



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF- EMF-Expositionsbestimmung

Vorhaben 3619S82463

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

T. Kopacz
Dr. C. Bornkessel
Prof. Dr. M. Wuschek

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-208/22

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2022112435660

Salzgitter, November 2022

Projektleitung beim Auftragnehmer

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

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

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

Autoren

Thomas Kopacz, M.Sc.
Dr. Christian Bornkessel
Prof. Dr. Matthias Wuschek

Projektleitung beim Auftraggeber

Dirk Geschwentner
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachgebiet WR5
Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim-Neuherberg
E-Mail: [dgeschwentner\(at\)bfs.de](mailto:dgeschwentner(at)bfs.de)

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Kurzzusammenfassung	7
Abstract.....	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	13
1 Einleitung.....	17
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens	17
1.2 Gliederung des vorliegenden Abschlussberichtes	17
2 Relevanter Stand von Wissenschaft und Technik	19
2.1 Funktechnische Spezifikationen von 5G sowie Vergabeauflagen	19
2.1.1 Frequenzbereiche und Bandbreiten	19
2.1.2 Modulationsschemata und Zugriffsverfahren	20
2.1.3 Signalstruktur	21
2.1.4 Beamforming durch MIMO.....	26
2.1.5 Maximale Ausgangsleistung bzw. EIRP	27
2.1.6 Vergabeauflagen in Deutschland.....	30
2.2 Technische Spezifikation von 5G-Basisstationen und – Basisstationsantennen	32
2.2.1 Standardisierung	32
2.2.2 Hersteller	39
2.2.3 In Deutschland eingesetzte 5G-Massive-MIMO-Antennen	43
2.3 Technische Spezifikationen geeigneter Messgeräte	44
2.3.1 Frequenzselektive Messgeräte.....	45
2.3.2 Codeselektive Messgeräte.....	46
2.4 Messempfehlungen	52
2.4.1 Publikation von Keller	54
2.4.2 IEC 62232.....	58
2.4.3 Schweizer Messempfehlung.....	63
2.4.4 Messanweisung der Bundesnetzagentur.....	68
2.4.5 Fazit.....	73
2.5 Erkenntnisse aus Projekten der Projektnehmer	74
2.5.1 Messverfahren für 5G zur Bestimmung der Momentanimmission.....	74
2.5.2 Messverfahren für 5G als Basis für eine Hochrechnung	74
2.5.3 Pauschales Hochrechnungsverfahren für Massive-MIMO-Antennen (LTE). 75	75

2.5.4	Messpunktabhängiges Hochrechnungsverfahren für Massive-MIMO-Antennen	77
2.5.5	Diskussion.....	78
2.6	Erkenntnisse aus weiteren Projekten anderer Stellen	80
2.6.1	Universität Gent und Ericsson (Mobile World Forum).....	80
2.6.2	Sonstige Arbeiten.....	84
2.7	Ergebnisse aus Messkampagnen	89
2.7.1	Agentschap Telecom.....	89
2.7.2	Untersuchungen von Telstra.....	90
2.7.3	Arbeiten der Projektnehmer	91
3	Entwicklung und Vorschlag von Messverfahren zur Bestimmung von 5G-Immissionen	94
3.1	Messverfahren zur Bestimmung der 5G-Momentanimmission	94
3.1.1	Anforderungen an den Mittelungsprozess	95
3.1.2	Vorgeschlagenes Verfahren	96
3.1.3	Validierung des Verfahrens	99
3.2	Frequenzselektives Messverfahren zur Bestimmung einer Basis für die Hochrechnung auf 5G-Maximalimmissionen	103
3.2.1	Anforderungen an die zeitliche Mittelung	104
3.2.2	Mittelungsprinzip des SRM-3006	105
3.2.3	Validierung des Verfahrens	106
3.2.4	Vorgeschlagenes Verfahren	110
3.2.5	Fazit.....	110
3.3	Codeselektive Messtechniken zur Bestimmung von 5G-Maximalimmissionen.....	111
3.3.1	Einleitung und Übersicht der codeselektiven Messgeräte	111
3.3.2	Vergleichsmessungen.....	112
3.4	Verfahren zur Bestimmung maximal möglicher 5G-Immissionen mittels Hochrechnung	119
3.4.1	Vorstellung des Hochrechnungsverfahrens.....	119
3.4.2	Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors K_{Ant}	122
3.4.3	Validierung des code- und frequenzselektiven Hochrechnungsverfahrens durch provozierte Vollaustung.....	129
3.4.4	Fazit.....	132
3.5	Frequenzselektives Messverfahren zur direkten Bestimmung maximal möglicher 5G-Immissionen bei provozierter Auslastung ..	133
3.5.1	Anforderungen.....	133
3.5.2	Vorgeschlagenes Verfahren	134
3.5.3	Validierung der Messeinstellungen des SRM-3006 zur pulsbezogenen Mittelung durch Vergleich mit dem Spektrumanalysator FSW.....	135
3.5.4	Validierung der Messeinstellungen des SRM-3006 zur pulsbezogenen Mittelung durch thermische Referenzmessung	138
3.5.5	Validierung der messtechnischen ermittelten Maximalimmission durch Berechnung.....	140
3.5.6	Fazit.....	143

4	Bestimmung der 5G-Immissionen an zehn Anlagenstandorten	146
4.1	Auswahl der Anlagenstandorte und Messpunkte	146
4.2	Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien	146
4.3	Eingesetzte Messtechnik	149
4.4	Grenzwerte	151
4.5	Messergebnisse 5G	153
4.5.1	Standort 1: Telekom-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld ...	153
4.5.2	Standort 2: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städtisches Umfeld.....	155
4.5.3	Standort 3: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, innerstädtisches Umfeld	157
4.5.4	Standort 4: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand.....	159
4.5.5	Standort 5: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld .	162
4.5.6	Standort 6: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, Gewerbegebiet	164
4.5.7	Standort 7: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld ...	166
4.5.8	Standort 8: Vodafone -Anlage mit Huawei -Technik, Stadtrand	168
4.5.9	Standort 9: Vodafone -Anlage mit Huawei-Technik, Gewerbegebiet	170
4.5.10	Standort 10: Telefónica-Anlage mit Nokia-Technik, städtisches Umfeld ...	172
4.6	Hintergrundimmission	175
5	Analyse der 5G-Immissionen	177
5.1	Grundsätzliches	177
5.2	Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse	179
5.2.1	Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse	179
5.2.2	Erzwungene 5G-Maximalimmission: Ergebnisse.....	180
5.2.3	"Typische" 5G-Immission: Ergebnisse	182
5.2.4	"Aktuelle" 5G-Immission: Ergebnisse.....	183
5.2.5	Zusammenfassender Vergleich der drei ermittelten 5G-Immissionen	185
5.3	Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage	186
5.4	Einfluss des Vertikalwinkels.....	187
5.5	Einfluss der Sichtverhältnisse.....	189
5.6	Vergleich mit den Immissionen durch andere Mobilfunkanlagen	190
5.7	Einfluss der Beamausrichtung auf die Immission	192
5.8	Fazit	196
6	Zeitlicher Verlauf der Immission	198
6.1	Standort 1: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städt. Umfeld	198
6.1.1	Langzeitmessung an Messpunkt 1 (Nahbereich)	200
6.1.2	Langzeitmessung an Messpunkt 2 (Nahbereich)	202
6.1.3	Langzeitmessung an Messpunkt 3 (Fernbereich)	204
6.1.4	Langzeitmessung an Messpunkt 4 (Nahbereich)	206
6.1.5	Fazit.....	211

6.2 Standort 2: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld	216
6.2.1 Langzeitmessung an Messpunkt 1 (Nahbereich)	218
6.2.2 Langzeitmessung an Messpunkt 2 (Fernbereich)	220
6.2.3 Fazit.....	223
Danksagung	227
Abkürzungsverzeichnis	228
Literaturverzeichnis	231
Anhang	240

Kurzzusammenfassung

Vorliegendes Forschungsvorhaben befasst sich mit der messtechnischen Erfassung und Analyse von Immissionen durch 5G-Basisstationen mit Beamforming-Antennen im 3,6-GHz-Band. Als Basis wurden Messverfahren zur Bestimmung aktueller, typischer sowie maximal möglicher Immissionen vorgeschlagen, die das zeitveränderliche Abstrahlverhalten der Antennen geeignet berücksichtigen. Die Bestimmung maximal möglicher Immissionen kann entweder mittels Hochrechnung basierend auf den am Messpunkt vorherrschenden Antennengewinnunterschied zwischen Traffic und Broadcast Beams oder durch direkte Messung bei Provozierung der Maximalimmission mithilfe eines 5G-Endgeräts erfolgen.

Immissionsmessungen an 100 systematisch ausgewählten Messpunkten im Umfeld von zehn 5G-Beamforming-Basisstationen im 3,6-GHz-Band ergaben maximale Immissionen zwischen 0,2 % (0,15 V/m) und 28,9 % (17,6 V/m) des Feldstärkegrenzwerts der 26. BImSchV (Median 4,7 % bzw. 2,9 V/m). Die Momentanimmissionen ohne provozierten Verkehr lagen zwischen 0,04 % (0,03 V/m) und 1,1 % (0,67 V/m) des Feldstärkegrenzwerts (Median 0,08 % bzw. 0,05 V/m) und die Immissionen bei typischer Nutzung (ARD-Livestream) nur unwesentlich höher zwischen 0,04 % (0,03 V/m) und 1,3 % (0,8 V/m) des Feldstärkegrenzwerts (Median 0,2 % bzw. 0,12 V/m). Einen großen Einfluss auf die Größe der Immission haben die Sichtverhältnisse zwischen Immissionsort und 5G-Antenne, da im 3,6-GHz-Band nennenswerte Dämpfungen auch schon durch Vegetation auftreten. Die bei GSM-, UMTS- und LTE-Basisstationen beobachtete Abhängigkeit vom Vertikalwinkel zwischen Immissionsort und Antenne hat sich bei den untersuchten 5G-Beamforming-Basisstationen dahingehend verändert, dass die Immissionen nicht mehr bei kleinen, sondern bei größeren Vertikalwinkeln am höchsten ausfallen. Sofern der Beam nicht am Immissionsort einwirkt, sondern azimuthal oder radial um einige zehn Meter in der Zelle verschoben wird, zeigte sich bei den hier durchgeführten Messungen gegenüber einer direkten Ausrichtung des Beams auf den Immissionsort im Mittel eine Immissionsreduktion von 7,5 dB. Langzeitmessungen ergaben, dass zum Zeitpunkt der Messungen nur sporadisch Nutzer aktiv waren. Selbst bei gezielter provozierter typischer Nutzung konnte der 6-Minuten-Mittelwert der Feldstärke an den meisten Punkten nur durch den Download einer großen Datei signifikant über die Nachweisgrenze des Messgeräts gehoben werden. Immissionsspitzen traten zeitlich meist sehr begrenzt auf.

Abstract

This research project deals with the measurement-based assessment and the analysis of RF-EMF exposure from 5G base stations operated with beamforming antennas at frequencies around 3.6 GHz. As a basis, measurement methods for determining instantaneous, typical as well as maximum possible exposure levels were proposed, which suitably take into account the time-varying radiation characteristics of the antennas. The assessment of maximum exposure levels can be done either by extrapolation based on the antenna gain difference between traffic and broadcast beams experienced at the measurement point or by immediate measurement while provoking maximum exposure using a 5G user equipment.

Exposure measurements at 100 systematically selected measurement points in the coverage areas of ten 5G base stations in the 3.6 GHz band resulted in maximum exposure levels between 0.2 % (0,15 V/m) and 28.9 % (17,6 V/m) of the German safety limits given by the 26th Ordinance Implementing the Federal Immission Control Act, 26. BImSchV (median 4.7 % resp. 2.9 V/m). The safety limits are equal to the reference levels given in ICNIRP 1998 and 2020. The instantaneous exposure levels without provoked traffic were between 0.04 % (0.03 V/m) and 1.1 % (0.67 V/m) of the reference levels (median 0.08 % resp. 0.05 V/m) and the exposure levels caused by a typical use case (TV live stream) were only slightly higher between 0.04 % (0.03 V/m) and 1.3 % (0.8 V/m) of the reference levels (median 0.2 % resp. 0.12 V/m). The line-of-sight between the measurement point and the 5G antenna has a major influence on the exposure level, since high attenuation occurs in the 3.6 GHz band, even by vegetation. The dependence of the vertical angle between the base station antenna and the measurement point observed for GSM (2G), UMTS (WCDMA, 3G) and LTE (4G) base stations has changed for 5G massive MIMO base stations. The highest exposure levels do not occur at low, but at high vertical angles for the investigated beamforming antennas. In case the beam does not point towards the measurement point, but is displaced azimuthally or radially by several ten meters, for the conducted measurements an average exposure reduction of 7.5 dB can be observed compared to a beam aligned with the measurement point. Long-term measurements have shown that users were active only sporadically. Even by typical use cases of the user equipment in the vicinity of the measurement point, at most points, the six minute averaged field strength could be only increased significantly above the detection limit of the measuring device by downloading a large file. Field strength peaks occurred mostly very limited in time.

Zusammenfassung

Gegenstand vorliegenden Forschungsvorhabens ist die messtechnische Erfassung und Analyse von Immissionen durch im 3,6-GHz-Band für 5G eingesetzte Beamforming-Basisstationsantennen (Massive-MIMO-Antennen). Als Basis werden hierfür geeignete Messverfahren zur Bestimmung der aktuellen, typischen sowie der maximal möglichen Immission vorgeschlagen.

Die Hochrechnung auf maximal mögliche Immission bei 5G basiert auf der Messung der Immission des SS/PBCH-Blocks (SSB), der Teil der Signalisierung ist und periodisch abgestrahlt wird. Die Messung kann dabei frequenz- oder codeselektiv erfolgen. Bei der frequenzselektiven Messung ist dafür Sorge zu tragen, dass der korrekte RMS-Wert erfasst wird. Bei einem Laborspektrumanalysator geschieht dies durch Verwendung eines RMS-Detektors in Kombination mit einer an die 5G-Symboldauer angepassten Verweilzeit je Aufnahmepunkt. Beim Feldstärkemessgerät Narda SRM-3006 erfolgt die Mittelung durch ein Videofilter mit geeigneter Bandbreite. Bei der codeselektiven Messung wird das Secondary Synchronization Signal (SSS) als Teil des SSB dekodiert und dessen Immission bestimmt. Die codeselektive ist der frequenzselektiven Messung vorzuziehen, da nur damit die Immission des SSB zellspezifisch und nicht nur die Summe aller Zellen erfasst werden kann. Die codeselektiv ermittelten Messergebnisse sind zudem unabhängig vom den SSB zeitlich überlagernden Verkehr.

Das im 3,6-GHz-Band verwendete Beamforming, d.h. das zeitveränderliche Abstrahlverhalten der Basisstationsantenne, stellt hinsichtlich der Bestimmung der Maximalimmission eine große Herausforderung dar: Im Falle mehrerer SSB werden diese sequenziell in verschiedene Bereiche der Zelle durch die Broadcast Beams abgestrahlt. Der Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), der ursächlich für die Maximalimmission am Immissionsort ist, wird jedoch über die Traffic Beams abgestrahlt. Die Richtcharakteristika der Traffic und Broadcast Beams können dabei große Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede müssen bei der Hochrechnung je nach Lage des Messpunktes bzw. Zellregion individuell berücksichtigt werden. Dies erfordert allerdings, dass die jeweils für die Traffic und Broadcast Beams eingestellten Antennendiagramme für die entsprechenden Frequenzen von den Netzbetreibern zur Verfügung gestellt werden. Die Untersuchungen in vorliegendem Vorhaben haben gezeigt, dass die Hochrechnung mit diesem Verfahren für Immissionsorte mit Sichtverbindung zur Antenne verlässliche Ergebnisse liefert.

Eine Alternative zur Hochrechnung auf maximal mögliche Immission stellt die direkte Messung bei Provozierung der Maximalimmission mithilfe eines Endgeräts dar, das nahe am Immissionsort durch einen FTP-Download möglichst alle Ressourcen der Basisstation bindet, wodurch diese mit maximal möglicher EIRP in Richtung des Immissionsorts abgestrahlt werden. Angesichts der komplexen erforderlichen Daten für die Hochrechnung ist dieses Verfahren bei der derzeitigen noch sehr geringen Netzauslastung im 3,6-GHz-Band eine empfehlenswerte Alternative zur SSB-Messung. Aufgrund der mittelfristig zu erwartenden höheren Marktpenetration von 5G-Endgeräten, die Ressourcen der Basisstationen binden, ist jedoch fraglich, ob es zukünftig weiterhin verlässlich angewendet werden kann.

Bei den Immissionsmessungen an jeweils zehn systematisch ausgewählten Immissionsorten im Umfeld von zehn 5G-Anlagen mit Massive-MIMO-Antennen im 3,6-GHz-Band wurde zum

einen die zur Messzeit vorherrschende aktuelle Immission (Momentanimmission) ohne provozierte Auslastung und zum anderen die "typische Immission" (d.h. die bei einer typischen Nutzung (TV-Live-Streaming) auftretende Immission) sowie die Maximalimmission durch direkte Messung bei provozierter Maximalauslastung durch ein Endgerät in der Nähe des Immissionsortes bestimmt. Zusätzlich zur typischen Immission bei Ausrichtung eines Traffic Beams auf den Immissionsort wurde für mehr als die Hälfte der Immissionsorte die typische Immission für den Fall bestimmt, dass der abgestrahlte Traffic Beam entweder horizontal oder radial in einen anderen Bereich der Zelle ausgerichtet war. An jeweils zwei Immissionsorten im Umfeld von fünf Basisstationen wurden außerdem die momentanen sowie die maximalen Immissionen durch GSM, LTE und LTE/5G-DSS (Dynamic Spectrum Sharing, passive Mobilfunkantennen) bestimmt.

Die höchste festgestellte Maximalimmission (Anzahl der Messpunkte $n = 96$) beträgt 28,9 % vom Feldstärkegrenzwert (17,7 V/m), die niedrigste 0,2 % (0,15 V/m). Somit zeigt sich eine sehr große Spannweite von mehr als 40 dB. Bei Immissionsorten mit Sicht zur Anlage (line-of-sight, LOS; $n = 56$) ist die Spannweite mit 27 dB deutlich niedriger. Die leistungsbezogen gemittelte Maximalimmission über alle Messpunkte liegt bei 9,3 % vom Feldstärkegrenzwert (5,7 V/m) und der Median bei 4,7 % (2,9 V/m). Insgesamt zeigt sich bei den Maximalimmissionen im Vergleich zu den Ergebnissen der Vorgängerstudien zu LTE und UMTS eine Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung hin zu höheren Immissionswerten. Diesbezüglich sei allerdings darauf hingewiesen, dass in vorliegendem Vorhaben nur systematische Messpunkte ausgewählt wurden, die tendenziell häufiger eine Sichtverbindung zur Antenne und damit überdurchschnittliche Immissionen aufwiesen, während die Messpunkte in den Vorgängerstudien auch zufällig ausgewählt wurden.

Die höchste festgestellte typische Immission (TV-Streaming, $n = 97$) bei Ausrichtung des Traffic Beams auf den Immissionsort beträgt 1,3 % vom Feldstärkegrenzwert (0,8 V/m), die niedrigste 0,04 % (0,03 V/m, Nachweisschwelle des Messgeräts), was bedeutet, dass die reale typische Immission an einigen Punkten durchaus auch noch niedriger gewesen sein kann. Die Spannweite beträgt an Immissionsorten mit Sicht zur Anlage (LOS, $n = 57$) und an Immissionsorten ohne Sicht zur Anlage (NLOS, $n = 40$) jeweils knapp 30 dB. Über alle Messpunkte ist die Spannweite mit gut 30 dB nur unwesentlich höher. Die leistungsbezogen gemittelte typische Immission über alle Messpunkte liegt bei 0,4 % vom Feldstärkegrenzwert (0,27 V/m) und der Median bei 0,2 % (0,12 V/m).

Bei der Momentanimmission ohne provozierte Auslastung der Funkzelle ($n = 100$) beträgt das Maximum 1,1 % vom Feldstärkegrenzwert (0,67 V/m), das Minimum 0,04 % (0,03 V/m, Nachweisschwelle des Messgeräts), was analog zur typischen Immission bedeutet, dass die reale Momentanimmission an einigen Punkten auch noch niedriger gewesen sein kann. Die Spannweite über alle Messpunkte liegt mit 29 dB in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der typischen Immission. An Messpunkten ohne Sicht zur Anlage (NLOS, $n = 40$) fällt die Spannweite mit 22 dB im Vergleich zu Messpunkten mit Sicht zur Anlage (LOS, $n = 60$, 27 dB) jedoch niedriger aus, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass in NLOS-Situationen häufig Messwerte in der Größenordnung der Nachweisgrenze auftreten. Dies zeigt sich auch in der Häufigkeitsverteilung der Momentanimmission, bei der sehr kleine Messwerte stark dominieren.

Die zur Messzeit vorherrschende Momentanimmission liegt aufgrund der sehr niedrigen Auslastung größtenteils noch sehr nahe bei der theoretisch abgeschätzten Minimalimmission (0,01 % bis 0,4 % des Feldstärkegrenzwerts), die im Leerlauf der Anlage entsteht. Das verdeutlicht aber auch, dass eine 5G-Basisstation ohne Auslastung nur sehr geringe Hochfrequenzimmissionen generiert. Selbst eine typische Nutzung durch ein Endgerät am Immissionsort erzeugt Immissionen, die immer noch deutlich unter dem Maximalwert liegen. Ein Vergleich der Medianwerte von Maximal- und Momentanimmission zeigt einen Unterschied von 35,4 dB (d.h. zirka Faktor 3.450 bezüglich der Leistung). Die Unterschiedsfaktoren an den einzelnen Messpunkten bewegten sich hierbei zwischen etwa 7 dB und 48 dB. Nur an sechs der 96 Messpunkte ergab sich ein Unterschiedsfaktor von weniger als 20 dB.

An zehn Immissionsorten im Umfeld von fünf 5G-Anlagen wurde die Momentan- sowie die Maximalimmission durch alle am Standort in Betrieb befindlichen Mobilfunksignale (GSM, LTE, LTE/5G-DSS und 5G im 3,6-GHz-Band) und -frequenzbänder bestimmt. An keinem der Standorte war TETRA-BOS installiert. Zudem war UMTS an keinem der Standorte mehr in Betrieb. An allen zehn Immissionsorten fällt die momentane Gesamtimmission durch GSM, LTE und LTE/5G-DSS höher aus, als die momentane und typische 5G-Immission. An neun von zehn Immissionsorten ist auch die Momentanimmission mindestens eines Frequenzbands von GSM, LTE oder LTE/5G-DSS höher als die momentane sowie die typische 5G-Immission (dies betrifft sowohl die Feldstärke als auch die Grenzwertausschöpfung). Lediglich an einem Messpunkt tritt die größte Feldstärke bei typischer 5G-Nutzung auf. Aufgrund des niedrigeren Grenzwerts wird die höchste Grenzwertausschöpfung jedoch durch LTE-Signale im 800-MHz-Band hervorgerufen. Bei den Maximalimmissionen ergibt sich kein einheitliches Bild: An sechs der zehn Immissionsorte (jeweils an beiden untersuchten Immissionsorten im Umfeld von drei der fünf untersuchten 5G-Anlagen) dominieren die Immissionen durch die Summe der Maximalimmissionen von GSM, LTE und LTE/5G-DSS. An den verbleibenden vier Immissionsorten (jeweils beide untersuchte Immissionsorte im Umfeld von zwei der fünf untersuchten 5G-Anlagen) dominiert 5G. Der Unterschiedsfaktor besitzt eine große Spannweite, er bewegt sich zwischen etwa -19 dB (d.h. 5G dominiert) und 7 dB (d.h. andere Mobilfunkimmissionen dominieren). Absolut gesehen lagen an diesen zehn Punkten die maximalen 5G-Immissionen bei Grenzwertausschöpfungen im Bereich zwischen 0,7 % (0,4 V/m) und 25,5 % (15,5 V/m).

Die statistischen Auswertungen der Werte der drei 5G-Immissionsarten („aktuell“, „typisch“, „maximal“) in Abhängigkeit von der Lage der Outdoor-Immissionsorte in Relation zur 5G-Antenne zeigen, dass es offenbar nicht gerechtfertigt ist, den *Abstand* zwischen Immissionsort und Basisstationsantenne als allein maßgebliches Kriterium für die Beurteilung der Immissionsgröße zu verwenden. Ein Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenkeulen und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist. Durch die Fähigkeit der Antennen, ihre vertikale Hauptsenderichtung zu verändern, wird sich zwar der Entfernungsbereich, in dem sich Immissionsorte nur im Bereich der Nebenkeulen befinden, verkleinern, jedoch kann hierzu ohne Kenntnis der konkreten Anlagenparameter (vertikaler Schwenkbereich der Antenne) keine Vorhersage getroffen werden. Für eine bestimmte Entfernung zum Anlagenstandort beträgt die Spannweite der gemessenen Immission teilweise bis zu etwa 30 dB. Einen deutlichen Einfluss auf die Größe der Immission üben die *Sichtverhältnisse* zwischen Immissionsort und 5G-Antenne aus. Bei den verhältnismäßig hohen Frequenzen (um 3,6 GHz) haben Gebäude und selbst Bäume und

Sträucher einen stark dämpfenden Einfluss. Gleichzeitig sei aber auch erwähnt, dass es durch Reflexionen sowie durch Kantenbeugung an Gebäuden auch in NLOS-Situationen zu Immissionswerten kam, die ansonsten in Situationen mit LOS zur Anlage und bei ähnlichen Entfernungen auftraten. Der Einfluss des *Vertikalwinkels* zwischen Antenne und Immissionsort auf die entstehende Immission hat sich gegenüber den Ergebnissen von ähnlichen Messungen an Mobilfunksystemen ohne Massive-MIMO-Antennen verändert. Offensichtlich kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Immissionen bei kleineren Vertikalwinkeln ($< 10^\circ$) gegenüber denen bei großen Winkeln in der Regel höher ausfallen. Die im Mittel höchsten Maximalimmissionen treten bei den untersuchten Anlagen sogar im Vertikalwinkelbereich zwischen 15° und 20° auf. Die genaue *Ausrichtung des Beams* hat einen signifikanten Einfluss auf die entstehende Immission. Neben der typischen Immission, während sich das Endgerät in unmittelbarer Nähe zum Immissionsort befand („UE nah“), wurden weitere Messungen der typischen Immission unter der Randbedingung durchgeführt, dass sich das aktive Endgerät nicht mehr am Immissionsort, sondern in einem größeren Abstand von einigen zehn Metern dazu befand („UE fern“), wodurch es aus Sicht des Immissionsortes zu einer azimutalen oder radialen Verschiebung des ausgerichteten Traffic Beams kam. Der Unterschied der Medianwerte für das Szenario "UE nah" und das Szenario "UE fern" beträgt etwa 7,5 dB. Die Ergebnisse zeigen, dass in Bereichen der Funkzelle, die sich nicht im Einwirkungsbereich des Beams (Hauptkeule) befinden, die Immissionen geringer ausfallen. Aufgrund von Reflexionen sowie der Aussendung über Nebenkeulen ist die Immission trotz Ausrichtung auf einen anderen Ort in der Zelle jedoch weiterhin messbar.

Langzeitmessungen an insgesamt fünf unterschiedlich gelegenen Messpunkten über jeweils 24 Stunden im Umfeld je einer 5G-Anlage (3,6 GHz-Band) in städtischer beziehungsweise in ländlicher Umgebung haben gezeigt, dass nur sehr sporadisch Nutzer aktiv waren, was anhand von einzelnen Spitzen der Momentanimmissionswerte zu beobachten ist. Beim nachträglich errechneten gleitenden 6-Minuten-Mittelwert der Immission zeigen sich jedoch kaum Auswirkungen durch die nur kurzzeitig auftretenden Immissionsspitzen. Zu einem Großteil der Zeit war die gemessene Momentanimmission an meisten Messpunkten so niedrig, dass sie im Bereich der Detektionsschwelle des Messgeräts liegt. Bei Nachstellung einer typischen Datenverkehrssituation in der Zelle durch ein Endgerät am Immissionsort konnte der 6-Minuten-Mittelwert der Immission lediglich beim Download einer 1 GB großen Datei signifikant erhöht werden. Andere provozierte Szenarien wie Surfen oder Video-Streaming erzeugten zwar sporadisch Immissionsspitzen, die jedoch so selten auftraten, dass sie sich nicht sichtbar auf den 6-Minuten-Mittelwert auswirkten. Die Größe der Immissionsspitzen hing dabei in hohem Maße von der Lage des Messpunktes ab. An einem höher gelegenen indoor-Messpunkt direkt gegenüber der Anlage nahmen sie Werte von bis zu 9,0 % vom Feldstärkegrenzwert an (5,5 V/m). An Messpunkten in größerer Entfernung oder mit größeren Vertikalwinkeln zur Anlage waren sie mit 0,2 % vom Feldstärkegrenzwert hingegen deutlich kleiner (0,1 V/m).

Summary

The aim of this research project is the measurement-based assessment and analysis of RF-EMF exposure caused by beamforming base station antennas (massive MIMO antennas) used for 5G in the 3.6 GHz band. Suitable measurement methods for determining instantaneous, typical and maximum possible exposure levels are proposed as a basis.

