6-GHz-Band, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM aller Messpunkte *auf Bodenniveau sowie mit Sicht zur entsprechenden Sendeanlage* in Abhängigkeit ihres Vertikalwinkels dargestellt.

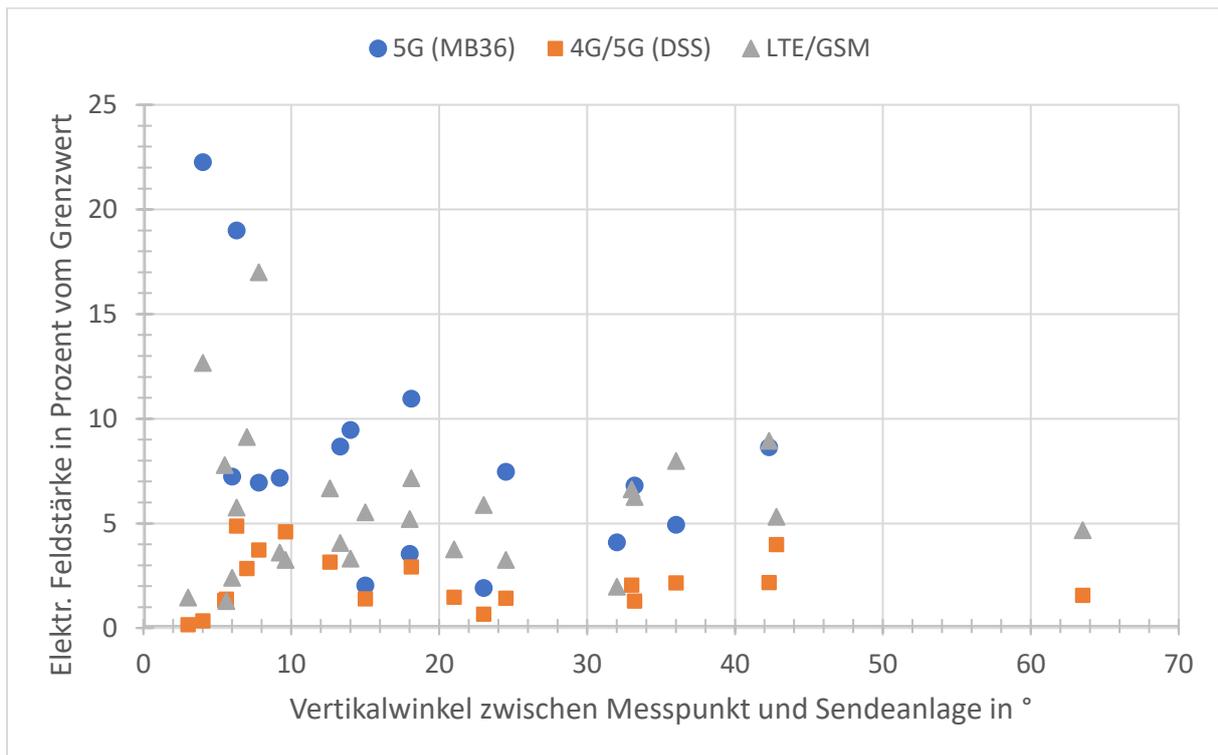


Abbildung 3.19: Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Vertikalwinkels zwischen Messpunkt und Sendeanlage.

