



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

Abschlussbericht

LANUV-Fachbericht 143

Inhalt

1	Beschreibung der 5G-Mobilfunktechnik im Hinblick auf die emissions- und immissionsrelevanten Eigenschaften.....	6
1.1	Kompakter Überblick zur 5G-Technik und -Luftschnittstelle	6
1.1.1	Luftschnittstelle	6
1.1.1.1	Frequenzbereiche und Bandbreiten	6
1.1.1.2	Modulationsschemata und Zugriffsverfahren.....	7
1.1.1.3	Numerologie und Frame-Struktur	7
1.1.1.4	Resource Grid	9
1.1.1.5	Duplex-Verfahren	9
1.1.1.6	Aus Immissionssicht relevante physikalische Kanäle	10
1.1.1.7	SS/PBCH Block (SSB).....	10
1.1.2	Netzstruktur	11
1.1.3	Antennentypen	11
1.1.3.1	Differenzierung zwischen Antennentypen.....	11
1.1.3.2	Aussendung eines oder mehrerer SSB	12
1.1.4	Sendeleistungen	13
1.2	Derzeitig genutzte und zukünftig zu erwartende spezielle Techniken bei 5G	14
1.2.1	Dynamic Spectrum Sharing (DSS)	14
1.2.2	Smart Power Lock (SPL).....	14
1.3	Aktuelle und zukünftige Frequenzbereiche bei 5G	15
1.3.1	Einfluss auf die Feldausbreitung in der Praxis.....	16
1.4	5G-Ausbau in NRW	18
1.4.1	Deutsche Telekom	19
1.4.2	Telefónica Deutschland.....	20
1.4.3	Vodafone Germany	21
1.5	Nationale und internationale Messempfehlungen	22
1.5.1	Messanweisung der Bundesnetzagentur.....	22
1.5.2	Schweizer Messempfehlung (METAS)	23
1.5.3	IEC 62232	25
1.6	Erläuterung einschlägiger 5G-typischer Fachbegrifflichkeiten.....	27
2	Durchführung der Immissionsmessungen	34
2.1	Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder.....	34
2.2	Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien	36
2.3	Eingesetzte Messgeräte	36
2.4	Verwendete Messverfahren	37

3	Messungen im Umfeld von 5G-Basisstationen	39
3.1	Beschreibung der Standorte und Messpunkte	40
3.1.1	Anlage 1: Übach-Palenberg, Martin-Luther-Straße 8	40
3.1.2	Anlage 2: Lippstadt, Gaußstraße 17	41
3.1.3	Anlage 3: Düsseldorf, Am Wald 130	42
3.1.4	Anlage 4: Essen, Frielingsdorfweg 1	43
3.1.5	Anlage 5: Oberhausen, Bismarckstraße 53	44
3.1.6	Anlage 6: Köln, Richard-Wagner-Straße 42	45
3.1.7	Anlage 7: Simmerath, Kranzbruchstraße 15.....	46
3.1.8	Anlage 8: Bonn, Am Stingenberg.....	47
3.1.9	Anlage 9: Münster, Münzstraße 13.....	48
3.1.10	Anlage 10: Dortmund, Leierweg 65	49
3.2	Ergebnisse: Maximalimmissionen.....	50
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).....	56
3.5	Vergleich der Immissionen von 5G, 4G/5G (DSS) und LTE/GSM	60
3.6	Immissionsänderung an früher untersuchten Messpunkten	64
3.7	Horizontaler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage	65
3.8	Vertikalwinkel zwischen Messpunkt und Sendeanlage	66
3.9	Zusammenfassung und Fazit.....	67
4	Messungen im Umfeld von 5G-Kleinzellenstandorten	69
4.1	Standort 1: Bonn-Landgrabenweg	70
4.2	Standort 2: Köln-Heumarkt	75
4.3	Standort 3: Hattingen-Obermarkt 5	81
5	Ergänzende Vergleichsmessungen zur Feldabstrahlung 5G-Endgerät	86
5.1	Aufgabenstellung	86
5.2	Durchführung der Messungen	86
5.3	Ergebnisse	88
5.3.1	MB07	88
5.3.2	MB21	90
5.3.3	MB36.....	93
5.4	Vergleich zu Immissionen durch 5G-Basisstationen	96

5.5	Übertragbarkeit auf andere Endgerätearten.....	97
5.5.1	Breitbandkommunikation.....	97
5.5.2	Massenkommunikation	98
5.5.3	Echtzeitkommunikation	99
5.6	Zusammenfassung	100
6	Arbeitshilfen für die Immissionsschutzbehörden.....	101
6.1	Wichtige im Projekt gewonnene Erkenntnisse	101
6.1.1	Signalstruktur und Leistungsabgabe bei 5G-Basisstationen	101
6.1.2	Netzstruktur und eingesetzte Funktechnologien.....	102
6.1.3	Einsatz von Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung	103
6.1.4	Veränderung der Immissionssituation durch 5G.....	104
6.1.4.1	Vergabeauflagen in Deutschland.....	104
6.1.4.2	Auflagen der Frequenzauktion 2019.....	104
6.1.4.3	Auswirkungen der Versorgungsaufgaben der BNetzA auf die Immission	105
6.2	Standortbescheinigung bzw. EMF-Portal der BNetzA	106
6.2.1	Neues Berechnungsverfahren der BNetzA.....	106
6.2.2	Sicherheit von Trägern aktiver Implantate	110
6.3	Überschlägige Immissionsberechnungen	111
6.4	Immissionsmessungen an 5G-Anlagen.....	113
6.4.1	Messung der Momentanimmission	114
6.4.1.1	Zweck der Messung.....	114
6.4.1.2	Geeignete Messverfahren	114
6.4.1.2.1	Breitbandmessung	114
6.4.1.2.2	Frequenzselektive Messung.....	115
6.4.2	Messtechnische Bestimmung der maximal möglichen Immission.....	119
6.4.2.1	Zweck der Messung.....	119
6.4.2.2	Geeignete Messverfahren	119
6.4.2.2.1	Extrapolation der Immission von Referenzsignalen.....	119
6.4.2.2.2	Erzwingen eines Antennenbeams, der mit maximal Leistung zum Messpunkt strahlt	121
6.4.2.3	Immissionsmessungen an 4G/5G-DSS-Anlagen.....	122
	Abkürzungsverzeichnis	123
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	129
	Literaturverzeichnis	132

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.

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.

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

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:

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

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

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 μ s, bei einem Trägerabstand von 15 kHz beträgt sie entsprechend im Mittel 71,4 μ s.
- 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.

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

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

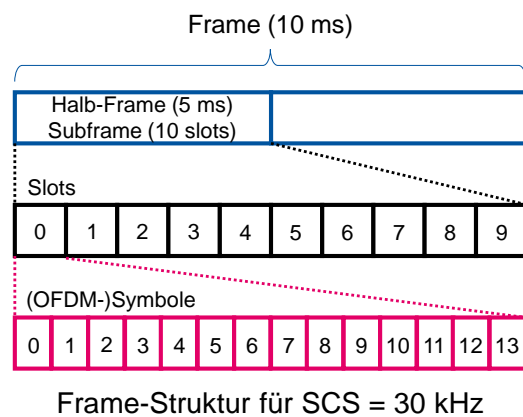


Abbildung 1.1: Aufbau eines 5G-Frames beispielhaft für einen Trägerabstand von 30 kHz

In Abbildung 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 Abbildung 1.2).

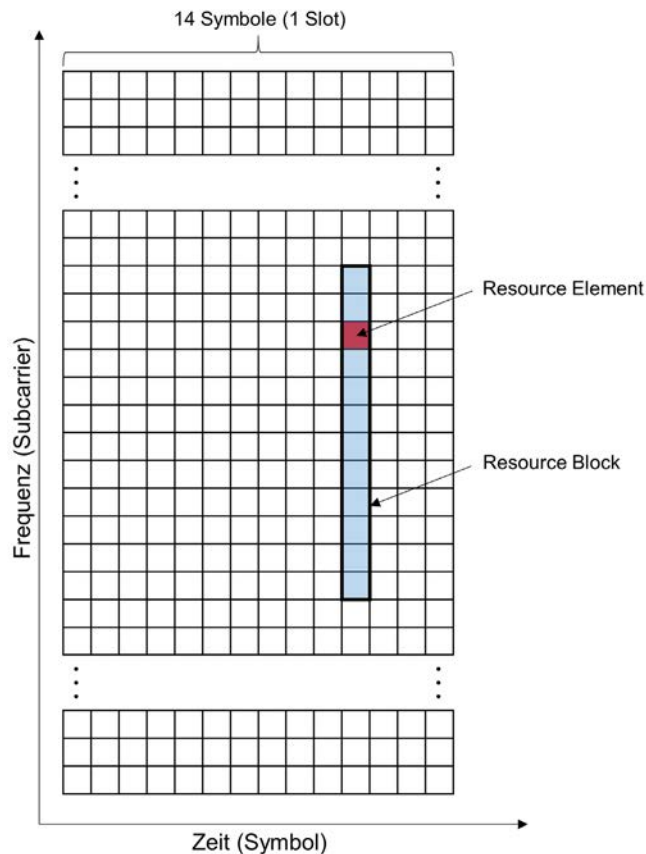


Abbildung 1.2: 5G Resource Grid im Frequenz- und Zeitbereich (y- bzw. x-Achse). Dargestellt sind 14 Symbole (ein Slot) im Zeitbereich. Ein Quadrat entspricht einem Resource Element (RE). Im Frequenzbereich werden zwölf Resource Elements zu einem Resource Block (RB) zusammengefasst.

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 Abbildung 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

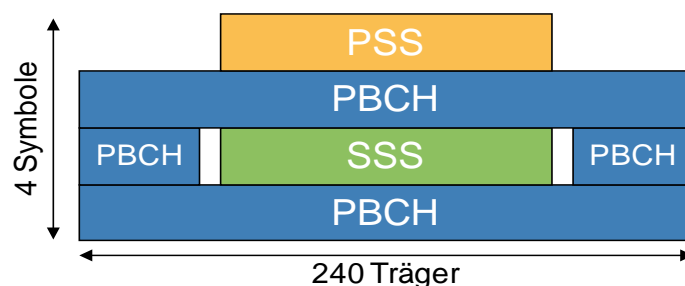


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung eines SSB bestehend aus den Signalen PSS, SSS sowie dem PBCH, die im Zeitbereich 4 OFDM-Symbole und im Frequenzbereich bis zu 240 Träger umfassen.

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 Abbildung 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.

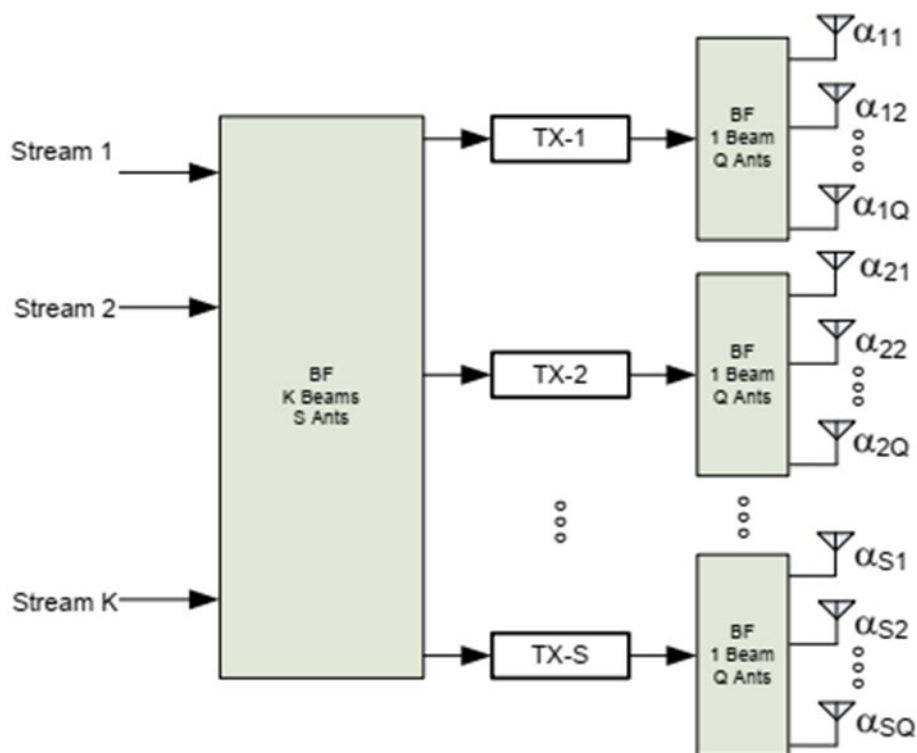


Abbildung 1.4: Aktives Antennensystem: Hybrid-Beamforming in der Variante „sub-array“ (aus [R1-165362])

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 aus-

gesendet 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 leitungsgebunden 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 Immisionsschutzes, 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 mittelnende Feldstärkewerte. Bei passiven Basisstationsantennen bedeutet der Terminus „höchste betriebliche Anlagenauslastung“, dass die Basisstation mit maximal möglicher beantragter Sendeleistung sendet. Bei 5G-Basisstationen mit aktiven Antennen wird zusätzlich das Beamfor-

ming 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 beispielweise 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:

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][DT 22].

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

Bezeichnung	Duplex-Verfahren	Frequenzbereich (bei FDD: Downlink)	5G oder 4G/5G (DSS)?	Grenzwert in V/m (Bandunterkante)
MB07	FDD	758-788 MHz	5G (Telekom, Telefónica) 4G/5G (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

Während Vodafone für 5G ohne die Koexistenz mit 4G (DSS) ausschließlich auf das 3,6-GHz-Band mit Beamforming-Antennen setzt, betreiben die Deutsche Telekom sowie Telefónica 5G zusätzlich im 700-MHz-Band, das die beste Flächenversorgung ermöglicht (siehe hierzu Teilkapitel 1.3.1). In diesem Band wird im Vodafone-Netz 4G/5G (DSS) betrieben. Auch im 1,8-GHz-Band betreiben Vodafone sowie in ausgewählten Regionen auch Telefónica 4G/5G (DSS). 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 eigenes 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 aus-

gegangen [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 Abbildung 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 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

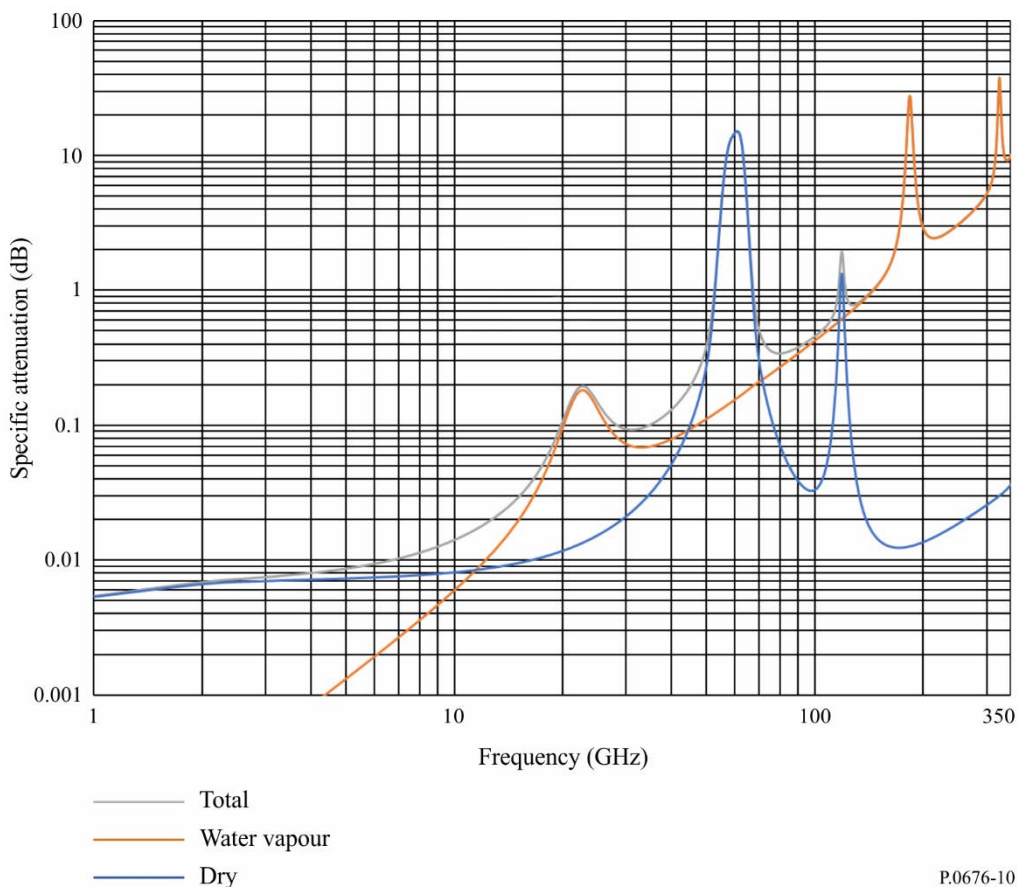


Abbildung 1.5: Spezifische Dämpfung durch atmosphärische Gase zwischen 0 GHz und 350 GHz [ITU-R P.676] (blau: trockene Atmosphäre; rot: Standardatmosphäre).

(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 durch das Mobilfunk-Monitoring der BNetzA (Stand: Januar 2022) lassen sich jedoch zumindest die abgedeckten Flächen in NRW anzeigen [BNetzA 22]. Hierbei handelt es sich analog zu den Netzausbaukarten auf den Seiten der jeweiligen Netzbetreiber um von den Netzbetreibern übermittelte Informationen über die Netzabdeckung. Im Folgenden wird ausschließlich die Abdeckung mit 5G und 4G/5G-DSS gezeigt, die Abdeckung mit 2G und 4G wurde für die Darstellungen ausgespart.

1.4.1 Deutsche Telekom

In Abbildung 1.6 ist die 5G-Abdeckung (Stand: Januar 2022) 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 und insbesondere 4G/5G-DSS 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). Im November 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.

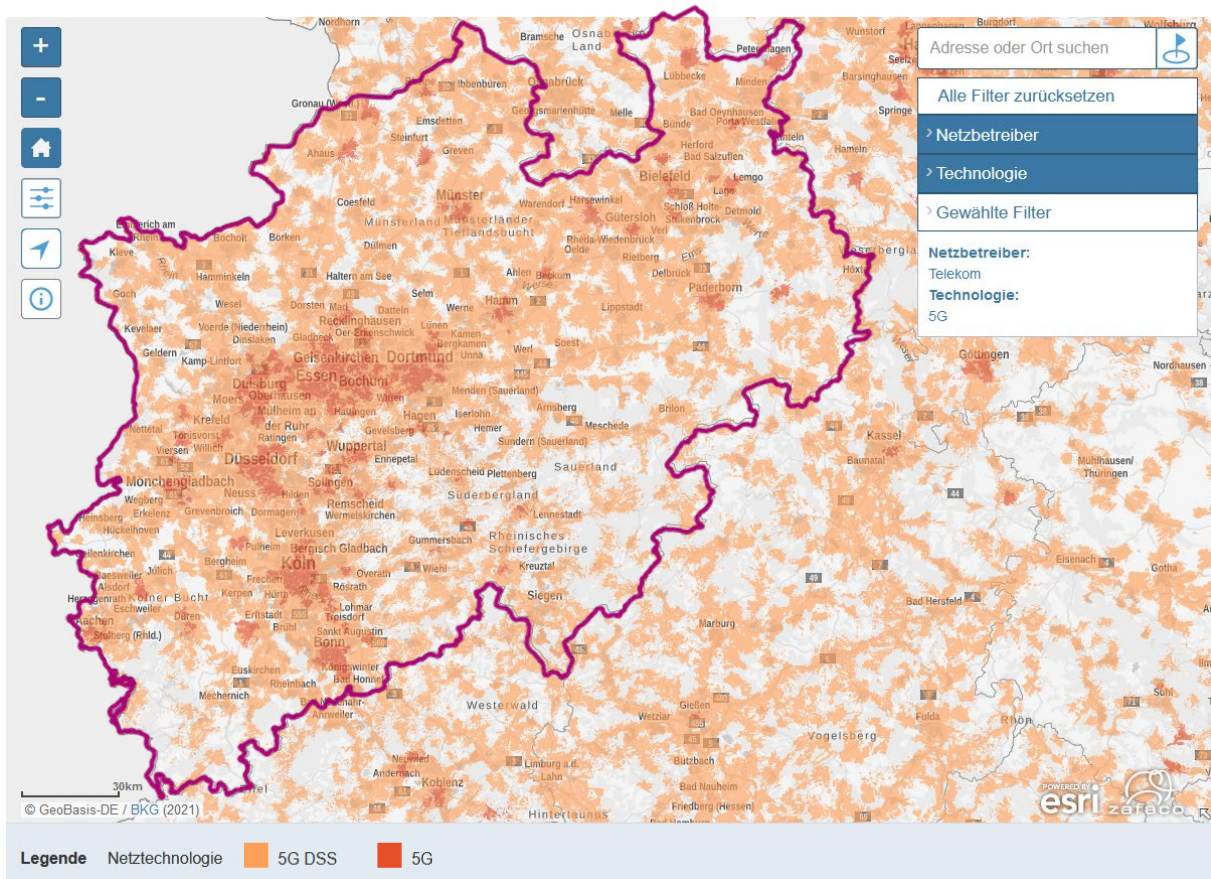


Abbildung 1.6: Netzabdeckung der Deutschen Telekom mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22].

1.4.2 Telefónica Deutschland

In Abbildung 1.7 ist die 5G-Abdeckung (Stand: Januar 2022) im Netz von Telefónica Deutschland für NRW dargestellt. Hierunter fallen sowohl die Versorgungsgebiete der Basisstationen bei 700 MHz und 3,6 GHz, über die ausschließlich 5G betrieben wird, sowie die Basisstationen bei 1,8 GHz, über die neben 5G auch 4G (DSS) betrieben wird. Die 5G-Versorgung konzentriert sich hauptsächlich auf die Ballungsräume rund um Rhein, Ruhr und Wupper. Zusätzlich werden auch einige Städte im Münsterland sowie in Westfalen mit 5G und mit 4G/5G-DSS abgedeckt. Des Weiteren erfolgt eine Versorgung mit 4G/5G-DSS auch westlich des Rheins.

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. Des Weiteren setzt Telefónica für die Flächenversorgung dünner besiedelter Gebiete auch auf das 700-MHz-Band.

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

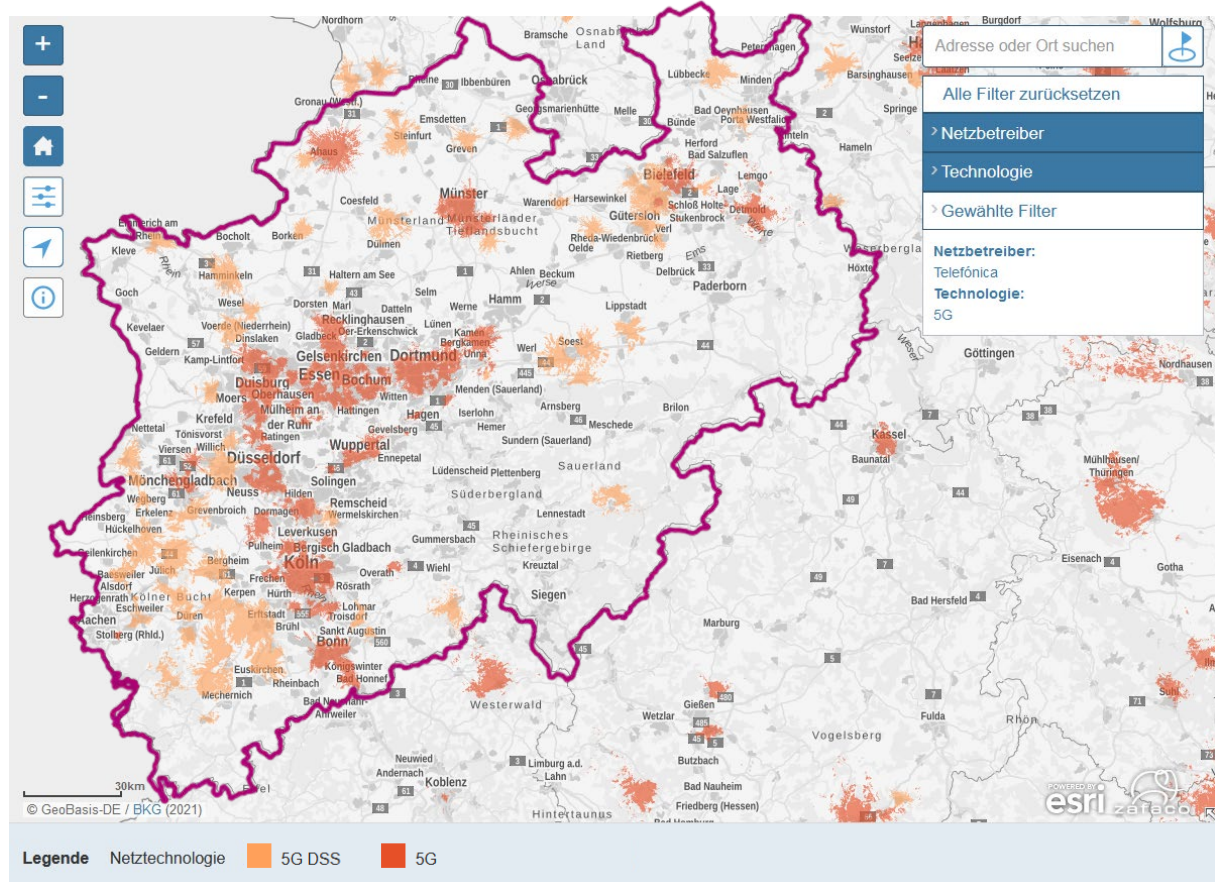


Abbildung 1.7: Netzabdeckung von Telefónica Deutschland mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22]

1.4.3 Vodafone Germany

In Abbildung 1.8 ist die 5G-Abdeckung (Stand: Januar 2022) 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. 4G/5G-DSS ist in weiten Teilen NRW 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. 5G bei 3,6 GHz beschränkt sich auf kleinere Netze hauptsächlich in und rund um größere Städte.

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.

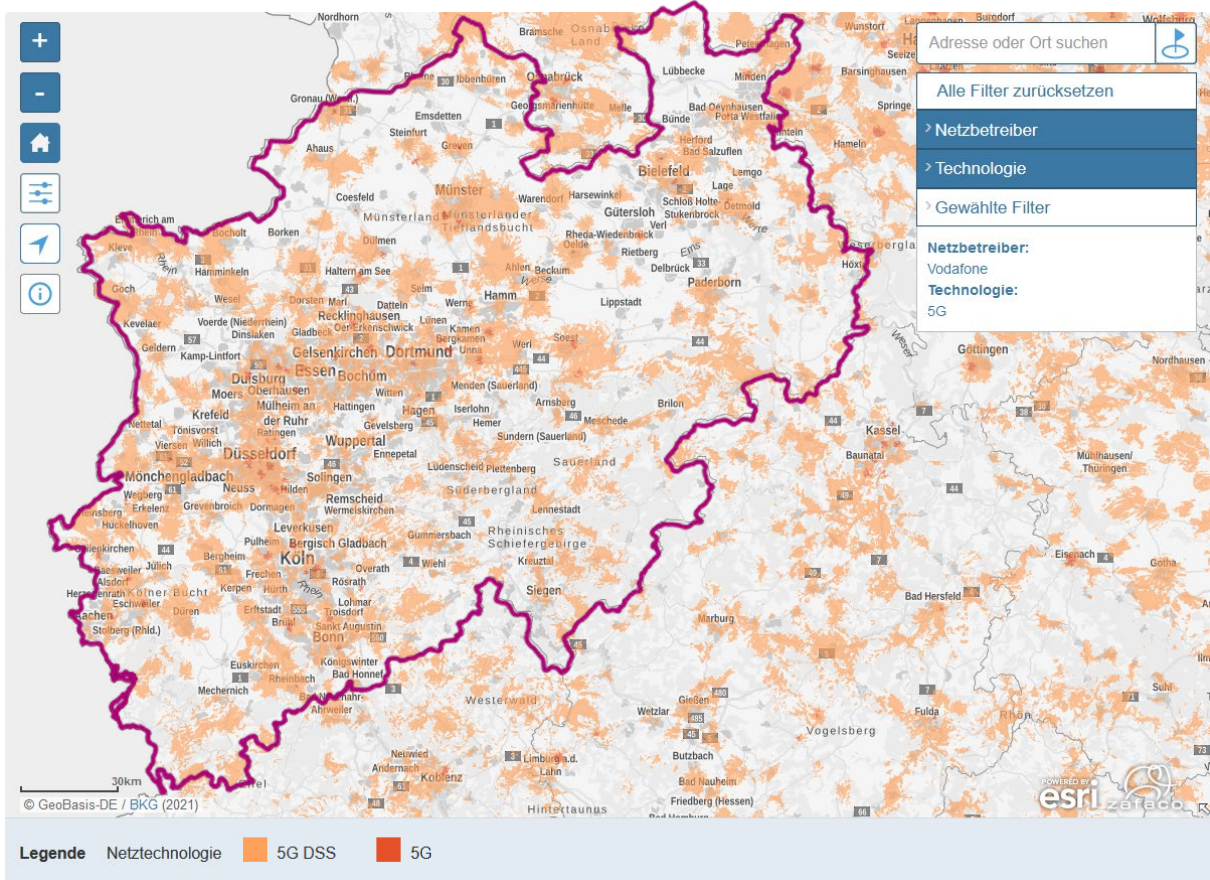


Abbildung 1.8: Netzabdeckung von Vodafone Germany mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22].

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 Netzkaustrüsters 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 0),

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 0).

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 *Momentanmission* 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 durchgeführt 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 Maximalmission 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 Maximalmission 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 Maximalmission* 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 Maximalmission 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).

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
<i>Carrier Aggregation (CA)</i>	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.
<i>Coordinated Multipoint Transmission and Reception (CoMP)</i>	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.
<i>Downtilt</i>	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.
<i>Dynamic Spectrum Sharing (DSS)</i>	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).

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
<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>	Massive MIMO stellt im Allgemeinen ein MIMO-Übertragungssystem dar, das mindestens auf einer Seite eine Vielzahl von Sende-/Empfangsantennen

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
	<p>nen 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 Nutzsignal wieder extrahieren. Im Bereich des Mobilfunks werden digitale Modulationsverfahren verwendet. Hierbei wird das zu modulierende komplexe digitale Signal (Amplitude und Phase) auf sogenannte</p>

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
	<p>"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>
<i>Multibandantennen</i>	<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>
<i>Network Slicing</i>	<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>
<i>Non Standalone</i>	<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>
<i>OFDMA</i>	<p>OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ist ein Zugriffverfahren, 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 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</p>

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
	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 Mo-

Begriff	Beschreibung/Erläuterung
	<p>bilfunks. 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.</p>
<i>Standalone</i>	<p>Siehe „Non Standalone“</p>
<i>Time Division Duplex (TDD)</i>	<p>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 nennenswert genutzten 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.</p>
<i>Transmit Diversity</i>	<p>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.</p>
<i>uRLLC</i>	<p>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).</p>
<i>Zugriffsverfahren</i>	<p>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.</p>

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.

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

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	$0,73 / f$
1 – 10	$87 / \sqrt{f}$	$0,73 / f$
10 - 400	28	0,073
400 - 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000 - 300000	61	0,16

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 technologie neutrale Vergabe der Frequenzen unterschiedliche Mobilfunksysteme betrieben werden können (z.B. GSM-900 und LTE-900 bei MB09).

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.

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

2.2 Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien

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.

Tabelle 2.3: Für die Messungen eingesetzte Messgeräte.

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

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]. Im Wesentlichen orientiert sich dieses an den in Kapitel 0 vorgestellten Messverfahren, allerdings wurden geringfügige Anpassungen aufgrund gerätetechnischer Vorgaben bzw. der gesammelten Erfahrungen in oben genannten Untersuchungen vorgenommen.

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 0 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 0) 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.

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

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

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	

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 [BSN+ 05].

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

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.