The extrapolation to maximum possible exposure to 5G is based on the measurement of the field strength of the SS/PBCH block (SSB), which is part of the signaling and is radiated periodically. The measurement can be carried out in frequency-selective or code-selective domain. In the case of frequency-selective measurement, care must be taken to ensure that the correct RMS value is recorded. In case a laboratory spectrum analyzer is used, this is done by applying an RMS detector in combination with an observation time, which is adapted to the 5G symbol duration for each recording point. In the case of the Narda SRM-3006 field strength meter, averaging is performed by a video filter with a suitable bandwidth. For code-selective measurements, the Secondary Synchronization Signal (SSS) is decoded as part of the SSB and its field strength is determined. The code-selective measurement is preferable to the frequency-selective measurement because it is the only way to measure the cell-specific SSB field strength and not only the sum field strengths of all present 5G cells. Code-selective measurement values are also independent of the traffic superimposing the SSB in time.

The usage of beamforming in the 3.6 GHz band, i.e. the time-varying radiation pattern of the base station antenna, poses a great challenge to the exposure assessment with regard to determining the maximum exposure: In the case of multiple SSBs, these are sequentially radiated into different areas of the cell by the broadcast beams. However, the physical downlink shared channel (PDSCH), which is causing maximum exposure at the measurement point, is radiated via the traffic beams. The radiation characteristics of the traffic and broadcast beams can differ significantly. These differences must be considered by the extrapolation procedure individually for each measurement point depending on its location in the cell. However, this requires that the used antenna patterns of traffic and broadcast beams and the current settings are provided for the corresponding frequency bands by the network operators. Investigations in this research project have shown that this extrapolation procedure works reliably for measurement points having line-of-sight to the base station antenna.

An alternative to the extrapolation to maximum possible exposure is the immediate measurement while maximum exposure is provoked using a 5G user equipment, which is located in the vicinity of the measurement point and is allocated as many resources of the base station as possible by means of an FTP download. In this way, radiation with maximum possible EIRP towards the measurement point is forced. Given the complexity of required data for the extrapolation procedure, this method is a recommendable alternative as the current network utilization in the 3.6 GHz band is very low. However, due to the higher market penetration of 5G terminals expected in the medium term, it is questionable whether it can still be applied reliably in the future.

In the course of the measurements, exposure levels were determined at each ten systematically selected measurement points in the vicinity of ten 5G base stations with massive MIMO

antennas in the 3.6 GHz band. On the one hand, the “instantaneous exposure” experienced at the measurement time without provoked utilization of the radio cell and on the other hand the “typical exposure” (i.e. the exposure occurring during a typical use case (TV live streaming)) as well as the “maximum exposure” during provoked utilization of the radio cell were determined. Maximum exposure was investigated by immediate measurement while a 5G user equipment was provoking maximum exposure in the vicinity of the measurement point. In addition to typical exposure levels in case a traffic beam was aligned with the measurement point, for more than half of the measurement points, the typical exposure was determined in case the traffic beam was displaced either horizontally or radially into another area of the cell. Furthermore, the instantaneous and maximum exposure levels to GSM, LTE and LTE/5G-DSS (Dynamic Spectrum Sharing, passive antennas) were determined at each two measurement points in the vicinity of five base stations.

The highest maximum exposure level determined (no. of measurement points $n = 96$) amounts to 28.9 % (17.7 V/m) of the German safety limits given by the 26th Ordinance Implementing the Federal Immission Control Act (26. BImSchV), which are equal to the reference levels given in ICNIRP 1998 and 2020. The lowest maximum exposure level is 0.2 % (0.15 V/m). Thus, there is a very large range of more than 40 dB. For measurement points with line-of-sight (LOS) to the 5G antenna ($n = 56$), the range is significantly lower at 27 dB. The mean maximum exposure level over all measurement points is 9.3 % of the reference levels (5.7 V/m, averaged over power) and the median is 4.7 % (2.9 V/m). Compared to the results of the previous studies on LTE and UMTS, the frequency distribution of the maximum exposure levels experiences a broadening towards higher values. However, it should be noted, that in this project only systematically selected measurement points were chosen which tended to have LOS to the antenna and thus above-average exposure levels, whereas the measurement points in the previous studies were also selected randomly.

The highest typical exposure level caused by TV streaming ($n = 97$) is 1.3 % of the reference levels (0.8 V/m) and the lowest 0.04 % (0.03 V/m, detection threshold of the measuring device), which means that the real typical exposure levels could be even lower at some points. The range is nearly 30 dB both for measurement points with line-of-sight (LOS, $n = 57$) and without line-of-sight (NLOS, $n = 40$) to the 5G antenna. Evaluated over all measurement points, the range is only slightly higher at a little more than 30 dB. The mean typical exposure level over all measurement points is 0.4 % of the reference levels (0.27 V/m, averaged over power) and the median is 0.2 % (0.12 V/m).

For the instantaneous exposure levels without provoked utilization of the radio cell ($n = 100$), the maximum is 1.1 % of the reference levels (0.67 V/m) and the minimum is 0.04 % (0.03 V/m, detection threshold of the measurement device). According to typical exposure levels, the real instantaneous exposure could also be even lower at some points. Over all measurement points, the found range of 29 dB is similar to that of the typical exposure levels. At measurement points without line-of-sight to the antenna (NLOS, $n = 40$), the range of 22 dB is lower compared to measurement points with line-of-sight to the antenna (LOS, $n = 60$, 27 dB), which is presumably due to the fact that in NLOS cases, measured values in the order of the magnitude of the detection limit frequently occurred. This can be also observed in the frequency distribution of the measured instantaneous exposure levels, where very low values strongly dominate.

Due to the currently very low network load in the 3.6 GHz band, the measured instantaneous exposure levels are for the most part very close to the theoretically estimated minimum exposure (0.01 % to 0.4 % of the reference levels), which is present when the base station is in idle mode. However, this also demonstrates that an idle 5G base station generates only very low exposure levels. Even typical use cases of a user equipment in the vicinity of the measurement point evoke exposure levels, which are still well below the maximum value. A comparison of the median values of maximum and instantaneous exposure levels shows a difference of 34.5 dB (i.e., a factor of 3,450 with respect to the power). The individual difference factors at the single measurement points ranged between about 7 dB and 48 dB. Only at six of the 96 measurement points, the difference factor was less than 20 dB.

At ten measurement points in the vicinity of five 5G base stations, the instantaneous as well as the maximum exposure values to all mobile radio services (GSM, LTE, LTE/5G-DSS and 5G in the 3.6 GHz band) and frequency bands operated at the base stations were determined. TETRA-BOS was not installed at any of the sites. Furthermore, UMTS was no longer in operation at any of the sites. At all then measurement points, the exposure to other mobile radio services (GSM, LTE and LTE/5G-DSS) dominates over the instantaneous as well as the typical 5G exposure. At nine out of ten measurement points, the instantaneous exposure to at least one frequency band of GSM, LTE or LTE/5G-DSS is also higher than the instantaneous as well as the typical exposure to 5G (this applies to both the field strength as well as the percentage of the reference levels). Only at one measurement point, the highest field strength occurs with typical 5G usage. However, due to the lower reference level, the highest percentage of the reference levels is caused by LTE signals in the 800 MHz band. For the maximum exposure, there is no consistent result: at six out of ten measurement points (each both measurement points around three of five 5G sites), the sum of the maximum exposures to other mobile radio services dominates. At the remaining four measurement points (each both measurement points around two of five 5G sites), the maximum exposure is dominated by 5G. However, the difference factors exhibit a wide range with values between -19 dB (i.e., 5G exposure dominates) and 7 dB (i.e., exposure to other mobile radio services dominates). The maximum exposure levels to 5G at these ten measurement points were in the range of 0.7 % (0.4 V/m) to 25.5 % (15.5 V/m).

The statistical evaluation of the levels of the three different 5G exposure types (“instantaneous”, “typical”, “maximum”) taking into account the location of the outdoor measurement points in relation to the 5G antenna shows that it is obviously not justified to use the *distance* between the measurement point and the base station antenna as the sole decisive criterion for the assessment of the exposure level. One reason for this is that in this range of distances, the exposure level is strongly influenced by the side lobes and nulls of the vertical antenna pattern. Due to the ability of beamforming antennas to change their direction of the main lobe in the vertical domain, the distance range, in which measurement points are located only in the region of the side lobes will be reduced, but no prediction can be done on this without knowing the actual settings of the base station (vertical scanning range). For a certain distance between measurement point and the base station antenna, the range of the measured exposure levels amounts up to 30 dB. A significant influence on the exposure levels is observed in the *line-of-sight conditions* between the measurement point and the 5G antenna. At the relatively high frequencies around 3.6 GHz, buildings and even vegetation have a strong attenuation on the

propagating waves. However, it should be mentioned that for some non-line-of-sight measurement points, which were covered by a reflected or an edge-diffracted beam, the resulting exposure levels were comparable to exposure levels at measurement points with line-of-sight to the antenna at similar distances. The impact of the *vertical angle* between base station antenna and the measurement point on the resulting exposure to 5G massive MIMO antennas has changed compared to the results of similar measurements on mobile radio services with passive antennas. Obviously, it can no longer be assumed that the exposure levels at smaller vertical angles ($< 10^\circ$) are in general higher than those at large vertical angles. For the investigated base stations, on average, the highest maximum exposure levels occurred even in the vertical angle range between 15° and 20° . The *orientation of the beam* has a significant influence on the resulting exposure. In addition to the typical exposure, while a user equipment was provoking cell load in the vicinity of the measurement point, further measurements of the typical exposure were carried out under the constraint that the active user equipment was no longer close to the measurement point, but at a greater distance of several tens of meters from it, which resulted in an azimuthal or radial displacement of the radiated traffic beam with respect to the location of the measurement point. The displacement of the beam resulted in a median reduction of the exposure levels of around 7.5 dB. The results show that, in areas of the radio cell that are not in the main lobe of the radiated beam, the exposure is in average lower. However, due to reflections and transmission via side lobes, the exposure is still measurable despite the alignment to a different location in the cell.

Long-term measurements at in total five differently located measurement points over each 24 hours around an urban and a rural 5G site in the 3.6 GHz band showed that users were active only very sporadically, which can be observed by very few peaks of the instantaneous exposure. However, the subsequently calculated 6-minute moving average of the exposure is barely affected by the exposure peaks occurring only for a short time. Most of the time, the measured instantaneous exposure at most of the measurement points was low enough to not exceed the detection threshold of the measurement device. When a typical data traffic case in the cell was provoked by a user equipment in the vicinity of the measurement point, the six-minute average exposure could only be significantly increased when downloading a large file of 1 GB. Other use cases such as surfing or video streaming generated only sporadic field strength peaks, but occurred so rarely that they did not significantly affect the six-minute average exposure. The magnitude of the field strength peaks was strongly depending on the location of the measurement point. At an indoor measurement point on the upper floor immediately opposite from the base station antenna, the exposure amounted up to 9.0 % of the reference levels (5.5 V/m). At measurement points in larger distances or at higher vertical angles to the base station antenna, the exposure was clearly lower with values up to around 0.2 % of the reference levels (0.1 V/m).

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Mit der Weiterentwicklung der Mobilfunknetze hin zur neuesten Mobilfunkgeneration 5G wird zum Erreichen von zellweit hohen Datenübertragungsraten mit einem vermehrten Einsatz von sogenannten Massive-MIMO-Antennen gerechnet. Mit Hilfe dieser strahlformenden und -schwenkenden aktiven Antennen ist es prinzipiell möglich einen oder mehrere Beams auf mögliche Nutzer bzw. Endgeräte auszurichten (Beamforming). Damit werden nutzerspezifische Signale vonseiten der Basisstation nicht mehr zellweit, sondern nur noch lokal in Form von sogenannten Beams abgestrahlt, was zum einen dazu führt, dass dieselben Frequenz- und Zeitressourcen nochmals in der gleichen Zelle, aber in einem anderen Beam wiederverwendet werden können, und zum anderen, dass es aufgrund der lokal beschränkten Abstrahlung zu einem günstigeren Signal-zu-Rausch-Abstand innerhalb des Beams und zu geringeren Interferenzen außerhalb dieser Beams kommt. Dies führt aber auch dazu, dass die lokale Immission in einer Zelle stark davon abhängen kann, wo sich aktive Nutzer befinden.

Die Möglichkeit der Strahlformung bzw. -schwenkung der Antennenabstrahlcharakteristik bringt aus Sicht der messtechnischen Immissions- und Expositionsbestimmung Herausforderungen mit sich, die es bei den bisher verwendeten Basisstationsantennen noch nicht gab. So lässt sich nicht mehr von einer statischen Abstrahlcharakteristik der Antenne ausgehen, vielmehr hängt das zeitabhängige Antennendiagramm von der Zellauslastung und ihrer raumwinkelabhängigen Verteilung ab.

Ziel des gegenständlichen Vorhabens ist die Entwicklung und Beschreibung von Vorschlägen für Messverfahren zur Immissions- und Expositionsbestimmung von im 3,6-GHz-Band eingesetzten Massive-MIMO-Basisstationsantennen, die in 5G-Netzen verwendet werden. Das Messverfahren wird an jeweils zehn Immissionsorten im Umfeld von zehn hinsichtlich der Betreiber, Systemtechnikhersteller sowie der Umgebung unterschiedlichen Basisstationen angewendet. Die Ergebnisse des Vorhabens dienen zur Ableitung von Erkenntnissen, wie sich die maximale, tatsächliche sowie typische Exposition der allgemeinen Bevölkerung in Deutschland durch den Netzausbau ändert.

1.2 Gliederung des vorliegenden Abschlussberichtes

In einem ersten Schritt erfolgt in Kapitel 2 eine ausführliche Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik sowohl hinsichtlich der 5G-Signalstruktur als auch hinsichtlich der Beamforming-Funktionalität. Des Weiteren werden potenziell geeignete Messgeräte für codeselektive 5G-Immissionsmessungen vorgestellt und Messempfehlungen aus nationalen und internationalen Normungsgremien diskutiert. Abschließend werden Erkenntnisse aus der Wissenschaft sowohl der Projektnehmer als auch anderer Stellen zu geeigneten Messverfahren sowie zu bereits ermittelten Immissionswerten aus durchgeführten Messkampagnen vorgestellt.

Basierend auf den vorangegangenen Erkenntnissen werden in Kapitel 3 Messverfahren zur Bestimmung der Momentanimmission sowie der maximal möglichen Immission durch 5G vorgeschlagen. Hierbei wird zwischen frequenz- sowie codeselektiven Messungen differenziert.

In Kapitel 4 werden die mithilfe der vorgeschlagenen Verfahren durchgeführten Immissionsmessungen im Umfeld von zehn 5G-Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen an jeweils zehn Immissionsorten dokumentiert. Neben der tatsächlich zur Messzeit vorherrschenden Momentanimmission sowie der Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung wurden auch typische Immissionen durch typische Nutzungsszenarien bestimmt. Hierbei wurde zusätzlich ein Augenmerk auf die Lage des aktiven 5G-Endgeräts in Relation zum Immissionsort gelegt und verschiedene Konstellationen im Hinblick auf das dadurch generierte Beam-Szenario (Immissionsort befindet sich zwischen Basisstationsantenne und Endgerät oder dahinter) durchgespielt. Darüber hinaus wurden an jeweils zwei Messpunkten im Umfeld von fünf untersuchten 5G-Basisstationen die Momentanimmissionen sowie die maximal möglichen Immissionen durch die bereits etablierten Funkdienste GSM und LTE ermittelt.

Basierend auf den messtechnisch bestimmten Immissionswerten erfolgt in Kapitel 5 eine umfassende Auswertung der Immissionen sowohl im Hinblick auf ihre statistische Verteilung als auch im Hinblick auf messpunktspezifische Eigenschaften wie der Abstand zur Basisstationsantenne und der Vertikalwinkel sowie die Sichtverhältnisse zur Antenne. Abschließend erfolgt ein Vergleich der Immissionswerte mit den etablierten Funkdiensten GSM und LTE.

Neben der Bestimmung der momentanen, der typischen sowie der maximal möglichen Immissionen durch die 5G-Basisstationen werden in Kapitel 6 zusätzlich an mehreren unterschiedlich gelegenen Messpunkten im Umfeld von zwei verschiedenen Anlagen Langzeitmessungen der 5G-Immission vorgestellt. Exemplarisch wurde auch die Immission durch die etablierten Funkdienste GSM und LTE erfasst, um die Immission durch 5G hinsichtlich der auftretenden Immissionswerte einordnen zu können.

2 Relevanter Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Funktechnische Spezifikationen von 5G sowie Vergabeauflagen

2.1.1 Frequenzbereiche und Bandbreiten

Im Rahmen der 3GPP-Standardisierung wurden sowohl für 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

Vorliegendes Projekt beschränkt sich auf das 3,6-GHz-Band, sodass der weitere Fokus auf FR1 gelegt wird. Derzeit sind dort 32 Frequenzbänder spezifiziert, das 3,6-GHz-Band ist Teil des Bandes „n78“, das den Frequenzbereich von 3,3 GHz bis 3,8 GHz umfasst. Für dieses Band gibt die Spezifikation zur Trennung von Up- und Downlink die Verwendung von Time Division Duplex (TDD) vor.

Für UEs und Basisstationen sind je nach Frequenzbereich unterschiedliche Kanalbandbreiten („Channel Bandwidth“) für das belegte Spektrum spezifiziert. In FR1 können Kanalbandbreiten von 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz, 25 MHz, 30 MHz, 40 MHz, 50 MHz, 60 MHz, 70 MHz, 80 MHz, 90 MHz und 100 MHz angenommen werden. Dabei fällt die eigentliche Signalbandbreite („Transmission Bandwidth“) aufgrund von Schutzabständen zu möglichen Nachbarbändern kleiner aus. Für die Schutzabstände, die am unteren und oberen Rand der Kanalbandbreite auch unterschiedlich groß sein dürfen, sind in Abhängigkeit vom Trägerabstand (SCS, Subcarrier Spacing) sowie von der Kanalbandbreite lediglich Mindestwerte spezifiziert. Dadurch wird die maximale Signalbandbreite bzw. die maximale Anzahl an Resource Blocks (RBs) festgelegt, wie in Tabelle 2.1 für einen Trägerabstand von SCS = 30 kHz beispielhaft dargestellt ist (mehr Details zum Trägerabstand und Resource Blocks in Teilkapitel 2.1.3).

Im Standard wird angemerkt, dass sich die angegebenen Betriebsfrequenzbereiche (FR1 und FR2) sowie Kanalbandbreiten in zukünftigen Releases ändern können.

Tabelle 2.1: Minimaler Schutzabstand und maximale Signalbandbreite in MHz sowie als Vielfache von Resource Blocks (RB) und Resource Elements (RE) in Abhängigkeit von der Kanalbandbreite für einen beispielhaft ausgewählten Trägerabstand von SCS = 30 kHz [TS 38.101-1],[TS 38.104]. Eine Kanalbandbreite von 5 MHz ist lediglich mit einem Trägerabstand von SCS = 15 kHz realisierbar.

Kanalbandbreite in MHz	Min. Schutzabstand in kHz	Max. Signalbandbreite in MHz	Max. Signalbandbreite in #RBs	Max. Signalbandbreite in #REs
5	505	3,96	-	-
10	665	8,64	24	288
15	645	13,68	38	456
20	805	18,36	51	612

25	785	23,40	65	7800
30	945	28,08	78	936
40	905	38,16	106	1272
50	1045	47,88	133	1596
60	825	58,32	162	1944
70	965	68,04	189	2268
80	925	78,12	217	2604
90	885	88,20	245	2940
100	845	98,28	273	3276

2.1.2 Modulationsschemata und Zugriffsverfahren

Je nach Anforderung an die Robustheit der Übertragung werden gemäß [TS 38.211] folgende Modulationsschemata für den Physical Downlink Shared Channel (PDSCH, Downlink-Verkehr) und für den Physical Uplink Shared Channel (PUSCH, Uplink-Verkehr) verwendet:

Tabelle 2.2: In PDSCH (Downlink) und PUSCH (Uplink) unterstützte Modulationsschemata sowie die jeweilige Anzahl der Bits pro übertragenem Symbol.

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

Bestimmte physikalische Übertragungskanäle zur Signalisierung werden zur Erhöhung der Robustheit bzw. Reichweite immer mit QPSK moduliert, z.B. Physical Broadcast Channel (PBCH), Physical Downlink Control Channel (PDCCH) und Physical Uplink Control Channel (PUCCH).

Mit OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) kommt bei 5G ein Zugriffsverfahren zum Einsatz, das bereits bei LTE (4G) verwendet wird und das sowohl zeitlich als auch spektral Ressourcen aufteilen und zur Verfügung stellen kann. Die Wellenform im Downlink entspricht konventionellem OFDM mit zyklischem Präfix (Cyclic Prefix OFDM, CP-OFDM). Im Uplink wird CP-OFDM mit optionaler Vorkodierung zur Frequenzspreizung verwendet (DFT-s-OFDM) [TS 38.300]. Beim zyklischen Präfix wird zu Beginn der OFDM-Symbole ein Teil der Bitfolge des Endes wiederholt. Dies stellt in gewisser Weise einen zeitlichen Schutzabstand für durch Mehrwegeausbreitung verspätet ankommende Bits des vorangegangenen OFDM-Symbols dar, sodass die Intersymbolinterferenz (ISI) reduziert werden kann.

2.1.3 Signalstruktur

2.1.3.1 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 und 60 kHz, 120 kHz sowie 240 kHz in FR2 möglich [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 (Rahmen) aus folgenden Teilen zusammen (siehe auch Tabelle 2.3):

- 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“) 35,7 μ s, wobei die Dauer gemittelt über einen Slot (siehe nächster Aufzählungspunkt) zu verstehen ist, da das erste Symbol innerhalb eines Slots ein längeres zyklisches Präfix aufweist.
- 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 2.3: 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
120 kHz	14	80	8
240 kHz	14	160	16

Ein erweitertes zyklisches Präfix („extended cyclic prefix“) ist lediglich für einen Trägerabstand von 60 kHz spezifiziert.

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. Das OFDM-Symbol kann somit eine zur Anzahl der Träger proportionale große Menge von zu übertragenden komplexen Symbolen beinhalten.

2.1.3.2 Resource Grid und Bandwidth Parts

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). Damit ist eine Kompatibilität zwischen in verschiedenen Bandwidth Parts (BWP) verwendbaren unterschiedlichen Numerologien mit anderen Trägerabständen bzw. Symbolauern gewährleistet [TS 38.211]. Je nach Signalbandbreite ergibt sich eine andere maximale Anzahl gleichzeitig übertragbarer Resource Blocks. Die Träger im Frequenzbereich und die Symbole im Zeitbereich werden im Resource Grid zusammengefasst (siehe Bild 2.1.1).

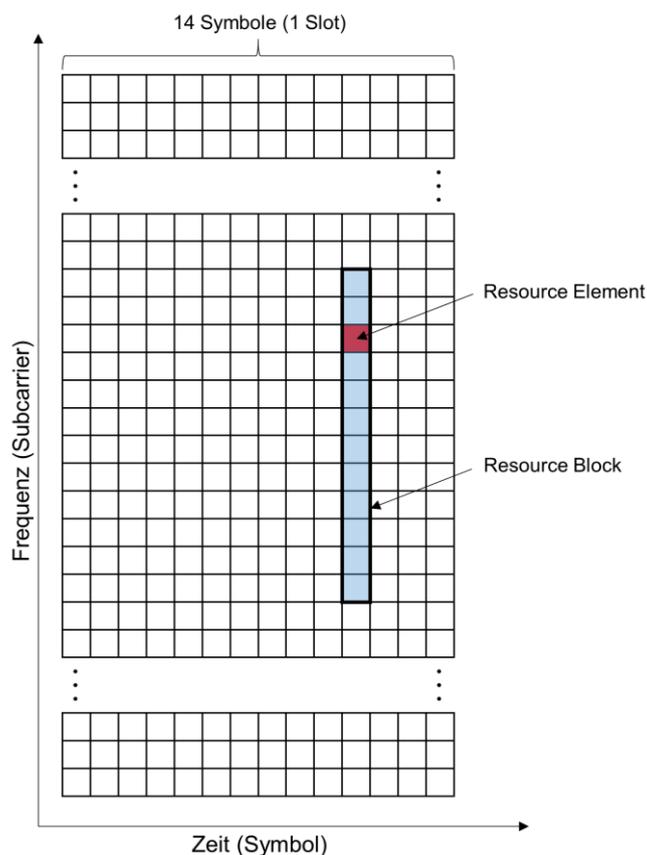


Bild 2.1.1: 5G Resource Grid im Frequenz- (y-Achse) und Zeitbereich (x-Achse). Dargestellt sind 14 Symbole (ein Slot) im Zeitbereich. Ein Quadrat entspricht einem Resource Element (RE). Im Frequenzbereich werden zwölf Resource Elements zu einem Resource Block (RB) zusammengefasst.

Ein Bandwidth Part (BWP) ist eine zusammenhängende Menge von Resource Blocks für eine bestimmte Numerologie [TS 38.211]. Ein Endgerät kann im Downlink sowie im Uplink bis zu vier Bandwidth Parts zugewiesen bekommen, wobei gleichzeitig nur ein Bandwidth Part aktiv sein darf, d.h. das Endgerät kann zu einer bestimmten Zeit Daten aus lediglich einem Bandwidth Part empfangen bzw. senden. Theoretisch kann in jedem Bandwidth Part eine unterschiedliche Numerologie verwendet werden [TS 38.213]. Durch die Unterteilung der kompletten Signalbandbreite in kleinere Bandwidth Parts ist eine Kompatibilität mit 5G-fähigen Endgeräten, die Kanalbandbreiten von bis zu 100 MHz in FR1 nicht unterstützen, gewährleistet.

Des Weiteren können auf einem 5G-Kanal über verschiedene Bandwidth Parts unterschiedliche Nutzungsszenarien abgebildet werden, die unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Datenraten, Latenzzeiten und Verlässlichkeit aufweisen (Network Slicing).

2.1.3.3 TDD-Slot-Format

Wie in Teilkapitel 2.1.3.1 beschrieben besteht ein Slot bei normalem zyklischen Präfix immer aus 14 Symbolen. Die Symbole können dabei in unterschiedliche Weise für „Uplink“, „Downlink“ sowie „Flexible“ aufgeteilt werden. 3GPP spezifiziert insgesamt 56 Slot-Formate für den TDD-Betrieb [TS 38.213], wobei auch beide Extrema nämlich 14 Downlink-Symbole (Slot-Format 0) sowie 14 Uplink-Symbole (Slot-Format 1) beinhaltet sind. Mit „Flexible“ gekennzeichnete Symbole können entweder Downlink, Uplink oder aber keine Übertragung bedeuten, um einen zeitlichen Schutzabstand zwischen Downlink- und Uplink-Übertragung zu ermöglichen. Das Slot-Format muss dabei Slot-übergreifend nicht konstant sein, sondern es ist variabel. Dies bedeutet, dass auch Konfigurationen möglich sind, in denen in mehreren aufeinanderfolgenden Slots nur der Downlink aktiv ist, gefolgt von einem oder mehreren gemischten Downlink-Uplink- bzw. reinen Uplink-Slots. Das jeweilige Slot-Format bzw. die Anzahl aufeinanderfolgender Slots mit demselben Format wird dem Endgerät von der Basisstation mitgeteilt.

2.1.3.4 Physikalische Kanäle

Im Downlink werden folgende 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 Downlink Control Channel (PDCCH) werden dem Endgerät Informationen zu Ressourcen, Modulationsschema und Kodierung für die Downlink-Übertragung im PDSCH und Uplink-Übertragung im PUSCH mitgeteilt.
- Im Physical Broadcast Channel (PBCH) werden die grundlegenden Informationen über die Basisstation übertragen. Er ist Teil des Synchronization Signal Block (SSB, siehe Teilkapitel 2.1.3.5).

Im Uplink werden folgende physikalische Kanäle spezifiziert [TS 38.211][TS 38.212]:

- Im Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) wird primär der Verkehr im Uplink übertragen. Darüber hinaus erfolgt dort eine Übertragung von Kontrollinformationen zwischen dem Physical und dem Transport Layer.
- Im Physical Uplink Control Channel (PUCCH) werden Uplink-Kontrollinformationen vom Endgerät zur Basisstation übertragen, u.a. die Channel State Information (CSI) oder eine Scheduling Request, mit dem eine Zuweisung von Ressourcen für die Übertragung angefordert wird.

Im Physical Random Access Channel (PRACH) signalisiert das Endgerät der Basisstation einen Zugriffsversuch.

2.1.3.5 SS/PBCH Block

Der Synchronization Signal / PBCH Block (SS/PBCH Block, SSB) dient zur Synchronisation zwischen Endgerät und Basisstation und dem initialen Verbindungsaufbau. Der SSB hat eine Dauer von 4 aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen im Zeitbereich und besteht aus 127 bis 240 Trägern im Frequenzbereich (siehe Bild 2.1.2). Die OFDM-Symbole werden in der Reihenfolge PSS – PBCH – PBCH+SSS+PBCH – PBCH gesendet. PSS (Primary Synchronization Signal) und SSS (Secondary Synchronization Signal) in den Symbolen 1 und 3 nehmen dabei 127 Träger ein, der PBCH umfasst hingegen bis zu 240 Träger in den Symbolen 2 und 4. Bei einem Trägerabstand von 30 kHz entspricht dies Bandbreiten von 3,81 MHz bzw. 7,2 MHz [TS 38.211]. Während PSS und SSS zur Synchronisierung dienen, beinhaltet PBCH wichtige anlagenbezogene Daten zum Verbindungsaufbau z.B. den Master Information Block (MIB) sowie das sogenannte Demodulation Reference Signal (DM-RS), das erst die Dekodierung des PBCH ermöglicht.