Generell treten die höchsten Immissionen bei kleineren Vertikalwinkeln, d.h. in größeren Abständen von der Sendeanlage auf. Bei allen Mobilfunkdiensten fällt auf, dass zumindest teilweise ein Zusammenhang zwischen der Immissionshöhe und dem Vertikalwinkel vorliegt. Während die Immissionshöhe für Winkel größer als etwa 15° (bei einer Antennenhöhe von 25 m entspricht dies einem Abstand von 93 m) keinen eindeutigen Trend nach oben oder nach unten zeigt, steigt die Immission für Winkel kleiner als etwa 15° mit sinkendem Vertikalwinkel, d.h. mit steigendem Abstand zur Sendeanlage, an. Dieser Effekt zeigt sich besonders bei 5G im 3,6-GHz-Band: Während die Immissionen für größere Vertikalwinkel vergleichbar mit denen von LTE/GSM sind, steigen sie für kleinere Vertikalwinkel etwas stärker an. Als Ursache hierfür sind die im 3,6-GHz-Band verwendeten Beamforming-Antennen festzumachen. Während bei passiven Antennen (LTE/GSM und 4G/5G (DSS)) die Hauptstrahlrichtung in der vertikalen Ebene fest ist und die höchsten Immissionen in der Regel im Bereich der ersten Nebenkeule auftreten, sind Beamforming-Antennen in der Lage die Hauptstrahlrichtung auch in der Vertikalebene an die Position des Nutzers in der Zelle anzupassen. Denn durch einen hohen Signalpegel am Zellrand, d.h. bei niedrigen Vertikalwinkeln, werden auch dort hohe Datenraten ermöglicht. Dadurch treten im Vergleich zu passiven Antennen aber höhere Immissionen bei niedrigeren Vertikalwinkeln auf. Gleichzeitig sind die Immissionen für größere Vertikalwinkel aber vergleichbar mit den Immissionen durch die passiven Basisstationsantennen, da der vertikale Schwenkbereich von Beamforming-Antennen nach unten begrenzt ist und für große Vertikalwinkel die Versorgung ohnehin über Nebenkeulen und/oder Reflexionen der Hauptstrahlrichtung erfolgt.

3.9 Zusammenfassung und Fazit

In vorliegender Messkampagne an 5G-Basisstationen wurden an insgesamt 40 Messpunkten in der Umgebung von zehn 5G-Basisstationen Immissionsmessungen durchgeführt. Dabei wurden Basisstationen ausgewählt, an denen 5G sowohl über DSS (in Koexistenz mit 4G) als auch im 3,6-GHz-Band betrieben wird. An jedem Messpunkt wurde sowohl die zum Messzeitpunkt vorherrschende Momentanimmision als auch die maximal mögliche Immission durch 5G und durch weitere am Standort installierte Mobilfunkanlagen (LTE/GSM) bestimmt. Bei 5G-Anlagen im 3,6-GHz-Band wurde zusätzlich die Momentanimmision bei typischer Nutzung (TV-Livestream), im Folgenden als „typische Immission“ bezeichnet, bestimmt.

Die höchste festgestellte Maximalimmision bei 5G im 3,6-GHz-Band liegt an Messpunkt 10.3 vor und beträgt 47,0 % des Feldstärkegrenzwertes der 26. BImSchV. Am selben Messpunkt, der hinsichtlich seiner Lage in Relation zur Basisstation besonders exponiert ist, treten auch die höchsten Maximalimmisionen bei 4G/5G (DSS, 4,9 %) und bei LTE/GSM (22,8 %) auf. Dieser Messpunkt stellt insofern einen Ausreißer dar, als dass die zweithöchste Maximalimmision von 5G im 3,6-GHz-Band mit 23,5 % des Feldstärkegrenzwerts um 6 dB (Faktor 4 bezüglich der Leistung) niedriger ausfällt. Die niedrigste Maximalimmision beträgt 0,5 % des Feldstärkegrenzwerts bei 5G im 3,6-GHz-Band, 0,2 % bei 4G/5G (DSS) sowie 0,4 % bei LTE/GSM. Der Median aller Maximalimmisionen ergibt sich bei 5G im 3,6-GHz-Band zu 6,9 % gefolgt von LTE/GSM mit 4,9 % und 4G/5G (DSS) mit 1,5 %.

Hinsichtlich der Momentanimmision weist 5G im 3,6-GHz-Band die niedrigsten Immissionen auf. So liegt das Maximum bei 0,5 % des Feldstärkegrenzwerts, während es bei 4G/5G (DSS) 1,0 % und bei LTE/GSM 6,3 % beträgt. Auch bei den Medianwerten zeigt sich, dass 5G im 3,6-GHz-Band mit 0,2 % gegenüber LTE/GSM mit 1,3 % im Mittel die niedrigsten Immissionen aufweist. Dies ist primär durch die derzeit niedrige Netzauslastung im 3,6-GHz-Band zu erklären, wodurch sich die Anlagen größtenteils im Leerlauf befinden und die Momentanimmision in guter Näherung der Minimalimmision im Leerlauf der Anlagen entspricht. 4G/5G (DSS) liegt mit einem Medianwert von 0,2 % ebenfalls auf einem niedrigen Immissionsniveau.