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)

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

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

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°

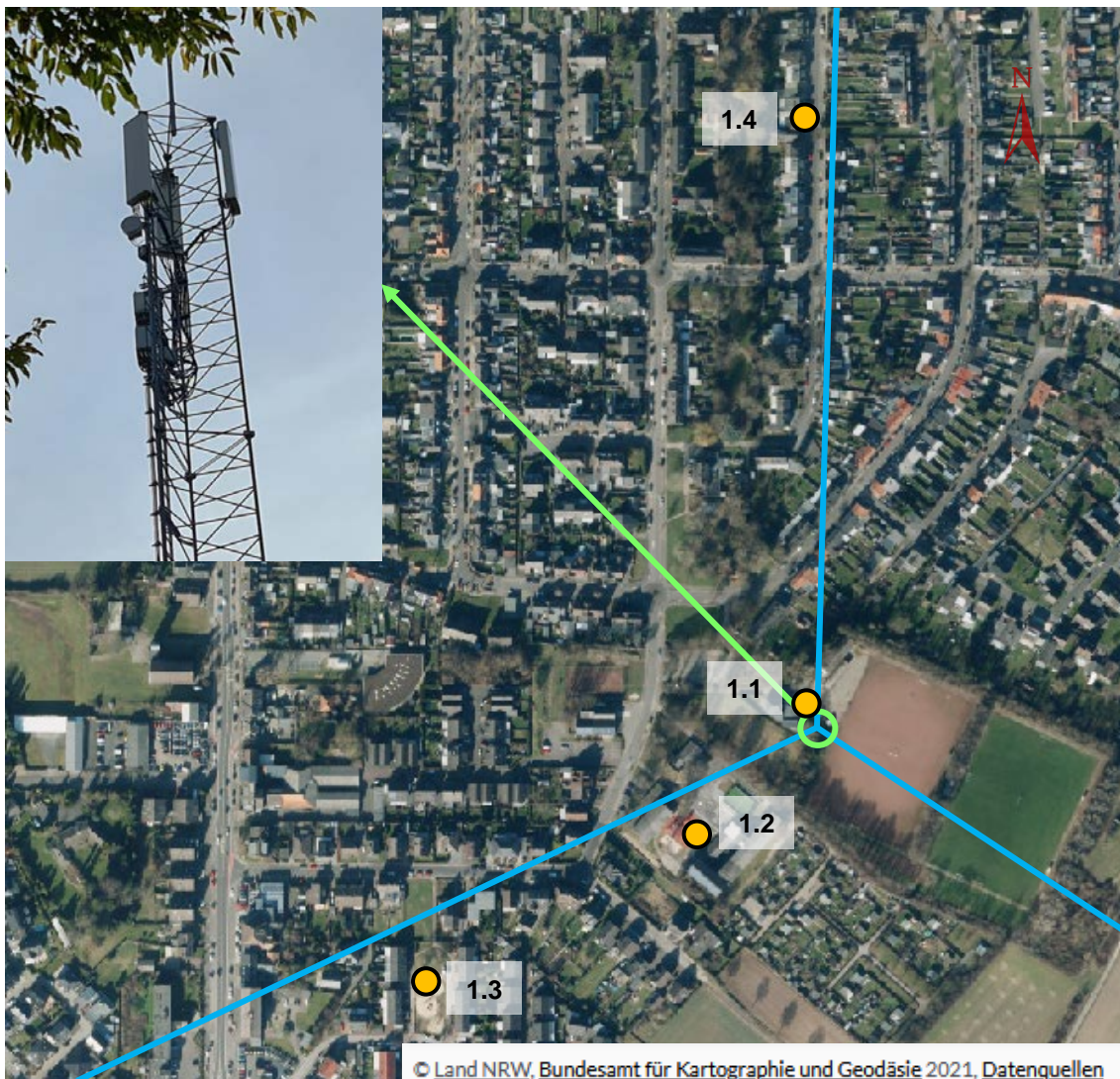


Abbildung 3.1: Ausrichtung der 5G-Sendeannten und Lage der Messpunkte am Standort 1. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Anlagenstandort und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.2 Anlage 2: Lippstadt, Gaußstraße 17

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

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°



Abbildung 3.2: Ausrichtung der 5G-Sendeannten 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

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

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°

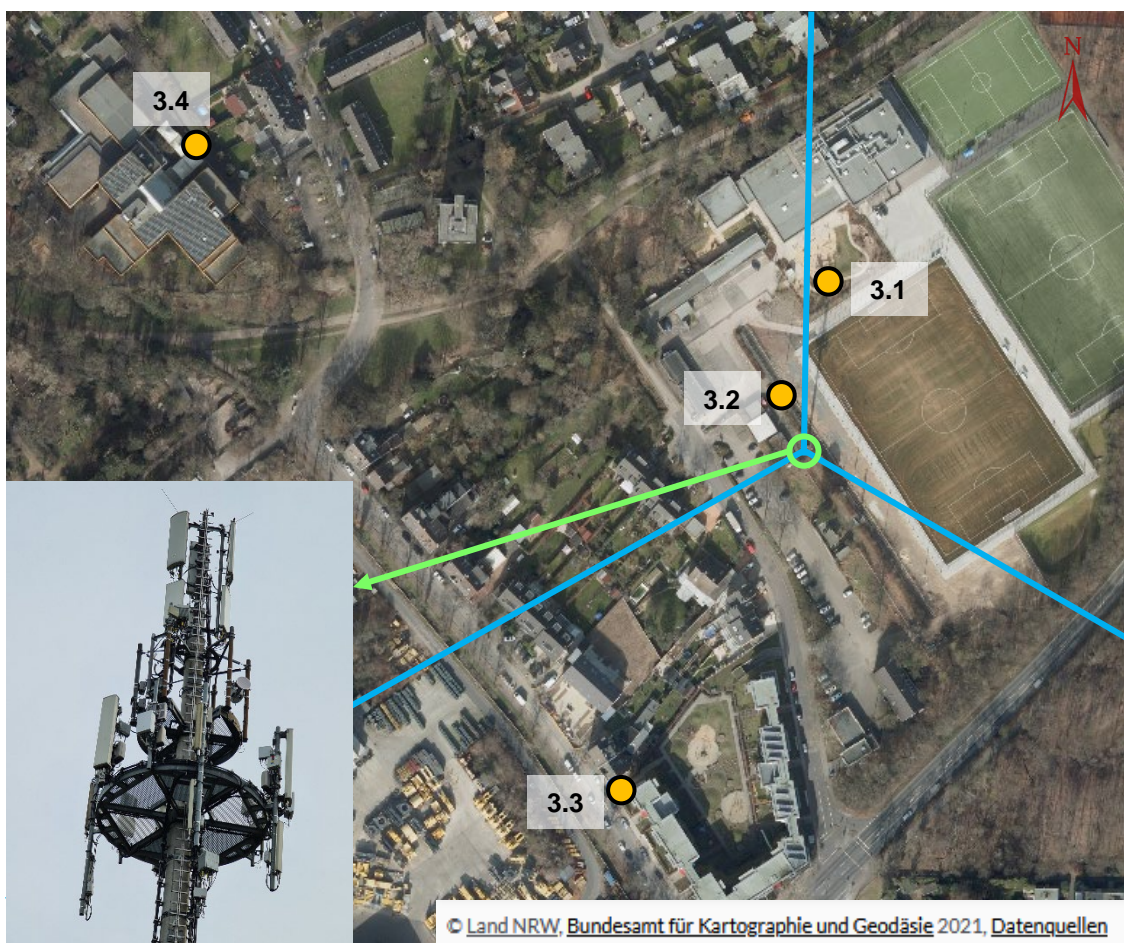


Abbildung 3.3: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 3. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.4 Anlage 4: Essen, Frielingsdorfweg 1

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

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°

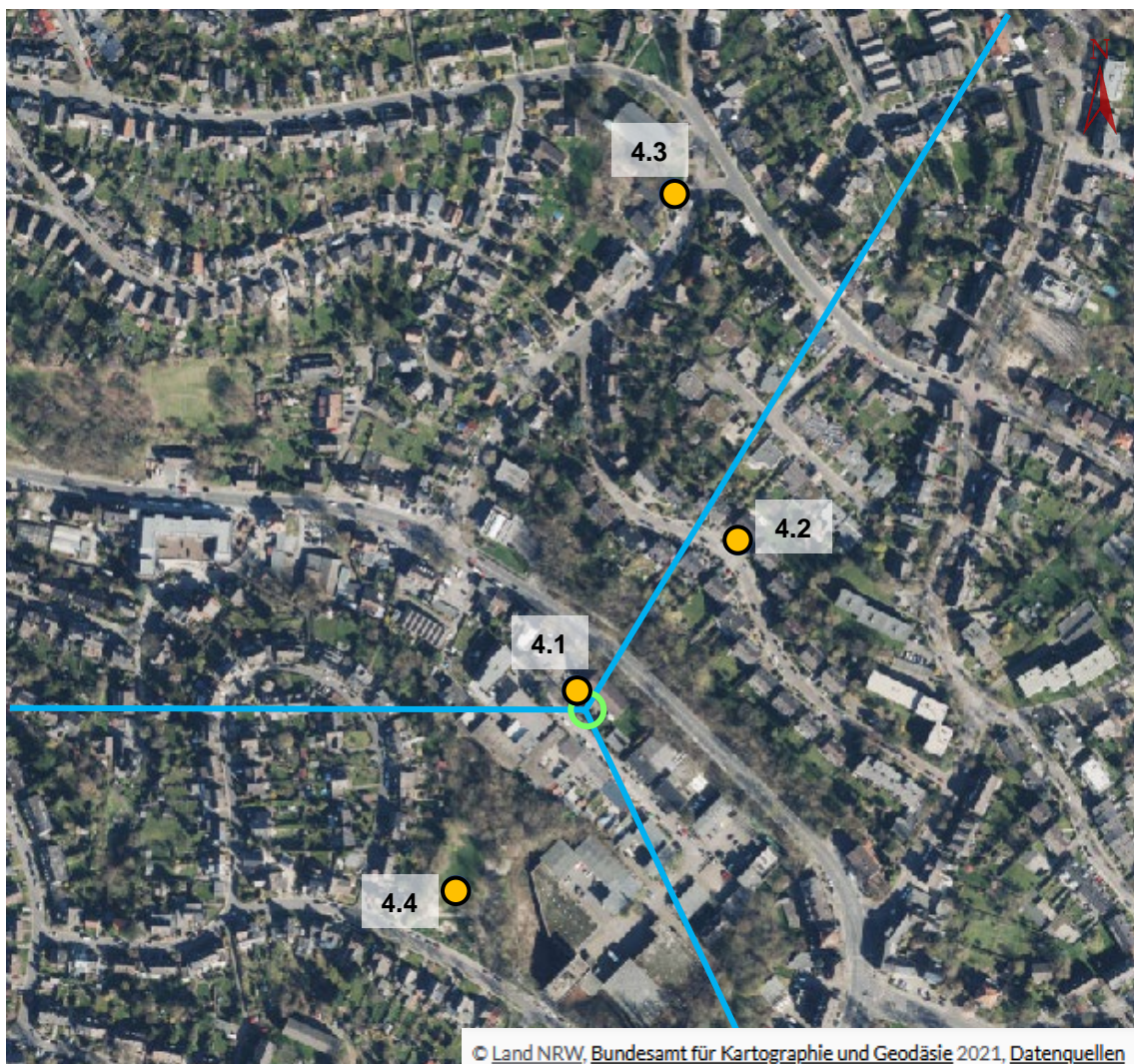


Abbildung 3.4: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 4. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.5 Anlage 5: Oberhausen, Bismarckstraße 53

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

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°

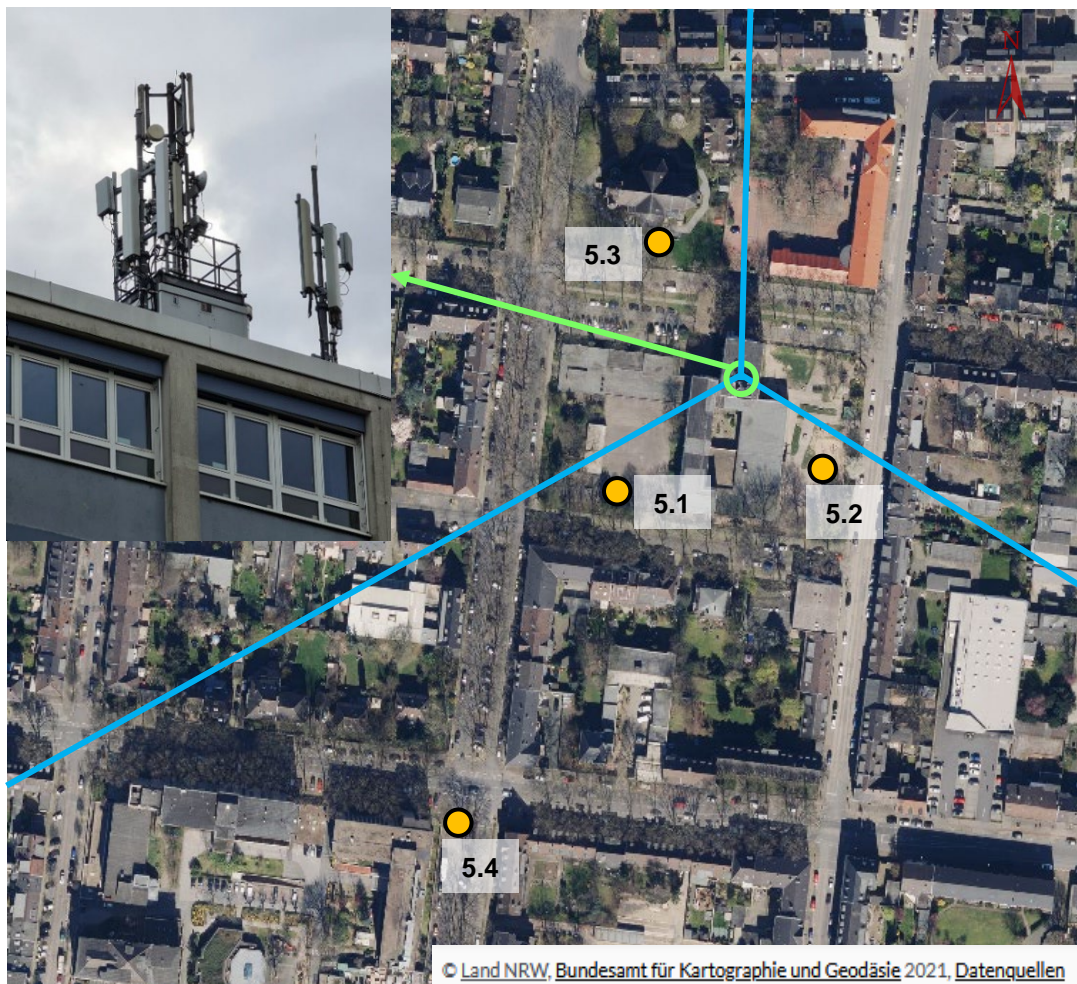


Abbildung 3.5: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 5. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

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

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

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°

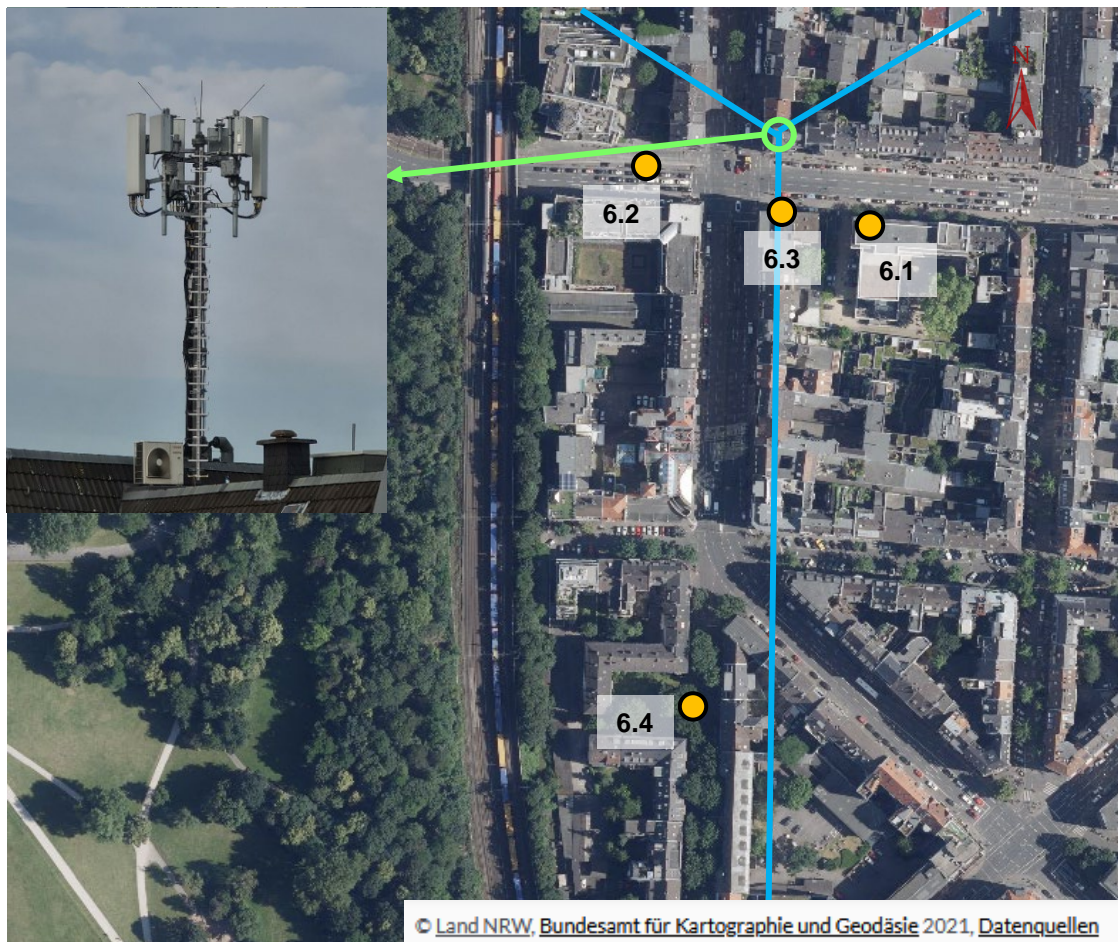


Abbildung 3.6: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 6. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.7 Anlage 7: Simmerath, Kranzbruchstraße 15

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

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°



Abbildung 3.7: Ausrichtung der 5G-Sendeannten 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

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).

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°

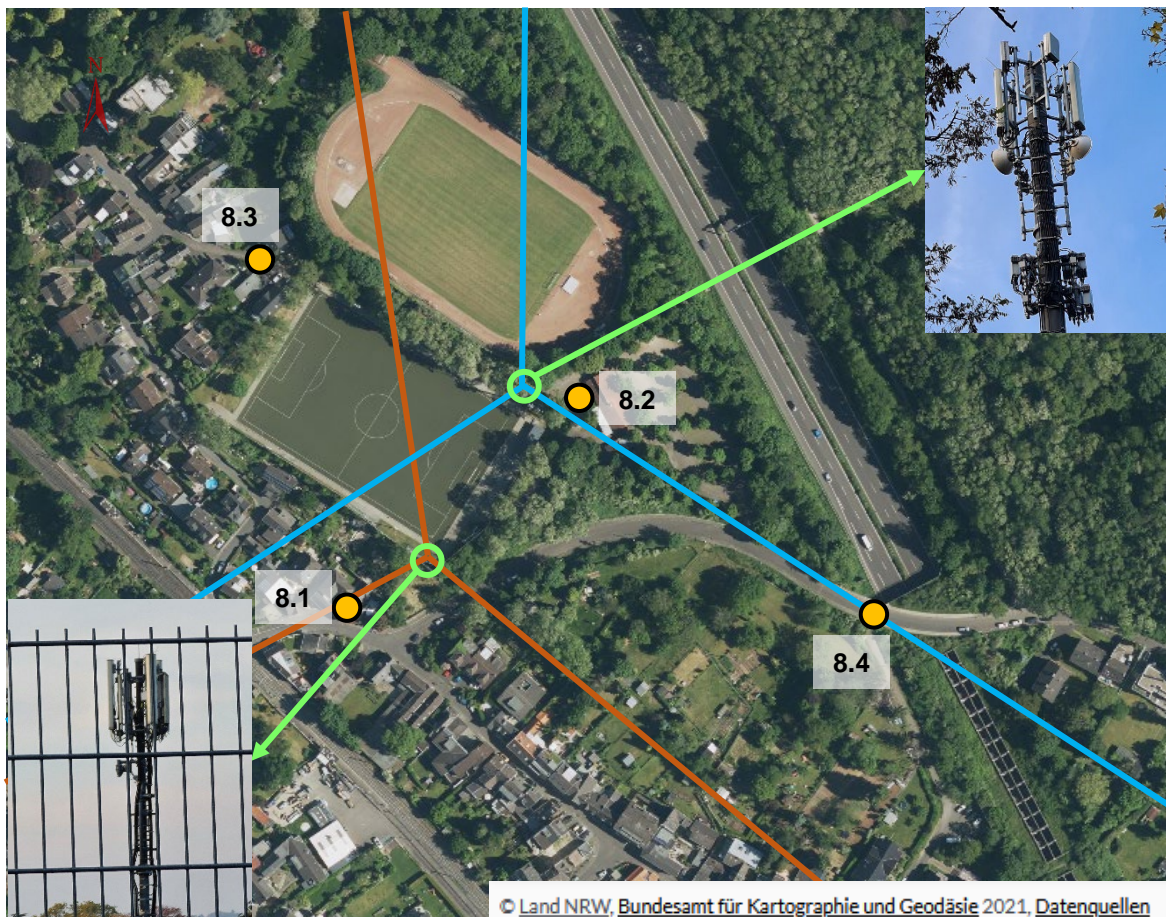


Abbildung 3.8: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 8. Die blauen Linien stellen die Hauptstrahlrichtungen der 5G Massive-MIMO-Antennen dar, die orangenen Linien die horizontale Antennenausrichtung der 5G DSS-Antennen, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und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

3.1.9 Anlage 9: Münster, Münzstraße 13

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

¹Die 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.

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°

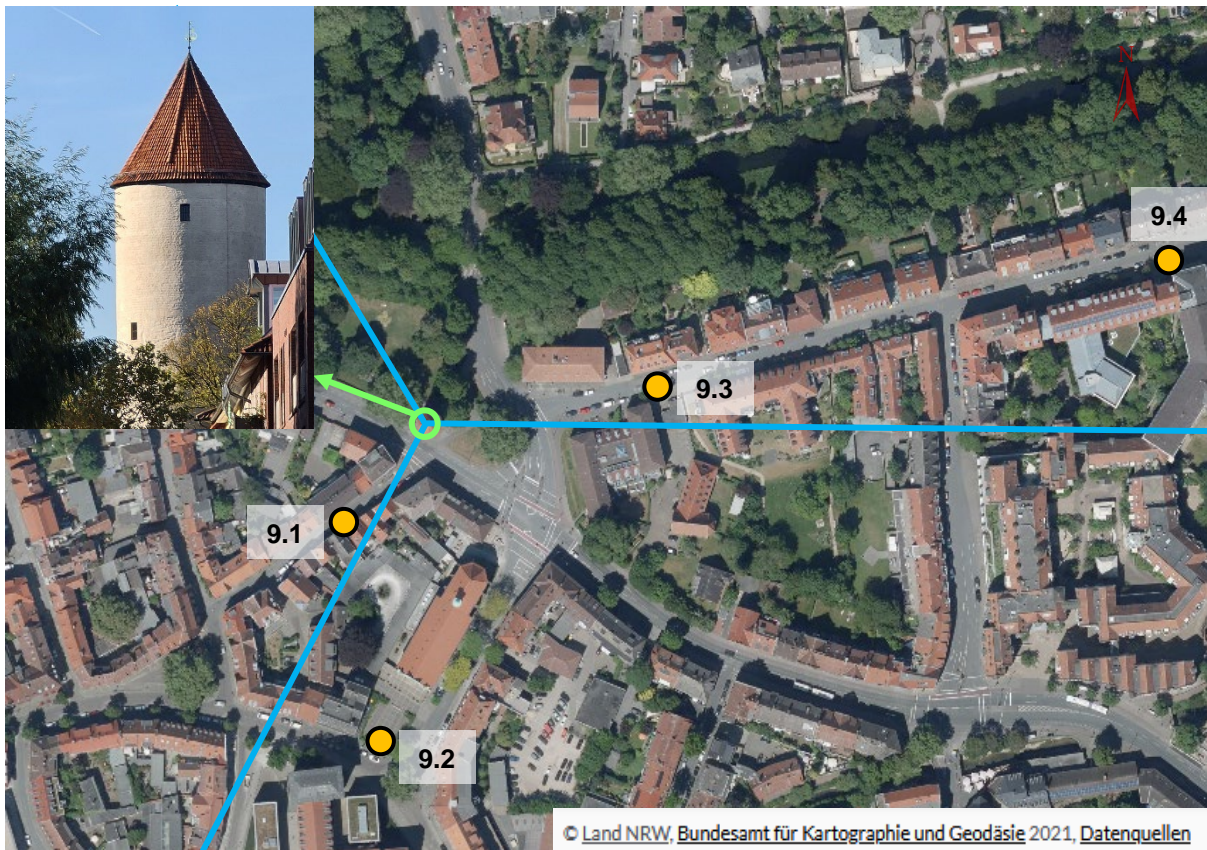


Abbildung 3.9: Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Lage der Messpunkte am Standort 9. Die blauen Linien stellen die horizontale Antennenausrichtung der 5G-Antennen dar, der grüne Kreis den Standort der Basisstation und die gelb ausgefüllten Kreise die Messpunkte.

3.1.10 Anlage 10: Dortmund, Leierweg 65

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

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°



Abbildung 3.10: Ausrichtung der 5G-Sendeanntenen 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 Volllastung 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.

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

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
1: Übach-Pa- lenberg	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
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

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
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
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

3.3 Ergebnisse: Momentanmissionen

Neben der Erfassung der Maximalimmission wurde ebenfalls die zum Messzeitpunkt vorherrschende aktuelle Immission (Momentanmission) des Mobilfunk-Downlinks wie in Teilkapitel 0 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 Gesamtmission dargestellt.

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

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

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	/	/	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
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

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
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
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		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
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

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 Momentan-
immission wurde an 5G-Basisstationen im 3,6-GHz-Band (MB36, sechs der zehn untersuchten
Anlagen) zusätzlich die Momentan-
immission während eines typischen Nutzungsszenarios (Li-
vestream des Fernsehprogramms der ARD [ARD]) bestimmt. In Tabelle 3.14 sind die entspre-
chenden Immissionswerte vergleichend gegenübergestellt.

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

Standort	Messpunkt	Momentan- immission 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

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.

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

Kenngröße	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

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 be-

züglich 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.

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

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

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 Feldstärkegrenzwertausschöpfungen 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.

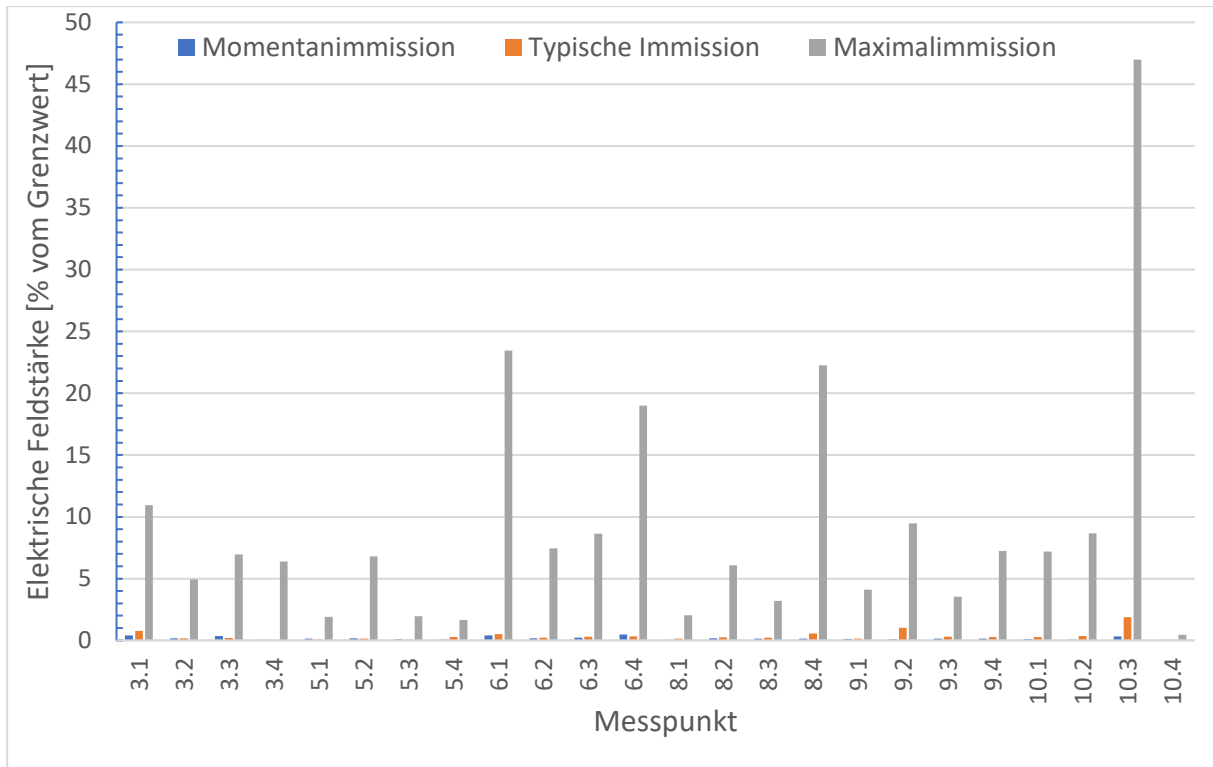


Abbildung 3.11: Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in linearer Skalierung.

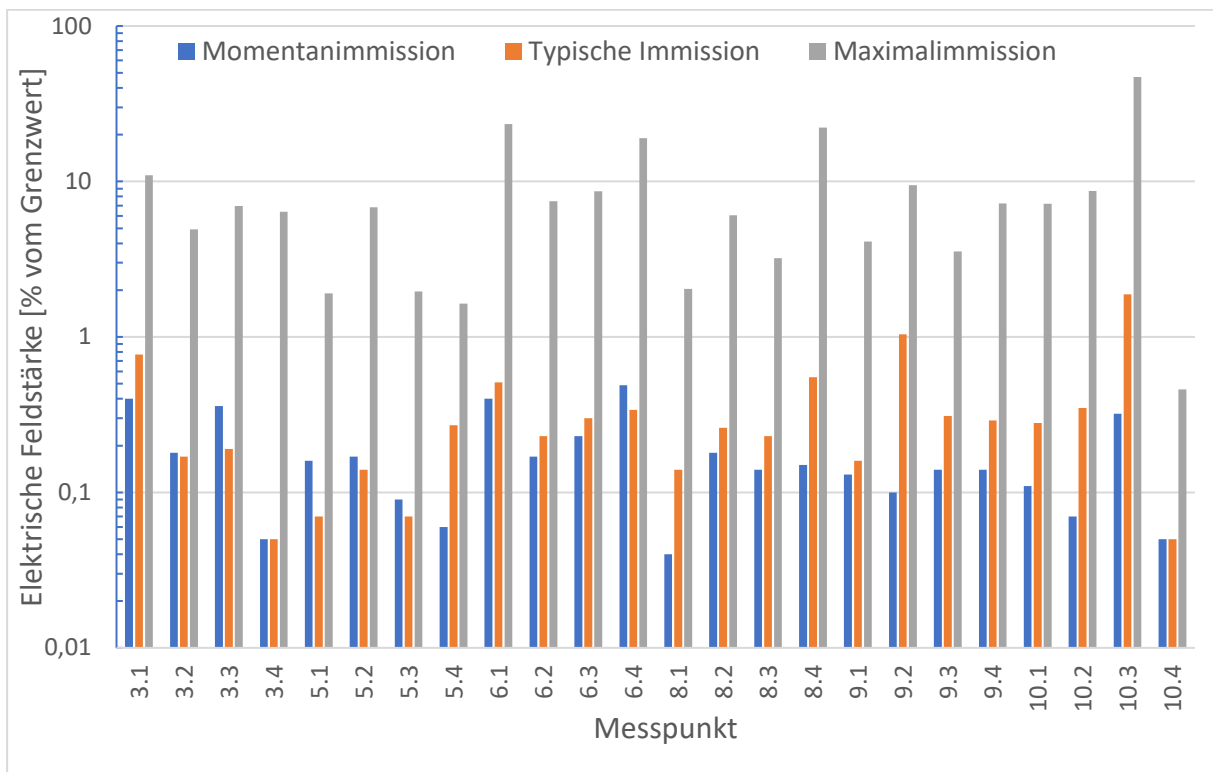


Abbildung 3.12: Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in logarithmischer Skalierung

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.

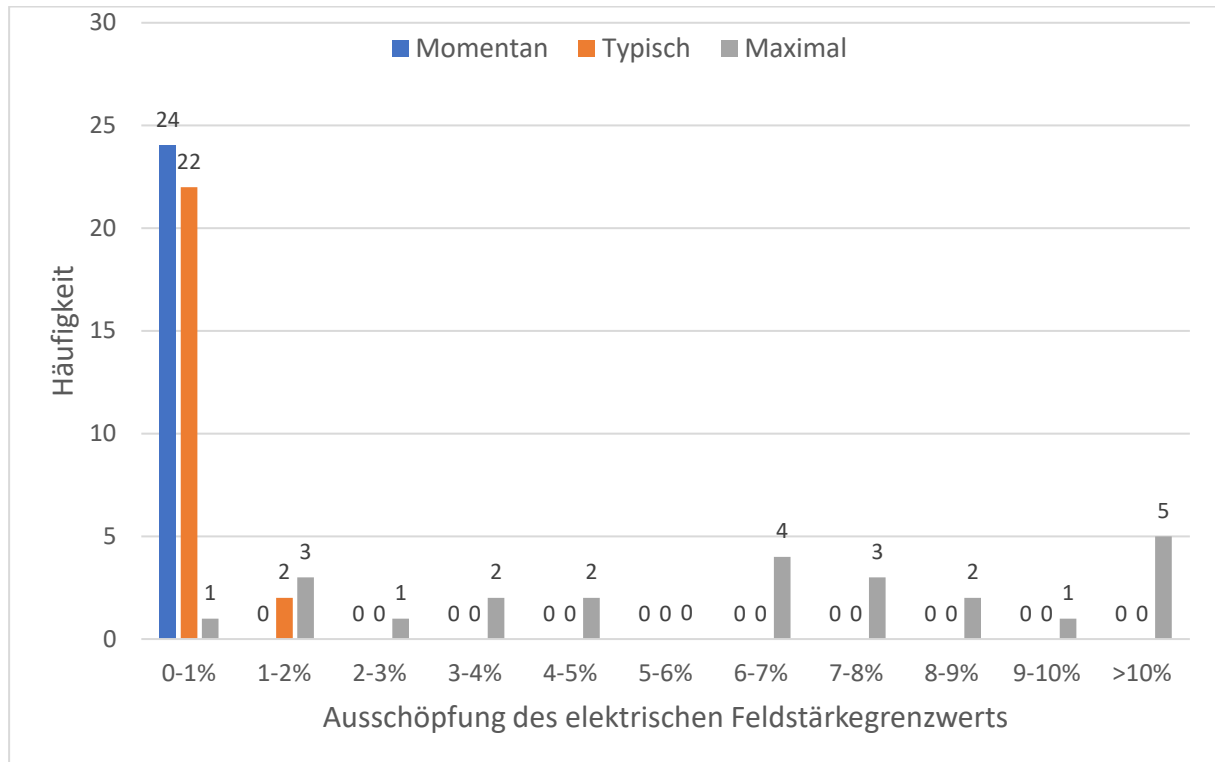


Abbildung 3.13: Verteilung der momentanen, typischen und maximalen 5G-Immission im 3,6-GHz-Band

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.

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	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 3.18: Statistische Auswertung der Momentanimmissionen 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

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.