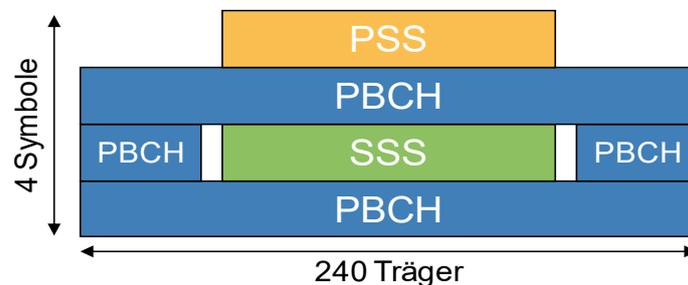


Bild 2.1.2: Schematische Darstellung eines SSB bestehend aus den Signalen PSS, SSS sowie dem PBCH, die im Zeitbereich 4 OFDM-Symbole und im Frequenzbereich bis zu 240 Träger umfassen.

Für das zeitliche Auftreten eines bzw. mehrerer aufeinanderfolgender SSB innerhalb eines Halb-Frames werden in [TS 38.213] je nach Trägerabstand und Frequenzband insgesamt acht Fälle spezifiziert. Generell gilt, dass sofern eine Übertragung stattfindet, diese innerhalb der Dauer eines Halb-Frames (5 ms) abgeschlossen sein muss (siehe Bild 2.1.3). Die maximale Anzahl L_{\max} der innerhalb eines Halb-Frames übertragenen SSB ist abhängig vom Frequenzband:

- $L_{\max} = 4$ für FR1 und Frequenzen $f \leq 3$ GHz für FDD und $f \leq 2,4$ GHz für TDD
- $L_{\max} = 8$ für FR1 und Frequenzen $f > 3$ GHz für FDD und $f > 2,4$ GHz für TDD
- $L_{\max} = 64$ für FR2

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 2.1.4). Die SSB können mit einer Periodizität von 5 ms (Halb-Frame), 10 ms (Frame), 20 ms, 40 ms, 80 ms oder 160 ms gesendet werden [TS 38.331]. Bei der Suche nach Zellen kann das Endgerät von einer Periodizität von 20 ms ausgehen. Bei hergestellter Verbindung mit einer Zelle kann die Basisstation dem Endgerät die SSB-Periodizität mitteilen. Sofern dies nicht geschieht, geht das Endgerät von einer Periodizität von 5 ms aus [TS 38.213].

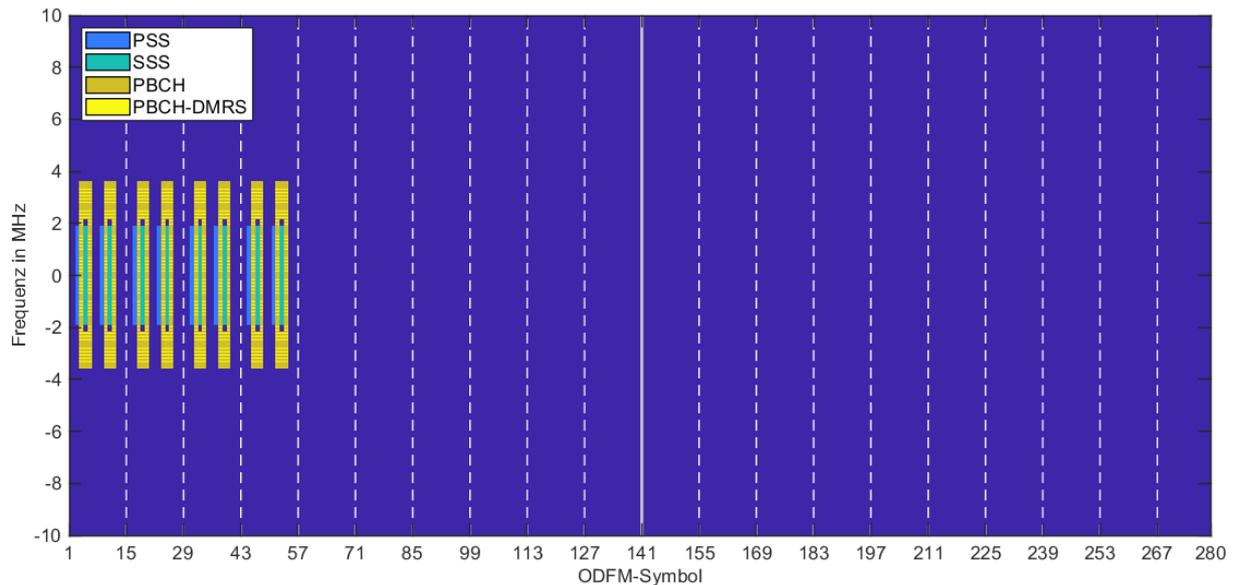


Bild 2.1.3: Darstellung eines SSB Bursts bestehend aus acht sequentiell abgestrahlten SSB im Frequenz-Zeit-Bereich bei einem Trägerabstand von 30 kHz für die Dauer eines 5G-Frames (10 ms). Die gestrichelten vertikalen Linien geben jeweils den Beginn eines Slots bestehend aus 14 ODFM-Symbolen an. Die durchgängige vertikale Linie markiert den Beginn eines neuen Halb-Frames nach 5 ms.

2.1.3.6 Referenzsignale

Während der Standardisierung von 5G wurde in 3GPP-Meetings darüber diskutiert, ob das bei LTE noch verwendete zellspezifische Referenzsignal (Cell-specific Reference Signal, CRS) bei 5G vereinfacht oder sogar abgeschafft werden kann, da dessen Funktion von anderen Referenzsignalen übernommen wird, die im Unterschied zum CRS mit Ausnahme des DM-RS nur bei aktiver Verbindung mit einem Endgerät gesendet werden [R1-165179]. Im Standard werden folgende Referenzsignale spezifiziert [TS 38.211]:

- Das Demodulation Reference Signal (DM-RS) wird im Downlink und Uplink zum Demodulieren von allgemeinen bzw. nutzerspezifischen Signalisierungs- (PBCH bzw. PDCCH, PUCCH) als auch nutzerspezifischen Verkehrsinformationen (PDSCH, PUSCH) als Bestandteil dieser Kanäle abgestrahlt. Da es unter anderem im PBCH abgestrahlt wird, ist es auch Bestandteil des SSB.
- Das Phase-Tracking Reference Signal (PT-RS) wird sowohl im Downlink als auch im Uplink im PDSCH und PUSCH ausgesendet und dient zur Kompensation des Phasenrauschens, indem der Empfänger mithilfe des PT-RS der Phase des Senders folgt. Das PT-RS wird nur bei einer aktiven Verbindung zwischen Basisstation und Endgerät gesendet.
- Das Sounding Reference Signal (SRS) wird ausschließlich im Uplink gesendet und ermöglicht der 5G-Basisstation eine Schätzung der augenblicklichen Kanalverhältnisse, die bei TDD-Systemen aufgrund der Reziprozität eine kanaloptimierte Abstrahlung im Downlink ermöglicht. Das SRS wird vom Endgerät nur bei einer aktiven Verbindung zur Basisstation gesendet.

- Das Channel State Information Reference Signal (CSI-RS) wird als eigenständiges Signal ausschließlich im Downlink gesendet und ermöglicht dem Endgerät eine Kanalschätzung. Basierend darauf meldet es der Basisstation u.a. die Kanalqualität sowie im Falle von Codebook-basiertem Beamforming die diskrete Beam-Ausrichtung (Precoding Matrix Indicator, PMI) [TS 38.214]. Das CSI-RS ist nutzerspezifisch, es wird von der Basisstation also nur bei einer aktiven Verbindung zum Endgerät gesendet.

Bei 5G gibt es daher keine Referenzsignale mehr, die im Allgemeinen sowohl zellweit (ohne Beamforming) als auch unabhängig von der Zellauslastung abgestrahlt werden müssen.

2.1.4 Beamforming durch MIMO

Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) ist eine Schlüsseltechnologie zur Erhöhung von Datenraten. Es verwendet mehrere Antennen aufseiten von Sender und Empfänger, wodurch unterschiedliche Datenströme gleichzeitig auf verschiedenen MIMO-Übertragungsschichten (Layern) übertragen bzw. in unterschiedliche Raumrichtungen abgestrahlt werden können. Der zweite Fall, der im Folgenden „Beamforming“ genannt wird, soll nachfolgend weiter beleuchtet werden. In [TR 38.802] wird das „Beam Management“ als Menge von Prozeduren beschrieben, um eine Anzahl von Basisstations- bzw. Endgeräte-Beams zu erfassen und aufrechtzuerhalten, die für den Sende- und Empfangsfall in Downlink und Uplink verwendet werden können. Für Beamforming muss die Basisstation in der Lage sein, basierend auf Downlink-Messungen des Endgeräts bzw. auf eigenen Uplink-Messungen eine Beam-Ausrichtung für den Sende- (Downlink) und Empfangsfall (Uplink) zu bestimmen. Die Prozeduren zum Beam Management zwischen Basisstation und Endgerät sind wie folgt zu verstehen:

- P-1 („Beam Selection“): Ermöglichung einer Beam-Auswahl aufseiten des Endgeräts basierend auf von der Basisstation in verschiedenen Richtungen abgestrahlten Beams. Aufseiten der Basisstation umfasst dies typischerweise einen Beam-Sweep aus einer Menge von verschiedenen Beam-Ausrichtungen.
- P-2 („Beam Refinement“): Ermöglichung von endgeräteseitigen Beam-Messungen für einen Wechsel zu einem anderen Beam derselben oder einer benachbarten Zelle.

Das in [TR 38.802] noch sehr allgemein beschriebene Beamforming wird in anderen Dokumenten konkreter spezifiziert. Für den Downlink kann die 5G-Basisstation Beamforming auf den SSB sowie auf die im Physical Downlink Control bzw. Shared Channel (PDCCH, PDSCH) übertragenen Kontrollinformationen bzw. den Verkehr anwenden [TR 21.915]. Im Detail bedeutet dies, dass die innerhalb eines Halb-Frames zu übertragenden SSB durch unterschiedlich ausgerichtete Beams in verschiedene Raumrichtungen abgestrahlt werden können, deren Einhüllende das Versorgungsgebiet der Zelle umfasst [TS 38.300]. In diesem Fall wird die Versorgungsqualität in Form des Empfangspegels RSRP (Reference Signal Received Power) unter allen empfangbaren Beams bewertet und der Basisstation gemeldet. Die Basisstation trifft basierend darauf eine Entscheidung, welche Beam-Ausrichtung weiterhin genutzt werden soll. Für Beamforming im PDSCH (Verkehr) informiert die 5G-Basisstation das Endgerät über die jeweilige Beam-Ausrichtung, sodass es im Falle eines endgeräteseitigen Beamformings für den Empfang eine entsprechende Beam-Ausrichtung aktivieren kann [TR 21.915]. Die durch das Beamforming erzeugten Beams werden in [Hua 19] Broadcast Beams für den SSB und Traffic Beams für PDCCH und PDSCH genannt.

2.1.5 Maximale Ausgangsleistung bzw. EIRP

2.1.5.1 Einordnung in Base Station Types

Um festzustellen, an welchem Referenzpunkt die Senderausgangsleistung („output power“, leitungsgebundene Messung) oder die abgestrahlte Leistung („radiated transmit power“, strahlungsgebundene Messung) einer Basisstationsantenne zu bestimmen ist, muss nach [TS 38.104] eine Einordnung in eine der drei Base Station Types vorgenommen werden:

- Beim BS Typ 1-C handelt es sich um einen einzelnen Sende-/Empfangszweig. Der Referenzpunkt zur Bestimmung der Senderausgangsleistung befindet sich am Fußpunkt der Antenne. Gegebenenfalls können zwischen BS cabinet und Antenne noch externe Verstärker bzw. Filter verbaut sein, sodass der Referenzpunkt an Port A bzw. an Port B liegt (siehe Bild 2.1.4).

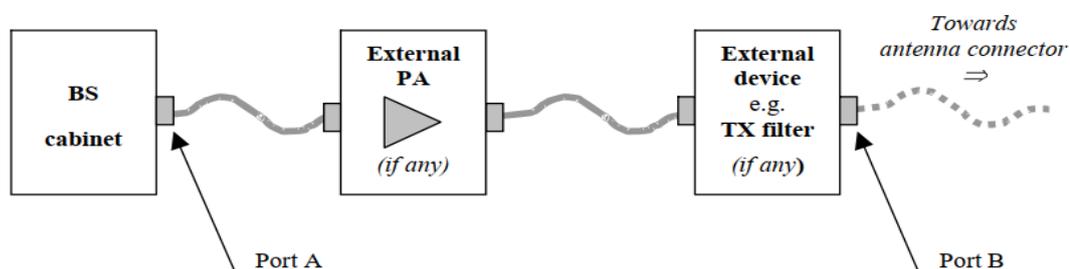


Bild 2.1.4: Transmitter Interface des Base Station Type 1-C (aus [TS 38.104]).

- Beim BS Typ 1-H werden zwei Referenzpunkte definiert: Leitungsgebunden erfolgt die Bestimmung der Senderausgangsleistung an der Transceiver Array Boundary (TAB) zwischen dem sogenannten Transceiver Unit Array (TRXUA), das M Datenströme verarbeitet, und dem HF-Netzwerk, das K Signalpfade auf die eigentlichen Antennen bzw. Antennen-Arrays abbildet. Die Anzahl der Anschlüsse in der TAB entspricht der Anzahl der Sende-/Empfangspfade (siehe Bild 2.1.5). Gestrahlt erfolgt die Bestimmung der abgestrahlten Leistung an der Radiated Interface Boundary (RIB, siehe nächster Aufzählungspunkt zum BS Typ 1-O und 2-O).

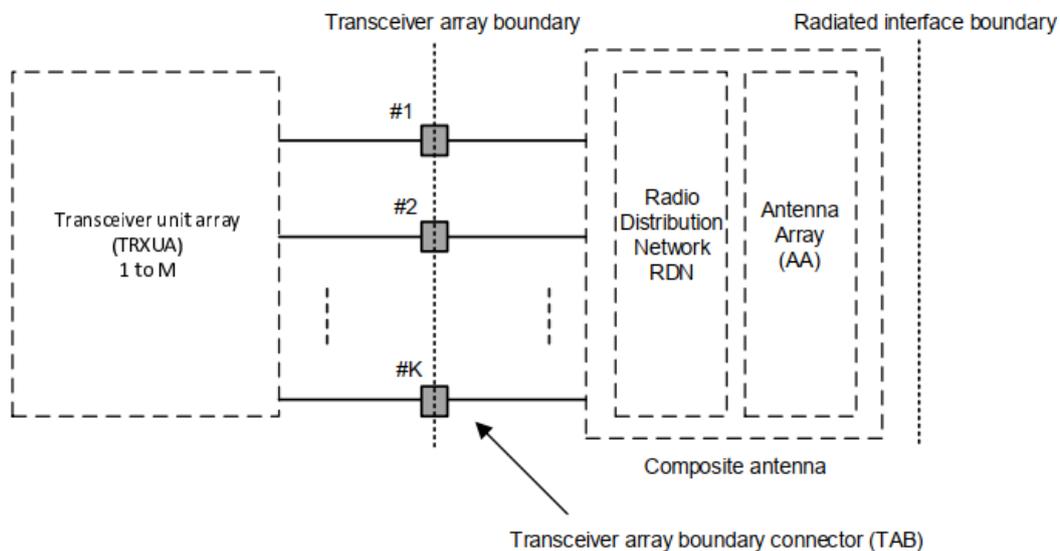


Bild 2.1.5: Referenzpunkte am TAB für Base Station Type 1-H (aus [TS 38.104]).

- BS Typ 1-O ist für FR1 und BS Typ 2-O für FR2 spezifiziert. Bei diesen Typen ist kein leitungsgebundener Zugriff mehr möglich, sodass die abgestrahlte Leistung an der sogenannten Radiated Interface Boundary (RIB) lediglich gestrahlt bestimmt werden kann (siehe Bild 2.1.6). BS Typ 1-O enthält mindestens acht Transceiver-Einheiten ($P \geq 8$), um mindestens 8 Datenströme parallel verarbeiten zu können.

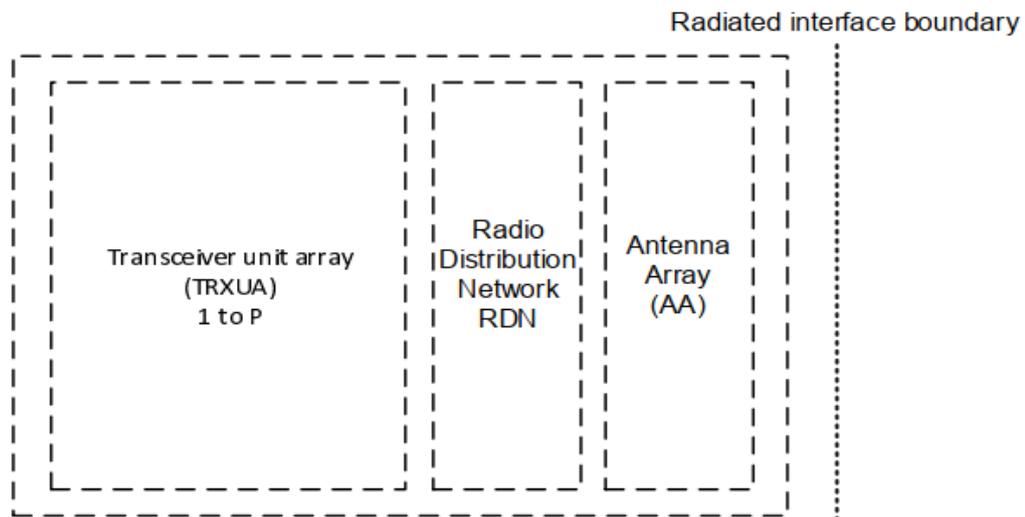


Bild 2.1.6: Gestrahlte Referenzebene RIB für Base Station Type 1-O und 2-O (aus [TS 38.104]).

Bei den im Rahmen von 5G zum Zwecke des Beamformings im 3,6-GHz-Band zum Einsatz kommenden Massive-MIMO-Antennen kann es sich aufgrund der Tatsache, dass dort eine Vielzahl von Sende- und Empfangszweigen zum Einsatz kommt (siehe Teilkapitel 2.2), nicht um Basisstationen des Typs 1-C handeln. Je nachdem, auf welche Weise die Senderausgangsleistung bestimmt werden kann, handelt es sich um Basisstationen des Typs 1-H (leistungsgebundene und gestrahlte Bestimmung der Sendeleistung) oder des Typs 1-O (ausschließlich gestrahlte Bestimmung der Sendeleistung).

2.1.5.2 Einordnung in Base Station Classes

In [TS 38.104] werden drei verschiedene Base Station Classes spezifiziert, für die je nach Base Station Type unterschiedliche Definitionen gelten. Sie werden durch Anforderungen des jeweiligen Zelltyps charakterisiert. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle 2.4 zusammengefasst. Für die Types 1-O und 2-O werden Mindestabstände zwischen Basisstation und Endgerät angegeben, anhand derer die Eignung für einen Zelltyp beurteilt werden kann. Bei den Types 1-C sowie 1-H erfolgt die Beurteilung basierend auf dem minimalen Kopplungsverlust. Dieser wird nach [TR 25.951] als Pfadverlust zwischen Basisstation und Endgerät definiert, wobei die Antennengewinne von Basisstation und Endgerät berücksichtigt werden.

Tabelle 2.4: Base Station Classes bzw. Zelltypen und ihre Mindestanforderungen für verschiedene Base Station Types.

Base Station Class	Zelltyp	Min. Lateralabstand BS-UE (Definition für BS Typ 1-O, 2-O)	Minimaler Kopplungsverlust (Definition für BS Typ 1-C, 1-H)
Wide Area BS	Makrozellen	35 m	70 dB
Medium Range BS	Mikrozellen	5 m	53 dB
Local Area BS	Pikozellen	2 m	45 dB

Im Rahmen des derzeitigen 5G-Rollouts werden primär Makrozellen, d.h. Basisstationen der Klasse „Wide Area“ aufgebaut. Zukünftig ist aber auch mit dem Einsatz von 5G in Mikro- und Pikozellen zu rechnen.

2.1.5.3 Maximale Sendeleistungen in Abhängigkeit von Base Station Type und Base Station Class

In Abhängigkeit davon, um welchen Base Station Type es sich handelt, werden entweder die Senderausgangsleistung leitungsgebunden (BS Typ 1-C, 1-H) oder die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) (BS Typ 1-O) als Bewertungsgröße verwendet und dementsprechend unterschiedliche Referenzpunkte zur Bestimmung gewählt. Unter Verwendung der Angaben aus [TS 38.141-1] sowie [TS 38.141-2] zeigt Tabelle 2.5 die maximale Senderausgangsleistung bzw. EIRP für die verschiedenen Base Station Types in FR1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Base Station Class. Für „Wide Area“ Basisstationen, die in Makrozellen eingesetzt werden, gibt es keine Limitierung der Sendeleistung bzw. EIRP. Für „Medium Range“ bzw. „Local Area“ Basisstationen, die in Mikro- bzw. Pikozellen eingesetzt werden, skaliert die maximale Ausgangsleistung bei Base Station Type 1-H mit der Anzahl der Sende- und Empfangszweige N_{TXU} (M in Bild 2.1.5 bzw. P in Bild 2.1.6).

Die in Tabelle 2.5 angegebenen Leistungsbegrenzungen dienen nicht zum Zwecke des Immissionsschutzes, sondern zur Klassifizierung und zur Auswahl seitens eines Netzbetreibers im Hinblick unter anderem auf die Minimierung von Störungen anderer Anlagen (z.B. in benachbarten Zellen oder Frequenzbändern). Im Rahmen des im vorliegenden Forschungsvorhaben untersuchten Beamforming-Antennen in FR1, sind lediglich die Base Station Types 1-H und 1-O von Relevanz.

Tabelle 2.5: Maximale Senderausgangsleistung (Type 1-C, 1-H) bzw. EIRP (Type 1-O) für verschiedene Base Station Classes in FR1. Für „Wide Area BS“ gibt es keine Limitierung der Sendeleistung bzw. EIRP (aus [TS 38.104],[TS 38.141-1] und [TS 38.141-2]).

	Base Station Type (Bewertungsgröße)	Type 1-C (Senderausgangsleistung)	Type 1-H (Senderausgangsleistung)	Type 1-O (EIRP)
	Referenzpunkt	Fußpunkt Antenne	Transceiver Array Boundary (TAB)	Radiated Interface Boundary (RIB)
Max. Ausgangsleistung bzw. EIRP je nach Base Station Class	Wide Area BS (Makrozellen)	-	-	-
	Medium Range BS (Mikrozellen)	38 dBm (6,3 W)	38 dBm + 10·log(N_{TXU})	47 dBm (50 W)
	Local Area BS (Pikozellen)	24 dBm (0,25 W)	24 dBm + 10·log(N_{TXU})	33 dBm (2 W)

2.1.6 Vergabeauflagen in Deutschland

In den Entscheidungen III und IV der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur über die Festlegungen und Regeln zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz [BNetzA 18] werden sowohl allgemeine als auch speziell 5G bzw. 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].

2.1.6.1 Frequenzauktion 2019 und der 5G-Rollout

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, wodurch die durch andere Teilnehmer erzeugte Zellauslastung nicht berücksichtigt wird. 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 % 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.
- neben den 500 Basisstationen in „weißen Flecken“ *zusätzlich* 1.000 Basisstationen im Bereich 3,6 GHz für 5G-Anwendungen in Betrieb zu nehmen. Dabei werden die Frequenzen eigentlich technologie- und diensteneutral zugeteilt, d.h. streng genommen wird nicht der Einsatz von „5G New Radio“ angeordnet. Vielmehr sollen Basisstationen errichtet werden, die hinsichtlich Datenraten und Latenzzeiten den Anforderungen an 5G entsprechen. Aufgrund der Wichtigkeit des 5G-Ausbaus wurde die Anzahl der Basisstationen im Bereich 3,6 GHz gegenüber dem Konsultationsentwurf von 500 auf 1.000 erhöht und der Geltungsbereich auch auf Neueinsteiger ausgeweitet.

Die zahlenmäßig spezifizierten Basisstationen sind nur entsprechend des Flächenanteils am Bundesgebiet auf die jeweiligen Bundesländer zu verteilen, berücksichtigen also bundeslandübergreifend keine unterschiedlich hohen Bevölkerungsdichten bzw. Einwohnerzahlen. Sie können aber innerhalb eines Bundeslandes örtlich den Anforderungen entsprechend verteilt werden. Zusätzlich wird bis zum Ende des Jahres 2022 eine Versorgung von 100 Mbit/s an besonders wichtigen Verkehrswegen (Bundesautobahnen, Bundesstraßen mit Verbindungsfunktionsstufen 0 und 1, Schienenwege mit mindestens 2.000 Fahrgästen pro Tag) auferlegt. Um den zukünftigen Anforderungen des automatisierten Fahrens gerecht zu werden, wird an Bundesautobahnen und -straßen zudem eine maximale Latenz von 10 ms auferlegt.

Bis zum *Ende des Jahres 2024* sind alle übrigen Bundesstraßen mit mindestens 100 Mbit/s und höchstens 10 ms Latenz 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 einen Versorgungsgrad von mindestens 25 % der Haushalte bis *Ende 2023* und von 50 % der Haushalte bis *Ende 2025*. Eine damit verbundene Mindestdatenrate wird nicht explizit angegeben. Sofern Neueinsteiger lediglich das 3,6-GHz-Band erworben haben, sind bis Ende 2025 nur 25 % 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. Unberührt davon bleibt aber die Auflage bis Ende 2022 - wie die anderen Netzbetreiber - 1.000 Basisstationen im 3,6-GHz-Band in Betrieb zu nehmen. Die Versorgungsaufgabe zur Errichtung von 500 Basisstation in „weißen Flecken“ gilt für Neueinsteiger nicht.

Bei den Auflagen zur Versorgung von Verkehrswegen wird auch die Versorgung anderer Netzbetreiber angerechnet bzw. es werden Kooperationsmöglichkeiten vorgeschlagen (z.B. Roaming), sodass nicht jeder Netzbetreiber alle Auflagen durch dessen eigenes Mobilfunknetz erfüllen muss.

2.1.6.2 Auswirkungen der 5G-Versorgungsaufgaben auf die Immission

In Anlage 3 von [BNetzA 18] werden Frequenznutzungsbestimmungen zu dem für vorliegenden Vorhaben relevanten Frequenzbereich 3.400 MHz - 3.700 MHz festgelegt. So kann der Betrieb der in diesem Frequenzband betriebenen Anlagen sowohl mit passiven Antennensystemen (konventionelle Mobilfunkantennen) als auch mit aktiven Antennensystemen (Beamforming-Antennen) erfolgen. Darüber hinaus werden analog zu den 3GPP-Spezifikationen für Makrozellen (siehe Teilkapitel 2.1.5.3) keine Grenzwerte für die EIRP vorgeschrieben. Lediglich für Femto-Basisstationen ist „die Leistung so zu wählen, dass Störungen auf Nachbarkanälen minimiert werden“.

Wie in Teilkapitel 2.1.6.1 ausgeführt wurde, hat jeder der vier Netzbetreiber mindestens 1.000 Basisstationen im 3,6-GHz-Band für 5G-Anwendungen auf dem gesamten Bundesgebiet zu errichten. Die zur Verfügung stehende Bandbreite von 300 MHz teilen sich die Netzbetreiber Vodafone, 1&1 Drillisch, Telefónica Germany sowie Telekom Deutschland auf (siehe Bild 2.1.7). Die Versorgungsaufgaben ermöglichen, fordern aber nicht den Einsatz von Beamforming-Antennen. Aus dem fehlenden Wissen über typischerweise eingesetzte Sendeleistungen und Antennengewinne (EIRP) sowie der typischerweise bzw. im worst case zu erwartenden Anlagendichte lässt sich keine verlässliche Aussage über die Auswirkungen des durch die Versorgungsaufgaben forcierten 5G-Rollouts auf die zu erwartende Immission treffen. Hinsichtlich des Auswirkungen der 5G-Versorgungsaufgaben auf die Immission im 3,6-GHz-Band ist zu beachten, dass dieses Frequenzband bisher vom Mobilfunkstandard WiMAX verwendet wurde und diese Immissionen dort entfallen, wo WiMAX noch verwendet wurde.

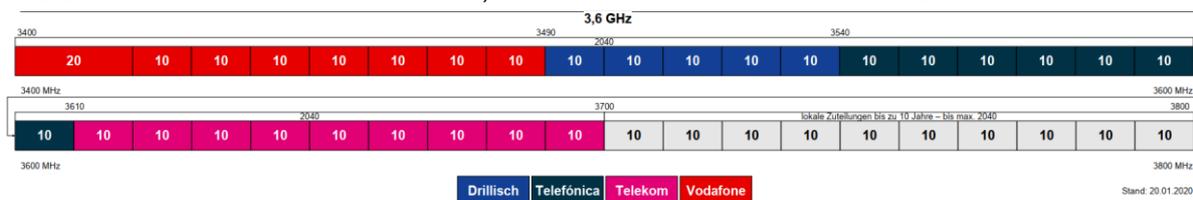


Bild 2.1.7: Übersicht des Mobilfunkspektrums zwischen 3,4 GHz und 3,8 GHz nach der Frequenzauktion 2019 (aus [BNetzA 20a]). Die vier Netzbetreiber haben das Spektrum zwischen 3,4 GHz und 3,7 GHz ersteigert.