Eine etwas größere Spannbreite bei 5G im 3,6-GHz-Band ist bei den typischen Immissionen festzustellen. Dennoch liegen auch hierbei Maximalwert (1,9 % des Feldstärkegrenzwerts) und Median (0,3 %) deutlich näher an der Minimalimmision, als an der Maximalimmision.

Im Hinblick auf den horizontalen Abstand zur Sendeanlage zeigen die Untersuchungen, dass sich weder bei 5G im 3,6-GHz-Band noch bei 4G/5G (DSS) oder LTE/GSM ein klarer Trend zwischen Immissionshöhe und Entfernung zur Anlage feststellen lässt. Hinsichtlich des Vertikalwinkels zur Anlage treten die höchsten Immissionen bei kleinen Vertikalwinkeln, d.h. in größeren Entfernungen zur Sendeanlage auf. Während die Immission für Vertikalwinkel größer als etwa 15° keine sichtbare Korrelation mit dem Vertikalwinkel aufweist, ist für kleinere Vertikalwinkel insbesondere bei 5G im 3,6-GHz-Band ein Anstieg der Immission mit fallendem Vertikalwinkel (d.h. mit steigendem Abstand zur Anlage) erkennbar. Dies ist durch das vertikale Schwenken der im 3,6-GHz-Band eingesetzten Beamforming-Antennen bedingt, wodurch auch am Zellrand ein hoher Signalpegel erzeugt und somit eine hohe Datenrate ermöglicht wird.

Die in vorliegender Studie durchgeführten Messungen fanden an 5G-Basisstationen im Non-Standalone-Betrieb statt. Alle Netzbetreiber haben angekündigt, dass im gesamten 5G-Netz mittelfristig Standalone aktiviert wird. Damit werden nicht nur Nutzerdaten, sondern auch die gesamte Signalisierung über 5G übertragen, welche bislang über das 4G-Ankernetz abgewickelt wird. Dadurch ist nur eine geringfügige Verschiebung der Momentanmission von 4G hin zu 5G zu erwarten. Die Maximalmission verändert sich hingegen nicht.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die in vorliegender Untersuchung festgestellten Maximalmissionen durch 5G im 3,6-GHz-Band an 40 Messpunkten höher ausfallen, als die Maximalmissionen durch LTE/GSM. Diese liegen jedoch in einer ähnlichen Größenordnung. Lediglich die Maximalmissionen von 4G/5G (DSS) fallen signifikant niedriger aus. Es bleibt zu diskutieren, inwiefern die messtechnisch festgestellte Maximalmission repräsentativ für die Nutzung von 5G-Zellen mit Massive-MIMO-Antennen ist. Beim Vergleich der Momentanmissionen bei typischen Nutzungsarten zeigen sich bei 5G im 3,6-GHz-Band deutlich niedrigere Werte als bei LTE/GSM. Sie liegen dabei nur unwesentlich über der Minimalmission. Bei der weiterer zu erwartenden Zunahme 5G-fähiger Endgeräte und damit einhergehend höheren Zellauslastung ist zwar zu erwarten, dass die Momentanmission ansteigen wird. Gleichzeitig bedeuten aber auch mehrere aktive Nutzer in einer Zelle, dass es in der Praxis immer unwahrscheinlicher wird, dass ein Beam mit voller Sendeleistung über längere Zeit (z.B. sechs Minuten) auf einen Messpunkt ausgerichtet sein kann.