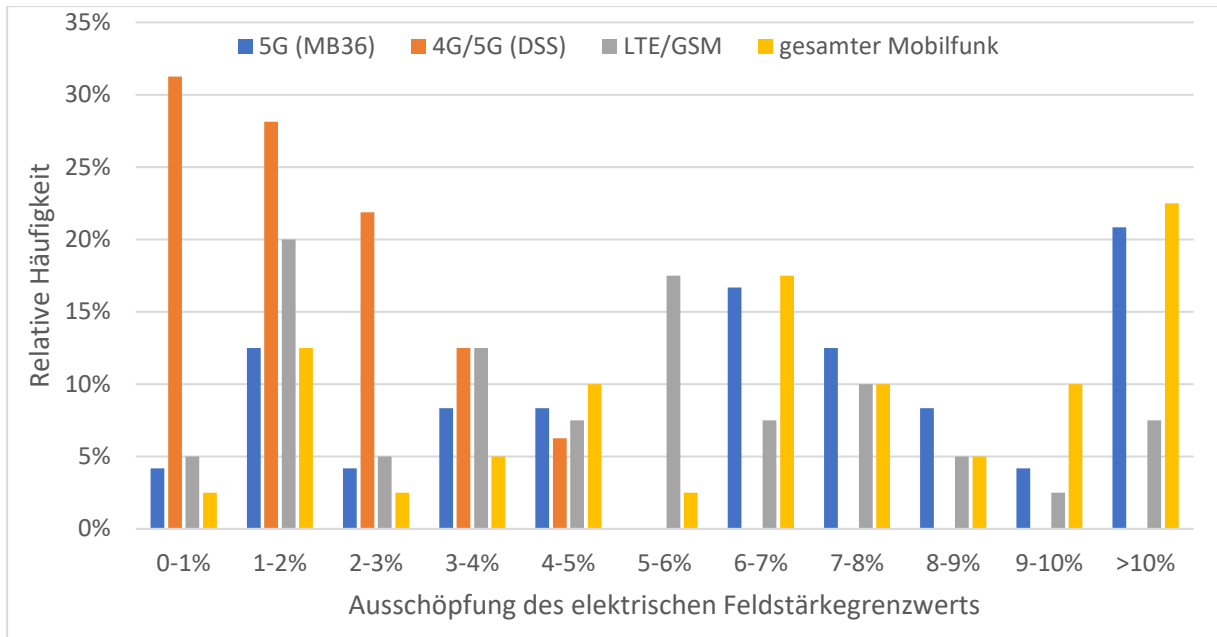


Abbildung 3.14: Verteilung der Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

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.

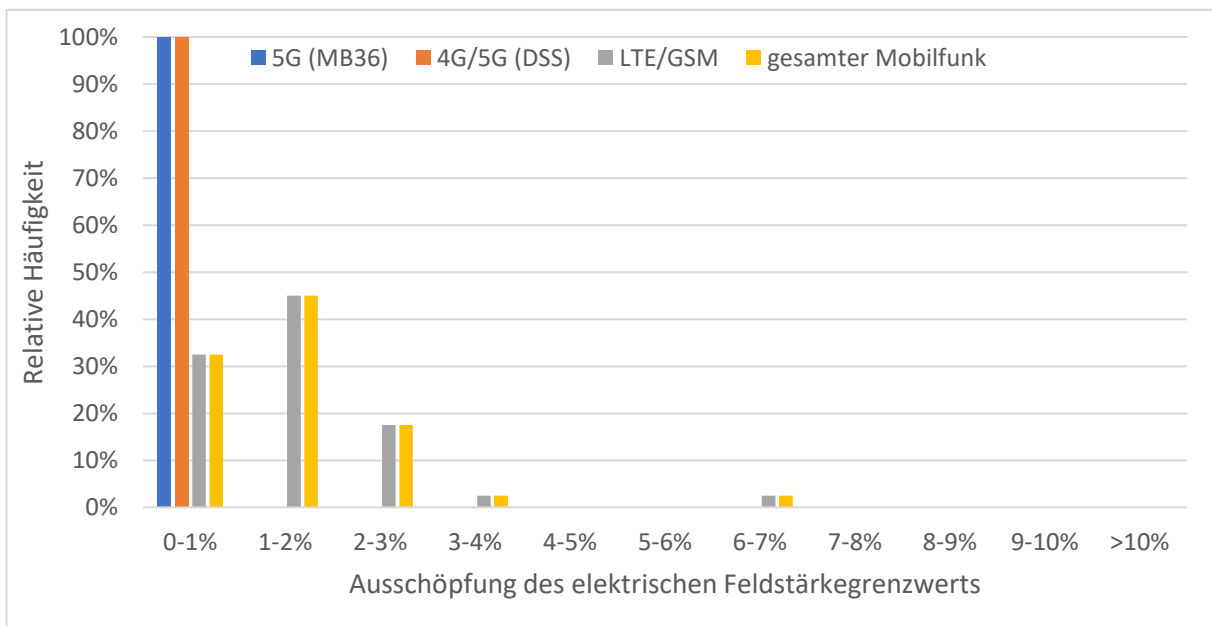


Abbildung 3.15: Verteilung der Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

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.

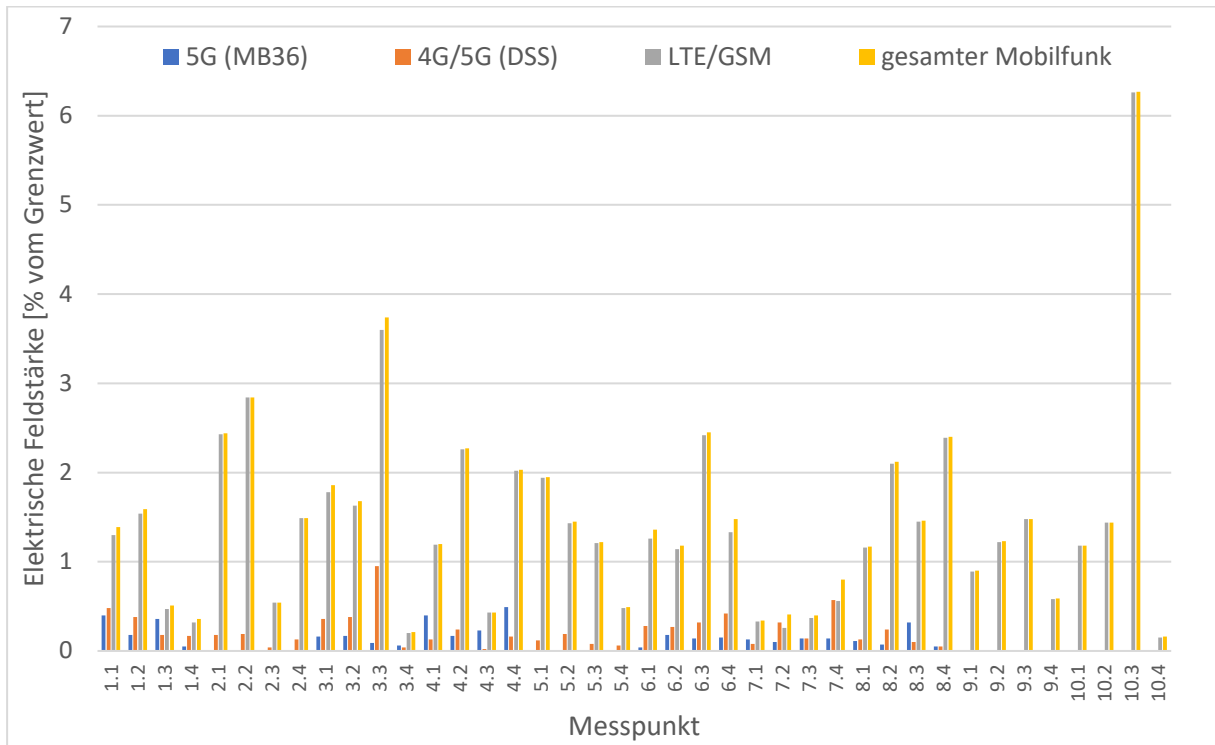


Abbildung 3.16: Übersicht über die Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

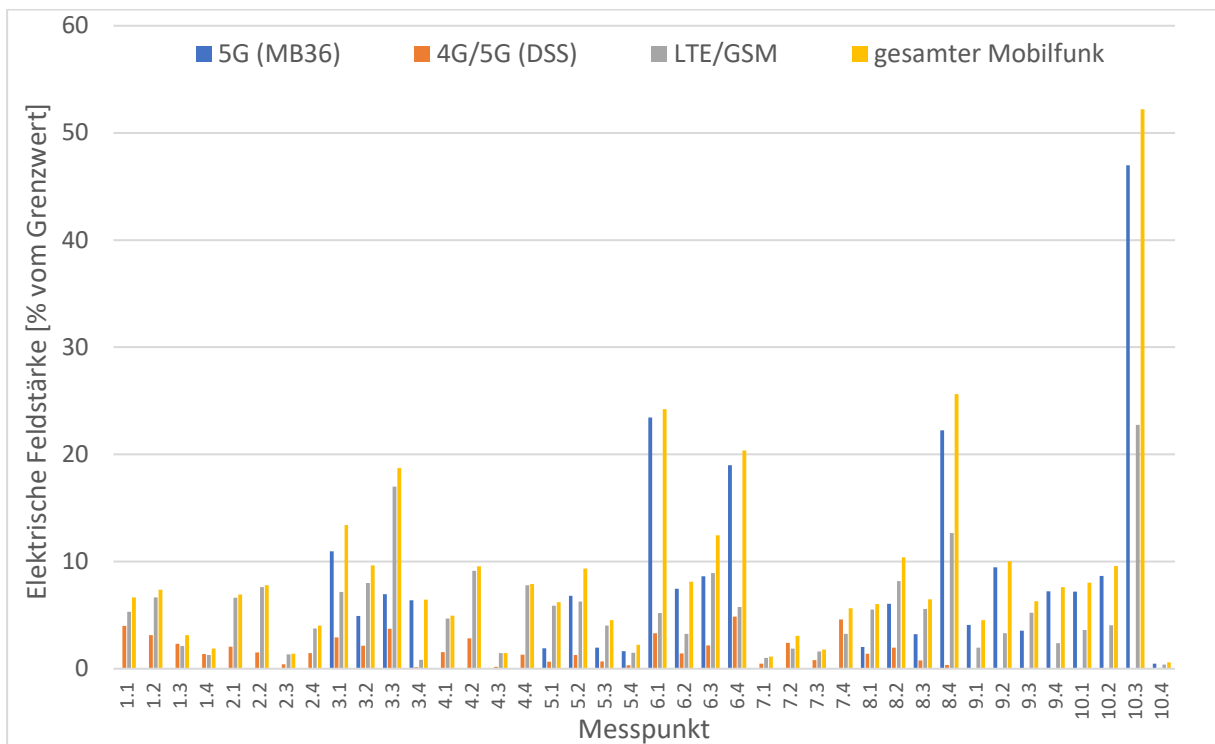


Abbildung 3.17: Übersicht über die Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.

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 [BSN+ 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.

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

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

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.

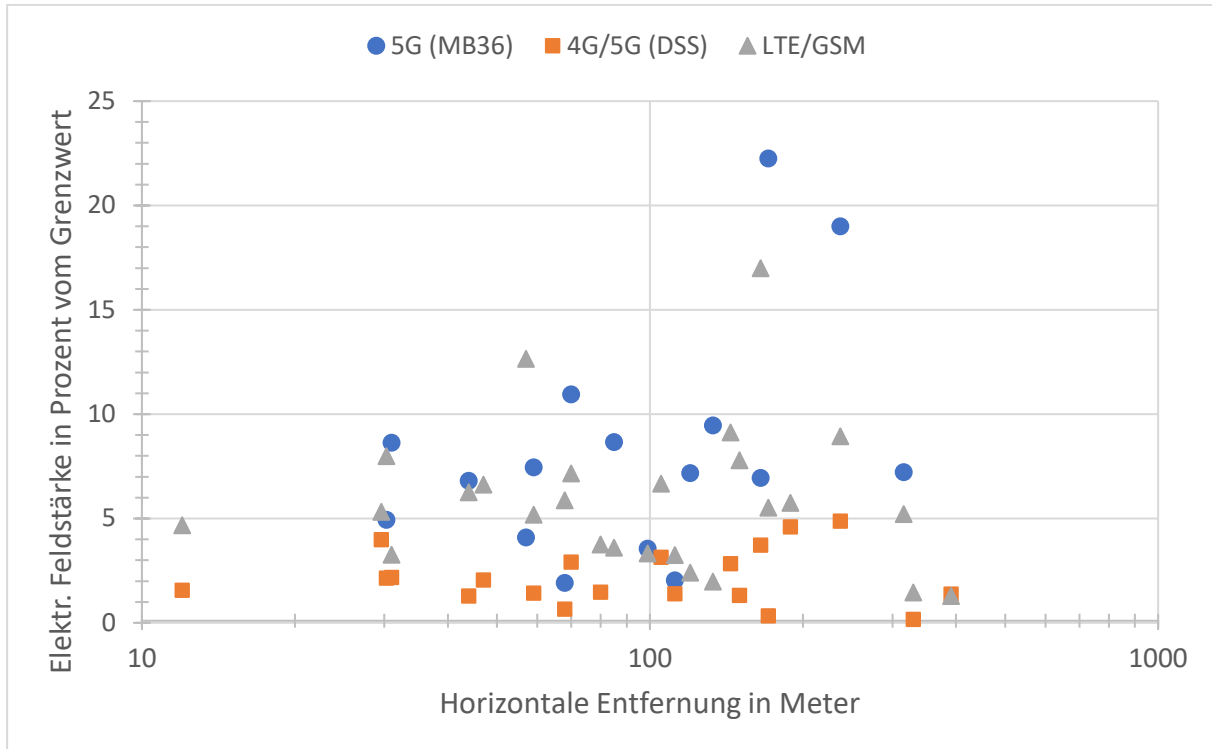


Abbildung 3.18: Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Abstandes zwischen Messpunkt und Sendeanlage.

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.

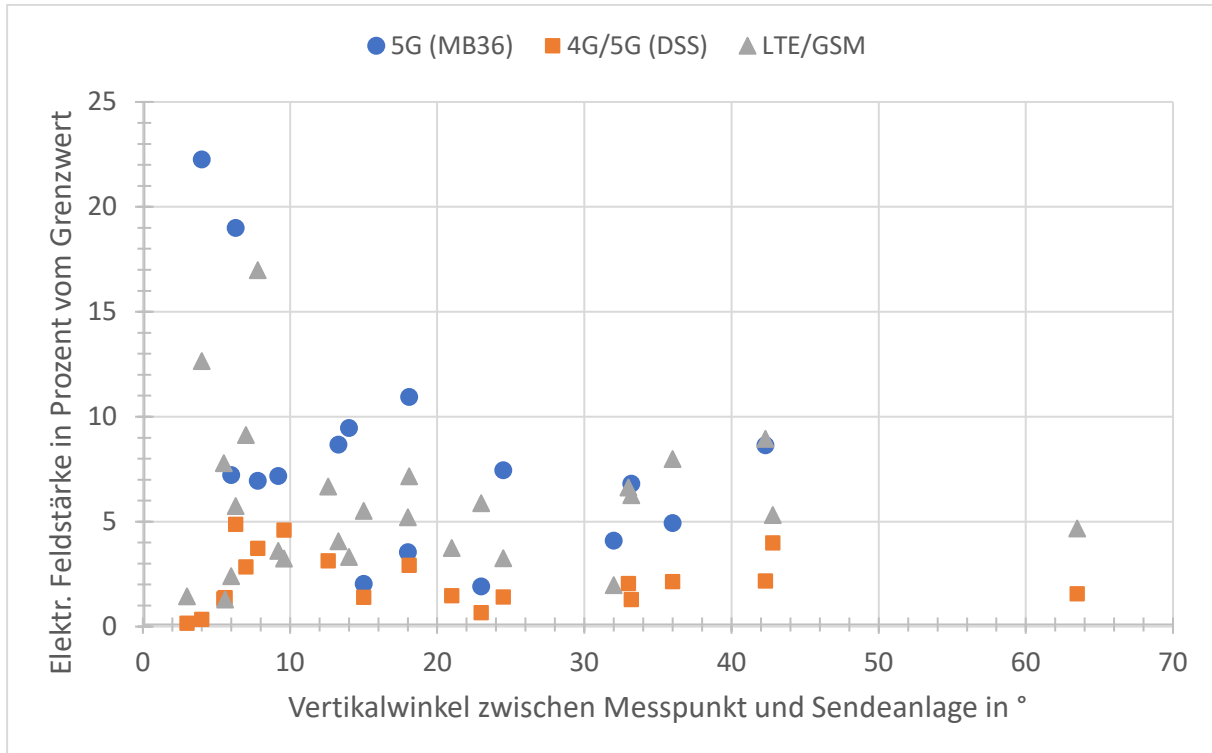


Abbildung 3.19: Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Vertikalwinkels zwischen Messpunkt und Sendeanlage.

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 Hauptsende- richtung 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 Messzeit- punkt vorherrschende Momentanimmission 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 Momentanimmission bei typischer Nutzung (TV-Livestream), im Folgenden als „typische Immission“ bezeichnet, bestimmt.

Die höchste festgestellte Maximalimmission 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 Maximalimmissionen bei 4G/5G (DSS, 4,9 %) und bei LTE/GSM (22,8 %) auf. Dieser Messpunkt stellt insofern einen Ausreißer dar, als dass die zweithöchste Maxima- limmission von 5G im 3,6-GHz-Band mit 23,5 % des Feldstärkegrenzwerts um 6 dB (Faktor 4 bezüglich der Leistung) niedriger ausfällt. Die niedrigste Maximalimmission 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 Maximalimmissionen 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 Momentanimmission 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 erklä- ren, wodurch sich die Anlagen größtenteils im Leerlauf befinden und die Momentanimmission in guter Näherung der Minimalimmission 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 Minimalimmission, als an der Maximalimmission.

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 Verti- kalwinkels zur Anlage treten die höchsten Immissionen bei kleinen Vertikalwinkeln, d.h. in grö- ßeren Entfernungen zur Sendeanlage auf. Während die Immission für Vertikalwinkel größer als etwa 15° keine sichtbare Korrelation mit dem Vertikalwinkel aufweist, ist für kleinere Verti- kalwinkel insbesondere bei 5G im 3,6-GHz-Band ein Anstieg der Immission mit fallendem Verti- kalwinkel (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 weiteren 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.

4 Messungen im Umfeld von 5G-Kleinzellenstandorten

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 dokumentierten Messungen in der Umgebung von 5G-Makrostandorten wurden die Hochfrequenzimmissionen im Umfeld von drei 5G-Kleinzellenstandorten ("Small Cells") genauer untersucht. Betreiber der Anlagen ist die Deutsche Telekom. Von den anderen beiden Firmen, die aktuell in Deutschland öffentliche 5G-Netze betreiben (Telefónica und Vodafone), erhielten wir die Aussage, dass von ihnen aktuell (d.h. im Frühjahr 2022) noch keine 5G-Small-Cells in Nordrhein-Westfalen betrieben werden.

Die drei Standorte sind in Tabelle 4.1 genauer beschrieben.

Tabelle 4.1: Untersuchte Kleinzellenstandorte

Standort Nr.	Beschreibung	Betrachtetes Funksignal
1	Landgrabenweg 151, 53227 Bonn (Telekom Campus)	5G-Signal (standalone) im Frequenzband 3,7 - 3,8 GHz (Campusnetz)
2	Heumarkt, 50667 Köln	LTE-Signal (2,15 - 2,17 GHz) mit 5G im DSS-Modus
3	Obermarkt 5, 45525 Hattingen	5G-Signal (non standalone) im Frequenzband 3,61 - 3,7 GHz

Anzumerken ist hierbei, dass am Standort 2 (Köln-Heumarkt) zusätzlich zum 5G-DSS-Signal von den Antennen noch LTE-Signale in zwei weiteren Frequenzbändern (MB18: 1,8 GHz/ MB26: 2,6 GHz) abgestrahlt werden. Die beiden anderen Standorte strahlen hingegen jeweils ausschließlich ein 5G-Signal ab.

Vorgenommen wurden die Messungen am 21. Februar 2022 von Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf und Thomas Kopacz, RWTH Aachen (IHF). Die Vorgehensweise bei Messung und Auswertung orientiert sich ebenfalls an den in Kapitel 0 beschriebenen Verfahren. Auch die eingesetzte Messausrüstung ist identisch (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Eingesetzte Messausrüstung

Gerät	Hersteller	Art	Serien. Nr.
SRM-3006	Narda Safety Test Solutions	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz – 6 GHz mit codeselektiver LTE- und 5G NR-Messoption	C-0034
3AX 350M-6G	Narda Safety Test Solutions	3-Achsen-E-Feld Antenne 350 MHz – 6 GHz	B-0090

Die genaue Lage des Standortes, die jeweils durchgeführten Messungen inklusive der Ergebnisse werden im Folgenden dokumentiert.

4.1 Standort 1: Bonn-Landgrabenweg

Am Standort 1 befindet sich eine Sektorantenne zur Abstrahlung des 5G-Signals in etwa 3,25 Meter über Grund an einem Gebäudepfeiler (siehe Abbildung 4.1). Die Antenne dient der Versorgung des Platzes vor den Gebäuden des Telekom Campus Bonn mit Signalen für ein Telekom-internes Campusnetz (Frequenzband: 3,7 - 3,8 GHz). Die Bandbreite des abgestrahlten Signals betrug zum Zeitpunkt der Messungen etwa 18,4 MHz, die abgestrahlte Leistung lag bei 10 Watt EIRP.

In der näheren Umgebung des Anlagenstandortes wurden Messungen an sieben Punkten mit verschiedener Orientierung und Horizontalentfernung (zwischen 17 und 121 Meter) zur Antenne sowie eine zusätzliche Linienmessung durchgeführt. Die Linienmessung erfolgte hierbei ungefähr in horizontaler Hauptsenderichtung der Antenne (250°). Die Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in **Abbildung 4.2** beziehungsweise Tabelle 4.3 dokumentiert.



Abbildung 4.1: Standort 1: Antenne der Kleinzellenanlage (Ericsson, Typ 6524)

Am **Messpunkt 1.1** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkanlagenstandorte verursacht werden ("Hintergrundimmission").

Messung der Immission während einer durch ein Endgerät erzeugten typischen Auslastung (ARD-Livestream) konnten an diesem Standort nicht vorgenommen werden, da keine Endgeräte verfügbar waren, die für dieses interne Netz freigeschaltet sind.

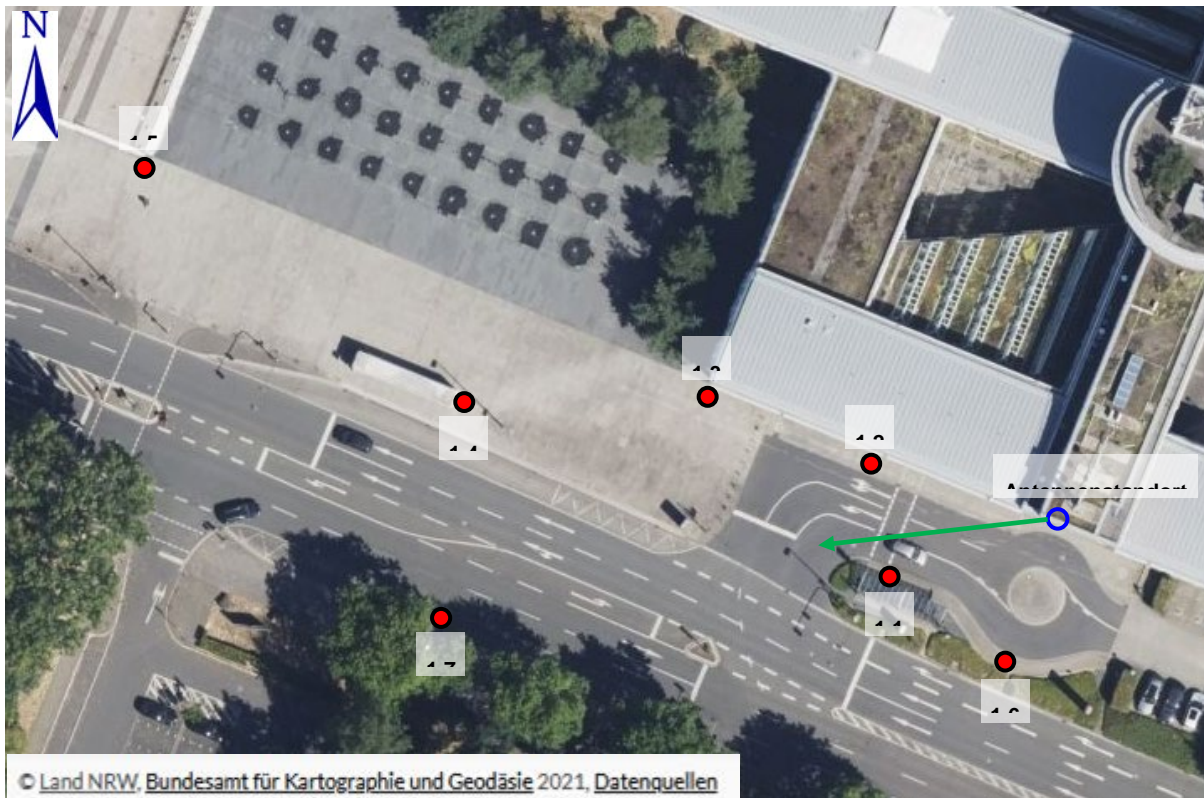


Abbildung 4.2: Standort 1: Umgebungsplan mit Antennenstandort (blauer Kreis) und Lage der Messpunkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.

Tabelle 4.3: Standort 1: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Beschreibung	Horizontaldistanz zur Anlage	Sichtverbindung zur Antenne
1.1	Fahrradständer	ca. 19 m	ja
1.2	Shuttlebushaltestelle vor T-Shop	ca. 22 m	ja
1.3	Westliche Gebäudeecke Altbau	ca. 42 m	ja
1.4	Bushaltestelle Telekom-Campus (Nord)	ca. 70 m	ja
1.5	Gebäudeecke vor Eingang Starbucks	ca. 121 m	ja
1.6	Südlich des Wendekreisels	ca. 17 m	ja
1.7	Bushaltestelle Telekom-Campus (Süd)	ca. 69 m	ja

Tabelle 4.4 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Tabelle 4.4: Standort 1: Durch die Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung an den betrachteten Punkten in der Umgebung verursachte aktuelle bzw. maximale 5G-Immissionen (Absolutwerte bzw. Immission in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV).

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke		Prozentuale Grenzwertausschöpfung	
	Aktuelle Immission	Maximalimmission	Aktuelle Immission	Maximalimmission
1.1	0,12 V/m	0,58 V/m	0,19 %	0,95 %
1.2	0,12 V/m	1,32 V/m	0,20 %	2,17 %
1.3	0,07 V/m	0,58 V/m	0,11 %	0,96 %
1.4	0,02 V/m	0,61 V/m	0,03 %	1,00 %
1.5	0,03 V/m	0,16 V/m	0,05 %	0,27 %
1.6	0,08 V/m	0,79 V/m	0,12 %	1,29 %
1.7	0,02 V/m	0,23 V/m	0,03 %	0,39 %

Die von der Kleinzellenanlage abgestrahlten 5G-Mobilfunksignale generieren an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung bei Maximalauslastung Immissionen mit feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **0,3 und 2,2 Prozent**.

Die leistungsbezogenen Unterschiedsfaktoren (d.h. das Quadrat aus dem Quotienten aus maximaler und aktueller Grenzwertausschöpfung) liegen im Bereich zwischen etwa **25 bis 1.450** (bzw. etwa **14 bis 32 dB**). Die zum Zeitpunkt der Momentanimmissionsmessung von der Antenne abgestrahlte Leistung war somit an den einzelnen Messpunkten um den Faktor 25 bis 1.450 kleiner als die maximal abstrahlbare Leistung. Offensichtlich wurde zum Zeitpunkt der Messungen kein intensiver Datenverkehr über die Anlage abgewickelt.

Die an Messpunkt 1.1 zusätzlich durchgeführte Messung der "Hintergrundimmission", verursacht durch andere in der näheren Umgebung befindliche Mobilfunkanlagen, ergab eine auf höchste Anlagenauslastung extrapolierte Immission von **1,4 V/m** bzw. eine feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung von **2,4 Prozent**.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen an Punkten entlang einer Linie durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren. Der Verlauf der Messlinie ist in **Abbildung 4.2** eingezeichnet. Die Länge der Linie beträgt 20 Meter. Um einen Vergleich der Messergebnisse mit den Resultaten einer einfachen theoretischen Feldstärkeberechnung zu ermöglichen, wurde entlang der Linie nur die Maximalimmission ermittelt.

In Tabelle 4.5 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der Messlinie dokumentiert.

Tabelle 4.5: Standort 1: Immissionsverlauf entlang der betrachteten Messlinie.

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke (Maximalimmission)	Prozentuale Grenzwertausschöpfung (Maximalimmission)
L-0,5m	0,99 V/m	1,62 %
L-1m	1,32 V/m	2,17 %
L-2m	2,12 V/m	3,47 %
L-4m	2,35 V/m	3,85 %
L-6m	2,67 V/m	4,37 %
L-8m	1,82 V/m	2,99 %
L-10m	1,48 V/m	2,43 %
L-12m	1,72 V/m	2,82 %
L-14m	1,22 V/m	2,00 %
L-16m	1,14 V/m	1,86 %
L-18m	1,01 V/m	1,66 %
L-20m	0,83 V/m	1,37 %

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten entlang der Messlinie Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **1,4 und 4,4 Prozent**.

In Abbildung 4.3 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert. Zusätzlich ist dort zum Vergleich auch die theoretische Abnahme der prozentualen Grenzwertausschöpfung mit dem Abstand zur Sendeantenne unter Annahme einer idealen Freiraumausbreitung (Friis-Formel) in Hauptstrahlrichtung einer fiktiven Antenne mit der aktuell am Standort eingestellten EIRP von 10 Watt eingezeichnet.

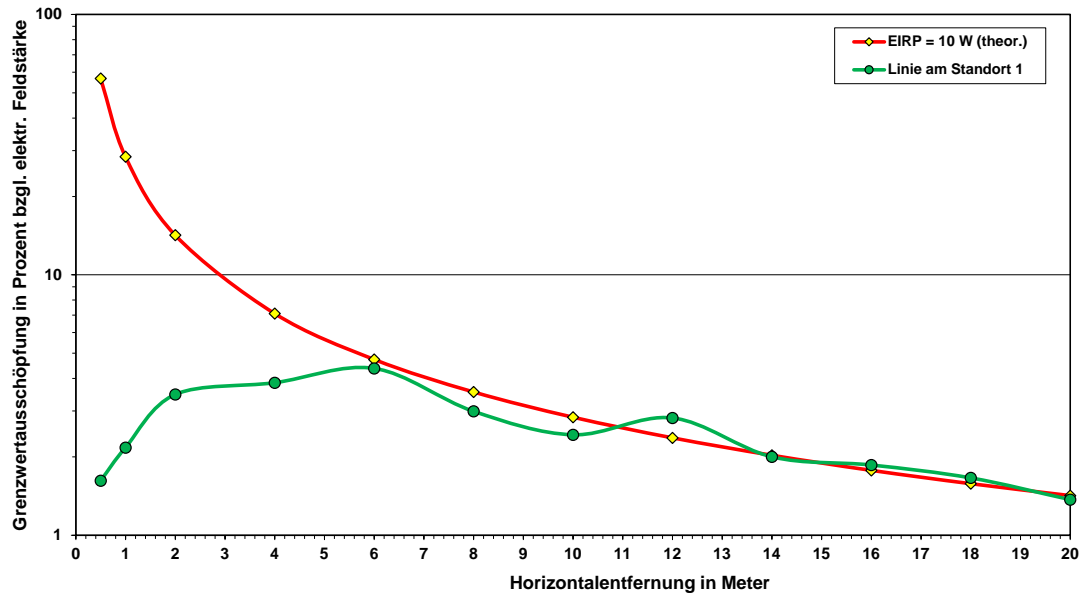


Abbildung 4.3: Ergebnisse der Linienmessung an Standort 1 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke). Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 10 Watt EIRP und idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für den im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz abzuwendenden Grenzwert (61 V/m) verdeutlicht.

Die Messergebnisse entlang der (grünen) Messlinie nähern sich mit zunehmendem Abstand der theoretischen Kurve für 10 Watt EIRP an, da man sich dort innerhalb des vertikalen Strahlungskegels der Antenne befindet. Mit geringer werdender Horizontaldistanz zum Anlagenstandort vergrößert sich der Abstand zur theoretischen (roten) Kurve, was sich folgendermaßen begründen lässt: Die Immissionen wurden nur im realistischen Aufenthaltsbereich von Personen ermittelt (Bodennähe, d.h. bis zirka zwei Meter über der Straße), die Mobilfunkantenne ist jedoch in einer Höhe von etwa 3,25 Meter über Grund montiert und sendet bevorzugt horizontal nach vorne. Im unmittelbaren Nahbereich befinden sich die Messorte somit nicht mehr optimal im vertikalen Strahlungskegel der Antenne, was die geringeren gemessenen Immissionen bedingt.

4.2 Standort 2: Köln-Heumarkt

Am Standort 2 sind an den vier Seiten der Überdachung des Eingangs zur Tiefgarage "Heumarkt" vier Sektorantennen zur Abstrahlung von 4G- und 5G-Signalen in etwa 2,85 Meter Höhe montiert (siehe Abbildung 4.4). Die Antennen dienen der Versorgung des Heumarktes mit Signalen für das Mobilfunknetz der Telekom. Die 5G-Abstrahlung erfolgt bei diesem Standort in "Dynamic Spectrum Sharing" (DSS) mit einem 4G(LTE)-Signal im Frequenzbereich um 2.160 MHz (MB21). Die Bandbreite des abgestrahlten DSS-Signals beträgt etwa 18 MHz.

Zusätzlich zum 4G/5G-DSS-Signal werden von den Antennen des Standortes noch reine 4G-Signale in zwei weiteren Frequenzbändern (MB18 und MB26) abgestrahlt. Diese tragen ebenfalls zur Immission an den betrachteten Punkten bei. GSM-Signale werden von den Antennen hingegen nicht abgestrahlt.

In der näheren Umgebung des Anlagenstandortes wurden Messungen aller vom Anlagenstandort abgestrahlten Mobilfunksignale an sechs Punkten mit verschiedener Orientierung und Horizontalentfernung (zwischen 9 und 44 Meter) zu den Antennen, sowie eine zusätzliche Liniemessung in horizontaler Hauptsenderichtung (0°) einer der am Standort vorhandenen Sektorantennen durchgeführt. Die Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Abbildung 4.5 beziehungsweise Tabelle 4.6 dokumentiert.



Abbildung 4.4: Standort 2 (Blick von Osten auf den Eingang zur Tiefgarage): Auf dem Foto zu sehen sind die Antennen der Kleinzellenanlage für den Ost- und den Nordsektor (Commscope, Typ CMAX-DM60-CPUSEi53).

Am **Messpunkt 2.4** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkanlagenstandorte verursacht werden.

Zudem war es möglich, an diesem Standort auch eine Messung der Immission während einer durch ein Endgerät erzeugten typischen Nutzung (ARD-Livestream) vorzunehmen.



Abbildung 4.5: Standort 2: Umgebungsplan mit Antennenstandorten (blaue Kreise) und Lage der Messpunkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.

Tabelle 4.6: Standort 2: Beschreibung der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Antenne
2.1	Laterne nördlich des Standortes	ca. 13 m	ja
2.2	Baum nordwestlich des Standortes	ca. 9 m	ja
2.3	Vor Heumarkt 77: Laterne am Gehwegrand	ca. 24 m	ja
2.4	Vor Heumarkt 72 (Südwestecke des Gebäudes)	ca. 31 m	ja
2.5	Vor Heumarkt 68 (Vor Garagentor)	ca. 33 m	ja
2.6	Heumarkt 52 / 54 (Eimündung Halbmondgässchen)	ca. 44 m	ja

Um eine Vergleichbarkeit mit den beiden anderen untersuchten Standorten zu gewährleisten, sind in Tabelle 4.7 zunächst nur die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten 4G/5G-DSS-Immissionen dokumentiert.