2.2 Technische Spezifikation von 5G-Basisstationen und – Basisstationsantennen

Vorliegendes Teilkapitel beschäftigt sich mit den technischen Spezifikationen von 5G-Basisstationen und -Basisstationsantennen, wobei der Schwerpunkt auf 5G-Basisstationsantennen gelegt wird, weil die Informationsmenge zu 5G-Basisstationen begrenzt ist. Aus Immissionschutzsicht ist die abgestrahlte Leistung der Antenne relevant. Diese kann mit der Herstellerangabe der maximalen Eingangsleistung und des Antennengewinns nach oben abgeschätzt werden. Wie bei 2G-, 3G- und 4G-Basisstationen wird davon ausgegangen, dass auch bei 5G-Basisstationen Anlagenparameter wie die Base Station Class (und damit zusammenhängend die Zellgröße), die Installationshöhe und Bauform (Dach- oder Mastmontage) sowie die Azimut-Ausrichtung der Antennen und deren Downtilt (mechanisch und/oder elektrisch) ausschlaggebend sein werden für die erzeugte Immission im Umfeld eines Standorts.

Nachfolgend werden technische Spezifikationen von derzeit in 5G-Netzen in Makrozellen eingesetzten Massive-MIMO-Antennen vorgestellt. Zum einen wird in Teilkapitel 2.2.1 auf die durch 3GPP spezifizierte 5G-Standardisierung eingegangen, zum anderen werden in Teilkapitel 2.2.2 Informationen der Hersteller Ericsson, Huawei und Nokia zum Portfolio ihrer entwickelten Massive-MIMO-Antennen vorgestellt. Abschließend werden in Teilkapitel 2.2.3 basierend auf öffentlich verfügbaren Informationen die in Deutschland aktuell konkret eingesetzten Massive-MIMO-Antennen benannt.

2.2.1 Standardisierung

Im Rahmen der 5G-Standardisierung durch 3GPP wurden Anforderungen und Spezifikationen definiert, die den Aufbau und die Funktionalität der in 5G einsetzbaren Massive-MIMO-Antennen beschreiben. Bereits bei LTE wurden im Rahmen von [TR 36.873] und [TR 36.897] Anforderungen für ein Elevations- sowie ein Full-Dimension-Beamforming aufgestellt und es wurde untersucht, welchen Performance-Gewinn das Beamforming und die damit einhergehende erhöhte Anzahl von Sende- und Empfangszweigen (Transceiver) mit sich bringt. Auf dem Weg zum ersten 5G-Standard (Release 15) wurden in diversen „Technical Discussions“ von 3GPP-Treffen Anforderungen skizziert sowie Anträge zur Spezifikation diskutiert und beschlossen. In den folgenden drei Teilkapiteln wird der durch den Standard vorgegebene Rahmen für die Antennenelemente, das Antennen-Array sowie die Array-Architekturen vorgestellt. In Teilkapitel 2.2.1.5 werden basierend darauf wesentliche Parameter von Massive-MIMO-Antennen abgeleitet.

2.2.1.1 Antennenelement

Ein Antennen-Array setzt sich aus mehreren gleichen Antennenelementen zusammen. In [TR 36.873] werden Vorgaben für das einzelne Antennenelement gemacht, auf denen alle weiteren 3GPP-Dokumente basieren. Im Wesentlichen wird zwischen kreuzpolarisierten Dipolantennen und einfachen Dipolantennen unterschieden. Da in Basisstationsantennen üblicherweise Kreuzdipolantennen eingesetzt werden, um die Polarisationsdiversität auszunutzen, wird im Folgenden nur auf diese Antennenelemente eingegangen.

Die Polarisationsdrehung der Kreuzdipole wird mit $\pm 45^\circ$ angegeben, wobei 0° parallel zur vertikalen Achse verläuft (siehe Bild 2.2.2). Für das horizontale und vertikale Antennendiagramm sowie für das dreidimensionale Antennendiagramm wird eine Berechnungsvorschrift angegeben. Die Horizontal- und Vertikalschnitte des Antennendiagramms des Antennenelements sind in Bild 2.2.1 visualisiert. Dort abzulesen ist der in [TR 36.873] angegebene 3-dB-Öffnungswinkel, der sowohl horizontal als auch vertikal 65° beträgt. Der Horizontalschnitt ist nicht omnidirektional, da anzunehmen ist, dass sich hinter den Antennenelementen Reflektoren befinden, die eine Abstrahlung in Richtung 180° unterdrücken. Der Gewinn des Antennenelements darf maximal 8 dBi betragen.

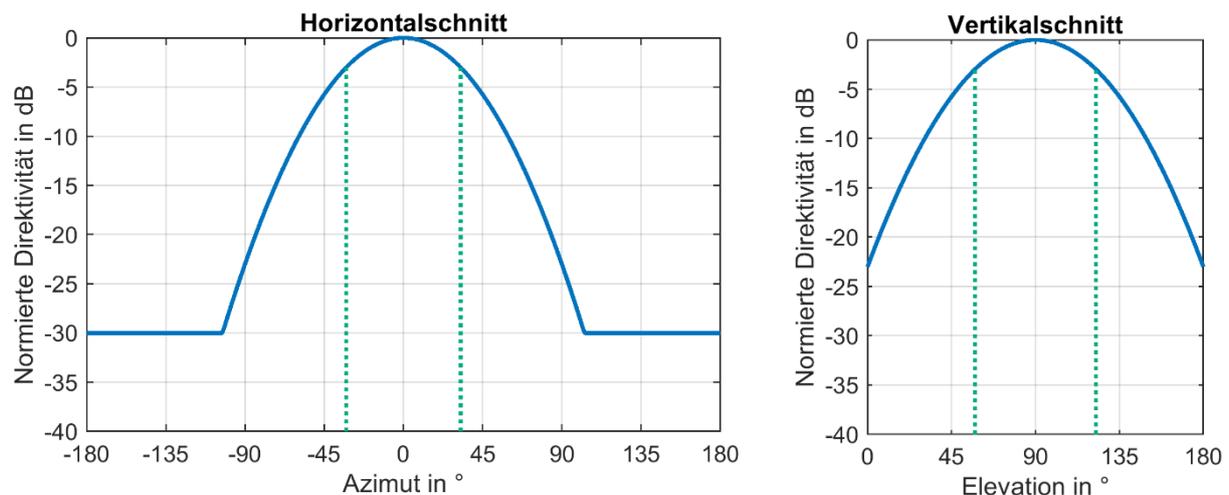


Bild 2.2.1: Auf das Maximum normierte Direktivität im Horizontalschnitt (links) und Vertikalschnitt (rechts) des Antennenelements (Kreuzdipol) aus [TR 36.873] mit 3-dB-Öffnungswinkeln von jeweils 65° .

2.2.1.2 Antennen-Array

In [TR 36.873] und darauf aufbauend in [TR 36.897] wird ein planares zweidimensionales Antennen-Array als Grundstruktur für die weitere Modellierung des Antennen-Arrays vorgestellt. Das Antennen-Array kann durch die Parameter M (Anzahl der Zeilen), N (Anzahl der Spalten) und P (Anzahl der Polarisierungen) eindeutig beschrieben werden (siehe Bild 2.2.2).

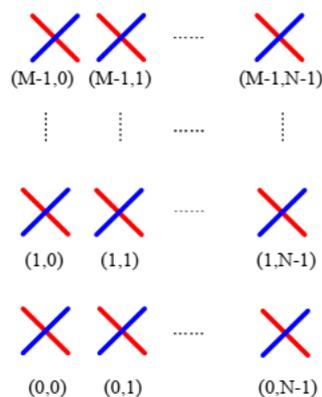


Bild 2.2.2: Modell des Antennen-Arrays beschrieben durch die Parameter (M, N, P = 2)

Für die Anzahl der Spalten N werden Werte von 1, 2, 4, 8 und 16 vorgeschlagen. Für die Anzahl der Zeilen M werden keine konkreten Vorgaben gemacht. Es sollen standardmäßig

zwei Polarisationen berücksichtigt werden, was aufseiten der Basisstation Polarisationen von $\pm 45^\circ$ entspricht. Horizontal sollen die einzelnen Antennenelemente eine Distanz von einer halben Wellenlänge ($0,5 \lambda$) aufweisen. Vertikal wird bei 8 vertikal angeordneten Elementen eine Distanz von $0,8 \lambda$, bei 4 vertikal angeordneten Elementen eine Distanz von $0,5 \lambda$ vorgeschlagen. Für verschiedene Array-Konfigurationen, die aus 8, 16, 32 oder 64 Transceivern bestehen und bei denen die Antennenelemente horizontal und vertikal unterschiedlich angeordnet sind, wird der Performance-Gewinn untersucht.

In neueren Dokumenten zur 5G-Standardisierung werden für die Zelltypen „Urban macro“ und „Dense urban“ für das Frequenzband um 4 GHz bis zu 256 Antennenelemente vorgeschlagen [R1-163885]. Darüber hinaus wird dort eine verallgemeinerte Form des Antennenmodells eingeführt, in dem jedes Antennen-Array aus [TR 36.897] als Panel bezeichnet wird und das sogenannte Antennen-Panel-Array wie in Bild 2.2.3 aus M_g Panels pro Spalte und N_g Panels pro Zeile besteht. Für das Sub-6-GHz-Band wird als Standardkonfiguration allerdings nur ein Panel ($M_g = 1, N_g = 1$) eingesetzt.

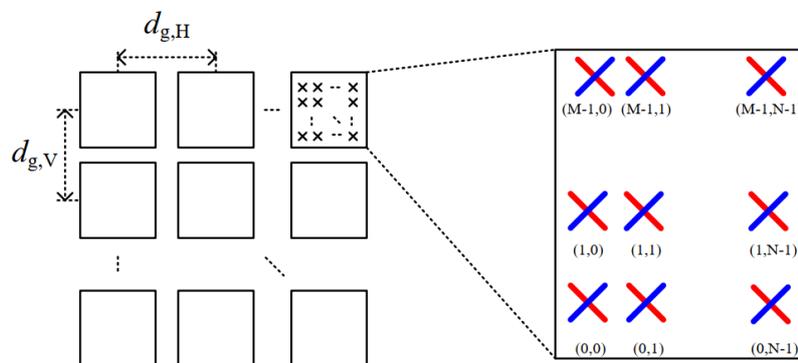


Bild 2.2.3: 3GPP-Modell eines Antennen-Panel-Arrays bestehend aus M_g horizontal und N_g vertikal angeordneten Panels (Antennen-Arrays) aus [R1-163885].

2.2.1.3 Array-Architekturen

Aufgrund der bei 5G zu erwartenden großen Unterschiede bei der Trägerfrequenz und den stark unterschiedlichen Nutzungsszenarien wird eine Benutzung unterschiedlicher Array-Architekturen angestrebt. Diese lassen sich nach [R1-165362] in Basisband-, Hybrid- und HF-Architekturen einteilen und basieren letztlich auf den Array-Konzepten, die bereits für das Beamforming bei LTE eingeführt wurden. Die drei verschiedenen Architekturen werden im Folgenden genauer beschrieben.

Bei der *Basisbandarchitektur* erfolgt das Beamforming durch komplexe Gewichtung (Amplitude und Phase) des Signals im digitalen Basisband, weswegen es auch digitales Beamforming genannt wird. Hierbei ist wie in Bild 2.2.4 dargestellt jedes Antennenelement

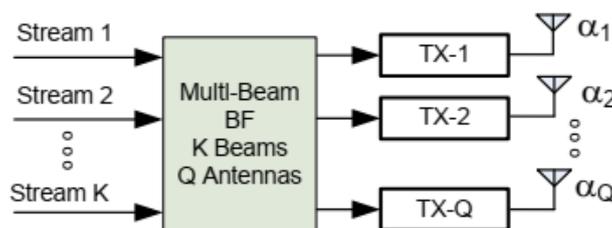


Bild 2.2.4: Beamforming mithilfe der Basisbandarchitektur: K Datenströme werden auf Q Signalpfade abgebildet. Jeder Signalstrom speist dabei ein Antennenelement (aus [R1-165362]).

einem Signalpfad zugeordnet, womit die höchstmögliche Steuerbarkeit beim Beamforming erreicht wird. Da der 5G-Kanal in FR1 Bandbreiten von bis zu 100 MHz und in FR2 von bis zu 400 MHz aufweisen kann, ist ein großer Vorteil der Basisbandarchitektur, dass das Beamforming frequenzselektiv bereits im Basisband stattfindet. Dies bedeutet, dass für jeden der K Signalpfade eine optimale Phasengewichtung frequenzselektiv für das komplette Signalspektrum, d.h. für jeden noch im Basisband liegenden OFDM-Träger erfolgt. Eine Phasengewichtung im analogen HF-Bereich (wie beim Beamforming mithilfe der HF-Architektur) kann lediglich pauschal für die gesamte Signalbandbreite erfolgen, was zu Phasenfehlern führt. Nachteile der Basisbandarchitektur ergeben sich aus der resultierenden hohen Hardware-Komplexität, da jedes Antennenelement mit einem individuellen Signalpfad versorgt werden muss. Darüber hinaus wird bei der Basisbandarchitektur aufgrund der hohen Anzahl von Signalpfaden bzw. Antennenelementen eine Vielzahl hochleistungsfähiger Digital-Analog-Wandler benötigt, die zu einem erhöhten Energiekonsum führen. Abschließend wird in [R1-165362] festgestellt, dass in Anbetracht der bis zu 256 zu erwartenden Antennenelemente rein digitales Beamforming nicht ökonomisch machbar sein wird.

Das Gegenstück zur Basisband-Architektur ist die *HF-Architektur*, bei der das Beamforming ausschließlich im analogen HF-Bereich erfolgt und aufgrund dessen auch analoges Beamforming genannt wird. Hierbei werden wie in Bild 2.2.5 gezeigt B Datenströme aus dem Basisband in den analogen HF-Bereich moduliert und die daraus resultierenden B Signalpfade werden durch ein Verteilnetzwerk auf Q Antennenelemente abgebildet. Das Verteilnetzwerk enthält steuerbare analoge Phasenschieber und Verstärker sowie Leistungskombinierer bzw. -teiler vor den Antennenelementen, um Signalpfade zu kombinieren. Vorteilhaft gegenüber der Basisbandarchitektur ist die reduzierte Rechenkomplexität. Ein Nachteil der HF-Architektur ist, dass das Beamforming nicht frequenzselektiv erfolgt, da die steuerbaren Phasenschieber nur pauschal für eine diskrete Frequenz optimal eingestellt werden können, was über die gesamte Signalbandbreite zu Phasenfehlern für die anderen Frequenzen führt. Dies hat eine Reduzierung des maximalen Antennengewinns der ausgebildeten Beams zur Konsequenz. Außerdem ist es damit nicht möglich zeitgleich mehrere Beams abzustrahlen. Des Weiteren erfordert das Verteilnetzwerk eine hohe Hardware-Komplexität auf der HF-Seite.

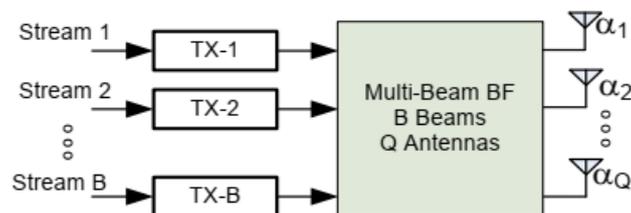


Bild 2.2.5: Beamforming mithilfe der HF-Architektur: B analoge HF-Signalpfaden werden durch ein Verteilnetzwerk mit Phasenschiebern und Verstärkern auf Q Antennenelemente abgebildet (aus [R1-165362]).

Die *Hybridarchitektur* stellt eine Kombination von Basisband- und HF-Architektur dar. Sie enthält vom Umfang her reduzierte Beamforming-Blöcke sowohl im Basis- als auch im HF-Band. Bei gleicher Anzahl von Antennenelementen weist sie gegenüber der rein digitalen Architektur eine reduzierte Hardware-Komplexität im Basisband und gegenüber der rein analogen Architektur eine reduzierte Hardware-Komplexität auf der HF-Seite auf. Gleichzeitig ist über den

Basisbandanteil weiterhin frequenzselektives Beamforming möglich. Beim Hybrid-Beamforming wird zwischen zwei Konzepten unterschieden:

- Das Hybridarchitekturkonzept „fully connected“ stellt eine Erweiterung der HF-Architektur mit zusätzlichem Basisband-Beamforming dar. Dabei werden wie im oberen Teil von Bild 2.2.6 im Basisband K Datenströme durch digitales Beamforming auf B analoge HF-Signalfade abgebildet. Dahinter erfolgt analog zum HF-Beamforming eine weitere Abbildung dieser Signalfade auf Q Antennenelemente. Dieser Ansatz bietet gegenüber der reinen HF-Architektur den Vorteil, dass durch das Basisband-Beamforming eine höhere Flexibilität erreicht wird und frequenzselektives Beamforming ermöglicht wird. Auf der anderen Seite ist bei diesem Ansatz HF-seitig die Komplexität so hoch wie bei der reinen HF-Architektur, da im Verteilnetzwerk Leistungskombinierer und -teiler zwischen allen Signalfaden und Antennen notwendig sind.
- Das Hybridarchitekturkonzept „sub-array“ stellt einen Mittelweg dar, da die Komplexität im analogen HF-Bereich reduziert wird. Hierbei werden wie im unteren Teil von Bild 2.2.6 weiterhin K Datenströme im Basisband durch digitales Beamforming auf nun S HF-Signalfade abgebildet. Im Gegensatz zu „fully connected“ sind die Signalfade

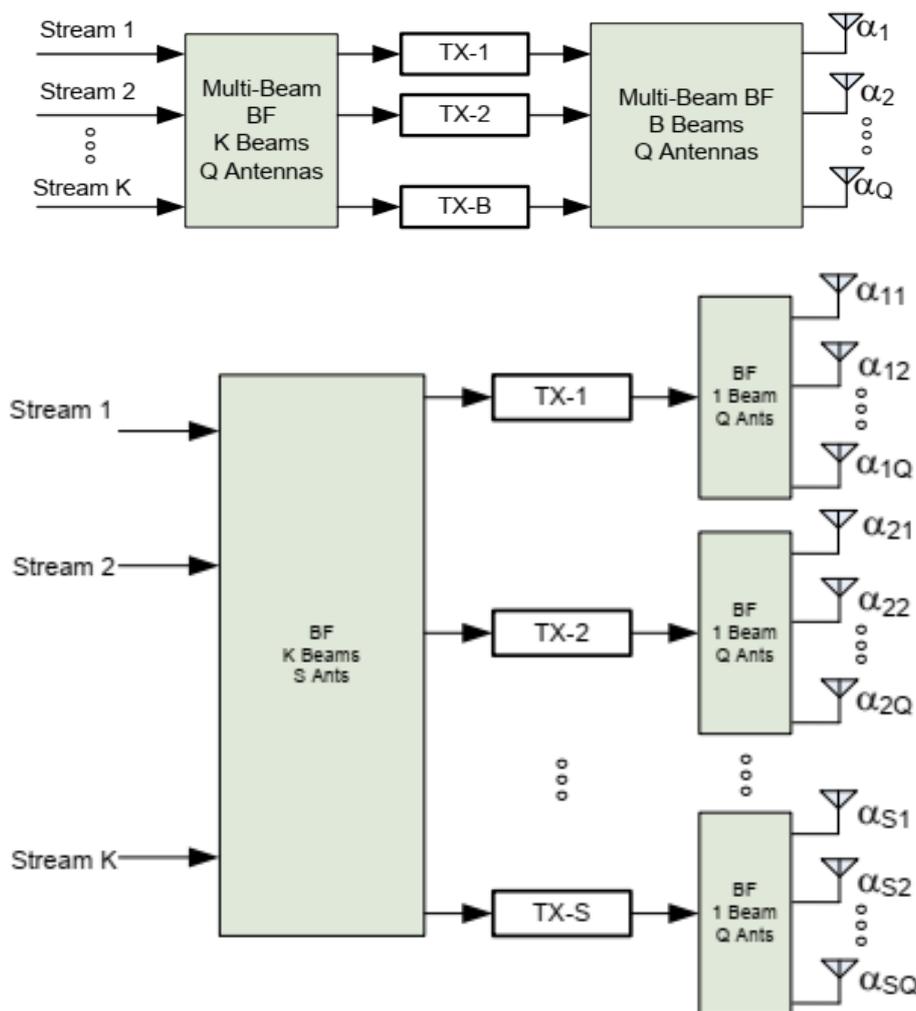


Bild 2.2.6: Beamforming mithilfe der Hybrid-Architektur in den Varianten „fully connected“ (oben) sowie „sub-array“ (unten) (aus [R1-165362]).

nicht mit allen, sondern jeweils nur mit einer Untermenge von Antennenelementen verbunden, den sogenannten Subarrays. Hierdurch lässt sich mit nur leichten Einbußen beim analogen Beamforming die Hardware-Komplexität im HF-Bereich deutlich reduzieren und gleichzeitig frequenzselektives Beamforming im Basisband nutzen.

2.2.1.4 Basisband-Beamforming bei OFDM-Systemen

Bei Array-Architekturen mit digitalem Beamforming, dies betrifft das Basisband-Beamforming mit reinem digitalem Beamforming sowie das Hybrid-Beamforming mit digitalem Beamforming-Anteil, in Kombination mit OFDM-Systemen ist es möglich simultan mehrere Beams abzustrahlen. Aus Sicht der Basisstation wird zur Downlink-Versorgung eines Endgeräts für eine bestimmte Zeit ein gewisser Teil des Spektrums bzw. der OFDM-Träger eines Bandwidth Parts allokiert und zum Senden verwendet (siehe Bild 2.2.7). Da bei Beamforming im Basisband die komplexe Gewichtung (für das Strahlschwenken ist die Phase relevant) frequenzselektiv, also individuell für jeden einzelnen OFDM-Träger erfolgt, kann mit demselben Antennen-Array simultan ein Beam mit höchstmöglichen Antennengewinn in Richtung von UE1 (grün) und ein zweiter Beam mit höchstmöglichem Antennengewinn in Richtung von UE2 (orange) ausgebildet werden (siehe Bild 2.2.7 links oben). Die versorgten UEs bzw. die Beams teilen somit nicht die zur Verfügung stehenden Antennenelemente, sondern das Spektrum untereinander auf. Dadurch, dass in diesem Beispiel jedem UE nur das halbe zur Verfügung stehende Spektrum zugewiesen wird, halbiert sich auch die Sendeleistung je Beam. Selbst der Sonderfall, dass sich zwei UEs an einem Ort befinden und simultan von der Basisstation versorgt werden (Bild 2.2.7 links unten), stellt aus Versorgungssicht streng genommen ein 2-Beam-Szenario dar,

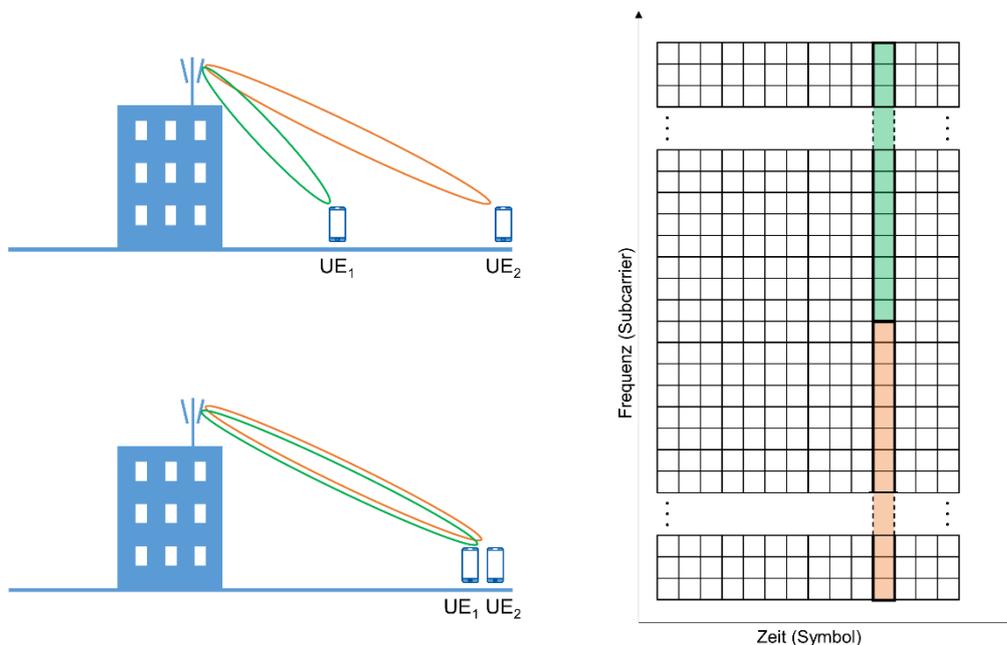


Bild 2.2.7: Versorgung von zwei UEs durch zwei Beams an separaten Orten bzw. am gleichen Ort (links oben bzw. links unten). Durch die Allokierung verschiedener Träger des OFDM-Spektrum können simultan Beams mit maximalem Antennengewinn in unterschiedliche Richtungen abgestrahlt werden. Je Beam ist lediglich die abgestrahlte Leistung um 3 dB reduziert.

weil die beiden Beams zwar in dieselbe Richtung, aber auf unterschiedlichen Trägern abgestrahlt werden. Aus Immissionsschutzsicht kann dieses Szenario jedoch als 1-Beam-Szenario betrachtet werden.

Bei reinem HF-Beamforming wird vor jedem Antennenelement das gesamte Signalspektrum mit einem Phasengewicht versehen, sodass Beamforming zwar möglich ist, jedoch ist es nicht möglich das Signalspektrum aufzuteilen und mehrere Beams simultan abzustrahlen.

2.2.1.5 Ableitung von Antennenparametern

Basierend auf den Angaben zum Antennenelement sowie zum Antennen-Array zeigt Tabelle 2.6 für verschiedene Array-Konfigurationen (Anzahl der Zeilen M, Anzahl der Spalten N, Anzahl der Polarisierungen P) sowie einen horizontalen Elementeabstand von $0,5 \lambda$ und vertikale Elementeabstände von $0,5 \lambda$ bzw. $0,8 \lambda$ den maximalen Antennengewinn, der in Hauptstrahlrichtung der Antenne (senkrecht zur Antennenfläche) erreicht wird, und die jeweiligen horizontalen und vertikalen 3-dB-Öffnungswinkel des jeweiligen Antennen-Arrays. Beim Strahl-schwenken außerhalb der Hauptstrahlrichtung kommt es zu einer Verbreiterung der Beams, was zu einer Reduzierung des Antennengewinns führt. Für die im Array enthaltenen Antennenelemente wurde das Modell aus [TR 36.897] mit 8 dBi Gewinn und 65° horizontalem und vertikalem Öffnungswinkel verwendet. Zur Bestimmung der Öffnungswinkel des gesamten Arrays wurde der Antennengewinn in Hauptstrahlrichtung gemäß [Bal 05] berechnet.

Tabelle 2.6: Maximaler Antennengewinn sowie vertikaler und horizontaler 3-dB-Öffnungswinkel für verschiedene Array-Konfigurationen mit kreuzpolarisierten Antennenelementen und einem horizontalen Elementeabstand von $0,5 \lambda$ und vertikalen Elementeabständen von $0,5 \lambda$ bzw. $0,8 \lambda$. Für die Berechnung des Antennengewinns wurde gemäß [TR 36.897] ein Antennenelementgewinn von 8 dBi angenommen.

Array-Konfiguration (M,N,P)	Maximaler Antennengewinn in dBi		3-dB-Öffnungswinkel		
	$d_v = 0,5 \lambda$	$d_v = 0,8 \lambda$	Vertikal ($d_v = 0,5 \lambda$)	Vertikal ($d_v = 0,8 \lambda$)	Horizontal ($d_H = 0,5 \lambda$)
(2,16,2)	28,0	30,1	$52,6^\circ$	$32,1^\circ$	$6,3^\circ$
(4,8,2)	28,0	30,1	$25,6^\circ$	$15,9^\circ$	$12,7^\circ$
(4,16,2)	31,0	33,1	$25,6^\circ$	$15,9^\circ$	$6,3^\circ$
(8,1,2)	22,0	24,1	$12,7^\circ$	$7,9^\circ$	65°
(8,2,2)	25,0	27,1	$12,7^\circ$	$7,9^\circ$	$52,6^\circ$
(8,4,2)	28,0	30,1	$12,7^\circ$	$7,9^\circ$	$25,6^\circ$
(8,8,2)	31,0	33,1	$12,7^\circ$	$7,9^\circ$	$12,7^\circ$
(8,16,2)	34,0	36,1	$12,7^\circ$	$7,9^\circ$	$6,3^\circ$

Es ist zu erkennen, dass der maximale Antennengewinn proportional mit der Anzahl der Antennenelemente steigt. Des Weiteren führt eine Erhöhung der Antennenelemente in der hori-

zontalen bzw. vertikalen Dimension (Spaltenanzahl bzw. Zeilenanzahl) zu einer stärkeren Bündelung, d.h. zu kleineren horizontalen bzw. vertikalen Öffnungswinkeln. Es zeigt sich auch, dass der größere vertikale Elementabstand zu einem höheren maximalen Antennengewinn bzw. zu einem geringeren vertikalen Öffnungswinkel führt.