Abkürzungsverzeichnis

2G	Mobilfunktechnologie der zweiten Generation
3G	Mobilfunktechnologie der dritten Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Mobilfunktechnologie der vierten Generation
5G	Mobilfunktechnologie der fünften Generation
5G NR	5G New Radio (Luftschnittstelle des 5G-Standards)
BNetzA	Bundesnetzagentur
BPSK	Binary Phase Shift Keying (binäre Phasenumtastung)
BWP	Bandwidth Part
CA	Carrier Aggregation
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission and Reception
CRS	Cell-specific Reference Signal (Zellspezifisches Referenzsignal)
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power (äquivalente isotrope Strahlungsleistung)
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FDD	Frequency Division Duplex (Frequenzduplexverfahren)
FR	Frequency Range
HF-EMF	Hochfrequente elektromagnetische Felder
ISI	Intersymbolinterferenz
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LOS	Line-of-sight (Sichtverbindung)
LTE	Long Term Evolution (4G)

LTE-A	LTE Advanced
MB	Mobile Broadband (verwendet zur Bezeichnung von Frequenzbändern)
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communication
mm-Wellen	Millimeter-Wellen
NLOS	Non-line-of-sight (keine Sichtverbindung)
NR	New Radio (Synonym für die 5G-Funkschnittstelle)
NRW	Nordrhein-Westfalen
NSA	Non-Standalone-Betrieb
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBCH	Physical Broadcast Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PSS	Primary Synchronization Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Quadraturamplitudenmodulation)
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Quadraturphasenumtastung)
RB	Resource Block
RE	Resource Element
SA	Standalone-Betrieb
SCS	Subcarrier Spacing (Trägerabstand bei OFDM)
SPL	Smart Power Lock
SS	Synchronization Signal

SSB	Synchronization Signal Block (abgekürzte Form von SS/PBCH)
SSS	Secondary Synchronization Signal
TDD	Time Division Duplex
TXU	Transmitter Unit
UE	User Equipment
uRLLC	Ultra Reliable and Low Latency Communication
VBW	Video Bandwidth (Videobandbreite)

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes** (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV). Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)
- [5G 21] **5G-Anbieter.info**, „*Dynamic Spectrum Sharing (DSS) – Was bringt die Technik und wie funktioniert das Frequenz-Sharing?*“, <https://www.5g-anbieter.info/technik/dynamic-spectrum-sharing.html>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.
- [ARD] **ARD-Livestream**, <https://live.daserste.de/>, zuletzt aufgerufen am 05.11.2021.
- [Bau 20] **Janette Baumann**, „*INSIDE VODAFONE – Vodafone startet 5G-Ausbau in der Fläche: Highspeed-Internet für zehn Millionen Menschen*“, Internetauftritt von Vodafone, <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/vodafone-startet-5g-ausbau-in-der-flaeche-highspeed-internet-fuer-zehn-millionen-menschen/#/>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.
- [Bau 21] **Janette Baumann**, „*INSIDE VODAFONE : NETZ – Vodafone übertrifft Ausbauziele: 5G-Netz für mehr als 20 Millionen Menschen verfügbar*“, 17.02.2021, Internetauftritt von Vodafone Germany, <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/vodafone-uebertrifft-ausbauziele-5g-netz-fuer-mehr-als-20-millionen-menschen-verfuegbar/#/>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021
- [BKS+ 19] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Sascha Schießl, Dirk Heberling und Matthias Hein**, „*Challenges to assess Human Exposure to 5G massive MIMO Base Stations*“, The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM) , Seite 244-248, Montpellier (Frankreich), 2019.
- [BKH+ 20] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Dirk Heberling und Matthias Hein**, „*A Follow-Up: Challenges for Human Exposure Assessment to 5G Massive MIMO Base Stations*“, eingereicht für: The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM), Oxford (UK), 2020.
- [BKS+ 20] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Sascha Schießl, Dirk Heberling und Matthias Hein**, „*Konzepte für zuverlässige Immissionsmessungen an 5G massive MIMO-Basisstationen*“, Elektromagnetische Verträglichkeit emv, 2020.