Tabelle 4.7: Standort 2: Durch die Kleinzellenanlage an den betrachteten Punkten in der Umgebung verursachte aktuelle bzw. maximale 4G/5G-DSS-Immissionen (Absolutwerte bzw. Immission in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung).

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke		Prozentuale Grenzwertausschöpfung	
	Aktuelle Immission	Maximalimmission	Aktuelle Immission	Maximalimmission
2.1	0,35 V/m	2,58 V/m	0,58 %	4,23 %
2.2	0,17 V/m	1,88 V/m	0,28 %	3,08 %
2.3	0,18 V/m	1,30 V/m	0,29 %	2,13 %
2.4	0,17 V/m	1,14 V/m	0,28 %	1,87 %
2.5	0,15 V/m	1,32 V/m	0,25 %	2,17 %
2.6	0,15 V/m	0,85 V/m	0,24 %	1,40 %

Die von den Antennen der Kleinzellenanlage abgestrahlten 4G/5G-DSS-Mobilfunksignale generieren an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung bei Maximalauslastung Immissionen mit feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **1,4 und 4,2 Prozent**.

Die Unterschiedsfaktoren zwischen maximaler und aktueller 4G/5G-DSS-Immission liegen leistungsbezogen etwa im Bereich zwischen **34 und 120 (15 und 21 dB)**. Die zum Zeitpunkt der Momentanimmisionsmessung von der Antenne abgestrahlte Leistung war an den einzelnen Messpunkten somit um den Faktor 34 bis 120 kleiner als die maximal abstrahlbare Leistung. Offensichtlich wurde zum Zeitpunkt der Messungen kein intensiver Datenverkehr über die 4G/5G-DSS-Systeme abgewickelt.

Die an Messpunkt 2.4 zusätzlich durchgeführte Messung der "Hintergrundimmission", verursacht durch andere in der näheren Umgebung befindliche Mobilfunkanlagen, ergab eine auf höchste Anlagenauslastung extrapolierte Immission von **1,0 V/m** bzw. eine feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung von **1,7 Prozent**.

In Tabelle 4.8 sind die aus Tabelle 4.7 bereits bekannten Immissionen, verursacht durch das 4G/5G-DSS-Signal, der vom Standort generierten Gesamtimmision für Maximalauslastung (d.h. 4G + 4G/5G-DSS) gegenübergestellt.

Tabelle 4.8: Standort 2: Durch die Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung an den betrachteten Punkten in der Umgebung verursachte 4G/5G-DSS-Immissionen im Vergleich zur Gesamtimmision (Absolutwerte bzw. Immission in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV).

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke		Prozentuale Grenzwertausschöpfung	
	4G/5G-DSS-Immission	Gesamtimmision	4G/5G-DSS-Immission	Gesamtimmision
2.1	2,58 V/m	4,90 V/m	4,23 %	8,24 %
2.2	1,88 V/m	3,35 V/m	3,08 %	5,61 %
2.3	1,30 V/m	2,24 V/m	2,13 %	3,74 %
2.4	1,14 V/m	2,60 V/m	1,87 %	4,39 %
2.5	1,32 V/m	2,80 V/m	2,17 %	4,72 %
2.6	0,85 V/m	2,11 V/m	1,40 %	3,55 %

Die von der Kleinzellenanlage in der Summe abgestrahlten Mobilfunksignale generieren an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung Immissionen mit feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **3,6 und 8,2 Prozent**. Über die sechs Punkte gemittelt, trägt das 4G/5G-DSS-Signal zu dieser Gesamtimmission mit einem leistungsbezogenen Anteil von etwa **24 Prozent** bei, was gut zum vom Betreiber angegebenen Anteil der Leistung der 4G/5G-DSS-Signals an der gesamten vom Standort abgestrahlten Leistung (zirka 22 Prozent) passt.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen an Punkten entlang einer Linie durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren. Der Verlauf der Messlinie ist in Abbildung 4.5 eingezeichnet. Die Länge der Linie beträgt 20 Meter. Um einen Vergleich der Messergebnisse mit den Resultaten einer einfachen theoretischen Feldstärkeberechnung durchführen zu können, wurde entlang der Linie nur die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Immission ermittelt.

In Tabelle 4.9 sind die Ergebnisse der Messungen entlang dieser Linie dokumentiert.

Die zusätzlich von den Antennen am Standort abgestrahlten reinen 4G Signale wurden ebenfalls gemessen und in Abbildung 4.5 dokumentiert, so dass einen Größenvergleich mit der Immission durch die 4G/5G-DSS-Signale möglich wird (Darstellung wiederum als absolute Feldstärke und prozentuale Grenzwertausschöpfung bei maximaler Anlagenauslastung).

Tabelle 4.9: Standort 2: Vergleichender Immissionsverlauf entlang der betrachteten Messlinie.

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke		Prozentuale Grenzwertausschöpfung	
	4G/5G-DSS-Immission (MB21)	4G-Immission (MB18 und MB26)	4G/5G-DSS-Immission (MB21)	4G-Immission (MB18 und MB26)
L-0,5m	2,92 V/m	6,16 V/m	4,78 %	10,19 %
L-1m	7,38 V/m	12,76 V/m	12,10 %	21,60 %
L-2m	7,78 V/m	13,27 V/m	12,90 %	22,46 %
L-4m	5,25 V/m	9,88 V/m	8,61 %	16,66 %
L-6m	3,63 V/m	6,99 V/m	5,95 %	11,78 %
L-8m	3,10 V/m	5,97 V/m	5,08 %	10,07 %
L-10m	2,42 V/m	5,22 V/m	3,96 %	8,77 %
L-12m	2,61 V/m	4,59 V/m	4,29 %	7,74 %
L-14m	2,25 V/m	4,39 V/m	3,69 %	7,42 %
L-16m	1,77 V/m	3,75 V/m	2,91 %	6,33 %
L-18m	1,97 V/m	3,60 V/m	3,23 %	6,06 %
L-20m	1,59 V/m	3,85 V/m	2,60 %	6,50 %

Die von der Kleinzellenanlage abgestrahlten 4G/5G-DSS-Signale (MB21) generieren an den untersuchten Punkten entlang der Messlinie Immissionen mit feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **2,6 und 12,9 Prozent**. Die ebenfalls von den Antennen der Kleinzellenanlage abgestrahlten reinen 4G-Signale (MB18 und MB26) verursachen aufgrund der größeren abgestrahlten Leistung (EIRP) auch größere feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **6,1 und 22,5 Prozent**. In Abbildung 4.6 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

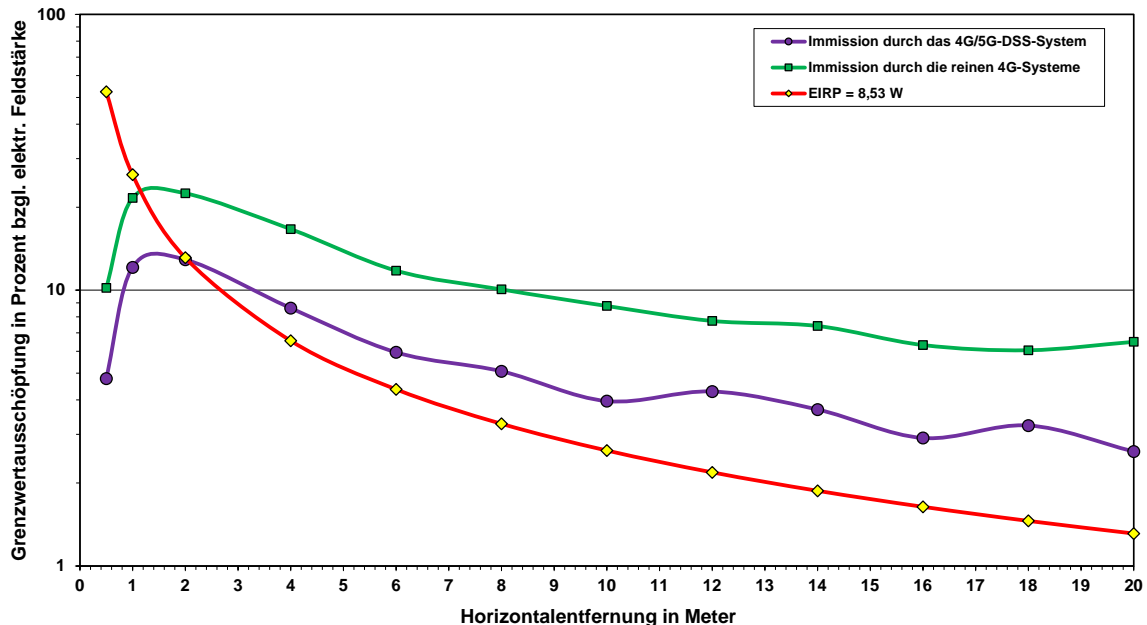


Abbildung 4.6: Ergebnisse der Linienmessung an Standort 2 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke bei Maximalauslastung). Die Messergebnisse für das 4G/5G-DSS-Signal und die reinen 4G-Immissionen sind getrennt dargestellt. Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung (Grenzwert: 61 Volt/m) für die durch das 4G/5G-DSS-Signal abgestrahlte EIRP (8,53 Watt) bei idealer Freiraumbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne verdeutlicht.

Die Messungen ergaben für das 5G/4G-DSS-Signal in unmittelbarer Nähe des Antennenstandortes im Vergleich zur theoretischen Kurve (rot) in gleicher Weise wie bei Anlagenstandort 1 (Bonn) deutlich niedrigere Messwerte. Dies ist auch hier durch die Tatsache begründet, dass sich die Messpunkte im unmittelbaren Nahbereich der auf einer Höhe von etwa 2,85 Meter über dem Boden montierten Antenne noch deutlich außerhalb des vertikalen Strahlungskegels der Antenne befinden.

In größerer Entfernung liefern die Messungen hingegen höhere Werte, als unter Annahme der idealen Freiraumbreitung berechnet wurden. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Messpunkte mit zunehmendem Abstand immer mehr in den vertikalen Strahlungskegel der Antenne gelangen und sich zudem nördlich des Standortes in einer Entfernung von etwa 30 Meter senkrecht zur Ausbreitungsrichtung eine geschlossene Häuserfront befindet, welche die ankommende Funkwelle zurück zum Standort reflektiert (siehe Abbildung 4.5). Dies führt an den Messorten entlang der Linie zu einer Überlagerung der von der Antenne abgestrahlten und der von Norden nach Süden zurücklaufenden Welle, was wiederum - bei passender Phasenlage - zu einer lokalen Vergrößerung der Felder führt. Diese Überhöhungen

werden bei der für die Messungen verwendeten "Schwenkmethode" detektiert und vom Messgerät als Ergebnis angezeigt.

Die Messungen am Anlagenstandort 1 (Bonn) zeigen diesen Effekt nicht. Hier stimmen die Messergebnisse in größerer Entfernung sehr gut mit den für ideale Freiraumausbreitung prognostizierten Werten überein (siehe Abbildung 4.3). In Ausbreitungsrichtung der Welle befindet sich allerdings auch kein Gebäude, das eine Reflexion der Funkwelle zurück zum Antennenstandort erzeugen könnte (siehe Abbildung 4.2).

Bereits in früheren Untersuchungen zu rechnerischen Immissionsprognosen wurde auf die Tatsache hingewiesen, dass das Modell der "idealen Freiraumausbreitung" in reflektiver Umgebung zu einer nennenswerten systematischen Unterbewertung der Immission führen kann [BSW 06].

Um näher zu quantifizieren, wie sehr sich der auf maximale Anlagenleistung hochgerechnete Immissionswert von der durch eine "typische Nutzung" verursachten Immission unterscheidet, wurde an den sechs betrachteten Punkten in der Umgebung dieses Standortes die aktuelle Immission zweimal hintereinander ermittelt, wobei bei der zweiten Messung gleichzeitig durch ein 5G-fähiges Endgerät über den Standort ein Video gestreamt wurde (ARD-Livestream). Der Vergleich zwischen aktueller Immission ohne und mit provoziertem Datentransfer ist in Tabelle 4.10 dokumentiert. Dort wird wieder zwischen den Immissionen, verursacht nur durch das 4G/5G-DSS-Signal und der vom Standort erzeugten Gesamtimmission unterschieden. Zusätzlich ist zum Vergleich noch für jeden Punkt die maximal mögliche Immission (aus Tabelle 4.8) angegeben.

Tabelle 4.10: Standort 2: Veränderung der gemessenen aktuellen Immissionen aufgrund eines durch einen Videostream erzwungenen Datentransfers. Zusätzlich ist die an den Punkten ermittelte Maximalimmission (aus Tabelle 4.9) angegeben (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke).

Messpunkt	Aktuelle Immission (ohne Videostream)		Aktuelle Immission (mit Videostream)		Maximalimmission	
	Nur 4G/5G-DSS	Gesamt	Nur 4G/5G-DSS	Gesamt	Nur 4G/5G-DSS	Gesamt
2.1	0,58 %	1,54 %	0,56 %	2,03 %	4,23 %	8,24 %
2.2	0,28 %	0,69 %	0,42 %	1,19 %	3,08 %	5,61 %
2.3	0,29 %	0,76 %	0,34 %	0,90 %	2,13 %	3,74 %
2.4	0,28 %	0,78 %	0,29 %	0,97 %	1,87 %	4,39 %
2.5	0,25 %	0,68 %	0,33 %	1,04 %	2,17 %	4,72 %
2.6	0,24 %	0,71 %	0,29 %	0,78 %	1,40 %	3,55 %

Tabelle 4.10 kann man entnehmen, dass die gemessenen aktuellen Immissionen (auch bei Nutzung des Livestreams) an allen untersuchten Punkten *sehr deutlich* unter der theoretisch möglichen Maximalimmission bleiben. Die gefundenen Unterschiedsfaktoren zwischen maximaler und aktueller Immission liegen für das 4G/5G-DSS-Signal leistungsbezogen etwa zwischen **24 und 58 (14 und 18 dB)**. Die Anlage wurde also durch den Livestream weiterhin nicht sehr stark ausgelastet.

Durch den erzwungenen Datentransfer konnte eine grundsätzliche Zunahme der gemessenen Immissionswerte beobachtet werden. Allerdings vergrößert sich hierbei nicht nur die Immission beim 4G/5G-DSS-Signal, sondern auch die Immissionen, verursacht durch die anderen von den Antennen des Standortes abgegebenen Signale. Dies liegt vermutlich daran, dass das 5G-fähige Endgerät nicht erzwingen kann, dass der Livestream ausschließlich über das 4G/5G-DSS-Signal übertragen wird. Das Netzwerk kann die Daten zum Teil oder komplett auch über die in den anderen Bändern (MB18 bzw. MB26) zusätzlich vorhandenen 4G-Signale an das Endgerät übermitteln ("carrier aggregation").

4.3 Standort 3: Hattingen-Obermarkt 5

Am Standort 3 befindet sich eine Telefonsäule der Telekom, in deren Spitze in einer Höhe von etwa 2,35 Meter Rundstrahlantennen einer Mobilfunkbasisstation installiert sind. Die Antennen dienen der Versorgung des umliegenden Bereichs Fußgängerzone mit Signalen für das Mobilfunknetz der Telekom. Die Antennen strahlen ausschließlich ein 5G-Signal im 3,6-GHz-Frequenzbereich (3,61 - 3,7 GHz) ab. Die Signalbandbreite des 5G-Signals beträgt 88,2 MHz, die abgestrahlte Leistung 5,9 Watt EIRP.

In der näheren Umgebung des Anlagenstandortes wurden Messungen an sechs Punkten mit verschiedener Orientierung und Horizontalentfernung (zwischen 0,5 und 34 Meter) zur Telefonsäule sowie eine zusätzliche Linienmessung durchgeführt. Die Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Abbildung 4.7 beziehungsweise Tabelle 4.11 dokumentiert.



Abbildung 4.7: Standort 3: Telefonsäule am Obermarkt in Hattingen Die Antennen befinden sich in der Spitze der Telefonsäule.

Am **Messpunkt 3.4** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkanlagenstandorte verursacht werden.

Zudem war es möglich, an diesem Standort auch eine Messung der Immission während einer durch ein Endgerät erzeugten typischen Nutzung (ARD-Livestream) vorzunehmen.

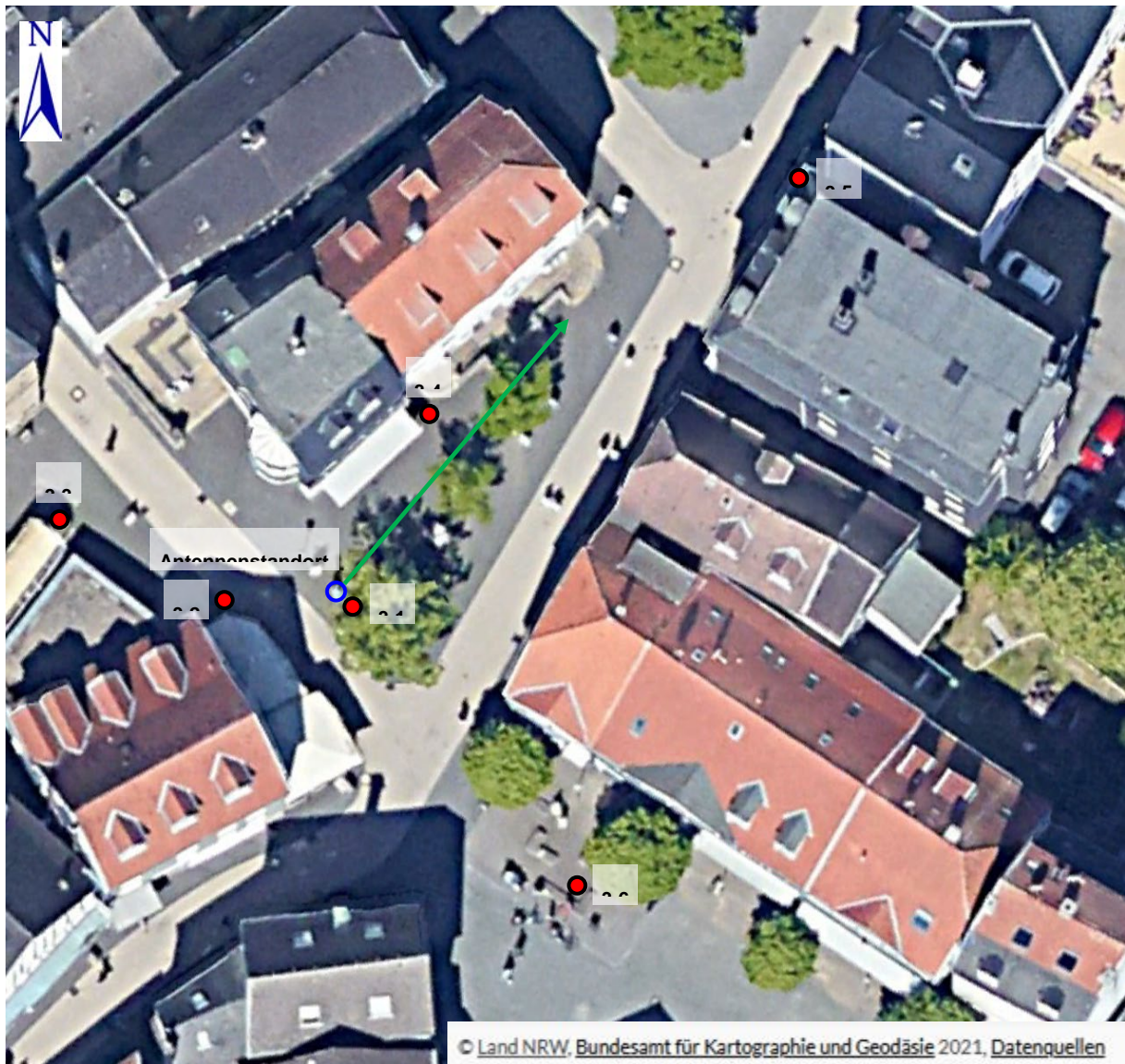


Abbildung 4.8: Standort 3: Umgebungsplan mit Antennenstandort (blauer Kreis) und Lage der Mess-punkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.

Tabelle 4.11: Standort 3: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Beschreibung	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Antenne
3.1	Direkt an der Telefonsäule	ca. 0,5 m	ja
3.2	Obermarkt 1 (Außenbereich Gastronomie)	ca. 7 m	ja
3.3	Obermarkt 1 (Eingang Gastronomie)	ca. 16 m	ja
3.4	Zwischen Obermarkt 5 und 7	ca. 12 m	ja
3.5	Einmündung Gasse zwischen Obermarkt 8 und 12	ca. 34 m	ja
3.6	Untermarkt 1 (Sitzgruppe vor dem Gebäude)	ca. 21 m	ja

Tabelle 4.12 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Tabelle 4.12: Standort 3: Durch die Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung an den betrachteten Punkten in der Umgebung verursachte aktuelle bzw. maximale 5G-Immissionen (Absolutwerte bzw. Immission in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV).

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke		Prozentuale Grenzwertausschöpfung	
	Aktuelle Immission	Maximalimmission	Aktuelle Immission	Maximalimmission
3.1	0,25 V/m	4,24 V/m	0,41 %	6,95 %
3.2	0,08 V/m	1,27 V/m	0,12 %	2,07 %
3.3	0,05 V/m	1,42 V/m	0,08 %	2,33 %
3.4	0,07 V/m	1,42 V/m	0,11 %	2,33 %
3.5	0,02 V/m	0,41 V/m	0,04 %	0,68 %
3.6	0,03 V/m	0,53 V/m	0,05 %	0,87 %

Die von der Kleinzellenanlage abgestrahlten 5G-Mobilfunksignale generieren an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung bei Maximalauslastung Immissionen mit feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **0,7 und 7,0 Prozent**.

Die Unterschiedsfaktoren zwischen maximaler und aktueller Immission liegen leistungsbezogen etwa im Bereich zwischen **280 und 900 (24 und 30 dB)**. Die zum Zeitpunkt der Momentanimmisionsmessung von der Antenne abgestrahlte Leistung war an den einzelnen Messpunkten somit um den Faktor 280 bis 900 kleiner als die maximal abstrahlbare Leistung. Offensichtlich wurde zum Zeitpunkt der Messungen kein intensiver Datenverkehr über die Anlage abgewickelt.

Die an Messpunkt 3.4 zusätzlich durchgeführte Messung der "Hintergrundimmission", verursacht durch andere in der näheren Umgebung befindliche Mobilfunkanlagen, ergab eine auf höchste Anlagenauslastung extrapolierte Immission von **0,6 V/m** bzw. eine feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung von **1,3 Prozent**.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen an Punkten entlang einer Linie durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren. Der Verlauf der Messlinie ist in Abbildung 4.8 eingezeichnet. Die Länge der Linie beträgt 20 Meter. Um einen Vergleich der Messergebnisse mit den Resultaten einer einfachen theoretischen Feldstärkeberechnung zu ermöglichen, wurde entlang der Linie nur die Maximalimmission ermittelt.

In Tabelle 4.13 sowie Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der Messlinie dokumentiert. Zusätzlich ist in Abbildung 4.9 zum Vergleich auch die theoretische Abnahme der prozentualen Grenzwertausschöpfung mit dem Abstand zur Sendeantenne unter Annahme einer idealen Freiraumausbreitung (Friis-Formel) in Hauptstrahlrichtung einer fiktiven Antenne mit der aktuell am Standort eingestellten EIRP von 5,9 Watt eingezeichnet.

Tabelle 4.13: Standort 3: Immissionsverlauf entlang der betrachteten Messlinie.

Messpunkt	Absolutwert der elektrischen Feldstärke (Maximalimmission)	Prozentuale Grenzwertausschöpfung (Maximalimmission)
L-0,5m	5,85 V/m	9,59 %
L-1m	2,12 V/m	3,48 %
L-2m	2,52 V/m	4,14 %
L-4m	1,87 V/m	3,07 %
L-6m	1,29 V/m	2,12 %
L-8m	1,21 V/m	1,98 %
L-10m	1,28 V/m	2,10 %
L-12m	0,89 V/m	1,45 %
L-14m	0,87 V/m	1,42 %
L-16m	1,17 V/m	1,91 %
L-18m	0,98 V/m	1,61 %
L-20m	0,78 V/m	1,28 %

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten entlang der Messlinie Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa **1,3 und 9,6 Prozent**.

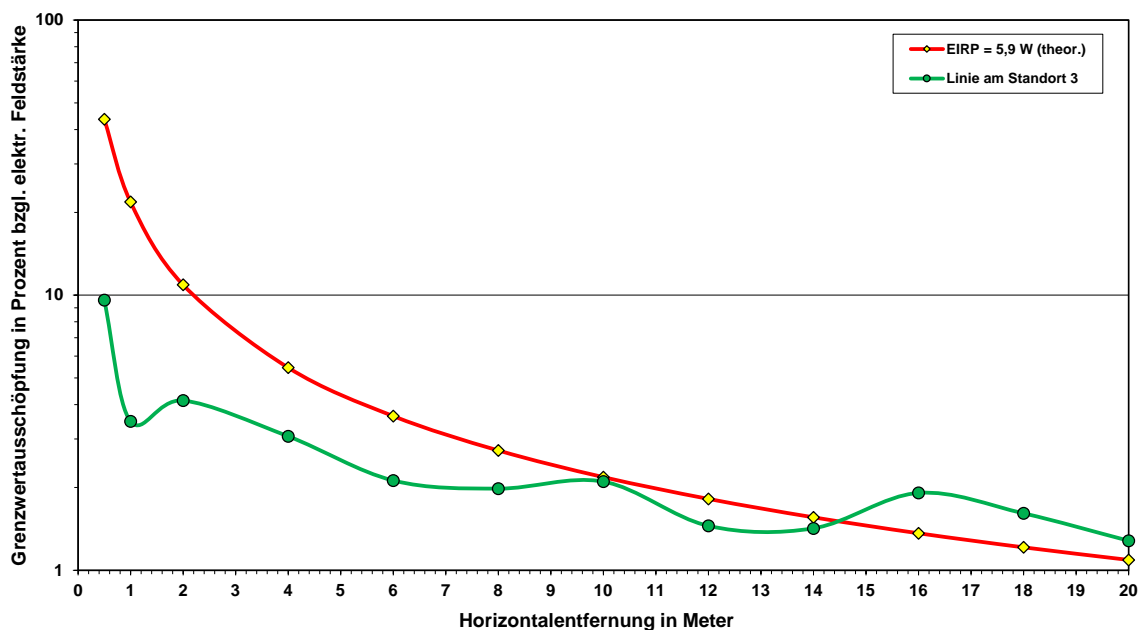


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Linienmessung an Standort 3 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke). Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 5,9 Watt EIRP und idealer Freiraumbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für den im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz anzuwendenden Grenzwert (61 V/m) verdeutlicht.

Die Messergebnisse entlang der Linie nähern sich mit zunehmendem Abstand der theoretischen Kurve für 5,9 Watt EIRP an, da man sich dort im vertikalen Strahlungskegel der Antenne befindet. Mit geringer werdender Horizontalentfernung zum Anlagenstandort vergrößert sich

der Abstand zur theoretischen (roten) Kurve, was sich - analog zu den vergleichbaren Beobachtungen bei den Anlagenstandorten 1 und 2 - folgendermaßen begründen lässt: Die Immissionen wurden nur im realistischen Aufenthaltsbereich von Personen ermittelt (Bodennähe, d.h. bis zirka zwei Meter über der Straße), die Mobilfunkantenne ist jedoch in einer Höhe von etwa 2,35 Meter über Grund montiert und sendet bevorzugt horizontal nach vorne. Im unmittelbaren Nahbereich befinden sich die Messorte somit nicht mehr optimal im vertikalen Strahlungskegel der Antenne, was die geringeren gemessenen Immissionen bedingt.

Messwerte, die bei großen Entfernungen oberhalb der theoretischen Kurve zu liegen kommen, können durch reflexionsbedingte Feldüberlagerungen entstanden sein.

Um näher zu quantifizieren, wie sehr sich der auf maximale Anlagenleistung hochgerechnete Immissionswert von der durch eine "typische Nutzung" verursachten Immission unterscheidet, wurde an den sechs betrachteten Punkten in der Umgebung dieses Standortes die aktuelle Immission zweimal hintereinander ermittelt, wobei bei der zweiten Messung gleichzeitig durch ein 5G-fähiges Endgerät über den Standort ein Video gestreamt wurde (ARD-Livestream). Der Vergleich zwischen aktueller Immission ohne und mit provoziertem Datentransfer ist in Tabelle 4.14 dokumentiert. Zusätzlich ist zum Vergleich noch für jeden Punkt die maximal mögliche Immission (aus Tabelle 4.13) angegeben.

Tabelle 4.14: Standort 3: Veränderung der gemessenen aktuellen Immissionen aufgrund eines durch einen Videostream erzwungenen Datentransfers. Zusätzlich ist die an den Punkten ermittelte Maximalimmission (aus **Tabelle**) angegeben (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke).

Messpunkt	Aktuelle Immission (ohne Videostream)	Aktuelle Immission (mit Videostream)	Maximalimmission
3.1	0,41 %	0,44 %	6,95 %
3.2	0,12 %	0,16 %	2,07 %
3.3	0,08 %	0,09 %	2,33 %
3.4	0,11 %	0,12 %	2,33 %
3.5	0,04 %	0,05 %	0,68 %
3.6	0,05 %	0,09 %	0,87 %

Tabelle 4.14 kann man entnehmen, dass die gemessenen aktuellen Immissionen (auch bei Nutzung des Livestreams) an allen untersuchten Punkten *sehr deutlich* unter der theoretisch möglichen Maximalimmission bleiben. Die gefundenen Unterschiedsfaktoren zwischen maximaler und aktueller Immission liegen leistungsbezogen etwa zwischen **90 und 640 (20 und 28 dB)**. Die Anlage wurde also durch den Livestream weiterhin nicht sehr stark ausgelastet.

Durch den erzwungenen Datentransfer konnte allerdings eine Zunahme der gemessenen Immissionswerte beobachtet werden.

5 Ergänzende Vergleichsmessungen zur Feldabstrahlung 5G-Endgerät

5.1 Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden die unter Kapitel 3 dokumentierten Messungen im Umfeld von 5G-Basisstationen mit denjenigen eines aktuellen marktverfügbaren 5G-Endgerätes (Smartphone) verglichen. Weiterhin erfolgen Abschätzungen zu den zu erwartenden Feldstärkeimmissionen weiterer bereits marktverfügbarer sowie künftig zu erwartender 5G-Endgeräte. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- Messungen der Feldimmission durch ein aktuelles 5G-Endgerät (Smartphone) in einem körpernahen Umgebungsbereich, differenziert nach den unterschiedlichen 5G-Frequenzbereichen (MB07, MB21, MB36). Gemessen wurden dabei die winkelabhängige Abstrahlcharakteristik, das Frequenzspektrum, das Abstandsverhalten sowie das Zeitverhalten. Die Messungen wurden in einem definierten Betriebszustand durchgeführt, der eine Hochrechnung auf die maximale Sendeleistung des Endgerätes erlaubt.
- Auswertung der durchgeführten Messungen mit Bezug auf Anforderungen des Personenschutzes mit Aussagen zur Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich anderer 5G-Endgeräte.
- Zusammenstellung der Gerätearten für die Vielzahl zu erwartender 5G-Endgeräte (Stichwort: „Internet der Dinge“) sowie Abschätzung zu deren Emissionen (z.B. Stärke, Zeitverhalten).

5.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden am 25.05.2022 von Herrn Th. Kopacz / RWTH Aachen und Dr. Chr. Bornkessel / TU Ilmenau im Umfeld von zwei 5G-Basisstationen der Deutschen Telekom in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Beide Basisstationen befanden sich zum Zeitpunkt der Messungen im operativen Betrieb.

Als Endgerät wurde ein Smartphone Samsung S20+ 5G (IMEI: 359 847 107 659 584) verwendet, das mit der Firmware „QualiPoc“ der Firma Rohde & Schwarz ausgerüstet war. Diese Firmware gestattet eine Verbindungsaufnahme des Smartphones in einem definierten Frequenzbereich (hier MB07, MB21 und MB36) und in eine definierte Mobilfunktechnologie (hier 5G) [RS 22]. Das Mobiltelefon wurde dabei mit der Rückseite waagrecht auf ein Stativ mit einer Aufnahme aus Schaumstoff in etwa 1,25 m Höhe positioniert, siehe Abbildung 5.1.

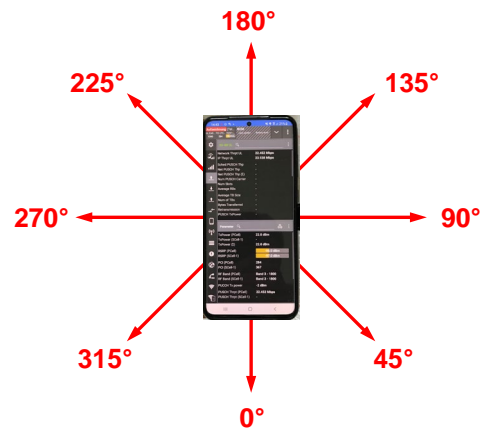


Abbildung 5.1: Positionierung des Mobiltelefons auf einem Stativ mit einer nichtmetallischen Aufnahme (links) und Winkeleinteilung für die Abstrahlcharakteristik (rechts). Im Beispielbild links erfolgt die Messung in Richtung 0°.

Das Mobiltelefon wurde definiert in eine 5G-Basisstation eingebucht, zu der dann eine Datei hochgeladen wurde (Upload). Während des Uploads wurde die Sendeleistung durch QualiPoc mitprotokolliert.

Mit dem frequenzselektiven Messgerät Narda SRM-3006 wurde zuerst ein Winkelscan auf der Höhe des Mobiltelefons mit einer Auflösung von 45° in einem Abstand von 2,0 m durchgeführt. In der dabei ermittelten winkelbezogenen Maximalrichtung wurde anschließend eine Immissionsmessung bei verschiedenen Abständen von 0,5 m bis 5,0 m durchgeführt. Bei kleineren Abständen als 0,5 m ist eine Feldstärkemessung nicht sinnvoll, da man hier zusehends in das reaktive Nahfeld des Mobiltelefons gerät und für eine adäquate Expositionsbewertung aufgrund der zunehmenden Verkopplung von Mobiltelefon und Körper eine Ermittlung der Spezifischen Absorptionsrate (SAR) nötig wird (siehe auch [ICNIRP 20]). Die SAR-Werte gängiger Mobiltelefone sind z.B. auf der Internetseite des Bundesamts für Strahlenschutz zu finden [BFS 22].