2.2.2 Hersteller

2.2.2.1 Ericsson

2.2.2.1.1 White Paper „Advanced Antenna Systems for 5G Networks“

In einem White Paper zu Massive-MIMO-Antennen von Ericsson [BAF+ 18] werden die grundlegende Idee des Beamformings anhand eines zweidimensionalen Antennen-Arrays erläutert und je nach Einsatzszenario unterschiedliche Anforderungen an die Antenne aufgestellt. Im Hinblick auf die Array-Architektur verwendet Ericsson die Hybrid-Architektur unter Verwendung von Subarrays. Bild 2.2.8 zeigt ein typisches Antennen-Array, das aus insgesamt 64 kreuzpolarisierten Antennenelementen besteht (8 Zeilen und 8 Spalten), wobei die Antennenelemente vertikal in Subarrays zusammengefasst werden. Die Subarrays wiederum sind für jede Polarisation nur an einen Sende- und Empfangszweig angeschlossen, sodass dieses Antennen-Array ($M=4$, $N=8$, $P=2$) 64 Transceiver beinhaltet.

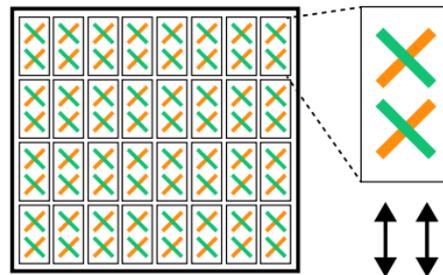


Bild 2.2.8: Ein typisches Antennen-Array bestehend aus kreuzpolarisierten Antennenelementen, die zu Subarrays zusammengefasst werden, wobei jedes Subarray je Polarisation (grün und orange) mit einem Sende- und Empfangszweig verbunden ist (dargestellt durch die schwarzen Pfeile; Bild aus [BAF+ 18]).

Im weiteren Verlauf werden die Auswirkungen unterschiedlicher Subarray-Größen auf das vertikale Antennendiagramm bzw. den vertikalen Schwenkbereich der Antenne diskutiert. Dabei werden die Antennenelemente ausschließlich in der vertikalen Dimension zu Subarrays zusammengefasst. Generell gilt, dass der maximale Antennengewinn in Hauptstrahlrichtung bei konstanter Elementanzahl unabhängig von der Subarray-Größe sowie vom Beamforming-Typ (Basisband-, HF- oder Hybrid-Beamforming) ist. Das Antennendiagramm des gesamten Antennen-Arrays setzt sich aus dem Produkt der Antennendiagramme des Arrays (Anzahl der Subarrays pro Zeile und Spalte, siehe Bild 2.2.10 links) sowie des Subarrays (Zusammenfassung der Antennenelemente, siehe Bild 2.2.10 Mitte) zusammen. Somit wirkt sich die Subarray-Größe unmittelbar auf den vertikalen Schwenkbereich der Antenne aus. Denn je mehr Antennenelemente vertikal zu Subarrays zusammengefasst werden, desto höher ist der Gewinn des einzelnen Subarrays sowie die vertikale Bündelung des resultierenden Antennendiagramms eines Subarrays (siehe Bild 2.2.10 Mitte). Das Antennendiagramm des einzelnen Subarrays bestimmt aber letztlich die Einhüllende des gesamten Antennen-Arrays, d.h. den

Schwenkbereich, da sich das Antennendiagramm des gesamten Antennen-Arrays wie oben beschrieben aus dem Produkt der Antennendiagramme von Subarray sowie Array, in dem das Strahlschwenken berücksichtigt wird, zusammensetzt. Das bedeutet, dass der Schwenkbereich bei gleichbleibender Anzahl von Antennenelementen für kleinere Subarrays größer wird. Andersherum verkleinert sich der Schwenkbereich, je mehr Antennenelemente in ein Subarray zusammengefasst werden.

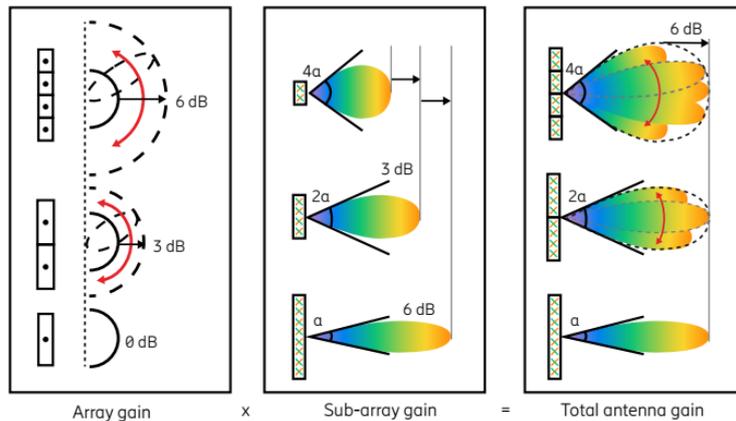


Bild 2.2.10: Array-Gewinn (links), Subarray-Gewinn (mittig) sowie resultierender Antennengewinn (rechts) für eine (M=8, N=8, P=2) Array-Konfiguration und Subarray-Größen von 2 (oben), 4 (mittig) und 8 (unten) (aus [BAF+ 18]). Die roten Kreisbögen im linken und rechten Teil der Abbildung verdeutlichen, dass mit dieser Subarray-Konfiguration ein vertikales Schwenken möglich ist.

Da der Schwenkbereich des Arrays also von der Subarray-Größe abhängt, ergeben sich im Sinne eines Kompromisses zwischen Hardware-Komplexität und Zellkapazität je nach Einsatzszenario (Zellgröße und Bebauung) unterschiedlich strenge Anforderungen an die Subarray-Größe (siehe Bild 2.2.9). Für die eher städtischen Szenarien A („dense urban high-rise“) mit Basisstationsabständen zwischen 200 und 500 m und hoher Bebauung sowie B („urban

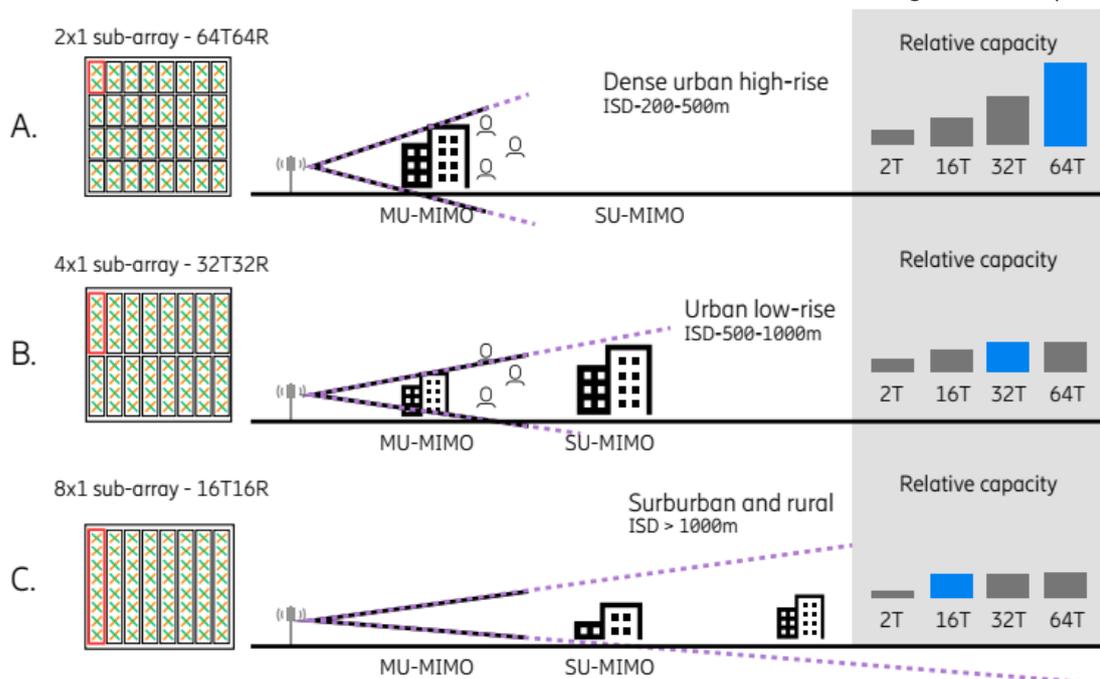


Bild 2.2.9: Antennen-Array mit unterschiedlichen Subarray-Größen (A: 2, B: 4, C: 8) und ihre Auswirkungen auf den vertikalen Versorgungsbereich sowie die Zellkapazität (aus [BAF+ 18]).

low-rise“) mit Basisstationsabständen zwischen 500 und 1.000 m und niedriger bis mittelhoher Bebauung schlägt Ericsson den Einsatz von 64 Transceivern (Subarray-Größe von 2) bzw. von 32 Transceivern (Subarray-Größe von 4) vor. Damit ist ein vertikales Schwenken möglich. In Szenario C, das am ehesten auf ländliche sowie vorstädtische Gebiete zutrifft, wird der Einsatz von 16 Transceivern (Subarray-Größe von 8) empfohlen, sodass ein Subarray die gesamte Spalte einnimmt und ein vertikales Schwenken nicht mehr möglich ist.

In allen drei Szenarien werden die Antennenelemente in der horizontalen Dimension nicht zu Subarrays zusammengefasst, sodass der horizontale Öffnungswinkel je Spalte unverändert bleibt. Somit ist für das gesamte Antennen-Array Strahlschwenkung horizontal fast uneingeschränkt möglich und lediglich durch den horizontalen Öffnungswinkel eines einzelnen Antennenelements begrenzt.

2.2.2.1.2 Massive-MIMO-Antennenportfolio von Ericsson

Laut eigenem Internetauftritt bietet Ericsson folgende Massive-MIMO-Antennen im „High-Band“ sowie im „Mid-Band“ an [Eri 20]:

- AIR 6468 für Frequenzen kleiner als 3 GHz ($f_{\min} = 2,5$ GHz)
- AIR 6488 für Frequenzen zwischen 3 GHz und 5 GHz
- AIR 5121 für Frequenzen größer als 6 GHz

Die in dem für vorliegendes Vorhaben relevanten Frequenzbereich von 3,6 GHz arbeitende Antenne ist die AIR 6488. Die Antenne weist 128 Antennenelemente und 64 Transceiver auf ($M=4$, $N=8$, $P=2$) [DT 19]. Damit entspricht diese Antenne genau der Prinzipdarstellung aus Bild 2.2.8 mit Subarrays, die aus jeweils zwei vertikal zusammengefassten Antennenelementen je Polarisation bestehen. Somit weist die Antenne 4 Subarrays je Spalte und 8 Subarrays je Zeile mit jeweils 2 Polarisationen auf. In [DT 19] ist deutlich zu erkennen, dass die vertikalen Elementabstände gegenüber den horizontalen größer ausfallen. In Tabelle 2.7 sind die öffentlich verfügbaren Spezifikationen zusammengefasst. Der maximale Antennengewinn beträgt etwa 24 dBi [Eri 18] und ist gegenüber dem maximal möglichen Antennengewinn in Tabelle 2.6 deutlich geringer, was möglicherweise auf die Verwendung von Antennenelementen mit einem geringeren Gewinn als 8 dBi sowie auf Verluste in den Antennenelementen bzw. im HF-Speisenetzwerk zurückzuführen ist. Hinsichtlich der in Teilkapitel 2.1.5.1 eingeführten Base Station Types ist diese Antenne aufgrund der Angabe der maximalen Ausgangsleistung sowie der EIRP den Types 1-H oder 1-O zuzuordnen.

Tabelle 2.7: Wichtige technische Parameter der Massive-MIMO-Antenne AIR 6488 von Ericsson für das 3,6-GHz-Band: (aus [Eri 20][DT 19][Eri 18]).

Bezeichnung	Anzahl Antennenelemente	Anzahl Transceiver	Frequenzband	Bandbreite	Max. Ausgangsleistung	Max. EIRP (max. Antennengewinn)
AIR 6488	128	64	3,4 GHz - 3,8 GHz	100 MHz	200 W	77 dBm (ca. 24 dBi)

2.2.2.2 Huawei

2.2.2.2.1 Dokumente von Huawei

In [Hua 19] wird auf die Öffnungswinkel von Basisstationsantennen eingegangen, die bei 3G und 4G nur diskrete Werte annehmen konnten. Um die Abdeckung zu präzisieren und die Zellkapazität zu erhöhen, sollen bei 5G im Prinzip dynamisch beliebige Beam-Konfigurationen verwendet werden können, um den Anforderungen verschiedener Nutzungsszenarien gerecht zu werden. Analog zu Ericsson werden auch bei Huawei die Szenarien „Low-rise coverage“ und „High-rise coverage“ sowie „Highway coverage“ mit unterschiedlichen Anforderungen an den horizontalen und vertikalen Abdeckungsbereich sowie an den Öffnungswinkel bzw. Gewinn der Beams definiert (siehe Bild 2.2.11).

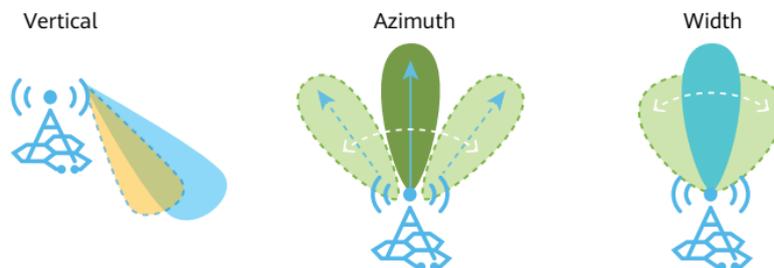


Bild 2.2.11: Szenariospezifische dreidimensionale Anpassung des Beams (aus [Hua 19]).

Die Anwendung verschiedener Beam-Konfigurationen wird in [Hua 20] nach Broadcast Beams und Traffic Beams aufgeteilt. Während bei den Traffic Beams ein je nach Nutzerverteilung und Kanalsituation zeitveränderliches dreidimensionales Beamforming angewendet wird, gibt es bei den Broadcast Beams eine Vielzahl vordefinierter Abdeckungskonfigurationen, die für die jeweilige Basisstation eingestellt werden können und sich hinsichtlich horizontalem und vertikalem Öffnungswinkel unterscheiden, um an das jeweilige Nutzungsszenario angepasste Versorgungsbereiche für den oder die Broadcast Beam/s zur Abstrahlung des SSB zu erzielen.

2.2.2.2.2 Massive-MIMO-Antennenportfolio von Huawei

Auf dem Mobile World Congress (MWC) 2018 hat Huawei 5G-Lösungen vorgestellt, u.a. auch Massive-MIMO-Antennen [Hua 18]. Diese werden in die Kategorien „Massive MIMO Macro“ und „Massive MIMO Pole Site“ unterteilt, was direkt das Nutzungsszenario (städtisch bzw. ländlich) widerspiegelt. Bis auf Angaben zur unterstützten Bandbreite (200 MHz) fehlen dort aber weitere Spezifikationen zu den Antennen. In einem Bericht zum Forschungsprojekt „Rewheel“, das sich mit dem 5G-Rollout von im 3,6-GHz-Band betriebenen Massive-MIMO-Antennen vor dem Hintergrund der Schweizer Anlagegrenzwerte beschäftigt [Rew 19], als auch in einer im Rahmen eines Runden Tisches der französischen Industrievereinigung Iignes vorgetragenen Huawei-Präsentation [Ign 19] wird detaillierter auf die Antennen eingegangen. So werden in dem Frequenzband drei Antennentypen mit unterschiedlicher Transceiver-Anzahl, Bandbreite und Ausgangsleistung verwendet. In Tabelle 2.8 sind die öffentlich verfügbaren Spezifikationen zusammengefasst. Angaben zur Anzahl der Antennenelemente, zum Aufbau des Antennen-Arrays und zum Beamforming-Typ sowie zur EIRP waren öffentlich nicht verfügbar. Hinsichtlich der in Teilkapitel 2.1.5.1 eingeführten Base Station Types ist diese Antenne aufgrund der Angabe der Ausgangsleistung Type 1-H zuzuordnen.

Tabelle 2.8: Wichtige technische Parameter der Massive-MIMO-Antennen von Huawei für das 3,6-GHz-Band (aus [Ign 19] und [Rew 19]).

Bezeichnung	Anzahl Antennenelemente	Anzahl Transceiver	Frequenzband	Bandbreite	Max. Ausgangsleistung	Max. EIRP (max. Antennengewinn)
AAU5613	-	64	um 3,6 GHz	200 MHz	200 W	-
AAU5313	-	32	um 3,6 GHz	200 MHz	200 W	-
AAU5310	-	32	um 3,6 GHz	100 MHz	100 W	-

2.2.2.3 Nokia

Für die relevante Frequenz von 3,6 GHz bietet Nokia zwei Massive-MIMO-Antennen an, die jeweils einen Teil des 5G-Frequenzbandes n78 abdecken [Nok 19] (siehe Tabelle 2.9). Beide Antennen haben 64 Transceiver und 192 bzw. 128 Antennenelemente. Ausgehend von einem planaren zweidimensionalen Antennen-Array bestehend aus kreuzpolarisierten Antennenelementen sowie der Annahme, dass die Antennenelemente auch bei Nokia in der vertikalen Dimension zu Subarrays zusammengefasst werden, ergeben sich Subarray-Größen von 3 (AEQA) bzw. 2 (AEQD). Des Weiteren ist über die maximale EIRP und die maximale Ausgangsleistung ein Rückschluss auf den maximalen Antennengewinn möglich, der 24,5 dBi bzw. 23 dBi beträgt. Hinsichtlich der in Teilkapitel 2.1.5.1 eingeführten Base Station Types ist diese Anlage aufgrund der Angabe der maximalen Ausgangsleistung sowie der EIRP Type 1-H zuzuordnen.

Tabelle 2.9: Wichtige technische Parameter der Massive-MIMO-Antennen von Nokia für das 3,6-GHz-Band (aus [Nok 19]).

Bezeichnung	Anzahl Antennenelemente	Anzahl Transceiver	Frequenzband	Bandbreite	Max. abgestrahlte Leistung	Max. EIRP (max. Antennengewinn)
AEQA AirScale MAA	192	64	3,4 GHz - 3,6 GHz	100 MHz	200 W	77,5 dBm (24,5 dBi)
AEQD AirScale MAA	128	64	3,6 GHz - 3,8 GHz	100 MHz	200 W	76,0 dBm (23 dBi)

2.2.3 In Deutschland eingesetzte 5G-Massive-MIMO-Antennen

Bei der Frequenzauktion 2019 haben die Netzbetreiber 1&1 Drillisch, Telefónica Germany, Telekom Deutschland sowie Vodafone Frequenzspektren im 3,6-GHz-Band erworben. Im Folgenden werden die jeweiligen Ausbaupläne sowie die jeweiligen Antennenlieferanten vorgestellt.

1&1 Drillisch hat als Neuanbieter zwar mildere Versorgungsverpflichtungen auferlegt bekommen, muss aber bis Ende 2022 - wie die anderen Netzbetreiber - 1.000 5G-Basisstationen im

3,6-GHz-Band in Betrieb nehmen (siehe Teilkapitel 2.1.6). Da 5G-Netze aktuell nur über ein vorhandenes LTE-Netz betriebsfähig sind, 1&1 Drillisch bisher aber noch kein eigenes LTE-Netz betreibt, kann es einen 10-MHz-Kanal im 2,1-GHz-Band von Telefónica (LTE) in Form von National Roaming zur Überbrückung nutzen. Wann in 2022 ein eigenes 5G-Netz in Betrieb genommen werden kann, ist noch nicht konkret terminiert [Dri 21][Lüc 21].

Telefónica hat Mitte 2021 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. Hierbei werden Antennen der Hersteller Huawei und Nokia verwendet [TF 17],[TF 18]. DSS bei 1,8 GHz, womit in den ursprünglich für LTE (4G) genutzten Frequenzbändern parallel auch 5G betrieben wird, wird nur in ausgewählten Regionen ausgebaut, kann jedoch per Software-Update einfach aktiviert werden. In Zukunft setzt Telefónica für die Flächenversorgung dünner besiedelter Gebiete auch auf das 700-MHz-Band, in dem im Gegensatz zu Vodafone nur 5G ohne DSS betrieben werden soll.

Im Netz der Deutschen Telekom gibt es laut [Kes 21], das den Stand vom 30.08.2021 widerspiegelt, deutschlandweit 2.400 Antennen an 800 Standorten bei 3,6 GHz. Dabei werden Antennen der Hersteller Ericsson (u.a. AIR 6488 [DT 19]) und Huawei verbaut [Wel 19],[Han 20]. Inklusiv der für DSS verwendeten Antennen bei 2,1 GHz ([DT 20]) betreibt die Telekom 55.000 Antennen für 5G-Anwendungen. 85 % der Bevölkerung (gut 70 Mio.) können vom 5G-Netz der Telekom versorgt werden (5G bei 3,6 GHz und DSS). Bis Ende 2021 sollen es 90 % werden (entsprechend rund 75 Mio. Einwohnern).

Im Netz von Vodafone gibt es laut [VF 21], das den Stand vom 14.06.2021 widerspiegelt, deutschlandweit mehr als 3.100 5G-Antennen bei 3,6 GHz (entspricht grob 1.000 Standorten). Dabei werden Antennen der Hersteller Ericsson (u.a. AIR 6488 [Tel 19]) sowie Huawei verbaut [Wel 19]. An der Mehrzahl der insgesamt betriebenen 5G-Standorte und vor allem in Städten wird 5G durch DSS im 1,8-GHz-Band bereitgestellt [Bau 21]. Zusätzlich wird DSS zur Flächenversorgung in ländlichen Regionen auch im 700-MHz-Band betrieben. 5G von Vodafone 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.

2.3 Technische Spezifikationen geeigneter Messgeräte

Für die Messung der elektromagnetischen Immission an möglichen Aufenthaltsbereichen der Allgemeinbevölkerung in der Umgebung von ortsfesten Hochfrequenz-Sendeanlagen (Hörrundfunk, TV, Mobilfunk) haben sich in den letzten Jahren frequenzselektive Messungen unter Zuhilfenahme von Spektrumanalysatoren bewährt. Speziell bei Messungen mit nachträglicher Extrapolation der Ergebnisse auf den zu erwartenden Zustand bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung sind für UMTS- und LTE-Sendeanlagen auch codeselektive Messverfahren in den Fokus gerückt. Diese erfassen codeselektiv und zellspezifisch bestimmte Signalisierungssignale aus dem gesamten Signalspektrum, die dann als Grundlage für die Extrapolation dienen.

Da die Signalstruktur von 5G hinsichtlich der Problematiken von frequenzselektiver Messungen wie

- Nichtextrahierbarkeit der verkehrslastunabhängigen Signalisierungssignale bei zunehmender Verkehrslast sowie
- Nichtseparierbarkeit der Signalisierungen unterschiedlicher Funkzellen desselben Betreibers im selben Frequenzband

Ähnlichkeiten vor allem zu LTE aufweist, ist absehbar, dass mittelfristig auch für verlässliche 5G-Immissionsmessungen mit anschließender Hochrechnung auf die maximal mögliche Immission codeselektive Messverfahren eingesetzt werden müssen. Deswegen soll im Folgenden – neben einer kurzen Darstellung der Anforderungen an frequenzselektive Messungen – in diesem Kapitel schwerpunktmäßig auf derzeit verfügbare codeselektive Messmöglichkeiten für 5G-Signale eingegangen werden.

2.3.1 Frequenzselektive Messgeräte

Eine Zusammenfassung zu frequenzselektiven Messungen mittels Spektrumanalysatoren und der Bedeutung relevanter Einstellparameter findet sich z.B. in [BSW 12]. Die dort getroffenen Aussagen sind generell auf 5G-Signale übertragbar und sollen deswegen an dieser Stelle nur hinsichtlich der 5G-spezifischen Messparameter konkretisiert werden.

Es ist grundsätzlich empfehlenswert, für Feldmessungen auf geeignete tragbare und batteriebetriebene Spektrumanalysatoren zurückzugreifen. Laborspektrumanalysatoren sind hierfür nicht zweckmäßig, da sie keinen entsprechenden Witterungsschutz aufweisen, eine externe Spannungsversorgung benötigen sowie unhandlich im Betrieb sind.

2.3.1.1 Frequenzbereich

Entsprechend dem derzeitigen Rollout von 5G in Deutschland müssen Spektrumanalysatoren mindestens für den Frequenzbereich bis 3,8 GHz ausgelegt sein. Bei modernen Spektrumanalysatoren stellt dies sicherlich kein Problem dar; ältere Geräte mit einer typischen Frequenzobergrenze von 2,9 GHz oder 3 GHz sind hingegen nicht geeignet.

2.3.1.2 Auflösebandbreite (RBW)

Im Frequenzbereich 1 (FR1) beträgt die maximale Kanalbandbreite 100 MHz und dementsprechend die maximale Signalbandbreite ca. 98,3 MHz. Diese Bandbreite geht teilweise deutlich über typische Auflösebandbreiten verfügbarer tragbarer Spektrumanalysatoren hinaus, die meist eine Obergrenze von 10 MHz, 20 MHz oder auch 32 MHz aufweisen. Für 5G-Momentanwertmessungen, bei denen der gesamte 5G-Frequenzkanal eines Betreibers erfasst werden muss, sind entsprechend andere Messoptionen zu verwenden, die z.B. unter dem Begriff „Kanalleistungsmessung“ oder auch „Safety Evaluation Mode“ (speziell für die Geräteklasse Narda SRM-3006) zur Verfügung stehen.

2.3.1.3 Detektor

Da es sich bei 5G-Basisstationssignalen um digital modulierte Signale mit einem Crestfaktor in der Größenordnung von mehreren dB handelt, die Bevölkerungsschutzgrenzwerte aber als (zeitliche) Effektivwerte definiert sind, ist bei der Messung auf eine Glättung des rauschartigen Basisstationssignals zu achten. Hierfür eignet sich der so genannte RMS-Detektor (für nähere Details siehe [BSW 12]). Speziell bei der Geräteklasse Narda SRM-3006 wird anstatt eines dedizierten RMS-Detektors ein Videofilter zur Glättung (bzw. in der Betriebsart „Safety Evaluation“ auch ein speziell dimensioniertes Auflösefilter) eingesetzt.

2.3.2 Codeselektive Messgeräte

Derzeit sind folgende für 5G geeignete codeselektive Messgeräte auf dem Markt verfügbar, die eine Messung spezieller Signalisierungssignale aus dem SSB des Broadcast Beams ermöglichen:

- VIAVI CellAdvisor 5G CA5000
- Keysight N9912A/N9952A FieldFox Handheld RF Analyzer
- Rohde & Schwarz TSMx6
- Anritsu Field Master Pro MS2090A

Diese sollen nachfolgend anhand der verfügbaren Informationen auf ihre prinzipielle Anwendbarkeit für codeselektive Immissionsmessungen von 5G-Signalen untersucht werden. Dabei werden einheitlich folgende Aspekte thematisiert:

- Welche Signalbestandteile werden dekodiert bzw. welche immissionsrelevanten Informationen werden durch das Gerät dargestellt?
- Wie hoch ist die Empfindlichkeit?
- Können an das Gerät für Immissionsmessungen geeignete Empfangsantennen angeschlossen werden?
- Wie hoch ist die Dekodiertrate? Diese Aussage ist insbesondere für die Anwendung der Schwenkmethode wichtig.
- Verfügt das Gerät über eine Max-Hold-Funktion der erfassten Immissionen?
- Können die Signalisierungssignale mehrerer 5G-Zellen eines Betreibers (d.h. bei gleicher Frequenz) in einem Messdurchlauf gemessen werden?

2.3.2.1 VIAVI CellAdvisor 5G CA5000

Der Hersteller VIAVI bietet mit dem CellAdvisor 5G CA 5000 ein Produkt an, das nach dessen eigener Aussage für die Unterstützung von Installation, Inbetriebnahme und Wartung von 5G-Basisstationen geeignet ist. Das Gerät bietet einerseits eine frequenzselektive Echtzeit-Spektrumanalyse, andererseits mit den Optionen „5G TF Signal Analyzer“ und „5G NR Signal Analyzer“ 5G-spezifische codeselektive Messoptionen.

In der Betriebsart „Beam Analyzer“ werden SSB-Beam-spezifisch die Daten SS-RSRP und PS-RSRP (SS/PS-Reference Signal Received Power), jeweils leistungsgemittelt über alle

diese Daten beinhaltenden Resource Elemente dargestellt; außerdem erfolgt eine Anzeige von SS-SINR (Signal to Noise Ratio von S-SS) und SS-RSRQ (SS-Reference Signal Received Quality). Die Anzeige erfolgt für die 8 stärksten gemessenen Beams mit Angabe der PCI (Physical Cell ID) und des SSB-Index (Beam-ID) (siehe auch Bild 2.3.1). Angaben zu einer Max-Hold-Funktionalität der Messergebnisse oder zur Fragestellung, ob mehrere Zellen eines Betreibers bei gleicher Frequenz in einem Messdurchlauf gemessen werden können, sind den Herstellerangaben nicht zu entnehmen.