- [BNetzA 20] **BNetzA MA 09/EMF/01**, *„Vorläufige Messanweisung des Prüf- und Messdienstes für EMVU-Messungen im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens“*, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), Referat 511, Mainz 03/2020.
- [BNetzA 20a] **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen**, *„Verwaltungsvorschrift für Frequenzuteilungen für lokale, breitbandige Frequenznutzungen im Frequenzbereich 24,25 – 27,5 GHz (VV Lokales Breitband“*, Stand: 17.12.2020.
- [BOR 05] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Neikes, A. Schramm und P. Schmidt**, *Elektromagnetische Felder in NRW - Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen*, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht Feldmessungen im Umfeld von UMTS-Mobilfunksendeanlagen, IMST GmbH, Kamp-Lintfort (2005).
- [Bri 20] **Volker Briegleb**, *„5G-Ausbau: Vodafone kommt schneller voran als erwartet“*, Internetauftritt von „heise online“, <https://www.heise.de/news/5G-Ausbau-Vodafone-kommt-schneller-voran-als-erwartet-4958387.html>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.
- [Bri 21] **Volger Briegleb**, *„Telefónica-CTO: 5G-Ausbau „schneller als jede andere Technologie zuvor“ – Mallik Rao, CTO von Telefónica Deutschland, beantwortet Fragen zum aktuellen Ausbaustand im O2-Netz, „echtem 5G“ und den Chancen von Open RAN.“*, Internetauftritt von „heise online“, <https://www.heise.de/news/Telefonica-CTO-5G-Ausbau-schneller-als-jede-andere-Technologie-zuvor-6159012.html>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.
- [Dri 21] **1&1 Drillisch**, *„Netzaufbau – Unser Weg zum 5G-Netz“*, Internetauftritt von 1&1 Drillisch, <https://www.1und1.ag/unser-weg-zu-5g>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2021.
- [DT 20a] **Deutsche Telekom**, *„5G für Deutschland“*, Pia Habel, Artikel vom Internetauftritt der Deutschen Telekom vom 22.04.2020, <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/5g-fuer-deutschland-598876>, zuletzt aufgerufen am 10.09.2020.
- [DT 21] **Deutsche Telekom**, *„Telekom Netzausbau“*, Internetauftritt der Deutschen Telekom, <https://www.telekom.de/netz/mobilfunk-netzausbau>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.
- [Gaj 21] **Henning Gajek (teltarif.de)**, *„Telekom und Telefónica erproben 5G-Standardone“*, teltarif.de Onlineverlag GmbH, <https://www.teltarif.de/netzausbau-5g-sa-nsa-telekom-o2/news/86206.html>, zuletzt aufgerufen am 15.11.2021.

- [IEC 62232] **IEC 62232 Ed. 3.0**, „*Methods for the Assessment of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields associated with Human Exposure*“, Committee Draft (CD), International Electrotechnical Commission (IEC), TC 106, 12/2019.
- [IEC 62669] **IEC TR 62669:2019**, „Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure“, Technical Report, International Electrotechnical Commission (IEC), TC 106, 2019.
- [ITU-R P.1410] **Recommendation ITU-R P.1410-5**, „*Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz*“, ITU-R, 02/2012
- [ITU-R P.1411] **Recommendation ITU-R P.1411-11**, „*Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*“, ITU-R, 09/2021.
- [ITU-R P.676] **Recommendation ITU-R P.676-11**, „*Attenuation by atmospheric gases*“, ITU-R, 09/2016.
- [ITU-R P.838] **Recommendation ITU-R P838-3**, „*Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*“, ITU-R, 2005.
- [KBS+ 17] **T. Kurz, Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. de Ridder**, „*Mustermessbericht bezüglich der Messung von Immissionen durch GSM-, UMTS- und LTE-Mobilfunkbasisstationen*“, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2017.
- [KBS+ 20] **Thomas Kopacz, Christian Bornkessel, Sascha Schießl und Dirk Heberling**, „*Untersuchungen zur korrekten Immissionserfassung von gepulsten Signalen mit dem SRM-3006 am Beispiel von 5G*“, Elektromagnetische Verträglichkeit emv, 2020.
- [KBW 22] **Thomas Kopacz, Christian Bornkessel, Matthias Wuschek**, „*Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF-EMF-Expositionsbestimmung*“, Abschlussbericht, Studie erstellt für das Bundesamt für Strahlenschutz, 2022.
- [Kes 21] **Marion Kessing**, „*Telekom liegt beim 5G- und Glasfaser-Ausbau voll im Plan / Wiederaufbau in den Flutgebieten läuft auf Hochtouren*“, 30.08.2021, Internetauftritt der Deutschen Telekom, <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/telekom-beim-5g-und-glasfaser-ausbau-voll-im-plan-634836>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.