Die Immissionsmessungen für den Winkelscan und den Abstandsscan erfolgten frequenzbereichsabhängig mit folgenden Messeinstellungen:

- MB07: Betriebsart Level Recorder, RBW=10 MHz, VBW=8 kHz
- MB21: Betriebsart Level Recorder, RBW=20 MHz, VBW=8 kHz
- MB36: Betriebsart Safety Evaluation, Kanalbreite 90 MHz, RBW=20 kHz

Auf diese Art und Weise wurde die durch das Mobiltelefon verursachte elektromagnetische Immission gemessen, die sich durch die real eingestellte Sendeleistung im Livebetrieb ergab. Anschließend wurden die dabei ermittelten Feldstärkewerte auf die maximal mögliche Sendeleistung des Smartphones (23 dBm) hochgerechnet. Die in Teilkapitel 5.3 ausgewiesenen Feldstärkewerte beziehen sich auf die maximale Sendeleistung.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 MB07

Die 5G-Messungen bei 700 MHz wurden an der Anlage Martin-Luther-Str. 8 in 52531 Übach-Palenberg (Kreis Heinsberg) durchgeführt. Die Deutsche Telekom hatte an dieser Anlage am Messtag ein 5G-System bei 700 MHz mit DSS in Betrieb. Bei MB07 handelt es sich nach Tabelle 1.4 um FDD, d.h. Downlink und Uplink verwenden unterschiedliche Frequenzen.

Abbildung 5.2 zeigt die gemessene Belegung des Uplink-Frequenzbereiches. Das Mobiltelefon belegt alle verfügbaren Frequenzressourcen gleichmäßig.

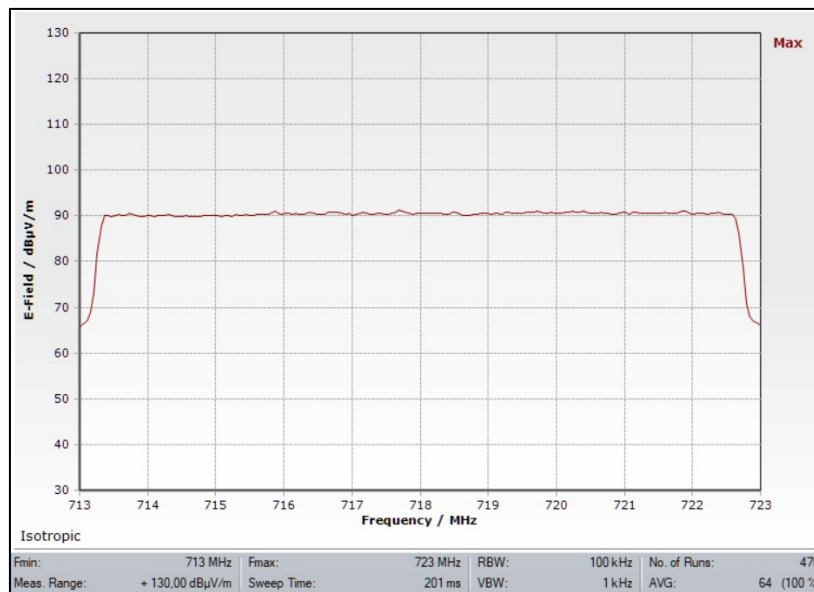


Abbildung 5.2: Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 10 MHz, MB07

Abbildung 5.3 zeigt die zeitliche Struktur des Uplinksignals. Es ist ein quasi-kontinuierlicher Verlauf der Sendeleistung des Mobiltelefons zu erkennen. Dies zeigt, dass das Mobiltelefon ununterbrochen mit konstanter Sendeleistung Daten zur Basisstation hochlädt.

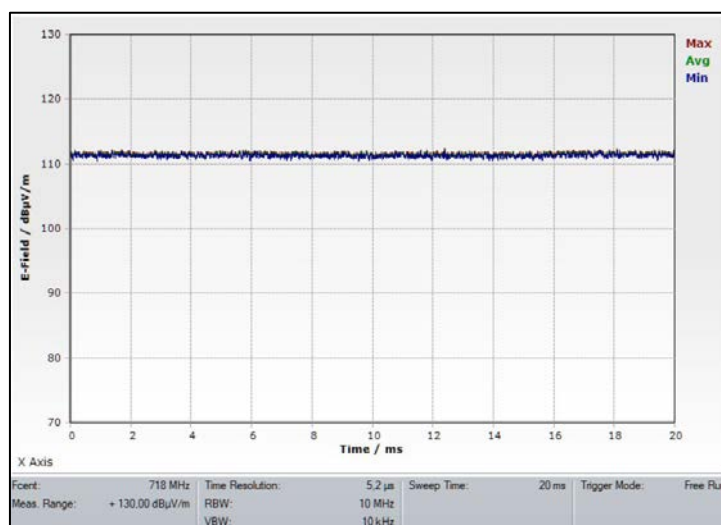


Abbildung 5.3: Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB07

In Abbildung 5.4 ist die Abstrahlcharakteristik des Smartphones dargestellt. Bei MB07 ergibt sich in Richtung 90° bei dem auf dem Rücken liegenden Mobiltelefon die stärkste Abstrahlung.

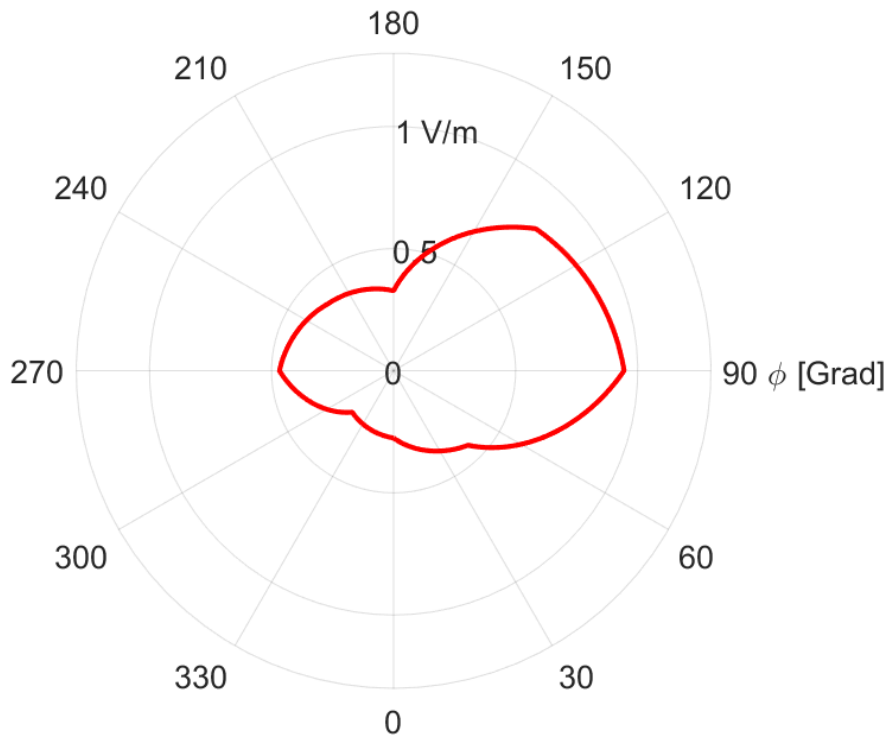


Abbildung 5.4: Abstrahlcharakteristik bei MB07; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts

In Abbildung 5.5 und Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der abstandsabhängigen Immissionsmessungen dargestellt; hier wurde auf Basis der winkelabhängigen Messungen die Richtung 90° ausgewählt. Die Messwerte an den diskreten Stützstellen sind dabei mit einem Marker gekennzeichnet. In Abbildung 5.4 ist zu beachten, dass die Ordinatenachse auf einen Maximalwert von 8 V/m skaliert ist.

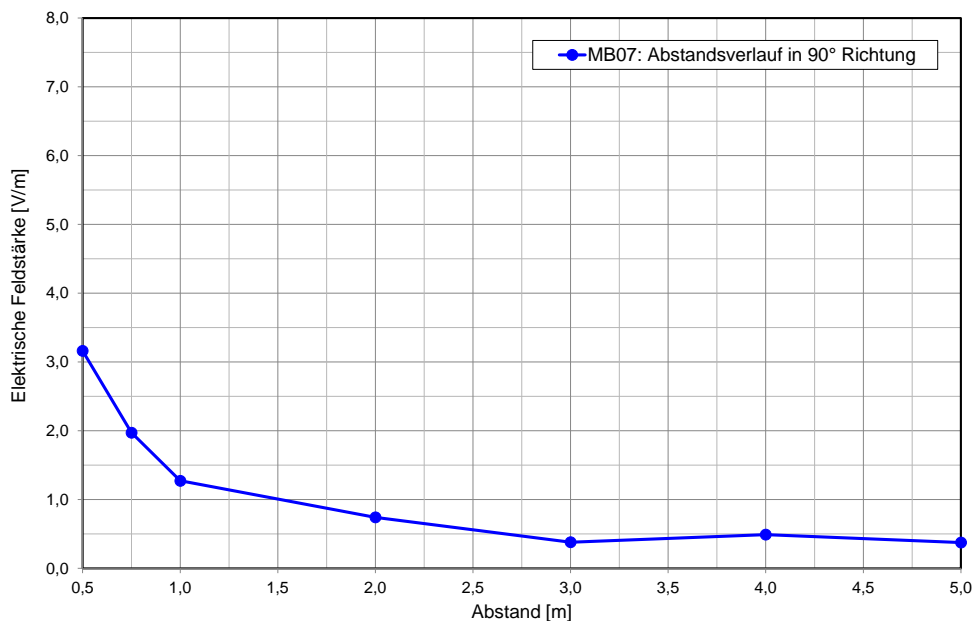


Abbildung 5.5: Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB07; 90°-Richtung

Die Feldstärke erreicht bei einem Abstand von 0,5 m 3,2 V/m und nimmt zu größeren Abständen hin ab. Bei einem Abstand von 4 m steigt der Messwert geringfügig an; durch einen Vertikalschwenk des Messgerätes konnte als Ursache eine konstruktive Überlagerung der direkten Abstrahlung vom Smartphone zum Messgerät mit einer Bodenreflexion ermittelt werden. In 5 m Entfernung werden noch 0,4 V/m erreicht.

Obwohl für eine Personenschutzbewertung von körpernahen bzw. im Körperkontakt betriebenen Endgeräten primär die Spezifische Absorptionsrate anzusetzen ist, soll wegen des Immissionsvergleichs zu den Basisstationsimmissionen die Betrachtung nachfolgend feldstärkebezogen erfolgen. Hierbei werden die Referenzwerte der EU-Ratsverordnung 1999/519/EG herangezogen [99/519/EG], die in den betrachteten Frequenzbereichen zahlenmäßig identisch zu den Grenzwerten der 26. BImSchV sind. Als maßgeblicher Grenzwert wird dabei derjenige Referenzwert definiert, der sich an der Banduntergrenze des betreffenden Frequenzbandes über alle Netzbetreiber ergibt. Im Frequenzband MB07 entspricht das einer Frequenz von 703 MHz bzw. einem Referenzwert von 36,4 V/m. Tabelle 5.1 enthält neben den ermittelten Immissionswerten in V/m auch die entsprechende Grenzwertausschöpfung in %E.

Tabelle 5.1: Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB07, 90°-Richtung

Messabstand in m	Extrapolierte E-Feldstärke in V/m	Grenzwertausschöpfung bzgl. E in %
0,5	3,2	8,7
0,75	2,0	5,4
1,0	1,3	3,5
2,0	0,7	2,0
3,0	0,4	1,0
4,0	0,5	1,3
5,0	0,4	1,0

5.3.2 MB21

Die 5G-Messungen bei 2100 MHz wurden ebenfalls an der Anlage Martin-Luther-Str. 8 in 52531 Übach-Palenberg (Kreis Heinsberg) durchgeführt. Die Deutsche Telekom hat an dieser Anlage neben dem DSS-System bei 700 MHz auch ein 5G-System bei 2100 MHz mit DSS in Betrieb. Bei MB21 handelt es sich nach Tabelle 1.4 ebenfalls um FDD, d.h. Downlink und Uplink verwenden unterschiedliche Frequenzen.

Abbildung 5.6 zeigt die gemessene Belegung des Uplink-Frequenzbereiches. Das Mobiltelefon belegt alle verfügbaren Frequenzressourcen nahezu gleichmäßig.

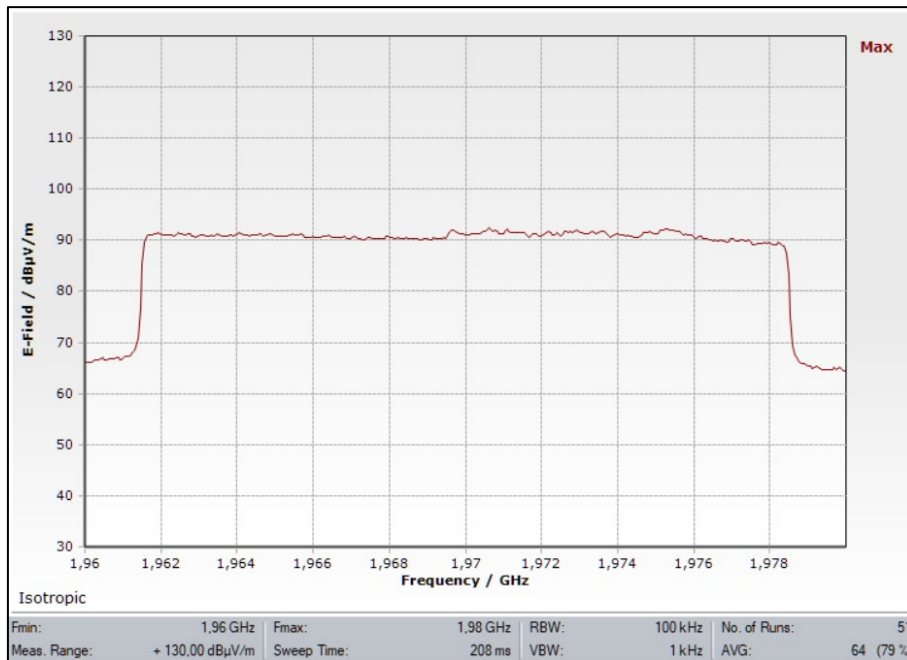


Abbildung 5.6: Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 20 MHz, MB21

Abbildung 5.7 zeigt die zeitliche Struktur des Uplinksignals. Es ist ein quasi-kontinuierlicher Verlauf der Sendeleistung des Mobiltelefons zu erkennen; jedoch erscheinen hier kurzzeitige Einbrüche bei etwa 2 ms und 8 ms, die sich nach 10 ms wiederholen. Unabhängig von diesen kurzzeitigen Unterbrechungen kann auch hier davon ausgegangen werden, dass das Mobiltelefon nahezu ununterbrochen mit konstanter Sendeleistung Daten zur Basisstation hochlädt.

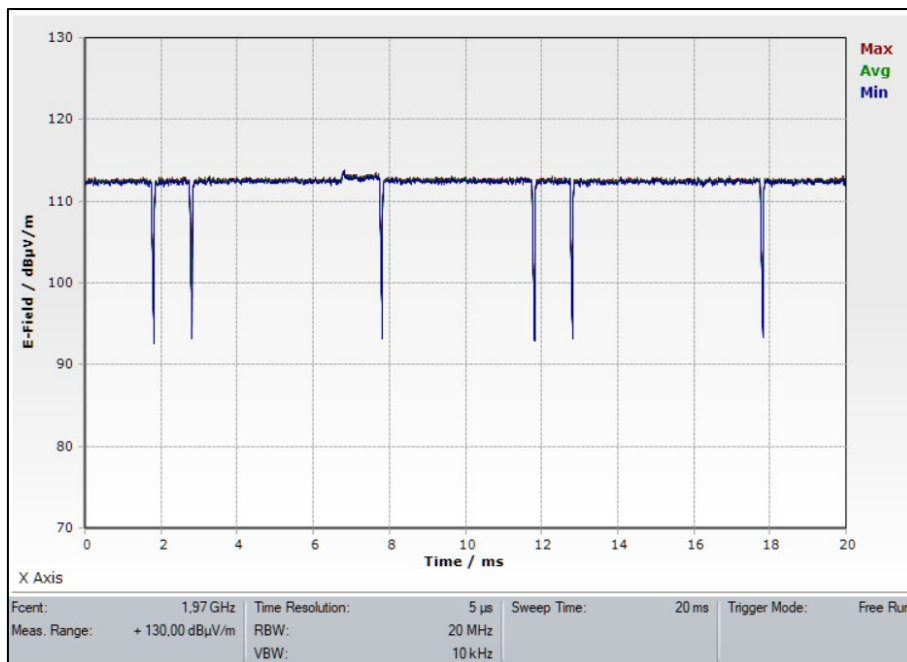


Abbildung 5.7: Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB21

In Abbildung 5.8 ist die Abstrahlcharakteristik des Smartphones dargestellt. Bei MB21 ergibt sich in Richtung 0° bei dem auf dem Rücken liegenden Mobiltelefon die stärkste Abstrahlung.

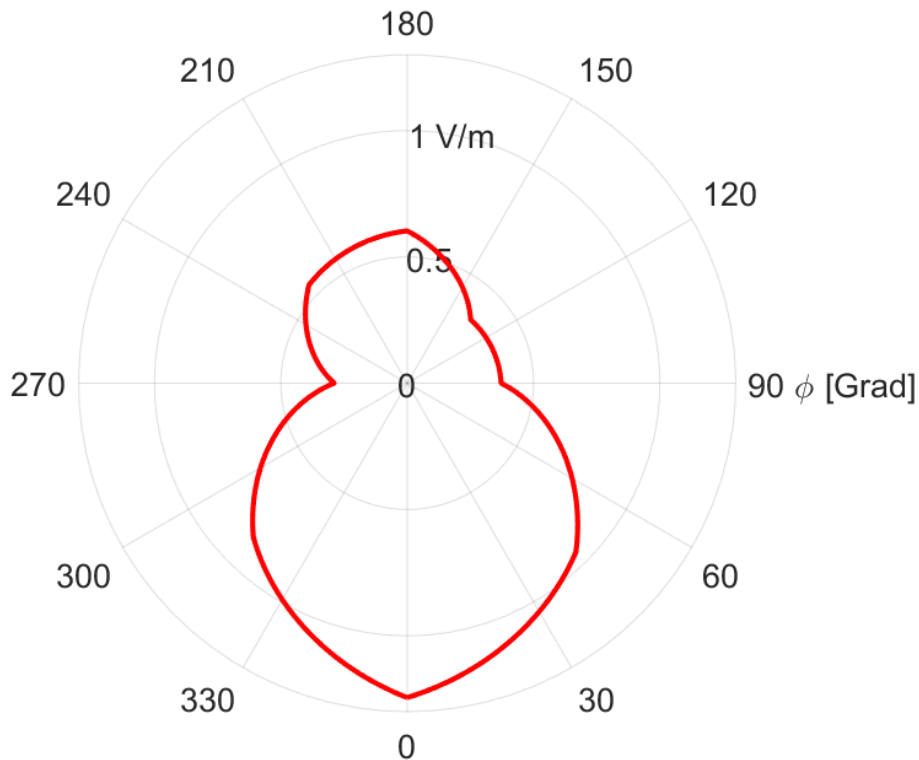


Abbildung 5.8: Abstrahlcharakteristik bei MB21; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts

In Abbildung 5.9 und Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der abstandsabhängigen Immissionsmessungen dargestellt; hier wurde auf Basis der winkelabhängigen Messungen die Richtung 0° ausgewählt.

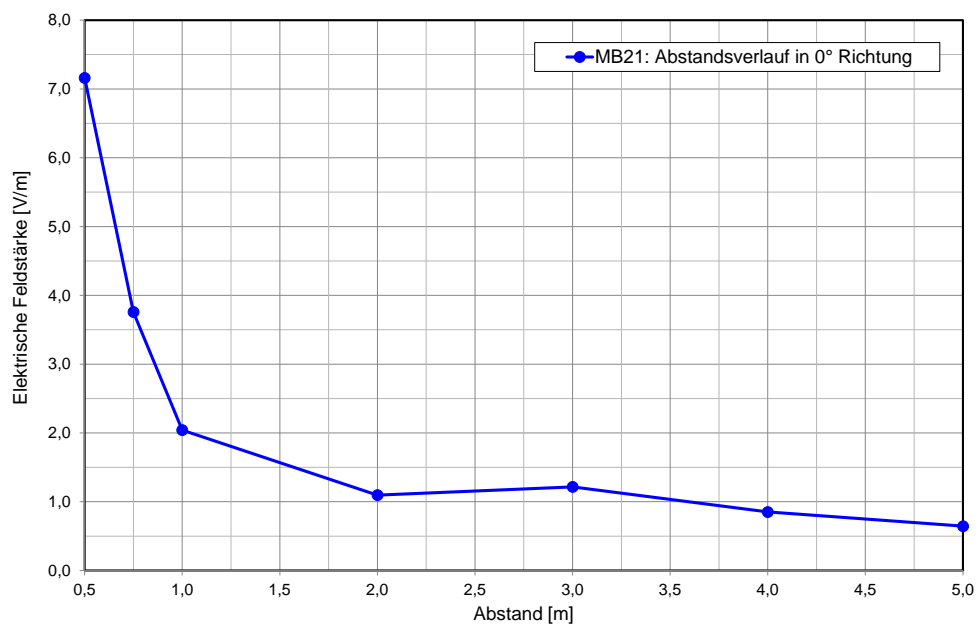


Abbildung 5.9: Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB21; 0°-Richtung

Die Feldstärke erreicht bei einem Abstand von 0,5 m 7,2 V/m und nimmt zu größeren Abständen hin ab. Diesmal steigt der Messwert bei 3,0 m vermutlich durch die Bodenreflexion bedingt geringfügig an. In 5 m Entfernung werden noch 0,6 V/m erreicht. Die extrapolierten Messwerte sind insgesamt höher als bei MB07. Als Grund wird eine gegenüber MB07 geänderte dreidimensionale Abstrahlcharakteristik des Smartphones vermutet, so dass sich jetzt eine Hauptstrahlrichtung ausgebildet hat, die in der Messebene liegt.

Als maßgeblicher Referenzwert für die prozentuale Grenzwertausschöpfung wird ein Wert von 60,2 V/m angesetzt, der sich bei der Banduntergrenze von 1920 MHz ergibt.

Tabelle 5.2: Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB21, 0°-Richtung

Messabstand in m	Extrapolierte E-Feldstärke in V/m	Grenzwertausschöpfung bzgl. E in %
0,5	7,2	11,9
0,75	3,8	6,2
1,0	2,0	3,4
2,0	1,1	1,8
3,0	1,2	2,0
4,0	0,9	1,4
5,0	0,6	1,0

5.3.3 MB36

Die 5G-Messungen bei 3600 MHz wurden an der Anlage Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen durchgeführt. Die Deutsche Telekom hat an dieser Anlage ein 5G-System bei 3600 MHz mit massive-MIMO in Betrieb. Bei MB36 handelt es sich nach Tabelle 1.4 um TDD, d.h. Downlink und Uplink verwenden denselben Frequenzbereich und sind durch unterschiedliche Zeitzuteilungen getrennt.

Abbildung 5.10 zeigt die gemessene Belegung des Frequenzbereiches. Das Mobiltelefon belegt hierbei über den Messzeitraum von etwa 14 s einen mittig liegenden Großteil des Spektrums; am Anfang und Ende des Spektrums werden einige Frequenzressourcen ausgespart.

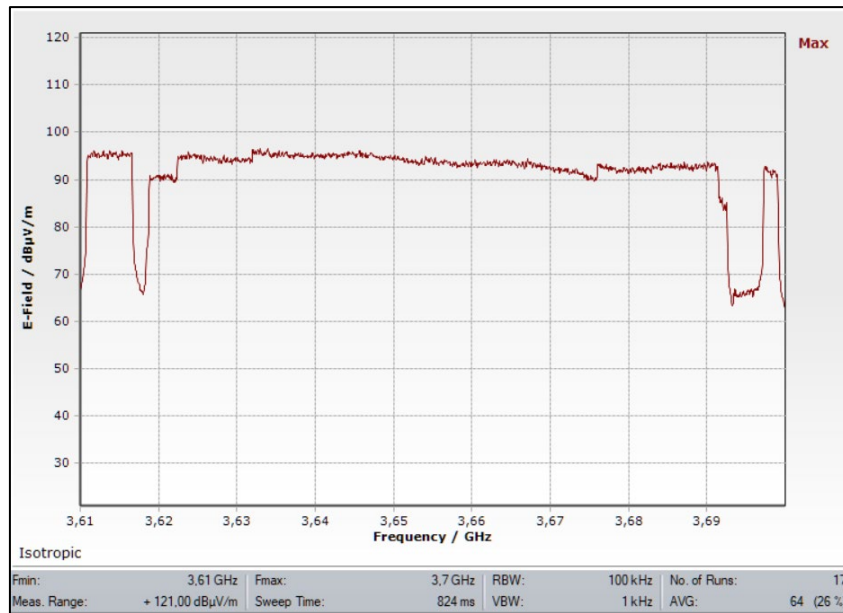


Abbildung 5.10: Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 90 MHz, MB36

Abbildung 5.11 zeigt die zeitliche Struktur des Uplinksignals. Im Gegensatz zu den FDD-basierten Frequenzbändern MB07 und MB21 ist hier die TDD-Struktur gut zu erkennen: Das Mobiltelefon sendet nicht zeitlich kontinuierlich, sondern gepulst. Die Lücken zwischen den Pulsen sind für die Downlinksignale reserviert, deren Pegel hier aber mindestens 15 dB unter dem der Uplinksignale liegt. Etwa bei 10 ms sind die 5G-Basisstationssignalisierungen des SSB zu erkennen.

An den Messpunkten wurde überprüft, dass die Immissionen durch das Endgerät (Uplink) deutlich stärker als die Immissionen durch die Basisstation (Downlink) waren, da mit dem gewählten Immissionsmessverfahren bei TDD nicht zwischen Uplink- und Downlinksignalen unterschieden werden kann.

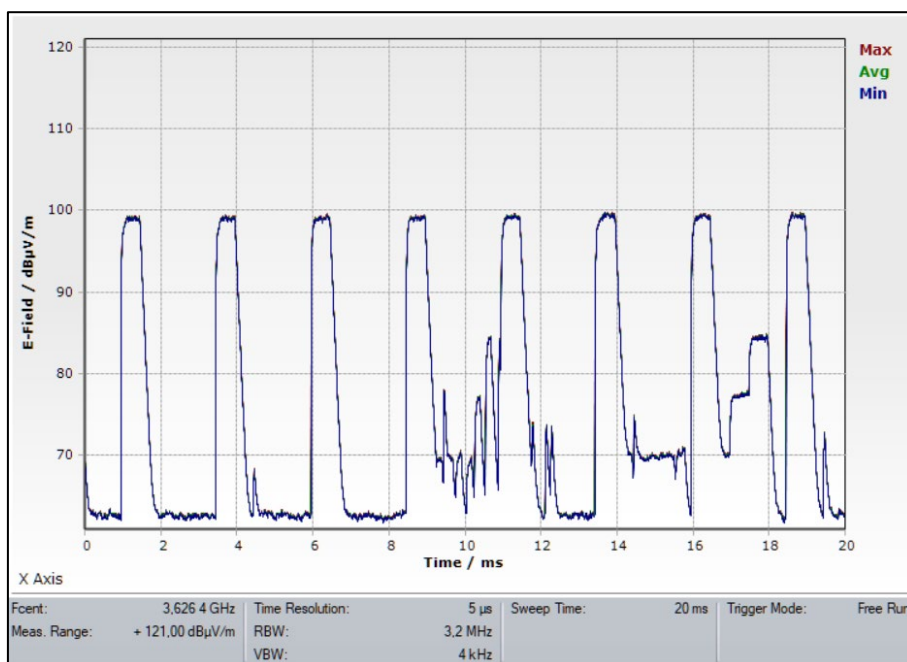


Abbildung 5.11: Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB36

In Abbildung 5.12 ist die Abstrahlcharakteristik des Smartphones dargestellt. Bei MB36 ergibt sich in Richtung 0° bei dem auf dem Rücken liegenden Mobiltelefon die stärkste Abstrahlung.

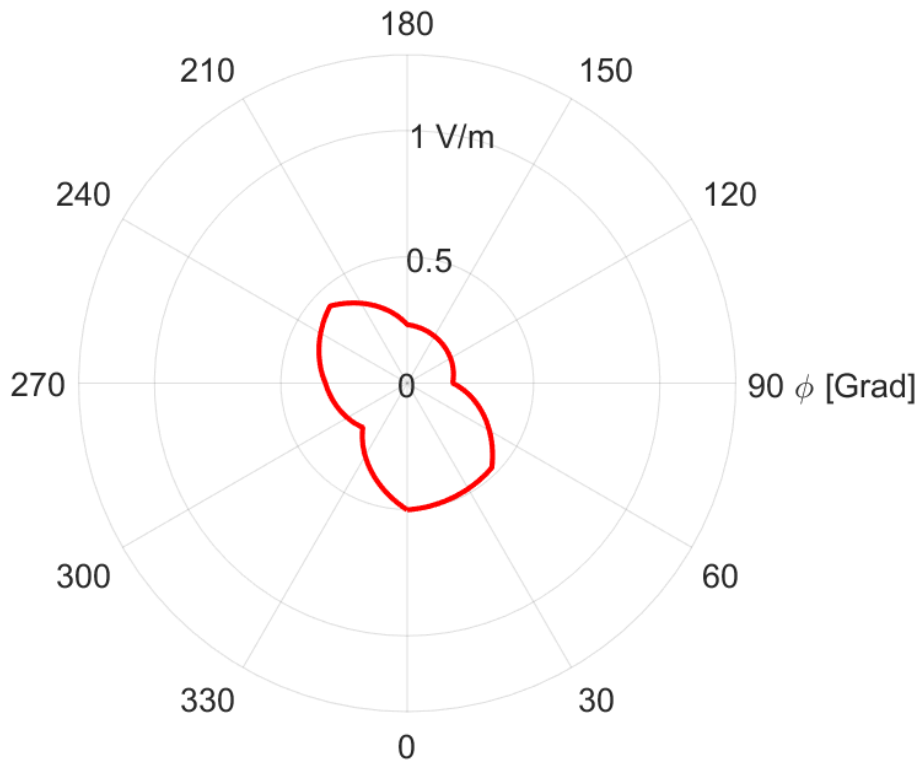


Abbildung 5.12: Abstrahlcharakteristik bei MB36; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts

In Abbildung 5.13 und Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der abstandsabhängigen Immissionsmessungen dargestellt; hier wurde auf Basis der winkelabhängigen Messungen die Richtung 0° ausgewählt.

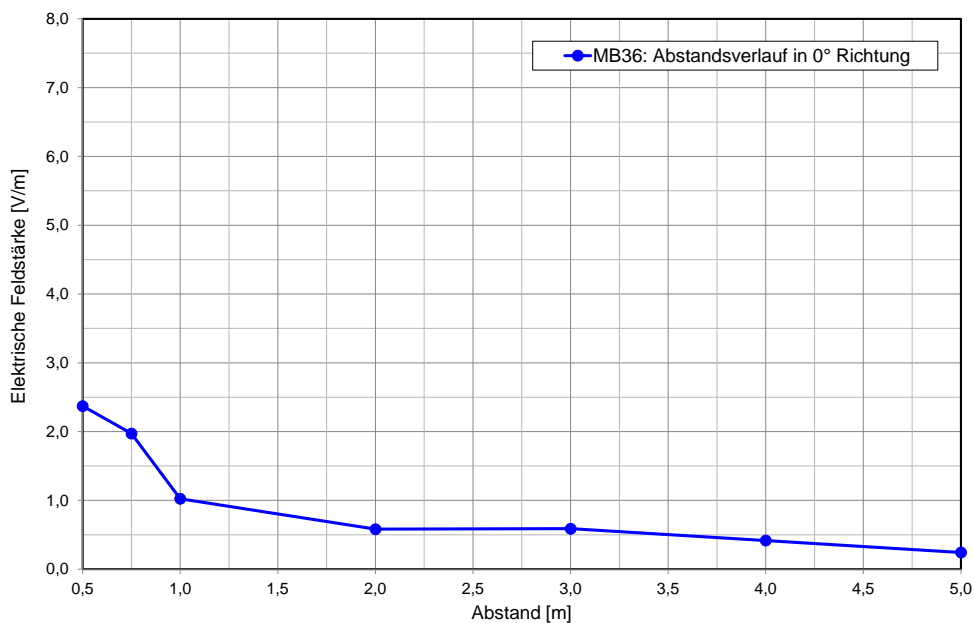


Abbildung 5.13: Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB36; 0°-Richtung

Die Feldstärke erreicht bei einem Abstand von 0,5 m 2,4 V/m und nimmt zu größeren Abständen hin ab. Die gleichmäßige Abnahme ist bei 0,75 m sowie bei 3,0 m geringfügig unterbrochen. In 5 m Entfernung werden noch 0,2 V/m erreicht. Die extrapolierten Messwerte weisen ein ähnliches Niveau wie bei MB07 auf.

Als maßgeblicher Referenzwert für die prozentuale Grenzwertausschöpfung wird ein Wert von 61 V/m angesetzt, der sich bei Frequenzen oberhalb von 2 GHz ergibt.

Tabelle 5.3: Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB36, 0°-Richtung

Messabstand in m	Extrapolierte E-Feldstärke in V/m	Grenzwertausschöpfung bzgl. E in %
0,5	2,4	3,9
0,75	2,0	3,2
1,0	1,0	1,7
2,0	0,6	1,0
3,0	0,6	1,0
4,0	0,4	0,7
5,0	0,2	0,4

5.4 Vergleich zu Immissionen durch 5G-Basisstationen

Im Teilkapitel 5.3 wurde die Immission eines 5G-Smartphones bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen bestimmt. In Tabelle 5.4 sind die mittleren gemessenen elektrischen Feldstärken (Median) in Bezug auf die Grenzwertausschöpfung in Abhängigkeit des Abstandes zusammenfassend dargestellt; hierbei erfolgte pro Abstand eine leistungsmäßige Mittelung bei den drei untersuchten Frequenzen. Tabelle 5.4 zeigt die mittlere (Median) Immission der 5G-Basisstationen aus Kapitel 3.