Die Empfangsempfindlichkeit wird in [Via 18b] für einen Trägerabstand (Subcarrier Spacing, SCS) von 30 kHz (dies ist ein für den derzeitigen 5G-Rollout typischer Wert) mit -106 dBm angegeben, wobei sich diese Angabe auf ein Resource Element (RE) bezieht. Aus dieser Angabe kann die zu erwartende Empfindlichkeit für ein auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnetes 5G-Signal wie folgt abgeschätzt werden. Dazu werden zuerst folgende „worst case“-Annahmen getroffen:

- Die maximale Kanalbandbreite eines 5G-Signals im Frequenzbereich FR1 bei 30 kHz Unterträgerabstand beträgt 100 MHz. Die Signalbandbreite beträgt hierbei maximal 273 Resource Blocks entsprechend 3.276 Resource Elementen bzw. 98,28 MHz.
- Es wird angenommen, dass (selbst wenn seitens der Basisstation alle Resource Elemente mit gleicher Leistung abgestrahlt werden) am Messpunkt die RE des PDSCH eine bis zu 10 dB höhere Immission verursachen als die RE des SSB, was z.B. durch unterschiedliche Gewinne von Traffic Beam und Broadcast Beam begründet sein kann.

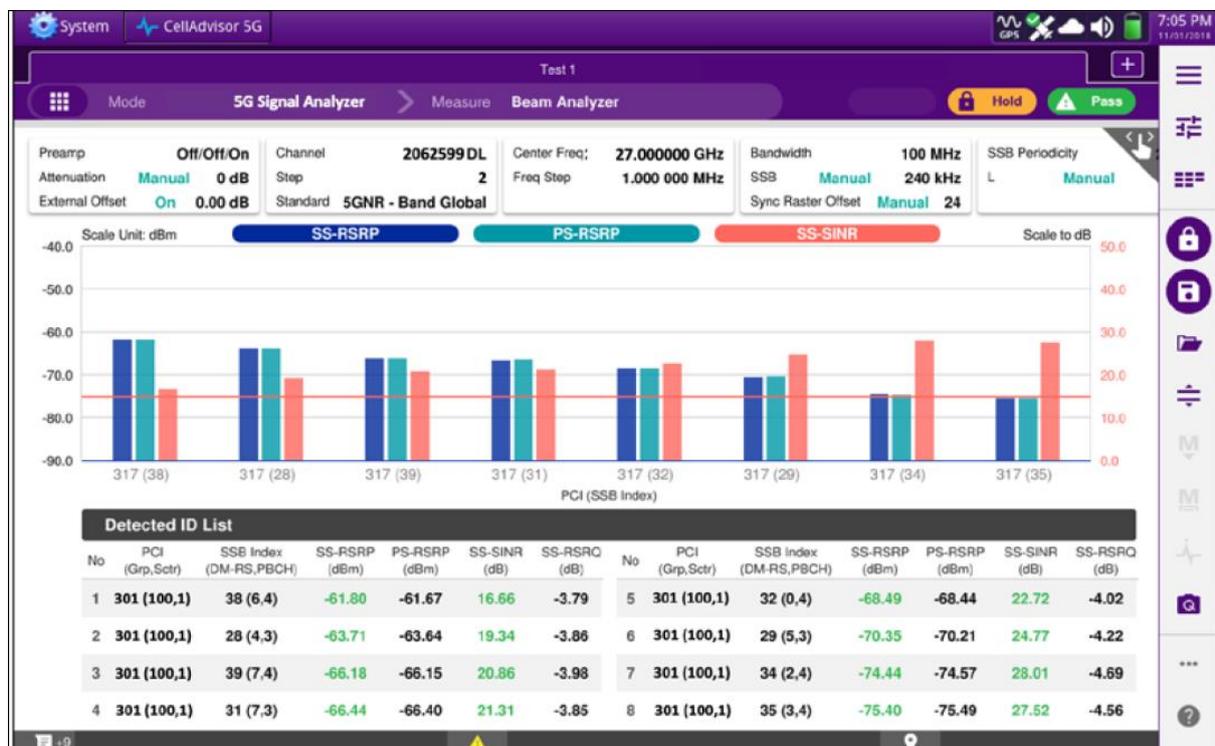


Bild 2.3.2: Beispielergebnis einer Messung mit dem VIAVI CellAdvisor 5G in der Betriebsart „Beam Analyzer“, aus [Via 18a]

Unter diesen Annahmen führt die Mindestempfindlichkeit des codeselektiven Messgerätes von -106 dBm pro RE zu einer Empfindlichkeit von etwa -61 dBm bzw. 46 dBµV (an einem 50-

Ohm-System) für das hochgerechnete Gesamtsignal. Bei Verwendung einer logarithmisch-periodischen Messantenne (z.B. Schwarzbeck USLP-9142) mit einem Antennenfaktor von etwa 35 dB/m bei 3,5 GHz und Berücksichtigung einer Dämpfung des Antennenkabels von 3 dB resultiert damit eine detektierbare Gesamtmission von 84 dB μ V/m bzw. 0,016 V/m. Dies entspricht einer Grenzwertausschöpfung von 0,026 %. Damit wird die Empfangsempfindlichkeit als für Immissionsmessungen völlig ausreichend betrachtet. Für davon abweichende (bzw. realistischere) Annahmen (geringere Signalbandbreite, geringerer Gewinnunterschied zwischen Traffic Beam und Broadcast Beam) werden entsprechend bessere Empfindlichkeiten erzielt.

Da das Gerät über einen N-Konnektor verfügt, können entsprechend geeignete externe Antennen angeschlossen werden. Eine dreiaxiale Messantenne mit automatischer Umschaltung der Achsen und entsprechender Verarbeitung im Gerät wird vom Hersteller nicht angeboten. Erwähnt werden sollte, dass von den beiden Optionen „5G TF“ und „5G NR“ nur „5G NR Signal Analyzer“ interessant ist, da die 5G NR Version in Deutschland ausgerollt wird. 5G TF (5G Technical Forum) – eine im Unterschied zur 3GPP-Standardisierung von der Firma Verizon getriebene Vorentwicklung zu 5G – unterscheidet sich in mehreren technischen Details wie Slotanzahl, Trägerabstand, MIMO-Ordnung oder Kanalbandbreite von 5G NR.

2.3.2.2 Keysight N99xxB FieldFox Handheld Analyzer

Der Hersteller Keysight bietet mit der Geräteserie N99xxB FieldFox ein Produkt an, das nach eigener Aussage auch für EMF-Immissionsmessungen eingesetzt werden kann. Neben spektralen Betriebsmodi verfügt das Gerät optional über eine Funktion „Over-the-air (OTA) 5G“, wobei hierbei ebenfalls zwischen 5G TF und 5G NR gewählt werden kann. Diese Optionen gestatten codeselektive Messungen von 5G Signalen.

In der Betriebsart „5GNR“ werden die Messwerte für SS-RSRP, SS-RSRQ, RSSI (Reference Signal Strength Indicator), SS-SINR, PSS, SSS und PBCH-DMRS (PBCH-Demodulation Reference Signal) ausgegeben. Die Anzeige erfolgt für die 8 stärksten gemessenen Beams mit Angabe der PCI (Physical Cell ID) und des SSB-Index (Beam-ID) (siehe auch Bild 2.3.3). Es können mehrere Zellen eines Betreibers bei gleicher Frequenz in einem Messdurchlauf gemessen werden. Angaben zu einer Max-Hold-Funktionalität der Messergebnisse und zur Dekodiergeschwindigkeit sind den Herstellerangaben nicht zu entnehmen.

Über die Empfangsempfindlichkeit finden sich im Datenblatt keine Angaben. Bild 2.3.3 deutet lediglich darauf hin, dass RSRP-Werte von -66 dBm noch problemlos erfasst werden können. Die Farbskala möglicher RSRP-Werte in Bild 3.2 endet etwa bei -90 dBm. Nimmt man diesen Wert hypothetisch als minimale Empfindlichkeit, dann würde mit denselben Annahmen wie in Teilkapitel 2.3.2.1 eine minimal nachweisbare Gesamtfeldstärke von 0,1 V/m bzw. 0,16 % Grenzwertausschöpfung resultieren, die für vorliegende Aufgabenstellung als völlig ausreichend erachtet wird. Allerdings sind diese Annahmen aufgrund fehlender Angaben im Datenblatt in der Praxis zu verifizieren.

Da das Gerät über einen N- bzw. wahlweise über einen 3,5 mm-Konnektor verfügt, können entsprechend geeignete externe Antennen angeschlossen werden. Eine dreiaxiale Messantenne mit automatischer Umschaltung der Achsen und entsprechender Verarbeitung im Gerät

wird vom Hersteller nicht angeboten. Auch hier ist von den beiden Optionen nur „OTA 5GNR“ interessant.

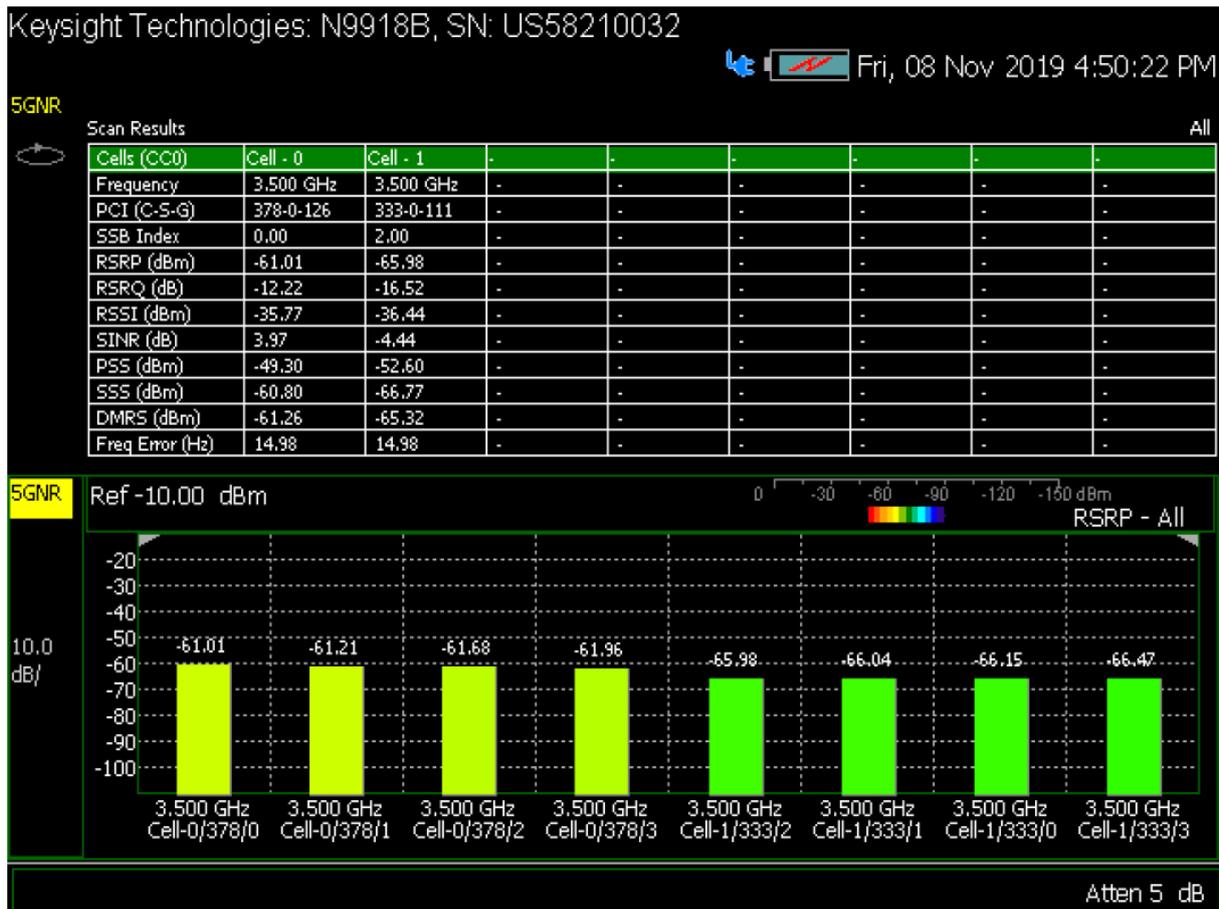


Bild 2.3.3: Beispielergebnis einer Messung mit dem Keysight N9918B in der Betriebsart „5GNR“, aus [Key 19]

2.3.2.3 Rohde & Schwarz TSMx6

Der Hersteller Rohde & Schwarz bietet mit den Geräten TSMA6 und TSME6 zwei „Drive Test Scanner“ an, die neben diversen anderen Mobilfunktechnologien auch 5G-Signale dekodieren können. Der Hauptanwendungsbereich der Geräte ist die Messung der Netz- bzw. Abdeckungsqualität in Mobilfunknetzen sowie die Optimierung derselben. Im Gegensatz zu den in den Teilkapiteln 2.3.2.1 und 2.3.2.2 beschriebenen Geräten verfügt der TSMx6 nicht über einen eigenen Bildschirm, sondern muss mit einem Rechner bzw. Tablet gekoppelt und mit der Software ROMES gesteuert werden.

Durch das Gerät werden die Messergebnisse für SS-RSRP, SS-RSRQ, und SS-SINR ausgegeben. Die Anzeige erfolgt mindestens für die 8 stärksten gemessenen Beams mit Angabe der PCI (Physical Cell ID) und des SSB-Index (Beam-ID) (siehe auch Bild 2.3.4); genauere Angaben fehlen hierzu in den Produktunterlagen.

Es können mehrere Zellen eines Betreibers bei gleicher Frequenz in einem Messdurchlauf gemessen werden. Angaben zu einer Max-Hold-Funktionalität der Messergebnisse sind den Herstellerangaben nicht zu entnehmen. Es wird eine Dekodiertrate von 5 Dekodierungen pro

Sekunde angegeben, was für die Schwenkmethode völlig ausreichend ist. Laut [RS 19] bezieht sich die Dekodiergeschwindigkeit auf die gesamte Dekodierung der SSB-Informationen einer einzelnen Zelle (PCI).

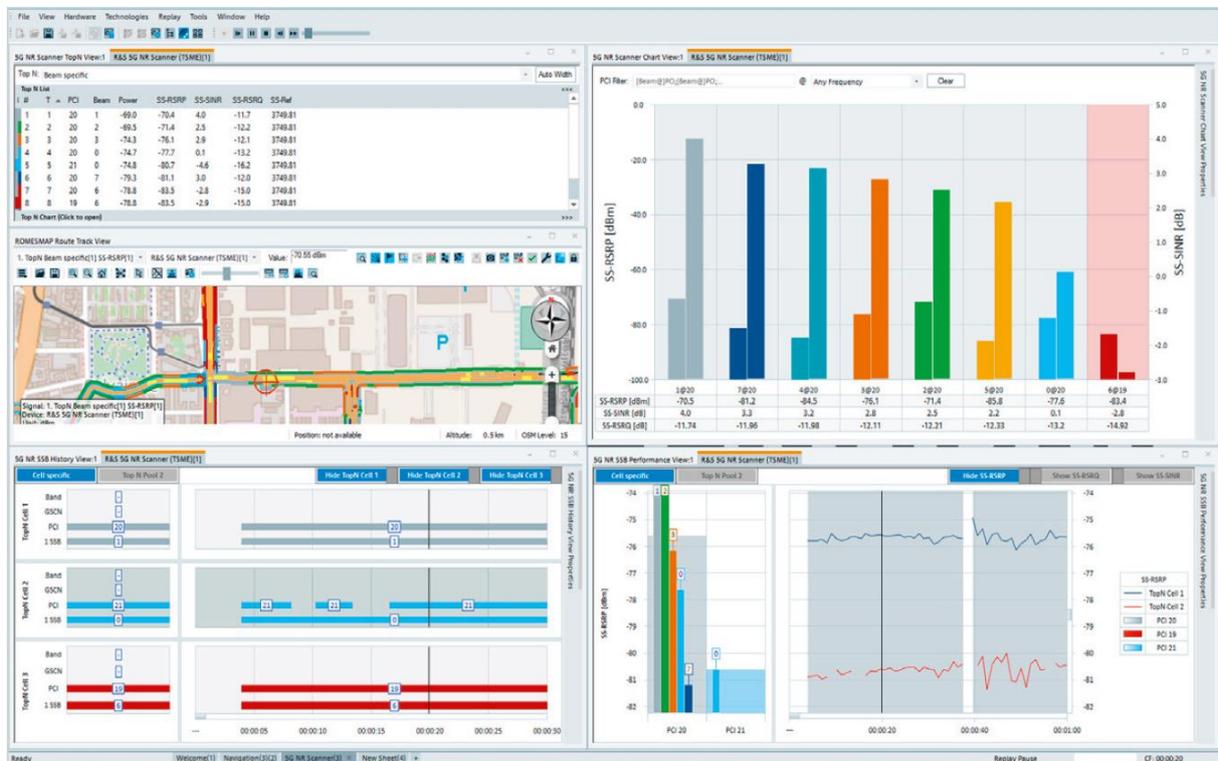


Bild 2.3.4: Beispielergebnis einer Messung mit dem R&S®TSM6, aus [RS 19]

In [RS 19] wird eine Nachweisgrenze von mindestens -140 dBm für SS-RSRP (SCS 30 kHz) angegeben. Mit denselben Annahmen wie in Teilkapitel 2.3.2.1 ergibt sich daraus eine minimal nachweisbare Gesamtfeldstärke von 0,0003 V/m bzw. 0,0005 % Grenzwertausschöpfung, die für vorliegende Aufgabenstellung als mehr als ausreichend erachtet wird; damit ist dieses Gerät wesentlich empfindlicher als die in den Teilkapiteln 2.3.2.1 und 2.3.2.2 beschriebenen.

Da das Gerät über einen SMA-Konnektor verfügt, können entsprechend geeignete externe Antennen angeschlossen werden. Eine dreiaxiale Messantenne mit automatischer Umschaltung der Achsen und entsprechender Verarbeitung im Gerät wird vom Hersteller nicht angeboten.

2.3.2.4 Anritsu FieldMaster Pro

Der Hersteller Anritsu bietet mit dem Field Master Pro MS2090A einen Spektrumanalysator an, der mit einer Option auch codeselektive Messungen von 5G NR erlaubt.

Mit dieser 5G-Option werden die Messergebnisse für SS-RSRP, SS-RSRQ, und SS-SINR ausgegeben. Die Anzeige erfolgt mit Angabe der PCI (Physical Cell ID) und des SSB-Index (Beam-ID) (siehe auch Bild 2.3.5). Das Gerät dekodiert alle aktiven Beams im Signal, d.h. typisch 8 Beams für Basisstationen im Band 3-6 GHz und 12-64 Beams in den Millimeterwellenbändern [Anr 20a]. Es können mehrere Zellen eines Betreibers bei gleicher Frequenz in

einem Messdurchlauf gemessen werden. Angaben zu einer Max-Hold-Funktionalität der Messergebnisse oder der Dekodiertrate sind den Herstellerangaben nicht zu entnehmen.

Bezüglich der Empfindlichkeit finden sich in den Produktunterlagen keine Angaben, so dass an dieser Stelle keine Nachweisgrenze abgeschätzt werden kann. Dies bleibt somit weiteren Untersuchungen vorbehalten.

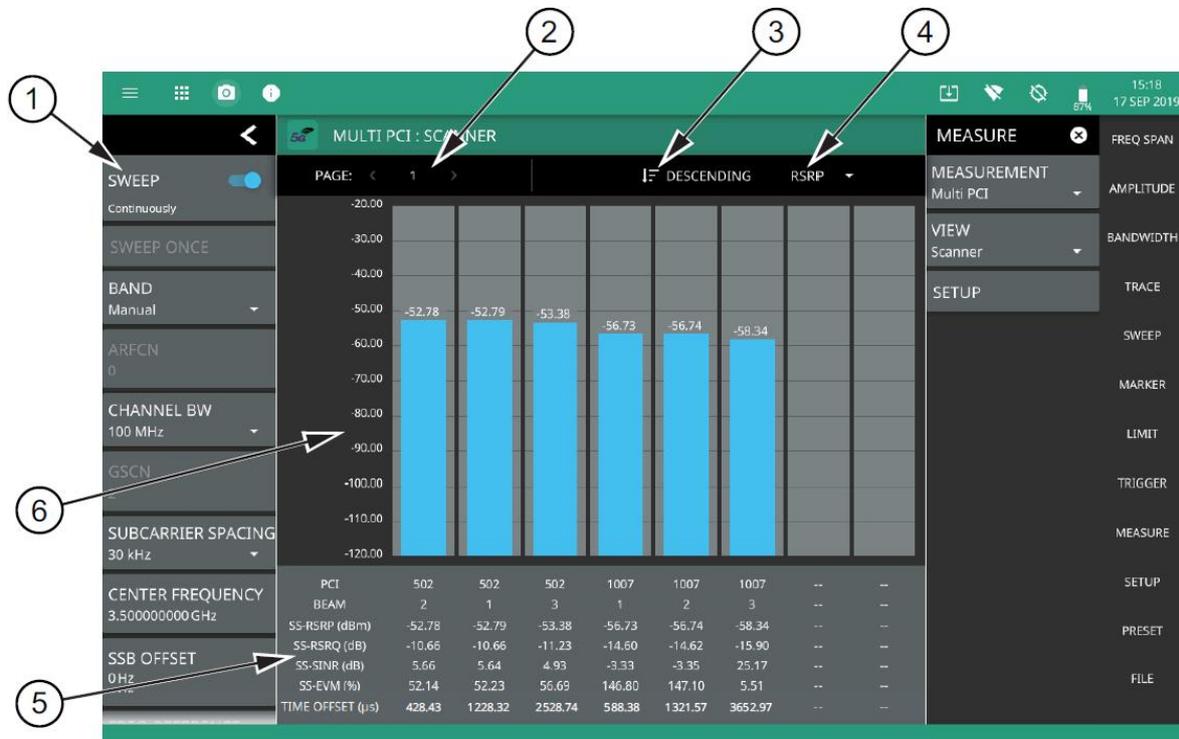


Bild 2.3.5: Beispielergebnis einer Messung mit dem Anritsu Field Master Pro, aus [Anr 20b]

Da das Gerät in Abhängigkeit der Frequenzobergrenze über einen N-, K- oder V-Konnektor verfügt, können entsprechend geeignete externe Antennen angeschlossen werden. Eine dreiaxiale Messantenne mit automatischer Umschaltung der Achsen und entsprechender Verarbeitung im Gerät wird vom Hersteller angeboten.

2.3.2.5 Fazit der codeselektiven Messgeräte

In nachfolgender Tabelle sind die untersuchten Geräte bezüglich der in Teilkapitel 2.3.2 definierten Parameter vergleichend gegenübergestellt. Allen Geräten ist gemeinsam, dass die Dekodierung jeweils nur für *eine* SSB-Mittelfrequenz erfolgt. Sind beispielsweise im Frequenzbereich 3400-3700 MHz vier Betreiber gleichzeitig aktiv, muss der Messvorgang z.B. mit der Schwenkmethode viermal nacheinander durchgeführt werden. Aus dieser Zusammenstellung ergibt sich, dass einige der für Immissionsmessungen wichtigen Fragestellungen (z.B. Dekodiertrate, Max-Hold-Funktionalität, Empfindlichkeit) aus den Datenblättern nicht geklärt werden können. Deswegen wurden im Rahmen des Projektes einige der hier aufgeführten codeselektiven Messgeräte exemplarisch erprobt. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Teilkapitel 3.3 dokumentiert.

Tabelle 2.10: Vergleich der recherchierten codeselektiven Messgeräte hinsichtlich der für 5G-Immissionsmessungen relevanten Anforderungen (k.A.: keine Angabe). Die Spalte „mehrere Zellen gleichz.“ thematisiert die Fragestellung, ob mehrere Zellen eines Betreibers bei gleicher Frequenz in einem Messdurchlauf gemessen werden können.

Hersteller / Gerät	Was wird als Messergebnis ausgegeben?	Empfindlichkeit	Antennenanschluss	Dekodierrate	Max-Hold ?	mehrere Zellen gleichz.?
VIAVI CellAdvisor 5G CA5000	PCI, SSB-Index, SS-RSRP, PS-RSRP, SS-SINR	-106 dBm (@ 30 kHz SCS)	N	k.A.	k.A.	k.A.
Keysight N99xxB FieldFox	PCI, SSB-Index, SS-RSRP, SS-RSRQ, RSSI, SS-SINR, PSS, SSS, PBCH-DMRS	k.A.	3,5 mm, N	k.A.	k.A.	ja
Rohde&Schwarz TSMx6	PCI, SSB-Index, SS-RSRP, SS-SINR, SS-RSRQ	-140 dBm (@ 30 kHz SCS)	SMA	5 Hz	k.A.	ja
Anritsu Field Master Pro MS2090A	PCI, SSB-Index, SS-RSRP, SS-SINR, SS-RSRQ	k.A.	K, N, V	k.A.	k.A.	ja

2.4 Messempfehlungen

In diesem Kapitel werden aktuell verfügbare Dokumente, die Vorgehensweisen zur Immissionsermittlung an 5G-Basisstationen empfehlen, bezüglich ihres Inhaltes näher vorgestellt.

Näher betrachtet werden hierbei insbesondere folgende Aspekte:

1. Welche Vorgehensweise bei der Bestimmung der aktuellen Immission wird empfohlen?
2. Welche Vorgehensweise bei der Bestimmung der maximal möglichen Immission wird empfohlen?
3. Wie werden Einflüsse, die an Anlagen des 5G-Mobilfunks erstmalig relevant sind (z.B. Einflüsse, die durch das Beamforming bzw. der Abstrahlung von Signalisierung und Verkehr über unterschiedliche Antennendiagramme verursacht werden) in der Empfehlung geeignet berücksichtigt?

Wie auch schon bei Mobilfunkanlagen der zweiten bis vierten Generation der Fall, ist zur Bestimmung der maximal möglichen Immission bei 5G-Anlagen mit Beamforming die Unterstützung der Betreiber bei der Auswertung der Messungen unverzichtbar, denn es müssen beispielsweise Antennendiagramme und bestimmte Leistungsangaben der betrachteten Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Bei manchen Messverfahren (Details dazu folgen) ist die Hilfe des Betreibers nicht nur auf die Lieferung von technischen Anlagendaten beschränkt, vielmehr kann es notwendig sein, dass die Basisstation durch den Betreiber in einen für die Messung notwendigen speziellen Betriebsmodus gebracht werden muss.

Obwohl für die Durchführung bzw. Auswertung von Messungen zur Bestimmung der aktuell am Messort vorhandenen Immission der Anlagenbetreiber keine speziellen technischen Anlagendaten liefern muss, sollte auch bei einer derartigen Messung zur Sicherheit beim Betreiber nachgefragt werden, ob sich die Anlage aktuell im normalen Betriebszustand befindet.

Aktuell befinden sich nationale und internationale Fachgremien noch in der Phase der Erstellung geeigneter Messempfehlungen, daher liegt noch keine große Zahl an diesbezüglichen Dokumenten vor. Dies ist wenig verwunderlich, da es in der derzeitigen Phase des beginnenden Rollouts der 5G-Netze mangels in Betrieb befindlicher Anlagen noch vergleichsweise schwierig ist, in der Umgebung von 5G-Anlagen Messungen vorzunehmen, um Strategien zur Immissionserfassung zu entwickeln beziehungsweise zu validieren.

Insgesamt wurden vier Dokumente mit relevantem Inhalt identifiziert:

- Veröffentlichung von H. Keller (Narda Safety Test Solutions GmbH) mit Vorschlägen zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Immissionserfassung in der Umgebung von 5G-Basisstationen [Kel 19].
- 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].
- 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].
- Vorläufige Messanweisung (BNetzA MA 09/EMF/01) des Prüf- und Messdienstes der Bundesnetzagentur für EMVU-Messungen im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens [BNetzA 20].

Die Ergebnisse der Sichtung dieser Schriftstücke werden in den nächsten Teilkapiteln vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf den vorgeschlagenen Verfahren zur messtechnischen Ermittlung der an einem Messpunkt vorhandenen *Immission*, d.h. die Bestimmung der dort vorhandenen Feldstärke (aktueller bzw. maximal möglicher Wert).

Wie man aus diesen Werten die daraus resultierende *Exposition* von Personen ermittelt, wird nicht in allen Dokumenten näher behandelt. Von Interesse wären hierbei vor allem Antworten auf folgende Fragen:

- Wird das am Messort vorhandene räumliche Maximum der Felder als Beurteilungswert für die Exposition herangezogen oder erfolgt eine räumliche Mittelung der am Messort vorhandenen Felder?
- Erfolgt zusätzlich eine zeitliche Mittelung der Messwerte (z.B. über sechs Minuten) oder wird der während der Messperiode auftretende zeitliche Maximalwert der gemessenen Feldstärke für die Ermittlung des Beurteilungswertes der Exposition verwendet?

Falls in den einzelnen Dokumenten dazu Hinweise gegeben werden, wird dies in den folgenden Abschnitten ebenfalls erwähnt.