- [Lüc 21] **Hayo Lücke**, „1&1 bereitet 5G-Start vor: So geht es jetzt weiter“, Internetauftritt von inside digital, <https://www.inside-digital.de/news/1und1-bereitet-5g-start-vor-so-geht-es-weiter>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2021.
- [METAS 20] **Technical Report 5G**, „Measurement Method for 5G NR Base Stations up to 6 GHz“, METAS-report 154.1-2020-5218-1016, Version 2.0, Eidgenössisches Institut für Metrologie (METAS), Bern, 02/2020.
- [R1-165362] **TDoc R1-165362**, „Multi-antenna Architectures and Implementation Issues in NR“, Agenda Item 7.1.6, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #85, Nanjing, China, 23rd – 27th May 2016.
- [Sch 19] **Michael Schüller**, „5G – massive MIMO“, Vortrag im Rahmen des Runden Tisches EMF am 05.03.2019, https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/emf/rtemf/vortrag-schuessler.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.
- [SKB+ 20] **Anna-Malin Schiffarth, Thomas Kopacz, Christian Bornkessel und Dirk Heberling**, „Measurement of instantaneous exposure to 5G massive MIMO base stations and comparison to established mobile radio services“, eingereicht für: The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM) , Oxford (UK), 2020.
- [Str 21] **Florian Streicher**, „5G für 30 Prozent der Bevölkerung 2021 – 5G-Standalone in Vorbereitung: Telefónica Deutschland / O₂ startet 5G-Ausbauturbo“, Internetauftritt von Telefónica Deutschland, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/03/5g-fuer-30-prozent-der-bevoelkerung-2021-5g-standalone-in-vorbereitung-telefonica-deutschland-o2-startet-5g-ausbauturbo.html>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.
- [Str 21a] **Florian Streicher**, „Meilenstein im 5G-Netzausbau: Telefónica/O2 nimmt 1.500. 5G-Antenne auf 3,6 GHz ins Netz“, 11.06.2021, Internetauftritt von Telefónica Deutschland, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/06/meilenstein-im-5g-netzausbau-telefonica-o2-nimmt-1500-5g-antenne-auf-36-ghz-ins-netz.html>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.
- [TS 38.101-1] **ETSI TS 138 101-1**, „5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.8.2 Release 15)“, 2018.
- [TS 38.104] **ETSI TS 138 104**, „5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.8.0 Release 15)“, 2020.

- [TS 38.141-1] **3GPP TS 38.141-1**, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing (Release 16)”, V16.1.0, 2019.
- [TS 38.141-2] **ETSI TS 138 141-2**, “5G; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing (3GPP TS 38.141-2 version 15.4.0 Release 15)”, 2020.
- [TS 38.211] **ETSI TS 138 211**, “5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.3.0 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.212] **ETSI TS 138 212**, “5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.3.0 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.213] **ETSI TS 138 213**, “5G; NR; Physical layer procedures for control, Version 15.7.0 Release 15”, 2019.
- [VF 20] **Vodafone**, „Vodafone startet 5G-Ausbau in der Fläche: Highspeed-Internet für zehn Millionen Menschen“, Janette Baumann, Artikel vom Internetauftritt von Vodafone vom 22.04.2020, <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/vodafone-startet-5g-ausbau-in-der-flaeche-highspeed-internet-fuer-zehn-millionen-menschen/#/>, zuletzt aufgerufen am 10.09.2020.
- [VF21] **Vodafone**, „5G-Netzausbau: Vodafone schaltet 5G-Standalone großflächig frei“, Internetauftritt von Vodafone Germany, 02.11.2021, <https://www.vodafone.de/newsroom/netz/vodafone-startet-umruestung-zum-modernsten-5g-netz-europas/>, zuletzt aufgerufen am 15.11.2021
- [VF 21a] **Vodafone**, „Vodafone-Netzausbau: Der Stand der Dinge“, 14.06.2021, Internetauftritt von Vodafone Germany, <https://www.vodafone.de/business/featured/technologie/fortschritt-ausbau-vodafone-netz/>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.
- [VF 21b] **Vodafone**, „Vodafone Netzabdeckung“, Internetauftritt von Vodafone, <https://www.vodafone.de/unternehmen/netz.html>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.