Tabelle 5.4: Mittlere 5G-Immissionen (Median) vom untersuchten 5G-Smartphone für MB07, MB21 und MB36 in unterschiedlichen Abständen

5G-Endgerät (Smartphone Samsung S20+ 5G)							
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	Abstand in [m]						
	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Medianwert	8,8	5,1	3,0	1,7	1,4	1,2	0,9

Tabelle 5.5: Mittlere 5G-Immission (Median) der 5G-Basisstationen aus Kapitel 3

Basisstationen (aus Kapitel 3)	
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	5G
Medianwert	3,4

Der Vergleich der mittleren Immission (Median) zeigt, dass in etwa 1 m Abstand vom untersuchten 5G-Smartphone vergleichbare Werte wie im Umfeld von 5G-Basisstationen erreicht werden. Bei geringeren Abständen überwiegt im Mittel die Immission des 5G-Endgerätes, bei größeren Abständen die der 5G-Basisstationen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Schlussfolgerungen sich nur begrenzt auf beliebige 5G-Endgeräte verallgemeinern lassen, da nur ein Endgerät in drei Frequenzbereichen untersucht wurden und die Zahl der verfügbaren 5G-Endgeräte in nächster Zeit deutlich anwachsen dürfte. Deswegen sollen im nächsten Teilkapitel Abschätzungen hinsichtlich anderer Endgerätetypen vorgenommen werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei den vorliegenden Untersuchungen als gemeinsamer Vergleichsmaßstab die jeweils maximale Sendeleistung von 5G-Endgerät und 5G-Basisstation (bzw. deren höchste betrieblicher Anlagenauslastung) angenommen wurde. Durch Leistungsregelungsmechanismen auf Seiten von Endgerät und Basisstation und insbesondere durch die Strahlschwenkmechanismen bei massive-MIMO-Basisstationen (MB36) können sich in der Realität gänzlich andere Verhältnisse einstellen.

5.5 Übertragbarkeit auf andere Endgerätearten

Derzeit ist die Anzahl verfügbarer 5G-Endgeräte noch überschaubar und beschränkt sich hauptsächlich auf die Bereiche Smartphones und Router. Weitere Typen von Endgeräten werden in den nächsten Monaten und Jahren auf den Markt kommen, wobei der Phantasie in der Gerätevielfalt keine Grenzen gesetzt sind. Grundsätzlich kann jedes Objekt, dessen Einbindung in ein 5G-Netzwerk sinnvoll ist, mit einem 5G-Funkmodul ausgestattet werden und wäre demnach als 5G-Endgerät zu bezeichnen [SSK 21].

In diesem Teilkapitel sollen grundlegende Überlegungen zur Übertragbarkeit der in Teilkapitel 5.3 dokumentierten Immissionsmessungen an einem Endgerät angestellt werden. Die vorgenommenen Betrachtungen beschränken sich auf den Frequenzbereich FR1.

5G-Anwendungen werden üblicherweise in die drei Bereiche

- Breitbandkommunikation (enhanced Mobile Broadband, eMBB)
- Massenkommunikation (massive Machine Type Communications, mMTC) und
- Echtzeitkommunikation (ultra-Reliable and Low Latency Communication, uRLLC)

unterteilt. Es ist sinnvoll, diese Unterteilung auch hinsichtlich der verschiedenen Typen von Endgeräten zu übernehmen.

5.5.1 Breitbandkommunikation

In diese Klasse fallen derzeit verfügbare Smartphones und Router; mittlerweile sind auch erste Tablets und Laptops mit 5G verfügbar. Es ist absehbar, dass die Gerätevielfalt in den nächsten Monaten stark ansteigen wird. Auch wenn bei Routern, Laptops und Tablets mehr Bauraum für die Antenne(n) zur Verfügung steht und damit eine optimierte Antennenfunktionalität im

Vergleich zu Smartphone zu erwarten ist, können die in Teilkapitel 5.3 vorgestellten Ergebnisse grundsätzlich als Anhaltspunkt für die entstehenden Immissionen dienen. Auch die Sendeleistungen sind vergleichbar zum untersuchten Smartphone.

Die ETSI TS 38.101-1 [TS 38.101-1a] definiert für so genannte Class 3 Geräte maximale Sendeleistungen von 23 dBm. Im Frequenzbereich FR1 gibt es daneben auch Class 2 Geräte, die eine maximale Sendeleistung von 26 dBm aufweisen; diese sind allerdings nur in den Frequenzbändern n41 (2.496 – 2.690 MHz, TDD), n77 (3.300 – 4.200 MHz, TDD), n78 (3.300 – 3.800 MHz, TDD) und n79 (4.400 – 5.000 MHz, TDD) definiert. Im Band n14 (Uplink 788 – 798 MHz, Downlink 758 – 768 MHz, FDD) sind bis zu 31 dBm möglich; dieses Band erstreckt sich in Deutschland über zwei verschiedene gepaarte Zuteilungen (700 MHz gepaart und 800 MHz gepaart).

Die maximalen Sendeleistungen sind mit einer erlaubten Toleranz von +2/-3 dB spezifiziert. Bei Annahme eines „Mittelwertes“ der Sendeleistung von 23 dBm für das in Teilkapitel 5.3 untersuchte Smartphone kann im Extremfall die Immission um +5 dB höher ausfallen als zur Auswertung der Messungen angenommen (26 dBm + 2 dB Toleranz). Das würde bedeuten, dass in diesem Fall die Feldstärkewerte bzw. die feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen um den Faktor 1,8 höher ausfallen würden als in Teilkapitel 5.3 dokumentiert.

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Sendeleistung bzw. der damit verbundenen Immission wird es aber keine Unterschiede zum gemessenen Smartphone geben, da auch Tablets, Router und Laptops als Geräte zur Breitbandkommunikation bei einem maximalen Upload zeitlich kontinuierlich (wenn auch in den TDD-Bändern gepulst wie bei MB36 dargestellt) senden.

5.5.2 Massenkommunikation

In diesen Bereich fallen Endgeräte für typische Anwendungen wie Industrial Internet of Things (IIoT), Industrie 4.0, Smart City und Sensornetzwerke. Diese werden z.B. in diversen elektronischen und elektrischen (Haushalts-)Geräten, Robotern und diversen Komponenten von Produktionsanlagen auftauchen [SSK 21]. In [ACIA 22] ist eine Übersicht über verschiedene industrielle 5G-Geräte enthalten, dabei werden insbesondere folgende Gerätetypen unter IIoT und Industrie 4.0 subsummiert:

- Sensoren/Aktuatoren geringer Leistung
- 2D/3D Sensoren
- HMI and xR (Human Machine Interface and extended Reality)

Diesen Geräten ist gemein, dass wegen der geringen zu übertragenden Datenmenge ein Upload nur während vergleichsweise kurzer Zeitintervalle stattfindet. Die Uplink-/Downlink-Konfiguration in TDD ist bei 5G extrem flexibel konfigurierbar.

Gemäß Grenzwertvorgaben ist die Immission leistungsbezogen über beliebige 6-Minuten-Intervalle zu mitteln. Die zeitgemittelte Immission hängt deswegen maßgeblich von der Zeitspanne ab, in der aktiv gesendet wird, und ist deutlich kleiner als der während eines Pulses erreichte Immissionswert. Für eine Maximalwertabschätzung ist dabei jedoch nicht die Periodendauer zu nehmen (das könnte bei einem Funk-Heizkostenzähler u.U. auch 24 Stunden sein), sondern dasjenige 6-Minuten-Intervall zu wählen, in dem die Dauer der Sendephasen

maximal ist. Die sich dann effektiv ergebende zeitlich gemittelte Feldstärke ergibt sich nach Gleichung 5.1

$$E_{\text{effektiv}} = E_{\text{puls}} \sqrt{\frac{t_{\text{puls}} [\text{min}]}{6 \text{ min}}} \quad (5.1)$$

E_{effektiv}	Zeitlicher Effektivwert der elektrischen Feldstärke
E_{puls}	Elektrische Feldstärke während der aktiven Sendephase(n)
t_{puls}	Summierte Zeitdauer des/der Pulse/s während der aktiven Sendephase(n) innerhalb von 6 min

Wird als Beispiel nur ein Puls der Länge 1 ms innerhalb einer Stunde gesendet, dann ist die grenzwertkonforme zeitlich gemittelte Feldstärke nach Gleichung 5.1 um den Faktor 600 kleiner als die Feldstärke während des Pulses. Derselbe Reduzierungsfaktor ergibt sich, wenn nur ein Puls von 1 ms innerhalb von 24 Stunden gesendet werden würde, da als maßgebliche Mittelungszeit nicht eine Stunde oder 24 Stunden anzusetzen ist, sondern 6 Minuten.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass laut neuer ICNIRP-Empfehlung von 2020 [ICNIRP 20] neben einer Mittelungszeit von 6 Minuten auch eine Mitteilung über 30 Minuten zu bestimmen ist, die für die Ganzkörperexposition relevant ist.

5.5.3 Echtzeitkommunikation

Hier sind neben Sensoren und Aktoren geringer Latenz aus dem industriellen Umfeld [ACIA 22] als typische Endgeräte Funkmodems für das automatisierte und vernetzte Fahren im Rahmen der V2X-Kommunikation absehbar. Für diese Endgeräte werden in [TS 38.101-1a] explizit dieselben maximalen Sendeleistungen definiert wie in Teilkapitel 5.5.1 beschrieben, wobei im Fall von „Sidelink-MIMO“ (d.h. das V2X-Modem hat zwei Antennenanschlüsse) die 23 dBm für das V2X-Band n47 (5.855 – 5.925 MHz, TDD) für jeden der beiden Anschlüsse gelten, sich in Summe also +26 dBm ergeben können. Die effektive, d.h. zeitlich gemittelte Sendeleistung bzw. Immission hängt wie in Teilkapitel 5.5.2 beschrieben vom Puls-Pausenverhältnis ab. Bereits vorliegende Erfahrungen mit der Vorgängertechnologie ITS-G5 [SBH 20] lassen erwarten, dass hier mindestens periodische Statussignale (cooperative awareness message, CAM) abgesendet werden, deren Häufigkeit u.a. von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs abhängt und die „in den Lücken“ durch weitere Datenpakete für die Übermittlung von Nachrichten ergänzt werden. Insofern ist zu erwarten, dass die maximale Immission deutlich über den IoT-Geräten aus Teilkapitel 5.5.2 liegen wird, aber auch bei maximalem Datenverkehr immer noch um mehr als 10 dB unter der Immission des Sendepulses liegt [SBH 20].

5.6 Zusammenfassung

Immissionsmessungen an einem handelsüblichen Smartphone, das in ein operatives Mobilfunknetz eingebucht war, ergaben auf eine maximale Sendeleistung von 23 dBm hochgerechnete Immissionswerte zwischen 2,4 V/m (bzw. 3,9 %E) und 7,2 V/m (bzw. 11,9 %E) bei 50 cm Abstand und zwischen 0,2 V/m (bzw. 0,4 %E) und 0,6 V/m (bzw. 1,0 %E) bei 5 m Abstand. Bei allen drei untersuchten Frequenzbändern (MB07 mit FDD, MB21 mit FDD und MB36 mit TDD) nehmen die Immissionen mit zunehmendem Abstand vom Endgerät ab, wobei die Richtung der stärksten Abstrahlung frequenzabhängig ist.

Der Vergleich der mittleren Immission anhand des Medians zeigt, dass in etwa 1 m Abstand vom untersuchten 5G-Smartphone vergleichbare Werte wie im Umfeld von 5G-Basisstationen erreicht werden. Bei geringeren Abständen überwiegt im Mittel die Immission des 5G-Endgerätes, bei größeren Abständen die der 5G-Basisstationen.

Anhand eines Überblicks über derzeitige Endgeräte und zukünftige zu erwartende Endgerätypen werden unter Berücksichtigung von anwendungsspezifischen Sendeleistungen und zeitlichen Verläufen der Sendeleistung Hinweise zur Übertragbarkeit der Immissionsergebnisse gegeben.

6 Arbeitshilfen für die Immissionsschutzbehörden

6.1 Wichtige im Projekt gewonnene Erkenntnisse

6.1.1 Signalstruktur und Leistungsabgabe bei 5G-Basisstationen

Folgende immissionsrelevante Eigenschaften können den Signalen von 5G-Basisstationen zugeschrieben werden:

- Die aktuell in Betrieb befindlichen 5G-Sendeanlagen der in Deutschland tätigen Mobilfunknetzbetreiber (Telekom, Vodafone, Telefónica) sowie der vereinzelt bereits vorhandenen Campusnetze nutzen den für Mobilfunknetze üblichen Frequenzbereich zwischen 750 und 3.800 MHz. Dieser ist ein Teil des für 5G spezifizierten Frequenzbereichs FR1 (410 - 7.125 MHz).
- Neu ist hierbei der Frequenzbereich zwischen 3,4 und 3,8 GHz (MB36). Die von der BNetzA für dieses Frequenzband definierten Qualitätskriterien bezüglich der Versorgung mit Mobilfunksignalen (verfügbare Datenrate und Latenzzeit) implizieren indirekt den ausschließlichen Einsatz von 5G-Anlagen (siehe dazu auch Abschnitt 6.1.4.2).
- Der ebenfalls neu für die Mobilkommunikation vorgesehene Frequenzbereich (Downlink) zwischen 758 und 788 MHz (MB07) wurde von der BNetzA hingegen technologie-neutral vergeben. Dies bedeutet, dass sowohl LTE- (4G) als auch 5G-Anlagen in diesem Band zum Einsatz kommen können.
- Bezüglich der Signalstruktur besteht bei den Anlagen der 5G-Netze kein grundsätzlicher Unterschied zu Sendeanlagen des LTE-Mobilfunkstandards (4G). Sowohl die 4G- als auch die 5G-Luftschnittstelle ("5G NR") verwenden OFDM als Übertragungsverfahren.
- Insbesondere durch die größere maximal mögliche Signalbandbreite bei 5G (knapp 100 MHz im Frequenzbereich FR1) wird im Vergleich zu LTE (maximale Signalbandbreite: 18 MHz) eine größere Datenübertragungsrate ermöglicht. Allerdings besteht bei LTE - ebenso wie bei 5G - zusätzlich die Möglichkeit einer Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit mittels Bündelung mehrerer Signalkanäle ("Carrier Aggregation").
- Die typisch von 5G-Basisstationen erzeugten Sendeleistungen liegen in der gleichen Größenordnung wie die von 4G-Anlagen.
- Der größte Unterschied von 5G zu Anlagen älterer Technologien wie GSM (2G), UMTS (3G) und LTE (4G) besteht darin, dass die permanent von einer Antenne abgestrahlte Signalisierungssignalleistung (Leistung der "Always-on-Signale") bei 5G deutlich geringer ausfällt. In [SSK 21] wird von einem Unterschiedsfaktor bezüglich der von der Basisstation generierten Signalisierungsleistung von mindestens 10 zwischen 3G bzw. 4G und 5G gesprochen. Diese Tatsache wird auch durch die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen bestätigt. Ein Vergleich der in Tabelle 3.16 dokumentierten Mittelwerte von Maximal- und aktueller Immission (aufgrund der während der Messungen meist vorhandenen geringen Anlagenauslastung lagen die Momentanimmisionswerte meist nahe an der Minimalimmission) ergibt einen Unterschied von

mehr als 30 dB. Derart große Unterschiede zwischen Maximal- und Minimalimmission treten bei Anlagen älterer Technologien nicht auf.

- Mit anderen Worten: Vergleicht man 5G-Basisstationen mit Anlagen älterer Funkstandards (2G, 3G, 4G), fällt bei vergleichbar großer maximal erzeugbarer Leistung die von 5G-Systemen minimal (z.B. nachts) verursachte Hochfrequenzimmission leistungsbezogen um mindestens den Faktor 10 geringer aus.

6.1.2 Netzstruktur und eingesetzte Funktechnologien

Mit Ende des Jahres 2021 sind in Deutschland die letzten UMTS-Basisstationen außer Betrieb gegangen. Die Betreiber haben im früheren UMTS-Band (MB21) stattdessen auf den LTE-Standard umgestellt. Bei vielen Anlagenstandorten wurde dies durch ein einfaches Softwareupdate verwirklicht, es wurden keine Änderungen an der Sendertechnik und den Antennen vorgenommen, insbesondere die maximal abgestrahlten Leistungen sind unverändert geblieben, so dass auch keine neue Standortbescheinigung notwendig wurde.

Auch der GSM-Mobilfunk wird zunehmend durch modernere Funktechnologien verdrängt. Im 1800-MHz-Band (MB18) hat die Telekom bereits seit längerem die Abstrahlung von GSM-Signalen vollständig eingestellt. Auch Vodafone und Telefónica wechseln in diesem Band mehr und mehr von GSM auf LTE, so dass inzwischen GSM-Dienste hauptsächlich nur noch im 900-MHz-Band (MB09) beheimatet sind. Aktuell wird jedoch von den Betreibern immer häufiger auch bereits ein Teil des ihnen jeweils zur Verfügung stehenden 900-MHz-Frequenzbandes für die Abstrahlung von LTE-Signalen verwendet.

Derzeit sind 5G-Anlagen in den bestehenden Mobilfunknetzen vornehmlich in folgenden Frequenzbereichen und Umgebungsszenarien anzutreffen:

- Reine 5G-Anlagen im 3,6-GHz-Band (MB36), typisch ausgestattet mit Massive-MIMO-Antennen findet man vornehmlich im Innenbereich größerer Städte sowie an sonstigen Orten mit großem Verkehrsaufkommen (Verkehrsknotenpunkte, Bahnhofsbereiche, Messegelände, Veranstaltungsorte, Fußballstadien, Gewerbegebiete etc.). Für die Flächenversorgung sind Anlagen in MB36 hingegen nicht geeignet, da deren Reichweite aufgrund der vergleichsweise hohen Betriebsfrequenz eingeschränkt ist.
- Für die Flächenversorgung ist der neu verfügbare Frequenzbereich MB07 deutlich besser geeignet, auch wenn die Betreiber hier nur jeweils eine Kanalbandbreite von je 10 MHz zur Verfügung haben. Wie in Tabelle 1.4 bereits angegeben, beabsichtigen die Deutsche Telekom und Telefónica in diesem Frequenzbereich zukünftig reine 5G-Systeme einzusetzen, während Vodafone hier alternativ auch 4G oder 4G zusammen mit 5G im "Dynamic Spectrum Sharing" (DSS) vorgesehen haben.
- Auch die Frequenzbereiche MB18 (Telefónica und Vodafone) und MB21 (Telekom) sind aktuell für den Einsatz von 4G/5G-DSS-Anlagen vorgesehen.
- Erste 5G-Kleinzellenstandorte zur Verbesserung der Kapazität z.B. in Fußgängerzonen sind bereits in Betrieb. Eingesetzt werden hierbei sowohl reine 5G-Anlagen als auch 4G/5G-DSS-Systeme (siehe Abschnitt 0 und 4.3).

Letztlich wird eines Tages auch der LTE-Standard durch die 5G-Technologie abgelöst werden, was bei vielen Standorten aufgrund der großen Ähnlichkeiten der 4G- und 5G-Signale auch relativ einfach durch Softwareupdate möglich ist. Begünstigt wird die Geschwindigkeit derartiger Technologiewechsel durch die Subventionspolitik der Betreiber und Serviceprovider bezüglich der Endgeräte, was dazu führt, dass Endgeräte, die nicht zum Empfang von 5G-Signalen geeignet sind, vergleichsweise schnell von den Kunden durch neuere Modelle, welche diese Einschränkung nicht mehr besitzen, ersetzt werden.

6.1.3 Einsatz von Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung

Der Einsatz von Beamformingantennen (mMIMO-Antennen) ist derzeit auf typische Dach- und Maststandorte im Frequenzbereich MB36 beschränkt. In den übrigen Mobilfunkbändern (MB07 bis MB26) werden aktuell weiterhin konventionelle passive Antennen eingesetzt. Das Gleiche gilt für Antennen von Kleinzellenstandorten bzw. zur Inhausversorgung und bei Campusnetzen.

Wie auch in [SSK 21] dargelegt wird, kann der Einsatz von mMIMO-Antennen zu einer lokalen Zunahme der maximal möglichen Immission an denjenigen Orten führen, die sich im Abdeckungsbereich eines aktuell ausgebildeten Antennenbeams befinden. Dieser Extremfall einer lokalen Konzentration der Immission tritt aber nur dann auf, wenn ein einzelner Teilnehmer einen großen Teil der Ressourcen, die das Netz in der Zelle zu bieten hat, in Anspruch nimmt oder mehrere Teilnehmer sich räumlich sehr eng bei einander befinden und die vorhandenen Ressourcen der Zelle größtenteils unter sich aufteilen.

Gleichermaßen wird die Immission aber in den von der Antennenabstrahlung "ausgesparten" Orten im Bereich der Funkzelle sinken. Die mMIMO-Technik sorgt also erstmalig dafür, dass die Hochfrequenzfelder und damit auch die Immissionen hauptsächlich dort auftreten, wo sie auch für die Kommunikation gebraucht werden. Orte im Versorgungsbereich der Anlage, zu denen meist kein nennenswerter Datenverkehr erfolgt, werden demzufolge auch weniger exponiert.

Nutzt hingegen eine größere Anzahl an Teilnehmern in einer 5G-Funkzelle gleichzeitig das Funknetz und sind diese relativ gleichmäßig in der Funkzelle verteilt, muss die Antenne die zu Verfügung stehende Sendeleistung geeignet auf alle Teilnehmer räumlich aufteilen, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Immission innerhalb der Zelle führt.

Die grundsätzliche Möglichkeit einer lokalen Zunahme der maximal möglichen Immission bei Verwendung von mMIMO-Antennen wird von der BNetzA im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens geeignet berücksichtigt, so dass sichergestellt ist, dass auch im Umfeld von mMIMO-Antennen an allen Orten, die zum Aufenthalt von Personen der Allgemeinbevölkerung bestimmt sind, die Vorgaben der 26. BImSchV eingehalten werden [BNetzA 22a][BNetzA 20].

Nach aktueller Aussage der BNetzA sind für die Bewertung des Schutzes von Personen in elektromagnetischen Feldern die in 5G-Netzen eingesetzten Techniken selbst zweitrangig. Wie bei jeder anderen Funkanlage auch ist vielmehr die beantragte maximale Anlagenauslastung mit den damit verbundenen Immissionen maßgeblich. Eine Sonderstellung nimmt deshalb die 5G-Technik in Bezug auf den Personenschutz nicht ein [BNetzA 22a].

Auch eine ausschließliche Bewertung von 5G-Anlagen macht in Bezug auf den Personenschutz wenig Sinn, da zur Gewährleistung des Schutzes in elektromagnetischen Feldern von Funkanlagen alle relevanten Immissionen durch ortsfeste Funkanlagen zu betrachten sind (Summenimmission). Die Standortbescheinigungen der BNetzA beziehen sich immer auf alle relevanten Aussendungen der am Standort vorhandenen Anlagen [BNetzA 22a].

6.1.4 Veränderung der Immissionssituation durch 5G

6.1.4.1 Vergabeauflagen in Deutschland

Auslöser des aktuell vergleichsweise intensiven Netzausbaus durch die Betreiber ist der Auftrag der Bundesregierung im Einklang mit den Landesregierungen, die Versorgungsqualität im Bereich mobiler Datenkommunikation signifikant zu verbessern. Einerseits soll die Versorgung flächendeckend für ganz Deutschland mit einer bestimmten Mindestqualität sichergestellt werden, andererseits werden für Orte mit besonders hohem Datenverkehrsaufkommen entsprechend gesteigerte Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Netzes gestellt.

Insbesondere mit den Entscheidungen III und IV der Präsidentenkammer der BNetzA über die Festlegungen und Regeln zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz [BNetzA 18] wurden die Vorgaben der Politik in die Praxis umgesetzt. In diesen Dokumenten werden sowohl allgemeine als auch speziell 5G beziehungsweise das 3,6-GHz-Band betreffende Versorgungsziele definiert, die zeitlich gestaffelt beginnend ab Ende 2022 erfüllt sein müssen. Gemäß § 61 Abs. 3 Satz 2 Nr. 4 TKG wurden vor der Frequenzauktion seitens der BNetzA "die Frequenznutzungsbestimmungen einschließlich des Versorgungsgrades bei der Frequenznutzung und seiner zeitlichen Umsetzung" bestimmt [TKG 04].

6.1.4.2 Auflagen der Frequenzauktion 2019

Im Rahmen der Frequenzauktion 2019 wurden die folgenden wesentlichen Versorgungsziele durch die BNetzA definiert [BNetzA 18]:

Ein Haushalt bzw. Verkehrswege gelten als von einem Betreiber versorgt, wenn dort eine definierte Mindestdatenrate grundsätzlich verfügbar ist. Dabei wird allerdings von idealen Bedingungen ausgegangen, die eine durch andere Teilnehmer erzeugte Zellauslastung nicht berücksichtigt. Die Versorgungsaufgaben der Frequenzauktion in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz sind zeitlich gestaffelt und gelten je Netzbetreiber. Bis zum Ende des Jahres 2022 sind

- in beiden Frequenzbereichen zusammengerechnet mindestens 98 Prozent der Haushalte in jedem Bundesland mit mindestens 100 Mbit/s im Downlink zu versorgen.
- 500 Basisstationen mit mindestens 100 Mbit/s im Downlink in "weißen Flecken" in Betrieb zu nehmen.
- 1.000 5G-Basisstationen im Frequenzband MB36 für 5G-Anwendungen in Betrieb zu nehmen. Dabei werden die Frequenzen grundsätzlich technologie- und diensteneutral zugeteilt, d.h. streng genommen wird nicht der Einsatz von 5G angeordnet. Vielmehr sollen Basisstationen errichtet werden, die in der Lage sind, hinsichtlich Datenraten und Latenzzeiten Anforderungen zu erfüllen, wie sie beispielsweise durch die in 5G

spezifizierte Luftschnittstelle "5G NR" (NR = New Radio) realisiert werden kann. Im Frequenzband MB36 können Anlagen sowohl mit passiven Antennensystemen (konventionelle Mobilfunkantennen) als auch mit aktiven mMIMO-Antennensystem ausgestattet werden.

- Die zahlenmäßig spezifizierten Basisstationen können vom Betreiber innerhalb eines Bundeslandes örtlich den Anforderungen entsprechend frei verteilt werden. Zusätzlich wird eine Versorgung von 100 Mbit/s an besonders wichtigen Verkehrswegen (Bundesautobahnen, wichtige Bundesstraßen, fahrgaststarke Schienenwege) auferlegt. Um den zukünftigen Anforderungen moderner Fahrerassistenzsysteme gerecht zu werden, wird an Bundesautobahnen und -straßen zudem eine maximale Latenzzeit von 10 ms auferlegt.
- Bis zum Ende des Jahres 2024 sind auch alle anderen Bundesstraßen mit mindestens 100 Mbit/s und höchstens 10 ms Latenzzeit sowie alle Landes- und Staatsstraßen mit 50 Mbit/s zu versorgen. Seehäfen, das Kernnetz der Binnenwasserstraßen sowie alle übrigen Schienenwege sind mit mindestens 50 Mbit/s zu versorgen.

Für Neueinsteiger wird abweichend eine mildere Versorgungspflicht festgelegt. Diese umfasst eine Versorgung von mindestens 25 Prozent der Haushalte bis Ende 2023 und von 50 Prozent der Haushalte bis Ende 2025. Sofern Neueinsteiger lediglich das 3,6-GHz-Band erworben haben, sind bis Ende 2025 nur 25 Prozent der Haushalte zu versorgen. Für diesen Fall ist keine Versorgungspflicht bis Ende 2023 vorgegeben. Dies ist aber ohnehin nicht von Relevanz, da der einzige Neueinsteiger (1&1 Drillisch) auch Frequenzen im 2-GHz-Band ersteigert hat.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass bis Ende 2022 je Netzbetreiber mindestens 1.000 neue 5G-Basisstationen im 3,6-GHz-Band auf dem gesamten Bundesgebiet zu errichten sind. Aus den Vergabebedingungen ist allerdings nicht eindeutig ersichtlich, ob mit dem Begriff "1.000 Basisstationen" 1.000 neue Anlagenstandorte, die meist aus drei unabhängigen Basisstationen bestehen (somit also 3.000 Funkzellen) oder "nur" 1.000 Basisstationen zur Versorgung von 1.000 Funkzellen (also in etwa 333 Anlagenstandorte) gemeint ist.

Die im Frequenzband MB36 für die öffentlichen Netze zur Verfügung stehende Bandbreite von 300 MHz teilen sich die Netzbetreiber Vodafone, 1&1 Drillisch, Telefónica sowie Telekom auf. Die Versorgungsaufgaben ermöglichen, fordern aber nicht den Einsatz von mMIMO-Antennen. Zukünftig werden zudem mehr und mehr Anlagen in der Lage sein, in Kombination sowohl 4G- als auch 5G-Signale im gleichen Frequenzkanal abzustrahlen (DSS), was aber nicht zwingend mit einer Erhöhung der abgestrahlten Leistung verbunden ist.

6.1.4.3 Auswirkungen der Versorgungsaufgaben der BNetzA auf die Immission

Eine Zunahme der von Basisstationen verursachten Mobilfunkimmissionen ist überall dort zu erwarten, wo gegenwärtig die Versorgungssituation als nicht zufriedenstellend angesehen wird (echte "Funklöcher" oder zumindest nicht zufriedenstellende Übertragungsraten) beziehungsweise regelmäßig Kapazitätsengpässe auftreten und daher zur Verbesserung der Versorgungssituation neue Anlagenstandorte notwendig sind oder an vorhandenen Standorten zur Kapazitätssteigerung zusätzliche Systeme in Betrieb genommen werden. Neu sind hierbei die Frequenzbänder MB07 und MB36, die bisher anderen Funkdiensten (z.B. digitales TV Wi-MAX) vorbehalten waren. Im Bereich privater Netze (Industrie, Hochschulen) besteht zudem

die Möglichkeit, lokale Funknetze im Frequenzbereich MB36 in Betrieb zu nehmen, was lokal zu einer Zunahme der Hochfrequenzimmission führt.

Grundsätzlich ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund der technologieneutralen Vergabe der Funkfrequenzen eine daraus resultierende Immissionserhöhung generell auch mit einem Netzausbau durch eine andere Technologie als 5G zu erwarten wäre. Infolge der höheren Effizienz von 5G kann sogar erwartet werden, dass die Zunahme der Immissionen weniger deutlich ausfällt als beim Ausbau mit einer älteren Mobilfunktechnik [SSK 21].

Die zunehmende Anzahl an Basisstationsstandorten bzw. die zusätzliche Installation von Sendeanlagen in neu freigegebenen Bändern wird in der Umgebung der Standorte zu einer Zunahme der mittleren und maximal möglichen Immission führen. Durch das Standortbescheinigungsverfahren der BNetzA ist jedoch sichergestellt, dass die Vorgaben der 26. BImSchV auch weiterhin eingehalten werden. Grundsätzlich soll an dieser Stelle nochmals deutlich gesagt werden, dass die Veränderung der Immission nicht ursächlich durch die Einführung des 5G-Mobilfunkstandards ausgelöst wird, sondern durch die Vorgabe der Bundesregierung (als Reaktion auf entsprechende Wünsche der Wirtschaft und der Bürger) bedingt ist, die Leistungsfähigkeit der Mobilkommunikationsnetze deutlich zu steigern. Der Netzausbau und die damit immer verbundene Zunahme der Immission würde auch erfolgen, wenn die 5G-Technologie nicht verfügbar wäre.

6.2 Standortbescheinigung bzw. EMF-Portal der BNetzA

6.2.1 Neues Berechnungsverfahren der BNetzA

Vor Inbetriebnahme beziehungsweise der immissionsrelevanten Änderung einer ortsfesten Funksendeanlage ab einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 10 Watt muss der Betreiber im Vorfeld durch die BNetzA eine Prüfung der Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV vornehmen lassen. Ergibt diese Prüfung, dass an allen Orten in der Umgebung des Standortes, die für einen nicht kontrollierbaren Aufenthalt von Personen der Allgemeinbevölkerung bestimmt sind, die Vorgaben der 26. BImSchV eingehalten werden, bestätigt die BNetzA dem Betreiber die Sicherheit der Anlage bezüglich der Wirkungen hochfrequenter Felder durch Erteilung der Standortbescheinigung (StOB). Ohne vorliegende Standortbescheinigung darf der Betreiber die Anlage nicht in Betrieb nehmen, beziehungsweise die geplanten wesentlichen Änderungen vornehmen.

Die Standortbescheinigung wird von der BNetzA auch den zuständigen lokalen Immissionsschutzbehörden sowie der Kommune, auf deren Gebiet sich die Anlage befindet, zur Verfügung gestellt (über das passwortgeschützte "EMF-Datenportal"). In der Standortbescheinigung sind wesentliche sicherheitsrelevante Daten der am Standort betriebenen Funksendeanlagen dokumentiert. Allerdings ist der Informationsgehalt der Standortbescheinigungen inzwischen nicht mehr einheitlich.

Die größte Menge an Information kann den Standortbescheinigungen entnommen werden, bei denen die Genehmigungsfähigkeit des Standortes mittels eines vereinfachten, konservativen Berechnungsverfahrens geprüft wurde. Man findet in derartigen Standortbescheinigungen u.a. folgende Daten und Parameter:

- Anschrift des Standortes

- Erteilungsdatum und Nummer der Standortbescheinigung
- Für jede Antenne des Standortes werden folgende Parameter dokumentiert:
 - Betreiber
 - Frequenzband in dem die Antenne Signale abstrahlt
 - In älteren Standortbescheinigungen zusätzlich auch der Funkstandard (z.B. GSM, LTE)
 - Montagehöhe der Antenne über Grund
 - Horizontale Hauptsenderichtung der Antenne
 - Vertikaler Sicherheitsabstand für jede einzelne Antenne
 - Sicherheitsabstand in Hauptsenderichtung für jede einzelne Antenne (entspricht näherungsweise dem horizontalen Sicherheitsabstand der Antenne)
 - Aus den einzelnen individuellen Sicherheitsabständen wird zusammenfassend ein Sicherheitsabstand für den Gesamtstandort, der sogenannte "standortbezogene Sicherheitsabstand" ermittelt (wiederum sowohl ein vertikaler als auch ein "horizontaler" Sicherheitsabstand). Diese stellen eine Art "Worst-Case"-Sicherheitsabstände zur schnellen Beurteilung des Standortes dar. Befindet sich innerhalb des durch die "horizontalen" und vertikalen Sicherheitsabstände des Gesamtstandortes definierten Volumens kein Ort, an dem sich Personen der Allgemeinbevölkerung unkontrolliert aufhalten können, ist die Sicherheit des Standortes gemäß der Vorgaben nach 26. BImSchV nachgewiesen.
- Zusätzlich finden sich in den im "EMF-Datenportal" der Standortbescheinigung beige-fügten Unterlagen meist ein Kartenausschnitt der Umgebung des Standortes mit ein-gezeichneten horizontalen Hauptsenderichtungen der Antennen sowie Werkpläne, aus denen die bautechnische Realisierung des Standortes entnommen werden kann.
- Neueren Standortbescheinigungen ist auch eine ausführliche Dokumentation der tech-nischen Anlagendaten ("Datenblatt Funkanlage") als Anlage beige-fügt.