2.4.1 Publikation von Keller

2.4.1.1 Grundsätzliches

Die erste Publikation, die sich intensiver mit den Herausforderungen bei der Erfassung der Immission von 5G-Basisstation beschäftigt, ist die Veröffentlichung von Keller aus dem Herbst 2019 [Kel 19]. Keller diskutiert hierin sowohl mögliche Vorgehensweisen zur Bestimmung der aktuell vorhandenen als auch der maximal möglichen Immission. Fragen zur Ermittlung der aus den Messwerten resultierenden Exposition sind nicht Thema dieses Dokuments.

2.4.1.2 Messung der aktuellen Immission

Die Erfassung der aktuell vorhandenen Immission kann aus Sicht des Autors bei 5G in vergleichbarer Art und Weise erfolgen, wie es bereits bei anderen breitbandigen Funksignalen (z.B. UMTS, LTE, DVB-T, WLAN) praktiziert wird.

- Verwendung eines Breitbandmessgeräts mit einem für den Frequenzbereich des Signals geeigneten isotropen Sensor (wenn das Signal ausreichend stark ist, d.h. die Feldstärke mindestens im Bereich einiger V/m liegt und keine anderen Funksignale einen nennenswerten Beitrag zur Gesamtimmission liefern).
- Ist eine frequenz aufgelöste Messung notwendig oder erwünscht, beispielsweise wenn mehrere Hochfrequenzsignale in ähnlicher Stärke vorliegen, dann können - wie auch bei anderen Funksignalen praktiziert - Messempfänger oder Spektrumanalysatoren mit geeigneter (isotroper) Messantenne verwendet werden. Zu beachten ist bei der spektralen Messung jedoch, dass die am Gerät eingestellte Messbandbreite nicht kleiner sein darf, als die Bandbreite des 5G-Signals, damit die komplette Signalleistung erfasst wird. Um die Felder, verursacht von im Frequenzbereich unmittelbar benachbarten 5G-Signalen separat erfassen zu können (wenn zum Beispiel für die Signale unterschiedliche Grenzwerte anzuwenden sind), müssen die Selektionsfilter zudem ausreichende Flankensteilheit aufweisen. Stehen am Messgerät keine Selektionsfilter mit ausreichender Messbandbreite zur Verfügung (z.B. bei der Messung eines 5G-Signals mit 100 MHz Bandbreite), sind integrierende Verfahren anzuwenden, die bei vielen Geräten als Alternative zur Verfügung stehen ("Channel Power"-Messung). Dabei ist eine RMS-Mittelwertbildung vorzunehmen, da 5G-Signale aufgrund des verwendeten Mehrträgerverfahrens starke kurzzeitige Schwankungen der Momentanleistung aufweisen. Dabei ist eine geeignete Mittelungszeit (typisch im Millisekundenbereich) bzw. Bandbreite des Glättungsfilters zu wählen.

2.4.1.3 Bestimmung der maximal möglichen Immission

2.4.1.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Für die Bestimmung der maximal möglichen Immission wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, die sich an einer bereits bei älteren Mobilfunkstandards (2-4G) bewährten Strategie orientiert: Messung der Immission eines permanent mit definierter Leistung abgestrahlten "Refe-

renzsignals" und Extrapolation dieses Messwerts auf die Maximalimmission mittels eines geeigneten Extrapolationsfaktors. Dieser Faktor setzt sich bei 5G aus mehreren Komponenten zusammen (siehe nachfolgende Abschnitte).

Die in den anderen näher betrachteten Empfehlungen beschriebene alternative Möglichkeit zur Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Erzwingen der Ausprägung einer einzelnen Antennenkeule (Beam) mit maximaler EIRP in Richtung zum Messpunkt wird von Keller nicht behandelt, da sich der Autor offensichtlich in seiner Publikation auf Verfahren konzentriert, bei denen kein aktiver Eingriff in die Funkkommunikation der Basisstation notwendig ist. Die bereits seit vielen Jahren bei Mobilfunksendeanlagen der zweiten bis vierten Generation etablierten Verfahren zur Bestimmung der Maximalimmission kommen ebenfalls ohne Eingriffe in das Betriebsverhalten der Basisstation aus.

2.4.1.3.2 Identifikation der als Basis für eine Extrapolation geeigneten Signale

Als geeignete Basis für eine Extrapolation werden Teile des Synchronization Signal / PBCH Blocks (SS/PBCH Block, SSB) vorgeschlagen. Dieser beinhaltet Signalisierungssignale, die zur Synchronisation zwischen Endgerät und Basisstation und dem initialen Verbindungsaufbau dienen (siehe Teilkapitel 2.1.3.5). Der SSB-Block wird in regelmäßigen Abständen mit definierter, auslastungsunabhängiger Leistung abgestrahlt.

2.4.1.3.3 Frequenzselektive Messung

Vergleichbar zur Vorgehensweise bei der Bestimmung von LTE-Maximalimmissionen wird für 5G vorgeschlagen, die Feldstärke, verursacht von einem definierten Frequenzbereich des SSB, mittels einer frequenzselektiven Messung zu erfassen. Anschließend wird die so ermittelte Feldstärke mittels eines Faktors, der sich als Quotient der gesamten Signalbandbreite und der Bandbreite des Ausschnittes aus dem SSB ergibt, auf die Maximalimmission hochgerechnet. Zusätzlich kann - wie auch bei LTE praktiziert - ein TDD-Korrekturfaktor (< 1) angewendet werden, mit dem berücksichtigt wird, dass bei einer Übertragung im Time Division Duplex (TDD) während der Uplink-Perioden die Basisstation nicht sendet, was die Maximalimmission verringert. Zur Bestimmung der maximal möglichen Immission ist hierbei der TDD-Korrekturfaktor für die kleinstmöglichen Uplink-Pausen zu verwenden, d.h. man betrachtet den Fall, dass der Downlink den maximal möglichen Zeitraum innerhalb eines Radio Frames belegt.

Als Messverfahren wird eine Kanalleistungsmessung mit einem steiflankigen Selektionsfilter und geeigneter RMS-Detektion empfohlen.

Dieses Verfahren hat nach Aussage des Autors allerdings seine Grenzen, denn es müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, bzw. gewisse Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Das oben beschriebene Verfahren setzt voraus, dass der SSB nicht mit einer größeren Leistung pro Subcarrier abgestrahlt wird (Boost), als die übrigen Subcarrier. Ist dies doch der Fall, muss dies mit einem Korrekturfaktor geeignet berücksichtigt werden, der aus entsprechenden Betreiberangaben zu ermitteln ist.

- Eine Separation der SSB einzelner Funkzellen ist mit diesem Verfahren nicht möglich, die spektrale Messung liefert nur die Summenfeldstärke aller individuellen Signalisierungssignale. Dies kann zu Problemen bei der Extrapolation führen.
- Die Bestimmung der Maximalimmission wird deutlich komplizierter, wenn die Träger des Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) mit größerem Pegel am Messort auftreten, als die Träger des SSB. Dies ist der Fall, wenn Beamforming angewendet wird und der PDSCH mit größerem Antennengewinn übertragen wird, als der SSB. In diesem Fall kann bei einer Anlage im Wirkbetrieb (d.h. Teilnehmerverkehr wird abgewickelt) mit einer einfachen Kanalleistungsmessung nicht mehr zuverlässig der Pegel des SSB ermittelt werden, es muss damit gerechnet werden, dass der PDSCH diesen "überdeckt", was zu einer Überbewertung der Immission führen würde.
- Selbst wenn man in der Lage ist, mittels spezieller Triggerverfahren (siehe [AVB+ 19] und [BNetzA 20]) den Messempfänger genau auf die zeitliche Position des SSB zu setzen und damit die Verfälschung des Messergebnisses durch den PDSCH verhindert, muss die stärkere Fokussierung der PDSCH-Carrier und die damit verbundene höhere Feldstärke durch einen Korrekturfaktor bei der Extrapolation berücksichtigt werden (dazu ist eine Kenntnis der Antennendiagramme für SSB und PDSCH erforderlich).

2.4.1.3.4 Codeselektive Messung

Als zweite Möglichkeit zur Bestimmung der maximal möglichen Immission wird - wiederum vergleichbar zu LTE - die codeselektive Messung eines Teilsignals des SSB vorgeschlagen. Favorisiert wird hierbei das Secondary Synchronisation Signal (SSS), da dieses zellspezifisch codiert ist, so dass wie bei der codeselektiven Erfassung von UMTS- bzw. LTE-Signalen das Referenzsignal für die Extrapolation zellspezifisch aufgelöst vorliegt. Das Ergebnis der Messung kann entweder als Pegel, summiert über den kompletten Frequenzbereich des SSS oder als auf ein Resource Element (einen Träger) gemittelter Pegel zur Verfügung gestellt werden. In beiden Fällen kann auf die maximal mögliche Immission mittels eines Extrapolationsfaktors (Gesamtbandbreite des Signals im Verhältnis zur Bandbreite, auf die das Messergebnis bezogen ist) hochgerechnet werden.

Bei TDD-Signalen kann - wie bei der frequenzselektiven Messung - ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor angewendet werden.

Das codeselektive Verfahren vermeidet die oben angesprochenen Probleme, die bei der frequenzselektiven Erfassung des SSB auftreten können (Synchronisationsprobleme, Überdeckung durch den PDSCH). Zudem ist man nun in der Lage, auch zellspezifische Korrekturfaktoren anzuwenden, da die Pegel der Referenzsignale individuell für jede Funkzelle vorliegen.

Allerdings werden auch für diese Art der Messung von Keller einige wichtige Randbedingungen thematisiert:

- Bei der Extrapolation der Ergebnisse einer codeselektiven Messung wird wieder vorausgesetzt, dass der SSB nicht mit einer größeren Trägerleistung abgestrahlt wird (Boost), als die übrigen Träger. Ist dies doch der Fall muss es mit einem Korrekturfaktor geeignet berücksichtigt werden.

- Bei Abstrahlung von SSB und PDSCH mit verschiedenen Antennendiagrammen muss die stärkere Fokussierung der PDSCH-Carrier und die damit verbundene höhere Feldstärke auch hier durch einen Korrekturfaktor bei der Extrapolation berücksichtigt werden.
- Thematisiert wird auch, dass selbst bei einer Abstrahlung von SSB und PDSCH über die gleiche Antennencharakteristik (d.h. keine mMIMO-Antenne) und mit gleicher Leistung pro Subcarrier ein zusätzlicher Korrekturfaktor notwendig ist, wenn der SSB nur über eine der beiden Antennenpolarisationen abgestrahlt wird, der PDSCH jedoch gleichzeitig über beide Polarisationen.
- Weiterhin wird kurz angesprochen, dass der Gewinnunterschied zwischen den Antennendiagrammen für den SSB und PDSCH vermutlich kein konstanter Wert ist, sondern je nach Aspektwinkel (Basisstation - Immissionsort) unterschiedlich groß ausfällt.

Nach Auffassung des Autors bietet die auf einer codeselektiven Messung basierende Extrapolation auf maximal mögliche Immission die größeren Chancen, verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Allerdings müssen zur Auswertung der Messergebnisse - ebenso wie bei der frequenzselektiven Messung des SSB - einige technische Parameter der Anlage vom Betreiber zur Verfügung gestellt werden.

2.4.1.4 Zusammenfassung

Das Dokument von Keller liefert zwar keine detaillierten Vorgaben für wesentliche Einstellparameter von Messgeräten, dafür einen sehr guten einführenden Überblick über mögliche Strategien zur Bestimmung der aktuellen und der maximal möglichen Immission.

Für die Bestimmung der aktuellen Immission wird bekanntes Wissen aus der Messung bisheriger Funkdienste übernommen und für 5G mit einigen Ergänzungen bzw. Kommentaren versehen. Festgestellt wird, dass für diese Art der Messung keine grundlegend neuen Ansätze notwendig sind.

Zur Bestimmung der maximal möglichen Immission wird auf Ansätze zurückgegriffen, die bereits aus der LTE-Immissionsmesstechnik bekannt sind [BSW 12], was nicht verwunderlich ist, da bei 5G ebenfalls ein Mehrträgerübertragungsverfahren zur Anwendung kommt. Ähnlich wie bei LTE bietet die codeselektive Messung offensichtlich auch für 5G einige entscheidende Vorteile im Vergleich zur frequenzselektiven Messung, auch wenn hierfür spezielle Messgeräte bzw. Geräteoptionen notwendig werden.

Spezielle Überlegungen zu Mess- und Auswerteunsicherheiten (z.B. Verlässlichkeit der für die Hochrechnung notwendigen Antennendiagramme von SSB- und PDSCH-Beam) an 5G-Anlagen werden in diesem Übersichtsbeitrag nicht angestellt.

Hervorzuheben ist, dass Keller in seiner Publikation nicht nur grundsätzliche Vorgehensweisen zur Extrapolation auf die maximal mögliche Immission vorstellt und erläutert, sondern explizit auf zusätzliche Aspekte bei der Abstrahlung von 5G-Signalen hinweist, die bei den bisherigen Funksystemen nicht oder nur eingeschränkt relevant waren. Ein besonders wichtiger Aspekt ist hierbei die Berücksichtigung vorhandener Gewinnunterschiede bei der Abstrahlung von SSB und PDSCH über unterschiedliche Antennendiagramme. In der Publikation finden sich zwar keine finalen Lösungen, aber noch offene Fragen werden thematisiert.

2.4.2 IEC 62232

2.4.2.1 Grundsätzliches

Aktuell liegt ein Entwurf des Standards IEC 62232 Ed. 3.0 [IEC 62232] vor, bei dem in den nicht normativen Anhängen B.3, B.5 und insbesondere in F.9 die Messung von 5G-Signalen behandelt wird. Der Standardentwurf befindet sich aktuell jedoch noch in einem frühen Stadium, was bedeutet, dass die relevanten Textabschnitte zwar zum größten Teil schon ausformuliert sind, beispielsweise einige Abbildungen in der uns vorliegenden Version allerdings noch fehlen.

Dennoch kann bereits eine nähere Evaluation wesentlicher Teile des Normenentwurfs vorgenommen werden, da insbesondere nicht unerhebliche Anteile des relevanten Abschnitts in Kapitel F.9 auf den Untersuchungen einer Arbeitsgruppe der Universität Gent basieren [AVB+ 19], die in Teilkapitel 2.6 dieses Berichts noch näher vorgestellt werden.

Da sich dieser Standard sowohl mit grundlegenden Fragen als auch mit Details zur konkreten Bestimmung der von Funksendeanlagen generierten elektromagnetischen Felder befasst, werden auch Fragen zur Bestimmung der Exposition aus den gemessenen Feldern diskutiert (vornehmlich in Kapitel 6.3 und 6.4 des Standards). Dort lässt der Standard offen, ob als Beurteilungswert für die Exposition ein räumlicher Feldstärkemittelwert oder das im Messvolumen vorhandene Maximum verwendet werden soll. Beide Strategien werden als grundsätzlich geeignet bezeichnet. Man verweist auf nationale Vorgaben, welche möglicherweise die anzuwendende Methode explizit festlegen.

Eine zeitliche Mittelung (z.B. über sechs Minuten) wird bei Messungen zur Bestimmung der aktuellen Immission und bei Anlagen mit zeitlich stark schwankender Leistungsangabe angesprochen.

Grundsätzlich beziehen sich die im Standard getroffenen Aussagen nicht explizit auf 5G, sondern werden als für viele Arten von Funkssystemen gültig formuliert.

2.4.2.2 Messung der aktuellen Immission

Der Entwurf der IEC 62232 Ed. 3.0 beschäftigt sich in Anhang B.3 mit Möglichkeiten zur Bestimmung der aktuellen Immission bei 5G. Diese kann auf folgende Arten ermittelt werden:

- Verwendung eines Breitbandmessgeräts mit einem für den Frequenzbereich des Signals geeigneten isotropen Sensor (wenn das Signal ausreichend stark ist und keine anderen Funksignale einen nennenswerten Beitrag zur Gesamtmission liefern).
- Frequenz aufgelöste Messung individueller 5G-Signale mit Messempfänger oder Spektrumanalysatoren und geeigneter (isotroper) Messantenne. Empfohlen wird, hierzu geeignete integrierende Verfahren anzuwenden ("Channel Power"-Measurement). Dabei ist eine RMS-Mittelwertbildung vorzunehmen, da 5G-Signale aufgrund des verwendeten Mehrträgerverfahrens starke kurzzeitige Schwankungen der Momentanleistung aufweisen.

Die IEC 62232 greift also für die Bestimmung der aktuellen Immission ebenfalls auf bewährte Verfahren zurück.

Zur Berücksichtigung der durch Reflexionen im Messvolumen vorhandenen räumlichen Feldstärkeschwankungen (für die Bestimmung der aktuellen bzw. der maximal möglichen Immission) werden die gleichen Verfahren vorgeschlagen, wie sie bereits für andere Funksignale in die Norm aufgenommen wurden: 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".

2.4.2.3 *Bestimmung der maximal möglichen Immission*

2.4.2.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die IEC 62232 schlägt für die Bestimmung der maximal möglichen Immission als primäres Verfahren vor, die Immission eines auslastungsunabhängig mit definierter Leistung abgestrahlten "Referenzsignals" zu messen und das Ergebnis auf die Maximalimmission mittels eines geeigneten Faktors zu extrapolieren.

In Anhang B.3 wird allerdings zusätzlich auch auf die Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Erzwingen der Ausprägung einer einzelnen Antennenkeule (Beam) in Richtung zum Messpunkt bei gleichzeitig angeforderter maximaler Downloadverkehrslast eingegangen (Kapitel B.3.1.2.5.4). Verschiedene Möglichkeiten zum Erzwingen einer großen Auslastung im Downlink werden angesprochen (z.B. die Verwendung einer auf einem Smartphone installierten "Speed-Test"-App). Allerdings wird nicht erläutert, wie sichergestellt werden kann, dass von der Basisstation wirklich nur ein Beam mit maximaler Leistung in Richtung zum Messpunkt ausgerichtet wird und nicht zusätzliche Beams zu anderen Teilnehmern in der Zelle ausgebildet werden, was zu einer Verringerung der zum Messpunkt hin abgestrahlten Leistung führen würde. Eine mögliche Lösung dieses Problems wird in der in Teilkapitel 2.4.4. noch näher vorgestellten Messanweisung der BNetzA [BNetzA 20] vorgestellt ("SimuLoad").

2.4.2.3.2 Identifikation der als Basis für eine Extrapolation geeigneten Signale

Als mögliche Basis für eine Extrapolation werden Signale aus dem SSB (Details: Siehe Teilkapitel 2.4.2.3.3) und das Channel State Information Reference Signal (CSI-RS) vorgeschlagen.

Das CSI-RS wird im Dokument allerdings nur als Basis für eine codeselektive Erfassung verwendet, während die im SSB enthaltenen Signale (PSS, SSS, PBCH) sowohl als Basis einer frequenzselektiven als auch einer codeselektiven Messung verwendet werden. Es wird jedoch angemerkt, dass das CSI-RS nicht notwendigerweise geeignet für eine Extrapolation konfiguriert und auch nicht immer vorhanden ist (z. B. zu Zeiten, in denen kein Endgerät mit der Basisstation verbunden ist). Daher kann eine CSI-RS-basierte Extrapolation nur dann durchgeführt werden, wenn ein spezieller Modus in der Basisstation aktiviert ist. Hierbei wird die untersuchende Funkzelle für den normalen Verkehr (Endgeräte von gewöhnlichen Teilnehmern) gesperrt. Dies ist erforderlich, da die Leistung pro Traffic Beam und folglich auch die über den CSI-RS übertragene Leistung bei gleichzeitiger Aussendung mehrerer Beams abnimmt. Anschließend wird die horizontale und vertikale Ausrichtung des CSI-RS-Beams schrittweise über den gesamten möglichen Schwenkbereich der Antenne variiert, so dass auf jeden Fall auch einmal mit der Ausrichtung der Antenne abgestrahlt wird, die am Messpunkt die größte Immission erzeugt (siehe dazu auch Teilkapitel 2.4.4.3.1).

Bei Anwendung dieser Messprozedur kann man sicher sein, die größte vom CSI-RS am Messort erzeugbare Feldstärke ermittelt zu haben. Allerdings ist bei dieser Art der Messung die Mithilfe des Betreibers oder des Systemtechniklieferanten notwendig, der die Basisstation in den speziellen Betriebsmodus bringen muss. Zudem besitzen die CSI-RS-Beams eine andere Abstrahlcharakteristik als die Traffic-Beams (PDSCCH), so dass auch hier - ebenso wie bei einer Extrapolation basierend auf Signale im SSB - ein Antennengewinnkorrekturfaktor notwendig ist.

Da auch die IEC 62232 offensichtlich Messungen präferiert, bei denen ein Eingriff in das Funknetz nicht notwendig ist, wird eine Extrapolation, basierend auf der codeselektiven Messung von CSI-RS, im Unterabschnitt F.9.2.2 zwar vorgestellt, es wird jedoch bereits in der Einleitung dieses Abschnitts darauf hingewiesen, dass dies nur informativen Charakter besitzt.

2.4.2.3.3 Frequenzselektive Messung

Die IEC 62232 empfiehlt, die Feldstärke, verursacht von einem definierten Frequenzbereich des SSB (z.B. einen Ausschnitt von 1 MHz) mittels einer frequenzselektiven Messung ("Zero Span" Modus) zu erfassen und daraus die Feldstärke pro Resource Element zu ermitteln (leistungsbezogener Umrechnungsfaktor = Messbandbreite / Trägerabstand). Die Hochrechnung auf maximale Leistung erfolgt dann durch Multiplikation des umgerechneten Messergebnisses mit der Gesamtzahl der Träger im betrachteten 5G-Signal. Zusätzlich wird ein TDD-Korrekturfaktor angewendet.

Es werden sehr ausführliche Hinweise zur korrekten Einstellung eines Spektrumanalysators bezüglich Messbandbreite und RMS-Detektion gegeben, jedoch sind diese nicht allgemeingültig für alle Hersteller und Typen von Analysatoren geeignet. Beispielsweise wird genau festgelegt, welche Sweepzeit am Analysator einzustellen ist, ohne zu berücksichtigen, dass bei manchen Geräten diese vom Bediener gar nicht frei gewählt werden kann. Die Empfehlungen basieren hauptsächlich auf den bereits erwähnten Untersuchungen der Universität Gent [AVB+ 19] und können für den dort verwendeten Laboranalysator durchaus korrekt sein.

Eine technische Norm sollte bei Geräteeinstellungen generell keine zu produktspezifischen Vorgaben machen, wenn diese nicht von allgemeingültiger Natur sind, da es sonst bei den Anwendern leicht zu Missverständnissen kommen kann. Eine ähnliche Problematik findet sich in diesem Standard seit einigen Jahren auch im Anhang F.8, in dem die frequenzselektive Messung von LTE-Signalen ebenfalls zum Teil mit zu produktspezifischen Messgeräteparametern beschrieben wird.

Obwohl hier eine sehr detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der frequenzselektiven Erfassung des SSB erfolgt, fehlt aktuell im Standard eine Aussage zur notwendigen Flankensteilheit der Selektionsfilter bzw. zur Verwendung eines Korrekturfaktors bei nicht idealer (d.h. rechteckförmiger) Filterkurve, also beispielsweise bei Messung mit gaußförmigen Auflösfiltern, wie sie in Spektrumanalysatoren typisch verwendet werden. Dies wird beispielsweise in der Messanweisung der BNetzA [BNetzA 20] thematisiert.

Nicht nachvollziehbar ist die Vorgabe, den RMS-Detektor zu verwenden (was in der Tat notwendig ist, um die modulationsbedingten starken Schwankungen der Momentanleistung im SSB zu glätten), jedoch zusätzlich auch das Videofilter am Analysator auf eine sehr kleine

Bandbreite einzustellen, obwohl in [Rau 00] gefordert wird, bei Einsatz des RMS-Detektors die Videobandbreite möglichst groß einzustellen, da sonst der RMS unterbewertet wird.

Bei Messungen an Anlagen im Wirkbetrieb (d.h. es findet eine Nutzdatenübertragung zu Teilnehmern statt) muss allerdings damit gerechnet werden, dass das vom Analysator angezeigte Spektrum nicht vom SSB stammt, sondern von stärkeren Feldern der Trafficsignale überdeckt wird (der PDSCH wird in manchen Fällen mit größerem Antennengewinn abgestrahlt als der SSB), was zu einer Überbewertung der Immission führen würde.

Der Standard schlägt daher vor, zur Vermeidung einer Überdeckung durch starke PDSCH-Signale einen Analysator zu verwenden, der als Ergebnisdarstellung über ein Spektrogramm ("Wasserfalldiagramm") verfügt. Auch die Möglichkeit einer speziellen Triggerfunktion am Analysator ("Gated Trigger") wird als mögliche Abhilfe bei einer Überdeckung des SSB durch PDSCH-Signale vorgeschlagen.

Bei Abstrahlung von SSB und PDSCH mit verschiedenen Antennendiagrammen soll die stärker gebündelte Abstrahlung der PDSCH-Carrier und die damit verbundene höhere Feldstärke durch einen zusätzlichen Korrekturfaktor bei der Extrapolation berücksichtigt werden. Der Standard schlägt in Anhang B.5.5 vor, einen vom Aspektwinkel (Azimut, Elevation) abhängigen Unterschiedsfaktor zwischen der EIRP des SSB und der EIRP des PDSCH zu ermitteln. Dadurch werden nicht nur Unterschiede im Antennendiagramm, sondern auch Differenzen in der für die beiden Signale verwendeten Leistungen erfasst.

Der Unterschiedsfaktor kann entweder rechnerisch durch Auswertung der vom Betreiber gelieferten Antennendiagramme unter Einbeziehung der abgestrahlten Leistungen von SSB und PDSCH ermittelt werden.

Alternativ wird vorgeschlagen, den Unterschiedsfaktor messtechnisch zu ermitteln, indem die Empfangsfeldstärke in SSB mit der Feldstärke in anderen Teilen des Signalspektrums (PDSCH) verglichen wird. Der Standard geht dabei offensichtlich von der Annahme aus, dass im normalen Betrieb einer 5G-Basisstation regelmäßig ein Beam mit maximaler EIRP zumindest kurzzeitig zum Messpunkt ausgerichtet ist. In wie weit beziehungsweise unter welchen Umständen diese Annahme realistisch ist, wird im Dokument nicht näher thematisiert. Alternativ könnte dies auch mittels eines Endgeräts erzwungen werden. Dieses Verfahren stammt aus [AVB+ 19] und wird in Teilkapitel 2.6.1.4 dieses Berichts noch ausführlicher diskutiert.

Bei TDD-Signalen soll - wie auch bei LTE praktiziert - ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor angewendet werden. Diesen Faktor kann man beispielsweise aus vom Betreiber zur Verfügung gestellten Anlagendaten ermitteln.

2.4.2.3.4 Codeselektive Messung

In der IEC 62232 wird primär die codeselektive Messung eines Teilsignals des SSB vorgeschlagen (die codeselektive Messung des CSI-RS wird hingegen nur informativ angegeben, da hierfür in der Basisstation zunächst bestimmte technische Voraussetzungen geschaffen werden müssen). Favorisiert wird das Secondary Synchronisation Signal (SSS), da dieses zellspezifisch codiert ist. Wird das Ergebnis der Messung auf ein Resource Element bezogen dargestellt, kann mit der Gesamtzahl an Trägern auf die maximal mögliche Immission extrapoliert werden.

Bei TDD-Signalen kann - wie bei der frequenzselektiven Messung - ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor angewendet werden.

Diese einfache Extrapolation der Ergebnisse einer codeselektiven Messung kann angewendet werden, wenn SSB und PDSCH mit gleicher EIRP pro Träger abgestrahlt werden, also bei Anlagen, die keine Beamforming-Antennen und für beide Signale die gleiche Leistung pro Subcarrier verwenden. Ist dies jedoch nicht der Fall, insbesondere bei Abstrahlung von SSB und PDSCH über unterschiedliche Antennendiagramme, sind zusätzlich die bereits bei der frequenzselektiven Messung genannten Gewinn-Korrekturfaktoren aus den von den Betreibern gelieferten Antennendiagrammen zu ermitteln und anzuwenden.

Spezielle Strategien zur messtechnischen Bestimmung des EIRP-Unterschiedsfaktors mittels einer codeselektiven Messung werden im Standard nicht vorgestellt.

2.4.2.4 Zusammenfassung

Der aktuell vorliegende Entwurf der IEC 62232 beschäftigt sich intensiv und teilweise sehr detailliert mit der messtechnischen Bestimmung der Immissionen bei 5G-Basisstationen. Behandelt werden hierbei:

- Verfahren zur Bestimmung der aktuell vorhandenen Immission,
- Verfahren zur Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Messung eines Referenzsignals und anschließender Hochrechnung (frequenzselektiv, codeselektiv),
- Verfahren zur direkten Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Erzwingen einer Abstrahlung der Basisstationsantenne mit maximal möglicher Fokussierung des Antennen-Beams in Richtung zum Messpunkt, sowie
- Strategien zur Ermittlung von aspektwinkelabhängigen Korrekturfaktoren für Anlagen, bei denen der SSB und der PDSCH nicht mit gleicher EIRP abgestrahlt werden (Beamforming).

Im Standard finden sich zum Teil sehr detaillierte Angaben zur Wahl geeigneter Geräteparameter, die jedoch hauptsächlich aus nur einer Veröffentlichung [AVB+ 19] entnommen wurden und dort nur mit einem Messgerät (Laboranalysator) ermittelt wurden. Erfahrungen beispielsweise bei der Bestimmung von LTE-Immissionen [BSW 12] zeigen jedoch, dass es nicht sinnvoll ist, zu detaillierte Angaben bezüglich der Einstellparameter von Messgeräten in allgemeingültigen Normen zu dokumentieren, da diese zum Teil nicht automatisch für alle Typen von geeigneten Messgeräten anwendbar sind.