All diese Informationen vermitteln der zuständigen Immissionsschutzbehörde ein vergleichs-weise detailliertes Bild über den Standort und dessen Sicherheitsabstände.

Allerdings werden inzwischen immer häufiger insbesondere Dachstandorte mittels eines neuen Berechnungsprogramms ("Wattwächter") durch die BNetzA beurteilt. Standortbeschei-nigungen, die auf Basis dieser neuen Software erstellt werden, enthalten folgende Informatio-nen nicht mehr:

- Vertikaler Sicherheitsabstand jeder einzelnen Antenne
- Sicherheitsabstand in Hauptsenderichtung für jede einzelne Antenne
- Sicherheitsabstände des Gesamtstandortes

Somit fehlen in diesen Standortbescheinigungen alle Detailangaben über die Immissionswir-kungen in der Umgebung der Antennen. Damit kann ein zumindest grober Vergleich unter-schiedlicher Standorte bezüglich ihrer Immissionen (bzw. ihrer abgestrahlten Leistungen) nicht

mehr vorgenommen werden. Zudem ist es bei Kenntnis der Ausdehnung der Sicherheitsabstände möglich, unter Annahme idealer Freiraumausbreitung (Feldstärke nimmt umgekehrt proportional zum Abstand zur Anlage ab) näherungsweise abzuschätzen, wie groß die Immissionen an Orten in größeren Entfernungen außerhalb des Sicherheitsabstandes in etwa ausfallen.

Gerade im Rahmen der Risikokommunikation ist es nach Erfahrung der Autoren in vielen Fällen hilfreich, wenn die zuständigen Umweltbehörden in der Lage sind, unter Zuhilfenahme der StOB interessierten Bürgern die realen Sicherheitsabstände um die Antennen benennen können. Dies ist nun nicht mehr bei allen Standorten möglich.

Es existiert noch eine dritte Art von Standortbescheinigungen. Bei diesen wurde die Genehmigungsfähigkeit des Standortes nicht durch Berechnungen, sondern durch Messungen überprüft. Auch bei Standortbescheinigungen dieser Art fehlen die Angaben über die Sicherheitsabstände komplett. Aktuell sind auf Messungen basierende Standortbescheinigungen allerdings vergleichsweise selten.

Diese Unterschiede im Informationsgehalt der Standortbescheinigungen findet man auch im allgemein über die Homepage der BNetzA zugänglichen "EMF-Portal" wieder. In Abbildung 5.1 sind beispielhaft die auf den Standortbescheinigungen basierende Informationen zu zwei Standorten westlich des Hauptbahnhofs von Düsseldorf aus dem "EMF-Portal" wiedergegeben. Auf diese kann allgemein über den Link

www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/TK/Funktechnik/EMF/start.html

zugegriffen werden.

Die Informationen zum linken Standort in Abbildung 6.1 basieren auf einer konventionellen Standortbescheinigung. Im "EMF-Portal" fehlen aus Datenschutzgründen zwar grundsätzlich die genaue Anschrift, die Anlagenbetreiber, sowie detaillierte Werkpläne und die Frequenzbereiche, in denen die einzelnen Antennen senden, jedoch sind die berechneten Sicherheitsabstände des Standortes angegeben.

An einem Standort, bei dem die Sicherheit mit der neuen "Wattwächter"-Software nachgewiesen wurde, fallen die Informationen im "EMF-Portal" hingegen äußerst dürrtig aus (siehe rechten Standort in Abbildung 6.1). Es werden keine Details zu den Antennen mehr angegeben, sondern es wird nur festgestellt, dass die erforderlichen Schutzbereiche um die Antennen innerhalb des kontrollierbaren Bereichs liegen, der Standort also im Sinne der 26. BImSchV genehmigungsfähig ist.

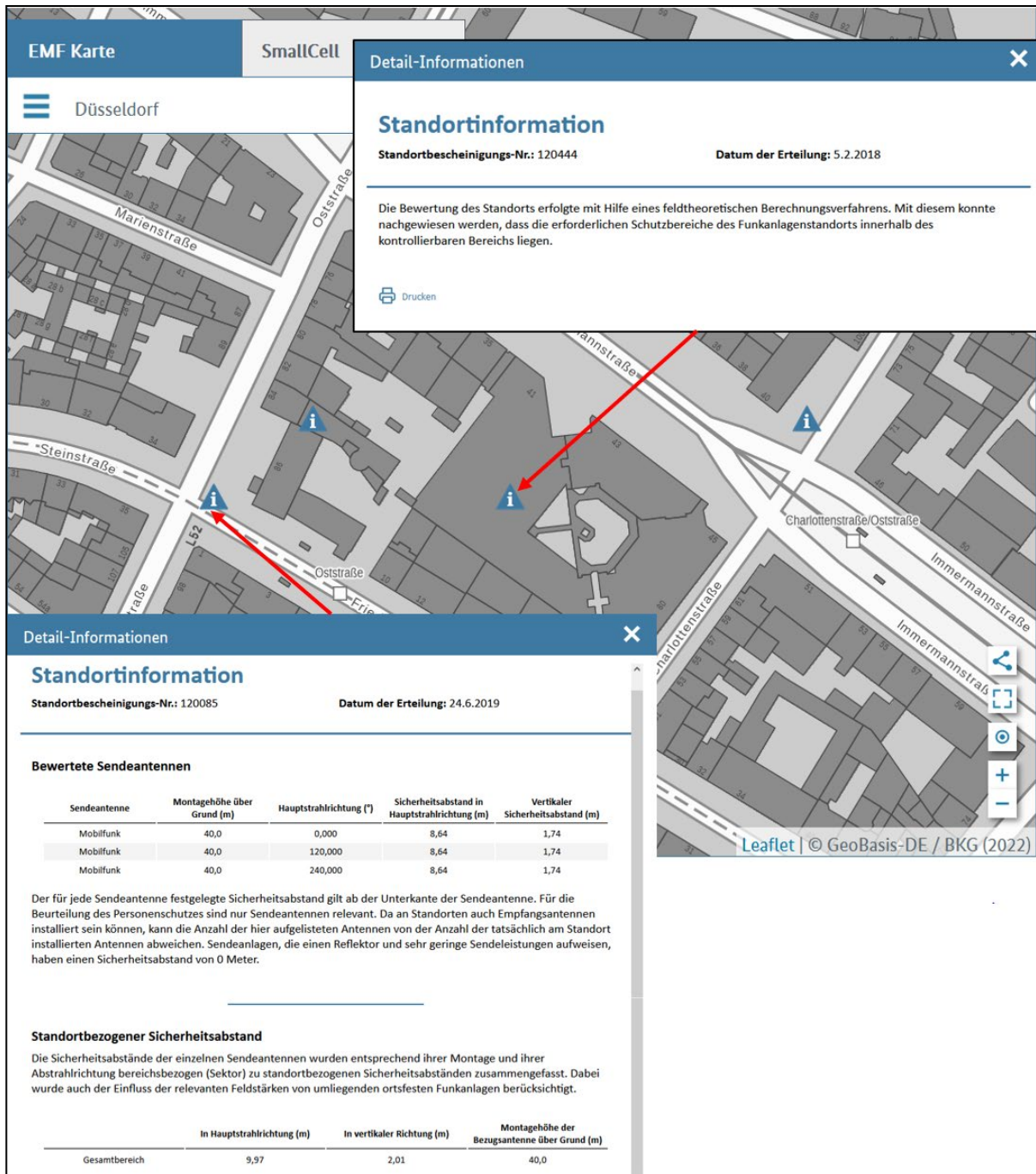


Abbildung 6.1: Beispiele für die im allgemein zugänglichen "EMF-Portal" der BNetzA verfügbaren Informationen über Funkanlagenstandorte.

6.2.2 Sicherheit von Trägern aktiver Implantate

In geringen Abständen zu Basisstationsantennen können Feldstärken auftreten, bei denen eine Störbeeinflussung von besonders empfindlichen Typen von aktiven Implantaten nicht völlig auszuschließen ist. Insbesondere Träger von Herzschrittmachern und Defibrillatoren, die sich beispielsweise aus beruflichen Gründen in der Nähe von Basisstationen aufhalten müssen, sollten deshalb einen Mindestabstand zu den Antennen einhalten.

Träger anderer aktiver Implantate (z. B. Insulinpumpen, Cochlearimplantate, Neurostimulatoren) sollten vergleichbare Vorsichtsmaßnahmen treffen.

Gemäß §10 der BEMFV hat die Bundesnetzagentur den Einwirkungsbereich für aktive Körperhilfen (d.h. den Bereich um die Antennen, in dem es eventuell zu Störungen von aktiven Implantaten kommen könnte) in der Standortbescheinigung speziell auszuweisen [BEMFV 13]. Allerdings nur dann, wenn er über den in der Standortbescheinigung primär festgelegten allgemeinen Personenschutz-Sicherheitsabstand nach 26. BImSchV hinausreicht. Aktuell finden sich in den Standortbescheinigungen von Basisstationen keine speziell ausgewiesenen Einwirkungsbereiche für aktive Körperhilfsmittel mehr, was impliziert, dass die Einhaltung der Vorgaben der 26.BImSchV bei Basisstationsantennen automatisch auch die Sicherheit für Träger aktiver Implantate gewährleistet.

In den für die Allgemeinheit zugänglichen Bereichen um die Antennen von Mobilfunkbasisstationen sind also keine Störungen an Herzschrittmachern, Defibrillatoren und anderen aktiven Implantaten zu befürchten.

Die Bundesnetzagentur bezieht sich bei der Ermittlung des Einwirkungsbereichs für aktive Körperhilfsmittel auf die DIN EN 50527-1 (Ausgabe 01/2011) [EN 50527-1] und die DIN EN 50527-2-1 (Ausgabe 05/2012) [EN 50527-2-1].

Geprüft werden allerdings gemäß §10 der BEMFV durch die Bundesnetzagentur nur Anlagen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz. Oberhalb von 3 GHz wird davon ausgegangen, dass aufgrund der mit steigender Frequenz abnehmenden Eindringtiefe der Hochfrequenzenergie in biologisches Gewebe eine Störbeeinflussung aktiver Implantate nicht mehr zu erwarten ist.

Mobilfunksendeanlagen im Frequenzbereich MB36 werden also von der Bundesnetzagentur in die Bewertung des Einflusses auf aktive Implantate nicht einbezogen.

In einer sehr ausführlichen Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) und der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) wird ebenfalls festgehalten, dass im Frequenzbereich oberhalb von 3 GHz eine Beeinflussung aktiver Implantate aufgrund der geringen Eindringtiefe der Hochfrequenzenergie in den Körper nicht mehr zu erwarten ist [NKL+ 19].

Müssen sich Träger aktiver Implantate innerhalb des BNetzA-Sicherheitsbereichs aufhalten (beispielsweise aufgrund einer beruflichen Tätigkeit), kann nicht mehr automatisch davon ausgegangen werden, dass keine Beeinflussung auftritt. Hilfestellung können in diesem Fall die Technischen Regeln zur EMFV (TREMf) leisten, denn in diesen sind für die Bewertung der Sicherheit von Arbeitsplätzen konkrete Schwellenwerte angegeben, bei deren Einhaltung von einer Nichtbeeinflussung aktiver beziehungsweise passiver Implantate ausgegangen werden kann [TREMf 2021]. Allerdings endet aufgrund der bereits erwähnten abnehmenden Eindringfähigkeit der Hochfrequenzenergie in das Körpergewebe der Frequenzbereich, für den in der

TREMF Schwellenwerte für die Beeinflussung aktiver Implantate angegeben sind, bei 2,5 GHz.

6.3 Überschlägige Immissionsberechnungen

Da im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens der BNetzA nur überprüft wird, ob an allgemein zugänglichen Orten im Umfeld eines Funkanlagenstandortes die Vorgaben der 26. BImSchV eingehalten werden, gibt die BNetzA in der Standortbescheinigung zusätzlich keine Absolutwerte der Grenzwertunterschreitung für Orte (z.B. Wohngebäude) außerhalb des Sicherheitsabstandes an.

Wird es von den zuständigen Immissionsbehörden als hilfreich erachtet, beispielsweise im Rahmen der Risikokommunikation für bestimmte Orte im Umfeld des Anlagenstandortes den Grad der Grenzwertunterschreitung quantitativ abzuschätzen, sind vereinfachte Feldstärkeberechnungen eine mögliche Option. Bei Standorten, die sich noch nicht in Betrieb befinden, ist dies zudem die einzige Alternative, da Messungen noch nicht möglich sind.

Wie beispielsweise in [BSW 06] und [BoSc 13] ausgeführt, erhält man eine ausreichend konservative und verlässliche Feldstärkeabschätzung mittels der Annahme einer idealen Freiraumausbreitung ohne Zusatzdämpfung durch Hindernisse (beispielsweise Gebäude oder Vegetation) plus einen Zuschlag von 3 dB (d.h. Faktor 2) auf die maximal in die Antenne eingespeiste Leistung zur Berücksichtigung eventueller Feldstärkeüberhöhungen am betrachteten Immissionsort durch Mehrwegeausbreitung. Softwareprogramme, mit denen derartige Berechnungen vorgenommen werden können, sind am Markt verfügbar, aber auch mittels einfacher Exceltabellen können derartige Berechnungen vorgenommen werden.

Die für die Berechnungen notwendigen technischen Anlagenparameter können sehr oft aus dem für berechnete Behörden und Kommunen zugänglichen "EMF-Datenportal" der BNetzA entnommen werden, denn bei neueren Standortbescheinigungen werden im dort zusätzlich zur Verfügung gestellten "Datenblatt Funkanlage" die technischen Parameter der am Standort befindlichen Anlagen sehr ausführlich dokumentiert (siehe Abschnitt 6.2.1). Alternativ ist natürlich auch eine Datenabfrage direkt beim Betreiber möglich. Zusätzlich benötigt werden für die Berechnung die Strahlungsdiagramme der am Standort befindlichen Antennen (jeweils für den an der Antenne eingestellten elektrischen Downtilt). Diese Diagramme sind meist nicht frei im Internet verfügbar, sondern müssen vom Betreiber geliefert werden.

Bei neueren Standortbescheinigungen ist für Anlagen mit Beamformingantennen (mMIMO) das einhüllende Antennendiagramm (horizontal und vertikal) aller möglichen Traffic Beams ebenfalls im "EMF-Datenportal" verfügbar, ebenso wie die Diagramme der anderen gegebenenfalls am Standort verwendeten passiven Antennen ohne Beamforming (siehe Beispiel in Abbildung 6.2). Allerdings sind die Diagramme dort nur in grafischer Form und nicht als Datei abrufbar.

Unter Verwendung dieser Daten können mit dem oben beschriebenen Berechnungsmodell die maximal entstehenden Immissionen für Punkte außerhalb der Sicherheitsabstände der Anlagen absolut oder auch als prozentuale Grenzwertausschöpfung mit einer für die Risikokommunikation ausreichenden Genauigkeit abgeschätzt werden. Die Einführung von 5G beziehungsweise die damit einhergehende erstmalige Verwendung von mMIMO-Antennen führt bei

rechnerischen Immissionsabschätzungen der maximal möglichen Immission zu keiner nennenswerten Verkomplizierung der Vorgehensweise.

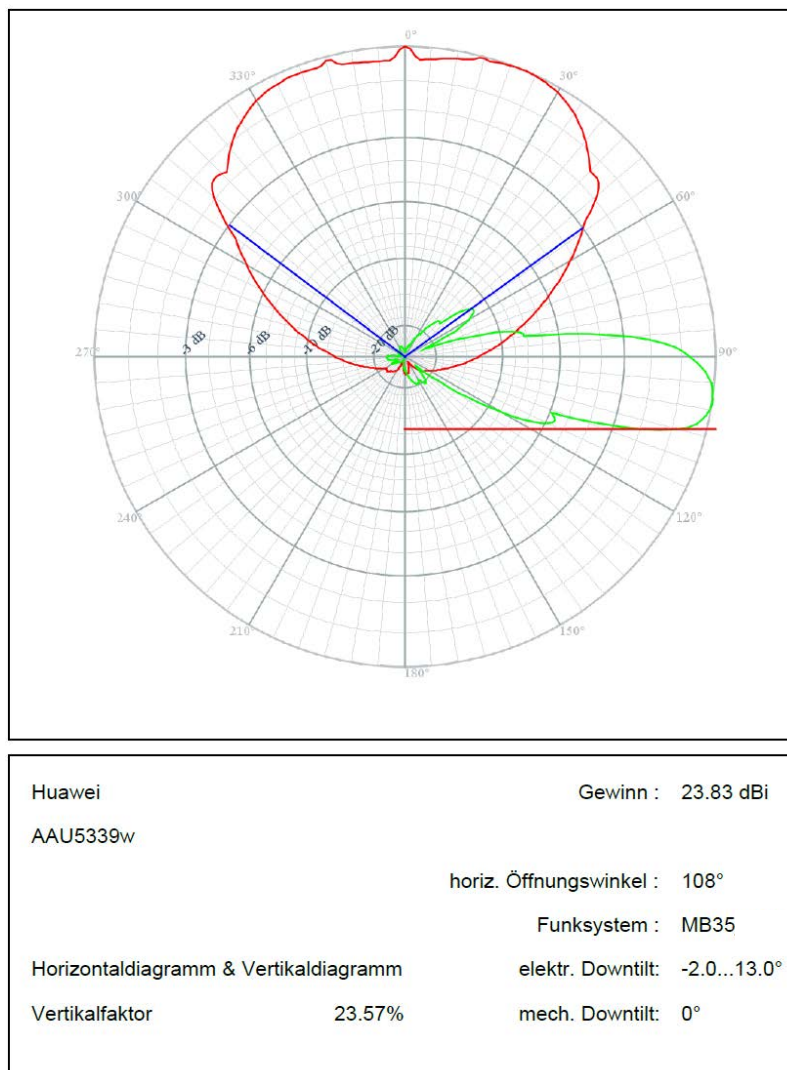


Abbildung 6.2: Beispiel eines im "EMF-Portal" zur Verfügung gestellten Antennendiagramms einer mMIMO-Antenne (Huawei AAU5339w).

Grundsätzlich erfordert jedoch die Durchführung derartiger Immissionsberechnungen ein gewisses Mindestmaß an Fachkenntnissen und Routine, wie sie beispielsweise durch eine entsprechende Schulung im Umgang mit den diversen technischen Anlagenparametern und der gegebenenfalls verwendeten Berechnungssoftware erworben werden können.

6.4 Immissionsmessungen an 5G-Anlagen

Bei in Betrieb befindlichen Mobilfunkanlagen können die in der Umgebung vorhandenen Mobilfunkimmissionen durch Messungen ermittelt werden. In früheren Jahren wurden durch das LANUV bereits Messungen in der Umgebung von Mobilfunkanlagen (2G - 4G) in Auftrag gegeben und deren Ergebnisse veröffentlicht [BNS 02], [BSN+ 05], [BoSc 13]. In dem hier vorliegenden Vorhaben wird diese Tradition mit Messungen in der Umgebung von 5G-Sendeanlagen fortgeführt.

Zusätzlich zur Durchführung der Messungen wurde vom Auftraggeber gewünscht, die korrekte Vorgehensweise bei der Durchführung von Immissionsmessungen an 5G-Anlagen in kompakter Form zu beschreiben und insbesondere auf Unterschiede zu Messungen an Anlagen älterer Technologien einzugehen. Zudem sind die verschiedenen möglichen Messverfahren (breitbandige, frequenzselektive und codeselektive Messung) hinsichtlich ihrer Eignung zur Immissionsbestimmung an 5G-Anlagen zu vergleichen.

Eine vollumfängliche Einführung in die EMF-Messtechnik zur Bestimmung der Immissionen im Umfeld von Mobilfunkanlagen würde den Rahmen dieses Berichtes bei weitem sprengen. Hierzu existiert jedoch mit [Wus 22] bereits ein ausführlicher Praxisleitfaden, in dessen neuester Auflage auch umfänglich auf die Immissionsmesstechnik bei 5G-Anlagen eingegangen wird.

In diesem Abschnitt werden folgende Themen näher behandelt:

- Wie unterscheiden sich Messungen zur Bestimmung der aktuell am Messpunkt vorhandenen Immission ("Momentanmission") von Messungen zur Bestimmung der am Messpunkt maximal möglichen Immission?
- Welche Messverfahren (breitbandige, frequenzselektive und codeselektive Messung) sind zur Immissionsbestimmung an 5G-Anlagen (Maximalmission bzw. Momentanmission) geeignet?
- Gibt es Unterschiede bezüglich der Immissionsmessung in Abhängigkeit vom Typ der 5G-Anlage (5G zusammen mit LTE im DSS-Mode, 5G-Anlagen mit konventionellen Antennen ohne mMIMO, 5G-Anlagen mit mMIMO-Antennen)?
- Welche technischen Anlagendaten sind für die Auswertung der Messungen vom Betreiber zu liefern?

Die am Messgerät für eine korrekte Immissionserfassung einzustellenden Parameter unterscheiden sich sowohl in ihrer Bezeichnung als auch in ihrer Funktionsweise je nach Hersteller und Messgerät teilweise erheblich, die zugrundeliegenden Messprinzipien sind jedoch immer dieselben. Daher kann in diesem Bericht natürlich nicht eine für alle auf dem Markt verfügbaren Messgeräte umfassende Beschreibung der konkreten Geräteeinstellungen erfolgen, es wird hingegen vornehmlich das grundsätzliche Messprinzip erläutert, sowie dargelegt, welche Fehler entstehen können, wenn diese grundlegenden Vorgaben nicht eingehalten werden (Über- oder Unterbewertung der Immission). Falls Detailangaben notwendig sind oder Beispiele behandelt werden, beziehen sich diese immer auf das auch im Rahmen dieser Messkampagne eingesetzte Messgerät (SRM-3006 von Narda).

Bei vielen Standorten sind neben den 5G-Anlagen auch Systeme älterer Mobilfunkgenerationen in Betrieb. Um die komplette durch Mobilfunksignale generierte Immission zu erfassen,

müssen die Felder, verursacht durch diese älteren Anlagen, ebenfalls ermittelt und in die Gesamtbetrachtung einbezogen werden (grenzwertbezogene Summation). Auf die Messung dieser älteren Systeme wird in diesem Bericht jedoch nicht näher eingegangen, es sei hier wieder auf die Literatur verwiesen (z.B. [Wus 22]).

6.4.1 Messung der Momentanimmission

6.4.1.1 Zweck der Messung

Momentanimmissionen können Aussagen über typischerweise auftretende Immissionen in der Umgebung des 5G-Anlagenstandortes liefern. Wegen der sich schnell ändernden Feldstärkewerte aufgrund von Lastschwankungen und insbesondere durch Beamforming wird die Momentanimmission nur über ein verhältnismäßig kurzes Zeitintervall gemittelt und entspricht somit nicht dem in vielen Normen erwähnten 6-Minuten-Mittelwert. Momentanimmissionen können beispielsweise an einem Punkt über längere Zeiträume wiederholt gemessen und abgespeichert werden (z.B. alle 10 Sekunden), wodurch eine Dokumentation der zeitlichen Schwankung der Hochfrequenzimmission möglich wird.

Generiert man mit einem Endgerät während der Messung eine gesteigerte Auslastung der 5G-Anlage (z.B. durch Videostreaming), kann die Messung der in diesem Fall auftretenden Felder eine Aussage über die durch die Basisstation verursachte Immission bei einer typischen Nutzung des 5G-Endgerätes getroffen werden ("typische Immission").

6.4.1.2 Geeignete Messverfahren

Grundsätzlich können Momentanimmissionen breitbandig oder frequenzselektiv erfasst werden. Die codeselektive Messung ist für die Ermittlung der Momentanimmission nicht geeignet. Im Folgenden dazu noch einige Detailinformationen:

6.4.1.2.1 Breitbandmessung

Der Einsatz eines typischen Breitbandmessgerätes mit Diodensensor zur Bestimmung von Hochfrequenzimmissionen ist grundsätzlich möglich, wenn die die am Messort vorhandenen Felder ausreichend groß sind, so dass die Nachweisschwelle der Breitbandsonde überschritten wird (typisch mindestens etwa 0,5 bis 1 V/m). Mittelwertbildungen beispielweise über 10 Sekunden sind mit Breitbandmessgeräten üblicherweise möglich.

Der Vorteil einer breitbandigen Messung liegt in der einfachen Bedienung der Messgeräte. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass derartige Sonden nur einen Summenimmissionswert liefern, die einzelnen am Messort vorhandenen Immissionen also nicht frequenzmäßig auflösen. Will man nicht nur die am Messort vorhandene Summenfeldstärke, sondern die prozentuale Grenzwertausschöpfung möglichst genau ermitteln, ist eine Frequenzauflösung jedoch unbedingt notwendig, denn im Frequenzbereich des zellularen Mobilfunks (380 MHz - 3,8 GHz) sind die anzuwendenden Grenzwerte der 26. BImSchV nicht konstant, sondern frequenzabhängig (zwischen 28 und 61 V/m). Ohne Frequenzauflösung kann nur eine grobe, allerdings konservative Grenzwertausschöpfung ermittelt werden. Man vergleicht in diesem Fall die breitbandig

gemessene Feldstärke mit dem niedrigsten im Frequenzbereich des Mobilfunks anzuwendenden Grenzwert (28 V/m für BOS-TETRA). Damit ergibt sich allerdings eine mehr oder weniger große Überbewertung der aktuellen Immission.

Allerdings sind auf dem Markt auch sogenannte "shaped probes" verfügbar, deren Empfindlichkeit an die Frequenzabhängigkeit der Grenzwerte angepasst ist, so dass auch mit einer Breitbandmessung die Momentanimmission in guter Näherung als prozentuale Grenzwertausschöpfung angegeben werden kann.

Nachteilig bleibt jedoch weiterhin, dass bei einer breitbandigen Messung die einzelnen Mobilfunksignale auch bei Verwendung von "shaped probes" nicht bezüglich ihrer individuellen Immissionsbeiträge separiert werden können. Es können also keine Vergleiche zwischen den durch die 5G-Anlage und den durch die anderen am Standort vorhandenen Mobilfunksysteme generierten Immission vorgenommen werden, was jedoch im Rahmen der Risikokommunikation durchaus hilfreich sein kann.

Zudem zeigen auch die im Rahmen dieses Projektes dokumentierten Messwerte, dass zumindest bei geringer Anlagenauslastung die von 5G-Systemen an den Messpunkten verursachten Immissionen aktuell sehr klein ausfallen. Aus Tabelle 3.14 wird ersichtlich, dass derzeit an den Messpunkten in der Umgebung der untersuchten Makrostandorte die aktuelle und auch die typische 5G-Immission im Regelfall mit Feldstärkewerten von weniger als 1 V/m - zum Teil deutlich - unter der Nachweisgrenze einer Breitbandmessung liegen.

Eine breitbandige Messung der Mobilfunk-Momentanimmission ist also prinzipiell möglich, es müssen jedoch einige Einschränkungen in Kauf genommen werden, wie insbesondere die Tatsache, dass nur die am Messpunkt aktuell vorhandene Summenimmission ermittelt werden kann und nicht daraus der Beitrag der 5G-Anlage separiert werden kann.

Zudem ist bei allen Breitbandmessungen grundsätzlich darauf zu achten, dass die Messergebnisse nicht durch die Uplinksignale von im näheren Umfeld des Messpunktes vorhandene Endgeräte (z.B. Mobiltelefone) oder andere HF-Quellen (z.B. WLAN-Router) verfälscht wird.

6.4.1.2.2 Frequenzselektive Messung

Die frequenzselektive Erfassung von Funksignalen bedeutet zwar einen größeren gerätetechnischen Aufwand (Spektrumanalysator oder Messempfänger plus kalibrierte Messantenne), dafür besitzt sie die bei der Breitbandmessung angesprochenen Nachteile (geringe Empfindlichkeit, keine Trennung der einzelnen Signale bezüglich ihrer Frequenz) nicht mehr. Der einzige bereits bei der breitbandigen Messung angesprochene Nachteil, der auch bei einer frequenzselektiven Messung noch im Auge behalten werden muss, ist die Tatsache, dass bei TDD-Netzen (d.h. Uplink und Downlink nutzen den gleichen Frequenzkanal) wiederum darauf zu achten ist, dass die Uplinksignale von in der näheren Umgebung des Messpunktes betriebenen Endgeräten nicht die Messung der durch die Downlinksignale verursachten Immissionen verfälschen.

Zur frequenzselektiven Erfassung der Immissionen von 5G-Anlagen muss bekannt sein, in welchen Frequenzbereichen die Signale vorhanden sind, damit die Messgeräte für die indivi-

duelle Messung der einzelnen Funkkanäle geeignet konfiguriert werden können. Wie in Abschnitt 6.1.2 bereits näher erläutert, werden 5G-Systeme aktuell in folgenden Bändern eingesetzt:

Tabelle 6.1: Frequenzkanäle, in denen aktuell 5G-Signale von Basisstationen abgestrahlt werden (Stand: 05/2022)

Band	Kanalbandbreite (von - bis)	Betreiber	Bemerkungen
MB07	758 - 768 MHz	Telefónica	5G
MB07	768 - 778 MHz	Telekom	4G, 5G oder 4G/5G-DSS
MB07	778 - 788 MHz	Vodafone	4G oder 4G/5G-DSS
MB18	1.840 - 1.860 MHz	Telefónica	4G oder 4G/5G-DSS (teilweise auch noch GSM)
MB18	1.860 - 1.880 MHz	Vodafone	4G oder 4G/5G-DSS (teilweise auch noch GSM)
MB21	2.150 - 2.170 MHz	Telekom	4G oder 4G/5G-DSS
MB36	3.400 - 3.490 MHz	Vodafone	5G
MB36	3.490 - 3.540 MHz	Drillisch	5G
MB36	3.540 - 3.610 MHz	Telefónica	5G
MB36	3.610 - 3.700 MHz	Telekom	5G
MB36	3.700 - 3.800 MHz	diverse	5G, Bandbreite in 1 bis 10 Blöcken zu 10 MHz zugeteilt

Eine spektrale Überblicksmessung, kann aufzeigen, welche der aktuell gegebenenfalls für 5G-Signale vorgesehenen Kanäle (Tabelle 6.1) am Messort nennenswert Immissionen generieren. Anschließend kann die eigentliche Momentanimmissionsmessung in diesen Kanälen vorgenommen werden.

Wird in einem Kanal mittels der Betriebsart "Dynamic Spectrum Sharing" eine Funkkommunikation sowohl über den 4G- (LTE-) als auch den 5G-Standard ermöglicht (Details dazu finden sich in Abschnitt 1.2.1), ist messtechnisch keine Trennung in die von der Anlage generierte 4G- beziehungsweise 5G-Immissionen möglich, da mit OFDM von beiden Funkstandards das gleiche Zugriffsverfahren angewendet wird, wodurch sich je nach aktuellem Nutzerszenario die Aufteilung der im Frequenzkanal zur Verfügung stehenden Signalleistung auf die beiden Funkstandards dynamisch ändert. Ermittelt werden kann nur die durch das DSS-Signal aktuell erzeugte Hochfrequenzimmission ohne genauere Angabe, wie diese sich zum Zeitpunkt der Messung auf die beiden Funkstandards aufteilt.

Falls nicht eindeutig geklärt ist, ob in einem Funkkanal ein reines 5G-Signal, ein reines 4G-Signal oder 4G und 5G zusammen im DSS-Mode abgestrahlt werden, kann eine einfache spektrale Übersichtsmessung diesbezüglich Klarheit schaffen.

Dazu stellt man auf dem Bildschirm des Messgerätes die Spektren der zu analysierenden Signale dar und zwar mit einer vergleichsweise kleinen RBW von beispielsweise 30 oder 100 kHz, so dass die Flanken der Signalspektren ausreichend genau sichtbar werden (siehe dazu Abbildung 6.3).

Da für 4G nur sechs verschiedene Signalbandbreiten zwischen minimal 1,08 MHz und maximal 18 MHz möglich sind, muss es sich bei Vorliegen einer Signalbandbreite größer als

18 MHz auf jeden Fall um ein reines 5G-Signal handeln (Siehe dazu auch die Auflistung aller für 5G im Frequenzbereich FR1 möglichen Signalbandbreiten in Tabelle 1.1).

Bei Signalen in einem Frequenzkanal mit einer Bandbreite, die einem der sowohl für 4G als auch für 5G spezifizierten Werte entspricht (siehe Tabelle 6.2), kann durch genaues Betrachten beziehungsweise Ausmessen der Bandbreite des Signalspektrums erkannt werden, ob ein reines 4G- bzw. 5G-Signal vorliegt oder 4G zusammen mit 5G im DSS-Modus abgestrahlt wird (siehe Abbildung 6.3).

Tabelle 6.2: Maximale Signalbandbreiten für Frequenzkanäle, die sowohl für 4G als auch für 5G spezifiziert sind

Kanalbandbreite	max. Signalbandbreite (4G)	max. Signalbandbreite (5G)
5 MHz	4,5 MHz	3,96 MHz
10 MHz	9,0 MHz	8,64 MHz
15 MHz	13,5 MHz	13,68 MHz
20 MHz	18,0 MHz	18,36 MHz

Bei Abstrahlung eines reinen 4G- oder 5G-Signals besitzt das Spektrum eine eindeutige Signalbandbreite entsprechend den in Tabelle 1.1 beziehungsweise Tabelle 6.2 angegebenen Werten. Liegt in einem Frequenzkanal hingegen DSS vor, ergibt sich bei der Bandbreite des Signals ein unklares Bild, da sich die (üblicherweise in der Praxis auch verwendeten) maximalen Signalbandbreiten von 4G und 5G etwas unterscheiden (vgl. Tabelle 6.2).

Theoretisch wäre es zwar möglich, dass die beiden unterschiedlichen Signalbandbreiten von 4G und 5G im DSS auf den jeweils kleineren Wert angeglichen werden, was dazu führen würde, dass die DSS-Betriebsart nicht mehr im Spektrum erkennbar ist. Da dies aber mit einer Verringerung der maximalen Übertragungskapazität des Signals verbunden wäre, ist es eher unwahrscheinlich, dass diese Anpassung in der Praxis vorgenommen wird.

Abbildung 6.3 zeigt das Ergebnis einer mit dem *SRM-3006* vorgenommenen spektralen Übersichtsmessung von drei 4G-Signalen im Frequenzbereich MB21, wobei eines davon auch 5G-Signale im DSS-Mode überträgt.

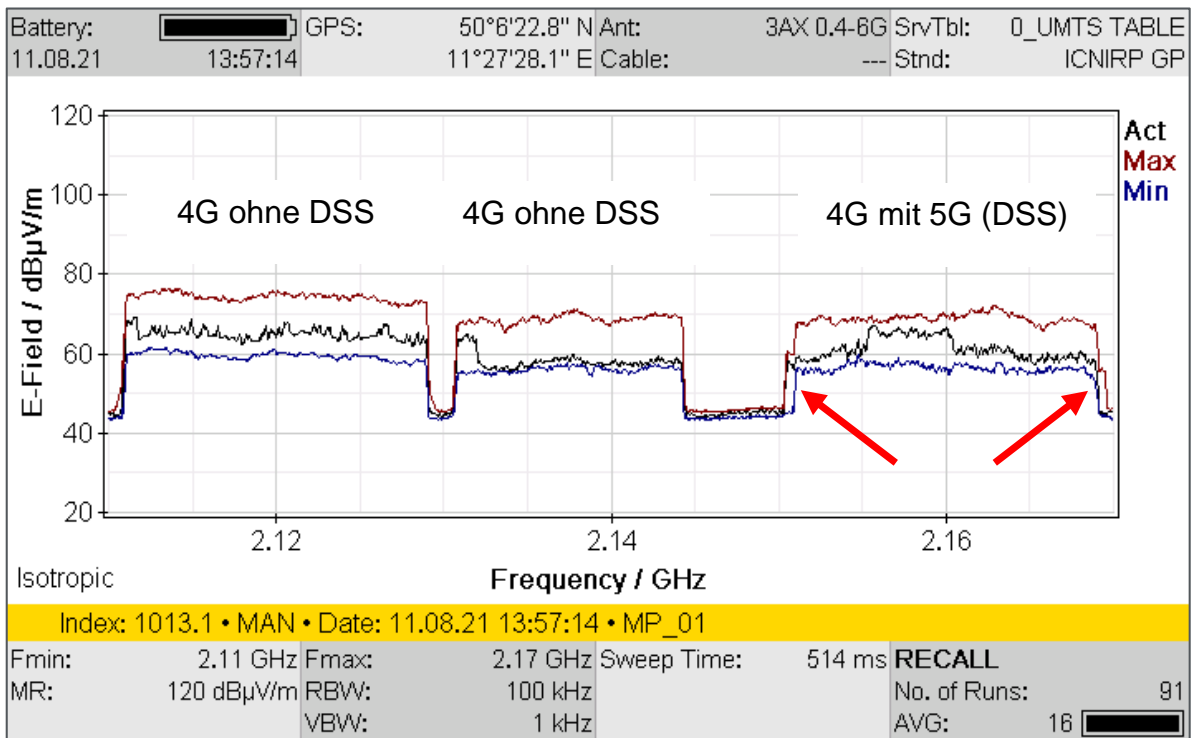


Abbildung 6.3: Zwei reine 4G-Signale ohne 5G-DSS (links), das rechte Signal beinhaltet hingegen 4G- und 5G-Signale im DSS-Mode.

Das linke der drei Signale in Abbildung 6.3 nutzt einen 20-MHz-Kanal und besitzt eine Signalbandbreite von permanent 18 MHz sowohl im **Max** als auch im **Min** Trace, es handelt sich also um ein reines 4G-Signal. Die Bandbreite des mittleren 4G-Signals ist ebenfalls konstant und beträgt 13,5 MHz, da es aktuell nur einen 15 MHz breiten Kanal nutzt. Beim rechten Signal, das wiederum einen 20 MHz breiten Kanal nutzt, ist die Signalbandbreite nicht eindeutig ersichtlich. Vergleicht man die Breite des Signals im **Max** und **Min** Trace, scheint sie manchmal etwas größer und manchmal etwas kleiner gewesen zu sein. Dies liegt daran, dass nach Tabelle 6.2 im 20 MHz-Kanal ein 4G-Signal eine maximale Bandbreite von genau 18 MHz besitzt, beim 5G-Signal sind es hingegen 18,36 MHz. Wenn also während der Messung Kommunikationsverbindungen auch über 5G geführt werden, verbreitert sich das Spektrum zeitweise etwas, zu anderen Zeiten wird das Spektrum wieder schmaler, wenn nur oder hauptsächlich 4G-Verbindungen geführt werden.

Bei einer Ergebnisdarstellung wie in Abbildung 6.3 erkennt man ein DSS-Signal also daran, dass die untere und obere Begrenzung des Spektrums im **Max** und **Min** Trace nicht deckungsgleich sind. Ein Blick in Tabelle 6.1 zeigt, dass das rechte Signal in Abbildung 5.3 (Frequenzkanal: 2.150 - 2.170 MHz) von Anlagen der Telekom stammen muss, die im hier dargestellten Frequenzbereich (MB21) 4G zusammen mit 5G im DSS Mode abstrahlt.

Die Messung der Momentanimmission kann beispielsweise mit der auch im Rahmen dieses Projektes gewählten Betriebsart "Safety Evaluation" des SRM-3006 und den in Tabelle 2.5 angegebenen Einstellparametern erfolgen. Die Mittelung des rauschartigen Signals zur Ermittlung eines RMS-Werts erfolgt automatisch durch die eingestellte kleine Bandbreite des Analysefilters (Auflösebandbreite RBW) von 10 bzw. 20 kHz (je nach Trägerabstand). Eine deutlich größere RBW kann je nach aktuellem Crestfaktor des Signals zu einer Überbewertung der Immission in der Größenordnung von durchaus etwa 10 dB führen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass frequenzselektive Messungen der 5G-Momentanmission mit einem korrekt eingestellten Messgerät vergleichsweise einfach und zuverlässig vorgenommen werden können.

6.4.2 Messtechnische Bestimmung der maximal möglichen Immission

6.4.2.1 Zweck der Messung

Durch die Bestimmung der am Messpunkt maximal möglichen Immission erhält man Feldstärkewerte, die nicht mehr von der aktuellen Auslastung der Anlage abhängig sind, sondern vielmehr die ungünstigste Immissionssituation darstellen. Vergleicht man diese Messresultate mit den für die Allgemeinbevölkerung verbindlichen Grenzwerten der 26. BImSchV, kann die zuständige Behörde erkennen, ob die Vorgaben des Immissionsschutzes am Messpunkt eingehalten werden beziehungsweise um welchen Faktor dort die maximal zulässigen Werte unterschritten sind.

6.4.2.2 Geeignete Messverfahren

Um von einer technischen Unterstützung der Betreiber bei den Messungen vor Ort unabhängig zu sein, sollte mithilfe des Messverfahrens ohne Eingriff in den Wirkbetrieb der Basisstation eine Aussage über die am Messpunkt vorhandene Maximalimmission möglich sein. Für die älteren Mobilfunktechniken (2G, 3G und 4G) wurden hierzu geeignete Verfahren entwickelt, die sich auch seit vielen Jahren in der Praxis bewährt haben.

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der messtechnischen Bestimmung von 5G-Maximalimmissionen mit allen Einstellparametern am Messgerät würde den Umfang dieses Berichts sprengen. Hier sei auf vorhandene Literatur verwiesen [BKS+ 19], [BKS+ 20], [BKH+ 20], [KBS+ 20], [SKB+ 20], [KBW 22]. Eine sehr detaillierte Beschreibung der codeselektiven Messung von 5G-Immissionen findet sich in [Wus 22] Im Folgenden werden einige grundsätzliche Anmerkungen zu den beiden möglichen Verfahren gegeben.

6.4.2.2.1 Extrapolation der Immission von Referenzsignalen

In Anlehnung an die Vorgehensweise bei 4G kann auch bei 5G-Anlagen die Bestimmung der Maximalimmission durch Extrapolation auf Basis der Immission bestimmter Referenzsignale erfolgen. Bei 5G sind dies die in den Broadcast Beams ausgesendeten SSB-Signale. Diese können messtechnisch auf zwei Arten bestimmt werden. Bei der frequenzselektiven Messung wird die höchste Immission innerhalb des SSB-Spektrums bestimmt. Bei der codeselektiven Messung werden explizit die Immissionsbeiträge des in den Broadcast Beams abgestrahlten SSS (Secondary Synchronization Signal) ermittelt. Bei Beamforming-Antennen im 3,6-GHz-Band können ein bis acht Broadcast Beams pro SSB-Periode abgestrahlt werden. Bei mehr als einem Broadcast-Beam muss dabei die höchste Immission, d.h. die des zum Immissionsort am besten ausgerichteten Broadcast Beams für die Hochrechnung herangezogen werden.

Aktuelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die codeselektive Messung deutlich verlässlichere Ergebnisse liefern kann, als es mit einer frequenzselektiven Messung möglich ist, die beispielsweise die SSB-Signale der einzelnen am Basisstationsstandort vorhandenen 5G-

Sektorantennen nicht voneinander separieren kann. Daher wird im weiteren Text nur noch auf die codeselektive Messung eingegangen.

Die Maximalimmission ergibt sich aus der codeselektiv gemessenen Feldstärke der SSS-Signale jeder Antenne durch Multiplikation mit einem Leistungskorrekturfaktor. Dieser errechnet sich aus der maximal von der Antenne abstrahlten Leistung und der Leistung, mit der aktuell das SSS-Signal abgestrahlt wird. Beide Leistungswerte sind dem Betreiber bekannt und müssen von diesem zur Verfügung gestellt werden.

Bei Antennen mit Beamforming (mMIMO) ist zusätzlich ein zweiter Extrapolationsfaktor anzuwenden. Dieser ist darin begründet, dass bei derartigen Antennen die (gemessenen) SSS-Signale mit einer anderen Antennencharakteristik abgestrahlt werden, als die für die Maximalimmission verantwortlichen Trafficsignale (PDSCH). Um diesen Faktor bestimmen zu können, müssen allerdings vom Betreiber die Antennendiagramme für diese beiden unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken der Antenne zur Verfügung gestellt werden. Würde man diesen Faktor nicht berücksichtigen, sind erhebliche Unterbewertungen der Immission möglich.

Die oben beschriebene Extrapolation geht von einem FDD-Signal aus, d.h. bei Vollauslastung sendet die Basisstation permanent mit maximaler Leistung. Da die Basisstation bei TDD-Anlagen nicht permanent senden kann, damit auch den Endgeräten Zeit zur Verfügung steht, in denen sie ihre Signale in Richtung zur Basisstation abgeben können, verringert sich dadurch die im Mittel durch die Basisstation abgestrahlte Leistung und damit auch die Immission um einen bestimmten Faktor.

Im Frequenzband MB36 werden alle Anlagen im TDD-Mode betrieben. Aktuell haben die Netzbetreiber in Deutschland dort einen TDD-Faktor von etwa 75 Prozent eingestellt, das heißt 25 Prozent der Zeit sendet die Basisstation auch bei Vollauslastung nicht, was zu einer Reduktion der im ersten Schritt (unter Annahme von FDD) hochgerechneten Immission um etwa 1,3 dB führt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die messtechnische Bestimmung der maximal möglichen Immission bei 5G-Anlagen ohne Beamformingantennen mittels einer codeselektiven Messung bei korrekt eingestelltem Messgerät vergleichsweise unproblematisch durchführbar ist. Auch die Extrapolation lässt sich mit wenigen technischen Anlagenparametern, die allerdings vom Betreiber geliefert werden müssen, einfach und verlässlich durchführen. Der Schwierigkeitsgrad ist vergleichbar mit dem bei einer codeselektiven Messung und Extrapolation von 4G-Signalen.

Bei Anlagen mit Beamformingantennen ist die Situation deutlich komplexer: Die reine Messung ist allerdings auch hier vergleichsweise unproblematisch. Aufwändiger sind hingegen Auswertung und Hochrechnung der Messergebnisse, insbesondere die Berücksichtigung der unterschiedlichen Antennendiagramme von SSS und Trafficsignalen. Die Betreiber müssen hierzu die entsprechenden Antennendaten zur Verfügung stellen. Zudem ist der sich daraus ergebende Korrekturfaktor nicht konstant, sondern unter Umständen deutlich von der räumlichen Lage des Messpunktes (Azimut, Elevation) relativ zur Sendeantenne abhängig, was bedeutet, dass diese Parameter ebenfalls im Rahmen der Messung vor Ort oder nachträglich durch Auswertung von Geodaten für jeden Messpunkt individuell ermittelt werden müssen.

Bei Messpunkten ohne direkte Sichtverbindung zur Sendeantenne können zusätzliche Unsicherheitsfaktoren auftreten, da sich die Funkwelle eventuell nicht auf direktem Weg, sondern

auf einer anderen Richtung über Reflexionen von der Sendeantenne zum Endgerät ausbreitet, was bei der Ermittlung des Korrekturfaktors möglicherweise so nicht berücksichtigt wurde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die codeselektive Messung des in den Broadcast Beams abgestrahlten SSS mittels dafür geeigneter Messgeräte mit vergleichbarem Aufwand und ähnlicher Präzision vorgenommen werden kann, wie dies aus der codeselektiven Messtechnik bei 4G-Anlagen bekannt ist. Die Hochrechnung der Messergebnisse auf maximale Immission ist bei 5G-Anlagen mit konventionellen Antennen ebenfalls vergleichbar zur Vorgehensweise bei 4G.

Bei Anlagen mit mMIMO-Antennen gilt für die reine Messung ebenfalls das im letzten Absatz Geschriebene. Jedoch ist die Prozedur der Hochrechnung der Messergebnisse auf Maximalimmission bei derartigen Anlagen mit viel Aufwand verbunden, da deutlich mehr Anlagenparameter (Antennendiagramme) zur Verfügung stehen müssen. Zudem ergeben sich hierbei neue, bei bisherigen Mobilfunkstandards nicht auftretende Quellen für Unsicherheiten. Hierzu zählen die Toleranzen bei der Bestimmung des Azimut- beziehungsweise des Elevationswinkels, unter dem die Basisstationsantenne den Messort sieht. Weiterhin müssen die genaue horizontale und vertikale Ausrichtung der Basisstationsantenne vom Betreiber verlässlich zur Verfügung gestellt werden. Im Extremfall kann ein Winkelfehler von einem Grad bei Immissionsorten an den Rändern des horizontalen bzw. vertikalen Abdeckungsbereichs der Antenne bereits zu einer Fehlbewertung der Immission von mehreren Dezibel führen.

Grundsätzlich sollte diese Art von Messungen an derartigen Anlagen daher nur von Personal mit einschlägigen Erfahrungen vorgenommen werden.

6.4.2.2 Erzwingen eines Antennenbeams, der mit maximal Leistung zum Messpunkt strahlt

Möchte man insbesondere bei Anlagen mit Beamformingantennen die aufwändige Extrapolation vermeiden beziehungsweise komplett ohne detaillierte technische Anlagendaten vom Betreiber auskommen, bietet sich als Alternative zur SSS-Messung mit anschließender Hochrechnung das gezielte Erzwingen der Maximalimmission am Messort mithilfe eines 5G-fähigen Endgeräts an, das während der Messung einen FTP-Download durchführt. Dadurch wird bei Beamformingantennen ein Beam auf den Messort ausgerichtet. Dazu sind jedoch einige Punkte zu beachten:

- Zum Start des FTP-Downloads ist für jeden Netzbetreiber eine geeigneter 5G-Mobilfunkvertrag notwendig, d.h. man benötigt mehrere SIM-Karten für das Endgerät, was natürlich entsprechend Kosten generiert.
- Es ist nicht ausreichend, dass durch den FTP-Download ein Beam in Richtung des Messpunktes ausgerichtet wird, zusätzlich muss sichergestellt sein, dass zum Zeitpunkt der Messung nicht auch andere Teilnehmer nennenswert Kapazität der Funkzelle beanspruchen, da sonst unter Umständen nicht mehr so häufig die gesamte verfügbare Sendeleistung zum Messpunkt hin abgestrahlt wird, was zu einer Unterbewertung der Immission führen kann. Mit zunehmender Nutzeranzahl im Bereich der 5G-Dienste wird dies zukünftig vermutlich immer schwerer sicherzustellen sein.

- Bei Anlagen ohne Beamforming sind hingegen andere Teilnehmer, die parallel einen Teil der Ressourcen für sich beanspruchen, kein Problem, da derartige Antennen die Sendeleistung immer in gleicher Art und Weise in die Funkzelle abstrahlen.
- Zudem kann man nie hundertprozentig sicher sein, ob das Netz selbst bei Verwendung eines 5G-fähigen Endgerätes für den FTP-Download die Datenkommunikation nicht auch komplett oder teilweise über andere, beispielsweise 4G-Funksysteme, die meist ebenfalls am Standort vorhanden sind, abwickelt. Wird dies während der Messung nicht bemerkt, kann dies zu einer kompletten Fehlbewertung der Immission führen.

Eine Messung während einer durch ein gewöhnliches 5G-fähiges Endgerät erzwungenen Maximalauslastung erfordert somit ebenfalls ein sehr erfahrenes Messpersonal und funktioniert zudem bei Verwendung von mMIMO-Antennen nur bei Funkzellen, die aktuell keine oder nur eine sehr geringe Auslastung besitzen.

Die Netzbetreiber sind bei Anlagen mancher Systemlieferanten in der Lage, den Zustand maximaler Auslastung, verbunden mit der Ausrichtung eines Beams in Richtung zum Messpunkt, mittels einer speziellen Betriebsart einzustellen, was jedoch deren Unterstützung bei der Messung vor Ort bedarf.

Zudem bedeutet das softwaregesteuerte Erzwingen eines Beams mit maximaler Leistung in Richtung zum Immissionsort einen erheblichen Eingriff in das Funknetz, denn für den Zeitraum, in dem dieser Zustand besteht, stehen im Extremfall anderen in der Funkzelle befindlichen Teilnehmern keine oder nur sehr wenige Systemressourcen zur Verfügung.

6.4.2.3 Immissionsmessungen an 4G/5G-DSS-Anlagen

Besonders unproblematisch stellt sich hingegen die Bestimmung der maximal möglichen Immission bei Anlagen dar, bei denen 5G zusammen mit 4G im DSS-Mode das gleiche Frequenzband nutzt. Derartige Anlagen werden aktuell nur mit konventionellen passiven Antennen ohne Beamforming betrieben, so dass alle erschwerenden Einflüsse bei der Extrapolation auf maximale Immission entfallen, die bei Anlagen mit mMIMO-Antennen in Abschnitt 6.4.2.2 bereits erläutert wurden.

Bei 4G/5G-DSS-Anlagen kann die Hochrechnung auf maximal mögliche Anlagenauslastung ohne weiteres auch über die Messung des 4G-Referenzsignals (RS) erfolgen, eine Hochrechnung, basierend auf den 5G-Referenzsignalen (SSS) ist zwar ebenfalls möglich, jedoch nicht notwendig, da beide Verfahren gleichwertig sind [SBH 22]. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die gesamte verfügbare Sendeleistung vom System flexibel auf beide Funkstandards aufgeteilt werden kann. Es ist somit auch keine spezielle 5G-Messtechnik notwendig, Messgeräte, die 4G-Signale codeselektiv erfassen können, sind ausreichend.

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)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau eines 5G-Frames beispielhaft für einen Trägerabstand von 30 kHz.....	8
Abbildung 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.	9
Abbildung 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.	10
Abbildung 1.4:	Aktives Antennensystem: Hybrid-Beamforming in der Variante „sub-array“ (aus [R1-165362])	12
Abbildung 1.5:	Spezifische Dämpfung durch atmosphärische Gase zwischen 0 GHz und 350 GHz [ITU-R P.676] (blau: trockene Atmosphäre; rot: Standardatmosphäre).....	17
Abbildung 1.6:	Netzabdeckung der Deutschen Telekom mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22].	19
Abbildung 1.7:	Netzabdeckung von Telefónica Deutschland mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22].	20
Abbildung 1.8:	Netzabdeckung von Vodafone Germany mit 5G sowie 4G/5G-DSS in NRW (Stand: Januar 2022) [BNetzA 22].	21
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.	40
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.....	41
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.....	42
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.....	43
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.....	44
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.....	45
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.....	46
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.....	47
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.....	48
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.....	49
Abbildung 3.11:	Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in linearer Skalierung.....	59
Abbildung 3.12:	Vergleich der momentanen, typischen sowie der maximalen Immission durch 5G (MB36) angegeben in % vom Grenzwert in logarithmischer Skalierung	59
Abbildung 3.13:	Verteilung der momentanen, typischen und maximalen 5G-Immission im 3,6-GHz-Band.....	60

Abbildung 3.14:	Verteilung der Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.	62
Abbildung 3.15:	Verteilung der Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.	62
Abbildung 3.16:	Übersicht über die Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.	63
Abbildung 3.17:	Übersicht über die Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM an allen Messpunkten angegeben als Feldstärkegrenzwertausschöpfungen.	63
Abbildung 3.18:	Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Abstandes zwischen Messpunkt und Sendeanlage.	65
Abbildung 3.19:	Maximalimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM in Abhängigkeit des jeweiligen Vertikalwinkels zwischen Messpunkt und Sendeanlage.	66
Abbildung 4.1:	Standort 1: Antenne der Kleinzellenanlage (Ericsson, Typ 6524)	70
Abbildung 4.2:	Standort 1: Umgebungsplan mit Antennenstandort (blauer Kreis) und Lage der Messpunkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.	71
Abbildung 4.3:	Ergebnisse der Linienmessung an Standort 1 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke). Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 10 Watt EIRP und idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für den im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz abzuwendenden Grenzwert (61 V/m) verdeutlicht.	74
Abbildung 4.4:	Standort 2 (Blick von Osten auf den Eingang zur Tiefgarage): Auf dem Foto zu sehen sind die Antennen der Kleinzellenanlage für den Ost- und den Nordsektor (Commscope, Typ CMAX-DM60-CPUSEi53).	75
Abbildung 4.5:	Standort 2: Umgebungsplan mit Antennenstandorten (blaue Kreise) und Lage der Messpunkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.	76
Abbildung 4.6:	Ergebnisse der Linienmessung an Standort 2 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke bei Maximalauslastung). Die Messergebnisse für das 4G/5G-DSS-Signal und die reinen 4G-Immissionen sind getrennt dargestellt. Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die	

	Abnahme der Grenzwertausschöpfung (Grenzwert: 61 Volt/m) für die durch das 4G/5G-DSS-Signal abgestrahlte EIRP (8,53 Watt) bei idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne verdeutlicht.	79
Abbildung 4.7:	Standort 3: Telefonsäule am Obermarkt in Hattingen Die Antennen befinden sich in der Spitze der Telefonsäule.	81
Abbildung 4.8:	Standort 3: Umgebungsplan mit Antennenstandort (blauer Kreis) und Lage der Mess-punkte. Die grüne Linie beschreibt Verlauf und Ausdehnung der Linienmessung.	82
Abbildung 4.9:	Ergebnisse der Linienmessung an Standort 3 (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke). Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 5,9 Watt EIRP und idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für den im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz anzuwendenden Grenzwert (61 V/m) verdeutlicht.	84
Abbildung 5.1:	Positionierung des Mobiltelefons auf einem Stativ mit einer nichtmetallischen Aufnahme (links) und Winkeleinteilung für die Abstrahlcharakteristik (rechts). Im Beispielbild links erfolgt die Messung in Richtung 0°.....	87
Abbildung 5.2:	Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 10 MHz, MB07	88
Abbildung 5.3:	Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB07	88
Abbildung 5.4:	Abstrahlcharakteristik bei MB07; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts	89
Abbildung 5.5:	Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB07; 90°-Richtung	89
Abbildung 5.6:	Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 20 MHz, MB21	91
Abbildung 5.7:	Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB21	91
Abbildung 5.8:	Abstrahlcharakteristik bei MB21; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts	92
Abbildung 5.9:	Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB21; 0°-Richtung	92
Abbildung 5.10:	Spektraler Verlauf des Uplinksignals über einen Frequenzbereich von 90 MHz, MB36	94
Abbildung 5.11:	Zeitverlauf des Uplinksignals über eine Dauer von 20 ms, MB36	94
Abbildung 5.12:	Abstrahlcharakteristik bei MB36; Ausrichtung siehe Abbildung 5.1 rechts	95

Abbildung 5.13:	Abstandsabhängiger Verlauf der Immissionen bei MB36; 0°-Richtung.....	95
Abbildung 6.1:	Beispiele für die im allgemein zugänglichen "EMF-Portal" der BNetzA verfügbaren Informationen über Funkanlagenstandorte.....	109
Abbildung 6.2:	Beispiel eines im "EMF-Portal" zur Verfügung gestellten Antennendiagramms einer mMIMO-Antenne (Huawei AAU5339w)....	112
Abbildung 6.3:	Zwei reine 4G-Signale ohne 5G-DSS (links), das rechte Signal beinhaltet hingegen 4G- und 5G-Signale im DSS-Mode.....	118

Tabellenverzeichnis

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.....	6
Tabelle 1.2:	In PDSCH (Downlink) und PUSCH (Uplink) unterstützte Modulationsschemata sowie die jeweilige Anzahl der Bits pro übertragenem Symbol [TS 38.211].....	7
Tabelle 1.3:	Anzahl zeitlich aufeinanderfolgender OFDM-Symbole pro Slot, Slots pro Frame und Subframes pro Frame für normalen zyklischen Präfix [TS 38.211].....	8
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][DT 22]. ¹ Telefónica betreibt DSS bei 1,8 GHz nur in ausgewählten Gebieten [Bri 21].....	15
Tabelle 2.1:	Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV. Für f ist der Zahlenwert in MHz einzusetzen.	34
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.....	35
Tabelle 2.3:	Für die Messungen eingesetzte Messgeräte.	36
Tabelle 2.4:	Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006 zur Bestimmung der Maximalimmission in Abhängigkeit vom Mobilfunksystem.....	38

Tabelle 2.5:	Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006 zur Bestimmung der Momentanimmission in Abhängigkeit vom Frequenzband	38
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.	39
Tabelle 3.2:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 1 in Übach-Palenberg	40
Tabelle 3.3:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 2 in Lippstadt.	41
Tabelle 3.4:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 3 in Düsseldorf.	42
Tabelle 3.5:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 4 in Essen.	43
Tabelle 3.6:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 5 in Oberhausen.	44
Tabelle 3.7:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 6 in Köln.	45
Tabelle 3.8:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 7 in Simmerath.	46
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).	47
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.	48
Tabelle 3.11:	Beschreibung der Messpunkte am 5G-Standort 10 in Dortmund.	49
Tabelle 3.12:	Maximalimmissionen jeweils von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM sowie die maximale Gesamtmission für alle untersuchten Anlagen.	50
Tabelle 3.13:	Jeweils zur Messzeit vorherrschende Momentanimmissionen von 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM sowie die momentane Gesamtmission für alle untersuchten Anlagen.	53
Tabelle 3.14:	Momentane, typische sowie maximale Immissionen durch 5G (MB36) an den sechs untersuchten Anlagen.	56
Tabelle 3.15:	Extremwerte und Spannweiten der gemessenen 5G-Immissionen im 3,6-GHz-Band.	57
Tabelle 3.16:	Mittelwerte (Durchschnitt und Median) über alle Messpunkte jeweils für momentane, typische und maximale 5G-Immission im 3,6-GHz-Band.	58

Tabelle 3.17:	Statistische Auswertung der Maximalimmissionen durch 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM.	61
Tabelle 3.18:	Statistische Auswertung der Momentanimmissionen durch 5G (MB36), 4G/5G (DSS) und LTE/GSM.	61
Tabelle 3.19:	Vergleichende Gegenüberstellung der Maximalimmissionen an zwei Wiederholungsmesspunkten der vorliegenden Feldmessung (2021) und der Feldmessung zum UMTS-Ausbau (2005).	64
Tabelle 4.1:	Untersuchte Kleinzellenstandorte	69
Tabelle 4.2:	Eingesetzte Messausrüstung.....	69
Tabelle 4.3:	Standort 1: Beschreibung der Messpunkte	71
Tabelle 4.4:	Standort 1: Durch die Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung an den betrachteten Punkten in der Umgebung verursachte aktuelle bzw. maximale 5G-Immissionen (Absolutwerte bzw. Immission in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV).	72
Tabelle 4.5:	Standort 1: Immissionsverlauf entlang der betrachteten Messlinie.....	73
Tabelle 5.1:	Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB07, 90°-Richtung	90
Tabelle 5.2:	Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB21, 0°-Richtung	93
Tabelle 5.3:	Auf maximale Sendeleistung extrapolierte Immissionswerte bei MB36, 0°-Richtung	96
Tabelle 5.4:	Mittlere 5G-Immissionen (Median) vom untersuchten 5G-Smartphone für MB07, MB21 und MB36 in unterschiedlichen Abständen	96
Tabelle 5.5:	Mittlere 5G-Immission (Median) der 5G-Basisstationen aus Kapitel 3	96
Tabelle 6.1:	Frequenzkanäle, in denen aktuell 5G-Signale von Basisstationen abgestrahlt werden (Stand: 05/2022).....	116
Tabelle 6.2:	Maximale Signalbandbreiten für Frequenzkanäle, die sowohl für 4G als auch für 5G spezifiziert sind	117

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.
- [99/519/EG] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [ACIA 22] **5G-ACIA White Paper**, „*Industrial 5G Devices – Architecture and Capabilities*“, 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), 2022.
- [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
- [BEMFV 13] **Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder vom 20. August 2002 (BEMFV)**, BGBl. I S. 3366, die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3259) geändert, worden ist.
- [BFS 22] **Bundesamt für Strahlenschutz**, SAR-Suche. https://www.bfs.de/SiteGlobals/Forms/Suche/BfS/DE/SARsuche_Formular.html, zuletzt aufgerufen am 01.12.2022
- [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 18] **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen**, „Konsultationsentwurf einer Entscheidung der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Festlegungen und Regeln im Einzelnen (Vergaberegeln) und über die Festlegungen und Regelegungen für die Durchführung des Verfahrens (Auktionsregeln) zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz“, Aktenzeichen: BK1-17/001, 2018.
- [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.
- [BNetzA 22] **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen**, „Mobilfunk-Monitoring: Kartendarstellung“, Internetauftritt der BNetzA, <https://www.breitband-monitor.de/mobilfunkmonitoring/karte>, zuletzt aufgerufen am 13.06.2022.
- [BNetzA 22a] **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA)**, Elektromagnetische Felder – EMF, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Verbraucher/ElektromagnetischeFelder/elektromagnetischefeldernode.html>, zuletzt aufgerufen am 27.05.2022.
- [BNS 02] **Chr. Bornkessel, M. Neikes, A. Schramm**, *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 Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen, IMST GmbH, Kamp-Lintfort, 2002.
- [BSN+ 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.
- [BoSc 13] **Chr. Bornkessel, M. Schubert**, *Elektromagnetische Felder in NRW – Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen*, Studie im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Abschlussbericht Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen, IMST GmbH, Kamp-Lintfort, 2013.
- [BSW 06] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek**, *Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, 2006.
- [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.
- [DT 22] **Deutsche Telekom**, „Telekom setzt erstmals 700 MHz-Frequenz für 5G ein“, Internetauftritt der Deutschen Telekom, <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/telekom-5g-funkt-auf-700-mhz-1008590>, zuletzt aufgerufen am 08.06.2022.
- [EN 50527-1] **DIN EN 50527-1**, *Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern - Teil 1: Allgemeine Festlegungen*, Deutsche Fassung EN 50527-1, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Berlin, 01/2011.
- [EN 50527-2-1] **DIN EN 50527-2-1**, *Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern - Teil 2-1: Besondere Beurteilung für Arbeitneh-*

mer mit Herzschrittmachern, Deutsche Fassung EN 50527-2-1, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Berlin, 05/2012.

- [Gaj 21] **Henning Gajek (teltarif.de)**, „Telekom und Telefónica erproben 5G-Standalone“, teltarif.de Onlineverlag GmbH, <https://www.teltarif.de/netzausbau-5g-sa-nsa-telekom-o2/news/86206.html>, zuletzt aufgerufen am 15.11.2021.
- [ICNIRP 20] **ICNIRP Guidelines 2020**, *Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 118 no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [IEC 62232] **IEC 62232 Ed. 3.0**, „Methods for the Assessment of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields associated with Human Exposure“, Committee Daft (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.
- [NKL+ 19] **A. Napp, C. Kolb, C. Lennerz, W. Bauer, J. Schulz-Menger, T. Kraus, N. Marx und D. Stunder**, *„Elektromagnetische Interferenz von aktiven Herzrhythmusimplantaten im Alltag und im beruflichen Umfeld“*, Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) und der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM), Der Kardiologe 04/2019, ASU 08/2019.
- [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.
- [RS 22] **Rohde & Schwarz**, QualiPoc Android, https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/netzwerkdatenerfassung/qualipoc-android_63493-55430.html, zuletzt besucht am 04.06.2022.
- [SBH 20] **L.-M. Schilling, Chr. Bornkessel und M. A. Hein**, *“Entwicklung und Verifikation eines Mess- und Berechnungsverfahrens der Immission durch ITS-G5“*, Elektromagnetische Verträglichkeit emv, 2020.
- [SBH 22] **L.-M. Schilling, Chr. Bornkessel, M. A. Hein**, *Verification of code-selective 5G measurements to assess the maximal RF exposure to mobile-radio base stations with dynamic spectrum sharing*, BioEM 2022, Nagoya, 2022.
- [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-schueller.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.
- [SSK 21] **Strahlenschutzkommission**, *„Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus – Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz)“*, Stellungnahme

der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 317. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 09./10. Dezember 2021.

- [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.
- [TKG 04] **TKG**, *Telekommunikationsgesetz vom 22. Juni 2004 (BGBl. I S. 1190), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 6. Februar 2020 (BGBl. I S. 146) geändert worden ist*, 2004.
- [TREMFM 2021] **Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (TREMFM)**, Vorläufige Entwurfsfassungen, 04/2021
- [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 38.101-1a] **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 16.4.0 Release 16)“, 2020.
- [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.
- [Wus 22] **M. Wuschek**, *Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Stations and Broadcast Transmitter Sites*, Practical Guide, Narda Safety Test Solutions GmbH, Zweite (erweiterte) Auflage, Pfullingen, 2022.

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Bearbeitung	Thomas Kopacz, M.Sc., Anna-Malin Schiffarth, M.Sc. Institut für Hochfrequenztechnik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Melatener Straße 25, 52074 Aachen E-Mail: kopacz@ihf.rwth-aachen.de Prof. Dr. Matthias Wuschek EM-Institut GmbH Carlstraße 5, 93049 Regensburg E-Mail: matthias.wuschek@em-institut.de Dr. Christian Bornkessel Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau E-Mail: christian.bornkessel@tu-ilmenau.de
Fachredaktion	Rainer Kindel (LANUV)
Veröffentlichung	August 2023
Titelfoto	Rainer Kindel (LANUV)
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucher schutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de