Angemerkt sei an dieser Stelle noch, dass in der IEC 62232 bei Antennen mit Beamforming neben der Vorgehensweise zur Bestimmung der maximal möglichen Immission zusätzlich auch auf Strategien eingegangen wird, die berücksichtigen, dass es aufgrund der sich permanent ändernden Abstrahlleistung und Ausrichtung der Antennenbeams sehr unwahrscheinlich ist, die maximal mögliche Immission an einem Messpunkt für einen Zeitraum von sechs Minuten (oder mehr) anzutreffen. In Anhang B.6 des Standards wird daher eine Strategie genauer erläutert, die auf der Idee basiert, einen Reduktionsfaktor zu ermitteln, mittels dessen aus der *theoretisch* maximal möglichen Immission auf eine "tatsächliche Maximalimmission" heruntergerechnet werden kann. Dieser Immissionswert kann als realistischere Beschreibungsgröße

für die *typisch* am Messpunkt zu erwartende Maximalimmission herangezogen werden, während der *theoretisch* maximal mögliche Immissionswert vornehmlich für die Bestimmung von Sicherheitsabständen des Personenschutzes verwendbar ist.

Der Standard verweist bezüglich der Anwendung des Reduktionsfaktors auf Beispiele in [IEC 62669].

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

2.4.3 Schweizer Messempfehlung

2.4.3.1 Grundsätzliches

Seit Anfang Februar 2020 liegt die Empfehlung zur Messung von Immissionen an 5G NR Basisstationen im Frequenzbereich bis 6 GHz vor [METAS 20]. Diese wurde als technischer Bericht vom nationalen Schweizer Metrologischen Institut METAS veröffentlicht. Wie schon bei früheren Mobilfunktechnologien (GSM, UMTS, LTE) publizieren auch bei 5G die verantwortlichen Schweizer Behörden vergleichsweise frühzeitig ausführliche Messempfehlungen, was vermutlich hauptsächlich durch den vermehrten Messbedarf aufgrund der niedrigen Schweizer Anlagegrenzwerte getrieben wird.

Dieses Dokument kann in der Schweiz für Konformitätstests von 5G-Basisstationen verwendet werden, bis eine neue Version oder eine offizielle Messempfehlung des Schweizer Metrologischen Instituts (METAS) und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) veröffentlicht wird.

Die Einführung des Mobilfunkstandards 5G erfordert nach Auffassung der Autoren Messverfahren, die folgenden Anforderungen genügen müssen:

- Die Verfahren sind robust und praktikabel,
- sie ermöglichen eine präzise Extrapolation, um eine Über- oder Unterschätzung der elektrischen Feldstärke im Referenzbetriebsmodus ("maßgeblicher Betriebszustand") zu vermeiden,
- die Möglichkeit der Strahlschwenkung von 5G-Antennen wird berücksichtigt,
- sie sind in der Lage, gegebenenfalls die sich aufgrund der zeitlichen Variabilität der Leistungsabstrahlungsrichtung einer 5G-Antenne mit Beamforming ergebende geringere "tatsächliche Maximalimmission" (siehe auch Teilkapitel 2.4.2.4) zu ermitteln,
- sie stimmen in ihrer grundsätzlichen Philosophie mit den älteren Schweizer Messempfehlungen (GSM, UMTS, LTE) überein,
- sie sind sowohl für Anlagen mit FDD als auch mit TDD geeignet.

Diese Auflistung gibt die wesentlichen Anforderungen an Messverfahren zur Bestimmung der maximal möglichen Immission bei 5G-Basisstationen in sehr prägnanter Art und Weise wieder.

Wie bei den früheren Messempfehlungen für UMTS und LTE werden im Dokument zwei verschiedene Methoden zur Messung eines auslastungsunabhängigen Referenzsignals vorgeschlagen:

- Die codeselektive Methode ermöglicht die Konformitätsbewertung einer Anlage und wird als Referenzmethode betrachtet.
- Die Spektralmethode (frequenzselektive Methode) erlaubt nicht die Unterscheidung der Immissionen, verursacht durch unterschiedliche Funkzellen eines Betreibers, da 5G-Netze (wie bei 3G und 4G) als Gleichwellennetze betrieben werden (d.h. alle Antennen eines Betreibers senden im gleichen Frequenzband). Darüber hinaus neigt dieses Verfahren zu einer Überschätzung der extrapolierten Feldstärke für den maßgeblichen Betriebszustand (siehe auch weiter unten). Daher kann nach Auffassung der Autoren mit diesem Verfahren prinzipiell die Einhaltung eines Grenzwertes nachgewiesen werden, jedoch nicht unter allen Umständen dessen Nichteinhaltung. Die frequenzselektive Methode wird daher nur für Orientierungsmessungen empfohlen.

Die Messempfehlung beschränkt sich auf den Frequenzbereich von 450 MHz bis 6 GHz.

Dieses Dokument gestattet - zusätzlich zu der üblichen Extrapolation auf den maßgeblichen Betriebszustand (entspricht der maximal möglichen Immission) - auch die Verwendung eines auf statistischen Überlegungen basierenden Reduktionsfaktors für adaptive Antennen. Dieser ist jedoch aktuell noch auf 1 zu setzen, was bedeutet, dass derzeit noch keine zusätzliche Berücksichtigung der Beamagilität erfolgen darf. Ein genauer Wert für den Reduktionsfaktor (kleiner als 1) müsste in einer aktuell noch nicht vorliegenden Ausführungsempfehlung veröffentlicht werden.

2.4.3.2 Messung der aktuellen Immission

Methoden zur Bestimmung der aktuellen Immission bei 5G-Basisstationen werden in dieser Messempfehlung nicht behandelt.

2.4.3.3 Bestimmung der maximal möglichen Immission

2.4.3.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Auch die Schweizer Messempfehlung schlägt für die Bestimmung der maximal möglichen Immission vor, die Immission eines auslastungsunabhängig mit definierter Leistung abgestrahlten Referenzsignals zu messen und das Ergebnis auf die Maximalimmission mittels geeigneter Faktoren zu extrapolieren.

Die alternative Möglichkeit zur Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Erzwingen der Ausprägung einer einzelnen Antennenkeule (Beam) in Richtung zum Messpunkt bei gleichzeitig angeforderter maximaler Downloadverkehrslast wird in dieser Empfehlung nicht thematisiert.

2.4.3.3.2 Identifikation der als Basis für eine Extrapolation geeigneten Signale

Als Basis für eine Extrapolation wird für beide Erfassungsmethoden (frequenz- bzw. codeselektiv) ausschließlich das im SSB vorhandene Secondary Synchronization Signal (SSS) vorgeschlagen. Eine Extrapolation, basierend auf dem Channel State Information Reference Signal (CSI-RS) wird nicht thematisiert.

2.4.3.3.3 Frequenzselektive Messung

Das frequenzselektive Verfahren basiert auf der Messung des SSS mittels eines geeigneten Spektrumanalysators mit RMS-Detektor, einer Messbandbreite, die höchstens der SSS-Bandbreite entspricht und einer Max-Hold-Funktion. Die Messungen sollen im "Zero Span"-Modus (d.h. Messempfängermodus) durchgeführt, und die Sweep-Zeit muss so gewählt werden, dass die Integrationszeit für jede einzelne Messung weniger als die Hälfte der Dauer eines SSS OFDM-Symbols beträgt (ca. 16,5 μ s bei einem Subcarrierabstand von $\Delta f = 30$ kHz). Weitere Angaben z.B. zur Flankensteilheit des verwendeten Selektionsfilters werden nicht gemacht.

Als Basis für die Extrapolation ist das räumliche Maximum der im Messvolumen erzeugten Feldstärke zum Beispiel mit Hilfe der "Schwenkmethode" zu ermitteln. Bei den Messungen ist die Feldstärke in einem Höhenbereich von 0,5 bis 1,75 Meter zu erfassen, zusätzlich ist ein Abstand zwischen Messantenne und Boden, Wänden, Decken, Fenstern und Möbeln von mindestens 50 cm einzuhalten. Die Bildung räumlicher Feldstärkemittelwerte wird in der Empfehlung nicht zugelassen.

Eine zeitliche Mittelung der Messwerte (z.B. über sechs Minuten) erfolgt nicht.

Die für die Messungen verwendete Empfangsantenne (der Typ wird in der Messempfehlung nicht näher spezifiziert, aktuell werden in der Schweiz sowohl einachsige als auch isotrope Messantennen eingesetzt) sollte kleine Abmessungen haben, damit sie problemlos in Innenräumen verwendet werden kann. Ein Kalibrierzertifikat muss die Rückverfolgbarkeit im internationalen Einheitensystem (SI) bestätigen.

Das in den vorstehenden Absätzen Geschriebene gilt ebenso für die codeselektive Messung.

Wie im nächsten Abschnitt noch näher erläutert wird, basieren alle in der Schweizer Messempfehlung beschriebenen Hochrechnungen nicht auf der Messung des stärksten SSB, sondern auf der Summenfeldstärke aller von einer Antenne in die Zelle abgestrahlten SSB. Dies ist bedeutsam für den Fall der gerichteten Abstrahlung einer Sequenz von mehreren SSB (SSB-Burst) in Teilbereiche des zu versorgenden Sektors mittels Beamforming-Antennen (z.B. acht SSB; siehe Teilkapitel 2.1.3.5). Da jedoch eine spektrale Messung diese Summenbildung nicht vornehmen, sondern mittels Max-Hold nur die Feldstärke des stärksten SSB eines Sektorscans liefern kann, schlägt die Schweizer Messempfehlung vor, diesen stärksten Messwert um 3 dB zu vergrößern, womit die anderen (vermutlich nicht optimal auf den Messpunkt ausgerichteten und damit schwächeren SSB-Beams) näherungsweise berücksichtigt werden. Der so für die eingestellte Messbandbreite ermittelte Feldstärkewert wird anschließend auf die Feldstärke pro Resource Element heruntergerechnet und kann dann in gleicher Art und Weise wie das Ergebnis einer codeselektiven Messung mittels verschiedener Extrapolations- und Korrekturfaktoren auf die Immission für den maßgeblichen Betriebszustand extrapoliert werden. Details zu dieser Extrapolation werden im nächsten Teilkapitel vorgestellt.

2.4.3.3.4 Codeselektive Messung

In der Schweizer Messempfehlung wird nur die codeselektive Messung des Secondary Synchronisation Signal (SSS) empfohlen, da dieses zellspezifisch codiert ist. Im Unterschied zu den bereits weiter oben besprochenen Dokumenten schreibt die Schweizer Empfehlung vor,

bei Anlagen, die eine Sequenz von mehreren SSS (SSB Burst) aussenden (siehe Teilkapitel 2.1.3.5), nicht nur das stärkste Signal als Basis für die Extrapolation heranzuziehen, sondern die leistungsbezogene Summe aller vorhandenen SSS eines Sektorscans zu bilden. Die Hochrechnung auf den maßgeblichen Betriebszustand (maximal mögliche Immission) der Anlage erfolgt dann wie folgt:

- Die Summe der gemessenen Pegelwerte pro Resource Element (räumliches Maximum) aller SSS einer Sequenz (entweder direkt vom Messgerät errechnet oder nachträglich im Rahmen des Postprocessing ermittelt) wird zunächst auf die für die Funkzelle bewilligte Maximalleistung hochgerechnet. Dies erfolgt über den so genannten "SSS-Korrekturfaktor", der sich leistungsbezogen als Quotient aus der für die Funkzelle maximal bewilligten ERP (Effective Radiated Power = Sendeleistung multipliziert mit dem Gewinn bezogen auf einen idealen Halbwellendipol) und der größten vorhandenen "Summen-ERP" pro Resource Element des SSS errechnet. Die größte Summen-ERP (pro RE) des SSS ergibt sich hierbei aus der Sendeleistung, mit der der SSS pro Resource Element abgestrahlt wird, multipliziert mit dem größten Antennengewinn (bezogen auf den Halbwellendipol) des "Summen-Antennendiagramms" aller in die Zelle abgestrahlten SSB. Für die Auswertung der Messungen müssen also die Leistungen und Antennendiagramme aller abgestrahlten SSB zur Verfügung stehen.
- "Summen-Antennendiagramm" bedeutet hierbei, dass aus den Einzeldiagrammen der in die Zelle abgestrahlten Beams nicht einfach das einhüllende Diagramm ermittelt wird, sondern die Gewinnwerte für alle Azimut- und Elevationswinkel der einzelnen Beams linear addiert werden. Dadurch entsteht ein logischer Zusammenhang zur Vorgehensweise bei der codeselektiven Erfassung der SSS-Feldstärke (Summation der einzelnen SSS-Messwerte). Die Autoren der Messempfehlung erhoffen sich mit dieser Strategie (Summen-Diagramm statt Hüllkurvendiagramm) eine bessere Übereinstimmung von Messung und Berechnung der Immissionen sowie eine größere Zuverlässigkeit bei der Anwendung des im nächsten Aufzählungspunkt näher erläuterten "Antennenkorrekturfaktors" [Pyt 20]. Untersuchungsergebnisse dazu wurden bisher nicht publiziert.
- Da der oben definierte SSS-Korrekturfaktor als vom Aspektwinkel unabhängiger Wert definiert wurde, kann es bei alleiniger Anwendung dieses Faktors sowohl zu einer Unter- als auch zu einer Überbewertung der hochgerechneten Immission kommen (siehe dazu auch Teilkapitel 2.5.3 bzw. 2.5.4), denn es muss bei Abstrahlung von SSB und PDSCH über unterschiedliche Diagramme mit einer sehr großen Variabilität in der Differenz zwischen der für die aktuelle Richtung vorhandenen ERP pro Resource Element des SSB und der ERP pro Resource Element des PDSCH der Zelle gerechnet werden. Dies wird für derartige Antennen mit einem zweiten Faktor, dem "Antennenkorrekturfaktor" berücksichtigt. Der Antennenkorrekturfaktor wird winkelspezifisch (Azimut, Elevation) durch Vergleich des "Summen-Antennendiagramms" für die SSB-Abstrahlung und dem für die Abstrahlung des PDSCH relevanten Diagramm ermittelt, wobei bei vorhandenem Beamforming für das Antennendiagramm des PDSCH nicht ein Summendiagramm, sondern "nur" das Hüllkurvendiagramm gebildet wird.
- Die Messempfehlung gibt insgesamt drei verschiedene Formeln für die Ermittlung des "Antennenkorrekturfaktors" an, je nachdem wo sich der Messpunkt relativ zur Antenne

befindet. Einfach gesagt: Es wird zum einen unterschieden, ob sich der Messpunkt nahe an den Hauptsenderrichtungen beider Antennendiagramme oder im Bereich der Neben- und Rückkeulen des SSB-Diagramms befindet. Als dritte Zone wird ein Winkelbereich zwischen den beiden eben genannten Zonen definiert. Im Detail wird auf diese drei Fälle in Abschnitt 3.4.2.3 eingegangen.

- Die für die Auswertung notwendigen 3D-Antennendiagramme und Leistungsdaten müssen vom Antennenhersteller beziehungsweise dem Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellt werden.
- In der Messempfehlung werden zusätzlich Szenarien vorgestellt, bei denen eine vereinfachte Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors denkbar ist (Kapitel 4.3 der Messempfehlung).
- Bei TDD-Signalen wird je nach Duty Cycle ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor angewendet.
- Außerdem erlaubt die Empfehlung die zusätzliche Verwendung eines auf statistischen Überlegungen basierenden Reduktionsfaktors für adaptive Antennen (zur Bestimmung der "tatsächlichen Maximalimmission"). Dieser ist jedoch aktuell noch auf 1 zu setzen, d.h. es wird die maximal mögliche Immission der Anlagen für den Grenzwertvergleich verwendet.

Die oben beschriebenen Schritte zur Hochrechnung können sowohl auf Basis einer codeselektiven als auch einer frequenzselektiven Messung erfolgen. Der einzige Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt darin, dass bei einer frequenzselektiven Messung keine zellspezifische Auflösung der SSS-Feldstärkewerte erfolgen kann. Daher kann die Extrapolation auch nicht zellspezifisch, sondern nur in der Summe erfolgen. Um eine Unterbewertung bei einer frequenzselektiven Messung zu verhindern, sind beispielsweise bei einem Standort mit drei 5G-Sektorantennen die oben beschriebenen Korrekturfaktoren jeweils getrennt zu ermitteln und der größte dieser Werte dann für die Hochrechnung heranzuziehen, wodurch unter Umständen eine nennenswerte Überbewertung der Immission entstehen kann.

2.4.3.4 Zusammenfassung

Auch die Schweizer Empfehlung beschäftigt sich intensiv und teilweise sehr detailliert mit der messtechnischen Bestimmung der Immissionen bei 5G-Basisstationen. Vertieft behandelt werden hierbei:

- Verfahren zur Bestimmung der maximal möglichen Immission durch Messung eines Referenzsignals und anschließender Hochrechnung (frequenzselektiv, codeselektiv) und
- Strategien zur Ermittlung des vom Aspektwinkel abhängigen Korrekturfaktors ("Antennenkorrekturfaktor") für Anlagen, bei denen der SSB und der PDSCH nicht mit gleicher Leistung (bzw. ERP) und über unterschiedliche Antennendiagramme abgestrahlt werden (Beamforming).

Besonders herauszuheben ist hierbei, dass in dieser Empfehlung besonders viel Augenmerk auf die Bestimmung des "Antennenkorrekturfaktors" gelegt wird und diesbezüglich im Dokument interessante neue Ideen zu finden sind, die in dieser detaillierten Art und Weise bisher noch nirgendwo thematisiert wurden.

Zudem wird bei der Messung der SSS im Vergleich zu allen anderen aktuell vorliegenden Empfehlungen ebenfalls ein etwas abweichender Weg beschrieben (Summation der einzelnen gemessenen SSS einer Sequenz). Auch das Antennendiagramm für die SSS-Abstrahlung wird anders definiert (Summendiagramm) als in anderen Empfehlungen praktiziert (Hüllkurvendendiagramm).

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.

Es kann erwartet werden, dass die Schweizer Behörden - wie bisher bei allen neuen Mobilfunkgenerationen - die Eignung der im vorliegenden technischen Bericht definierten Messstrategien im Rahmen einer Ringmessung ausführlich erproben werden.

2.4.4 Messanweisung der Bundesnetzagentur

2.4.4.1 Grundsätzliches

Seit Anfang März 2020 liegt auch eine vorläufige Messanweisung (BNetzA MA 09/EMF/01) des Prüf- und Messdienstes der Bundesnetzagentur vor. Diese ist von den Messtrupps der BNetzA anzuwenden, insbesondere bei Messungen im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens [BNetzA 20].

Neben Vorgaben zur Messung anderer Funksignale spezifiziert diese Messvorschrift auch die Erfassung der Immission in der Umgebung von 5G-Anlagen im Frequenzbereich bis 6 GHz.

2.4.4.2 Messung der aktuellen Immission

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

2.4.4.3 Bestimmung der maximal möglichen Immission

2.4.4.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Messanweisung beschreibt zwei verschiedene Verfahren zur Bestimmung der maximal möglichen Immission:

- Messungen an Basisstationen, an denen die Funktion „SimuLoad“ (Simulated Load) verfügbar ist. SimuLoad ist eine spezielle Betriebsart der Basisstation, die vom Betreiber oder Systemtechniklieferanten für den Zeitraum der Messung aktiviert werden kann. Ist diese aktiv, können keine „gewöhnlichen“ Teilnehmer mehr mit der Basisstation in Verbindung treten. Vielmehr kann nun eine Volllastung der Zelle über die

Abstrahlung nur eines Beams simuliert werden. Am Messpunkt können dann die durch den CSI-RS Beam maximal erzeugten Feldstärkewerte ermittelt werden (siehe dazu auch Teilkapitel 2.4.2.3.2).

- Messungen an Basisstationen, welche die Funktion SimuLoad zur Erzeugung einer Volllast nicht besitzen: Extrapolation basierend auf der frequenzselektiven Messung eines geeigneten Referenzsignals.

Ähnlich zu den Empfehlungen der IEC 62232 definiert die Messanweisung also ebenfalls die zwei grundsätzlich möglichen Strategien zur Bestimmung der maximal möglichen Immission: Erzwingen der größtmöglichen Abstrahlung in Richtung zum Messort oder Messung eines auslastungsunabhängigen Referenzsignals mit anschließender Extrapolation.

Anzumerken ist noch, dass in der Messanweisung - zusätzlich zu den allgemeinen Vorgaben der Signalmessung und Extrapolation - sehr detailliert messgerätespezifische Angaben zu finden sind. Dies ist nicht verwunderlich, da es sich hier um eine behördeninterne Messvorschrift und nicht um eine allgemeingültige Norm zur Messtechnik hochfrequenter Felder handelt. Zielgruppe sind primär die Mitarbeiter des Prüf- und Messdienstes der BNetzA, die dadurch konkrete Vorgaben zur Einstellung der bei den Messtrupps vorhandenen Messgeräte erhalten.

Ob am Messort nur an einem Punkt die Feldstärke ermittelt beziehungsweise an mehreren Punkten gemessen und anschließend ein räumlicher Mittelwert gebildet wird, oder ob z.B. mit Hilfe der Schwenkmethode das räumliche Feldstärkemaximum gesucht und als Basis für die Expositionsbeurteilung herangezogen wird, ist in der Anweisung nicht genauer spezifiziert.

2.4.4.3.2 Messung mit SimuLoad

Einer der in Deutschland aktiven Netzwerkausrüster (Huawei) bietet bereits für Basisstationen die Möglichkeit an, durch eine interne Software SimuLoad („Simulated Load“) eine Vollausslastung der 5G-Zelle bei Abstrahlung nur eines Beams zu simulieren. Diese Vollausslastung im Zeit- als auch im Frequenzbereich bezieht sich nur auf die Downlink-Kanäle und ermöglicht eine vergleichsweise einfache frequenzselektive Messung. Es werden hierbei die einzelnen CSI-RS Beams individuell angesteuert und winkelmäßig ausgerichtet. Am vorgesehenen Messpunkt ist zu ermitteln, welcher Beam die höchste Grenzwertausschöpfung verursacht. Dieser Feldstärkewert sowie der Gewinnfaktor des Beams ist dann für die weitere Auswertung heranzuziehen (siehe unten).

Für diese Art der Immissionserfassung ist somit ein Eingriff in die Betriebsweise der Basisstation erforderlich. Dazu ist ein Techniker des Betreibers oder Netzwerkausrüsters vor Ort nötig, der die SimuLoad-Betriebsart aktivieren und auf die Worst-Case-Situation einstellen kann. Die Funkzelle muss zudem für den normalen Verkehr (Endgeräte von Kunden) gesperrt werden, damit sichergestellt ist, dass die maximal mögliche EIRP in Richtung zum Messpunkt abgestrahlt wird.

Am Messpunkt wird die vorhandene Feldstärke in einer Bandbreite von 2 MHz um die Mittenfrequenz des CSI-RS (Betreiberangabe) isotrop erfasst. Eine RMS-Glättung hat ebenfalls zu erfolgen. Durch den SimuLoad-Betrieb wird sichergestellt, dass Carrier mit maximaler EIRP am Messpunkt auftreten.

Folgende Schritte zur Extrapolation auf die maximal mögliche Immission sind anschließend erforderlich:

- Die ermittelte Feldstärke ist mittels eines Faktors, der sich aus dem Quotienten der gesamten Signalbandbreite und der äquivalenten Rauschbandbreite des gemessenen Ausschnittes ergibt, zu extrapolieren.
- Für die maximale Immission ist der PDSCH verantwortlich. Da jedoch für die Messung im SimuLoad-Betrieb der CSI-RS-Beam aktiviert wird, ist eine mögliche Differenz der nominalen Antennengewinne zwischen dem CSI-RS Beam und dem PDSCH-Beam rechnerisch zu berücksichtigen.
- Im Falle von TDD-Signalen ist je nach Duty Cycle ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor anzuwenden. Bei dem in der Messanweisung präferierten Messgerät (SRM-3006 von Narda) und einer einzustellenden Mittelungszeit von 2,4 Sekunden muss dieser Faktor nach Maßgabe der Messanweisung nicht angewendet werden, da das Messgerät auch die Mittelung bezüglich des vorhandenen Tastverhältnisses korrekt durchführt. Umgekehrt muss auf den Messwert ein Korrekturfaktor (>1) angewendet werden, wenn eine Hochrechnung auf den ungünstigsten TDD-Betriebszustand erfolgen soll, und dieser zum Zeitpunkt der Messung an der Basisstation durch das SimuLoad-Programm nicht eingestellt war.
- Ein weiterer Korrekturfaktor von 3 dB ist anzuwenden, da im SimuLoad-Betrieb nach Aussage der Messanweisung die Signale im CSI-RS-Beam nur über eine der beiden Antennenpolarisationen abgestrahlt werden. Im realen Betrieb erfolgt die Abstrahlung hingegen über beide Polarisationen, also kann dadurch am Messpunkt eine größere Leistung vorhanden sein.
- Vermisst wird in der Verfahrensbeschreibung die Vorgabe, einen zusätzlichen Leistungskorrekturfaktor zu verwenden, wenn die Subcarrier des CSI-RS auf eine andere Leistung pro RE eingestellt sind, als es bei den PDSCH-Carriern der Fall ist. In diesem Fall ist die reine Bandbreitenkorrektur (Signalbandbreite im Vergleich zur Messbandbreite) nicht ausreichend.

Das beschriebene Verfahren könnte zwar grundsätzlich für Abnahmemessungen zur Überprüfung der Einhaltung von Sicherheitsabständen geeignet sein, der Aufwand für Vorbereitung und Durchführung der Messungen ist aber erheblich. Zudem wird während der Messungen die Leistungsfähigkeit des Funknetzes in der Umgebung des Anlagenstandortes beeinträchtigt. Weiterhin wird in der Vorschrift angemerkt, dass derzeit nur ein Netzwerkausrüster die SimuLoad-Funktion bei seinen Basisstationen anbietet. Bei Stationen anderer Anbieter ist aktuell eine derartige Immissionsmessung nicht möglich. Es muss auf das zweite Verfahren (Messung des SSB und anschließende Extrapolation) zurückgegriffen werden.

2.4.4.3.3 Identifikation der als Basis für eine Extrapolation geeigneten Signale

Als Basis für eine Extrapolation wird der SSB bzw. das dort vorhandene Secondary Synchronization Signal (SSS) herangezogen.

2.4.4.3.4 Frequenzselektive Messung

Die Messung erfolgt mit einem Laboranalysator (FSU von Rohde & Schwarz) unter Zuhilfenahme der von einem zweiten Messgerät (SRM-3006) gesteuerten isotropen Antenne und einer RBW von 2 MHz im Zero Span-Betrieb auf der Mittenfrequenz der SSB (spektrale Vormessung oder Betreiberangabe). Um Messfehler, verursacht durch ein Überdecken des SSB durch den PDSCH zu vermeiden, darf nur der Zeitraum zur Messung benutzt werden, in dem die SSB abgestrahlt werden. Dazu muss mit einem Gated Trigger gearbeitet werden. Dadurch synchronisiert sich die Zeitbereichsmessung auf das Timing der Basisstation auf, so dass die kurzen Zeiträume, in denen ein SSB gesendet wird, sichtbar werden. Der zu verwendende Detektor (Peak oder RMS) wird in der Messvorschrift nicht spezifiziert (Bei einer Anwendung der Peak-Detektors würden die Messergebnisse zu groß ausfallen).

Die Messung erfolgt also mit externem Trigger über einen Funktionsgenerator und ein GPS-Zeitnormal, damit das für die Synchronisation notwendige Trigger-Signal die notwendige Zeitgenauigkeit besitzt. Der Messaufbau ist somit sehr aufwändig und geräteintensiv (vier Geräte plus Steuerrechner und diverse Verkabelung). Ein flexibler, mobiler Einsatz der Messtechnik ist daher vermutlich schwer zu realisieren.

Wegen der Synchronisation auf den Rahmentakt der Basisstation werden am Display des Messgeräts (FSU) alle nacheinander abgestrahlten Broadcast-Beams einer Sequenz im Zeitbereich als einzelne Pulse dargestellt (Betriebsart „Zero Span“). Nun kann der Beam, welcher den höchsten Pegel am Messgerät verursacht, identifiziert und als Basis für die Extrapolation herangezogen werden. Es ist wichtig, dass eine eindeutige Zuordnung zwischen dem stärksten Beam und seinem Antennendiagramm besteht (d.h. es muss bekannt sein, welchen SSB-Index d.h. welche Beam-ID der stärkste Beam besitzt, was durch die Zeitsynchronisation der Messung und Abzählen der aufeinander folgenden SSB's sichergestellt wird). Nur so ist eine spätere Korrektur der Antennengewinne möglich.

Folgende Schritte zur Extrapolation auf die maximal mögliche Immission sind erforderlich:

- Die ermittelte Feldstärke ist mittels eines Faktors, der sich aus dem Quotienten der gesamten Signalbandbreite und der äquivalenten Rauschbandbreite des gemessenen Ausschnittes ergibt, zu extrapolieren.
- Für die maximale Immission ist der PDSCH verantwortlich. Da jedoch für die Messung ein Signal im SSB-Beam verwendet wird, ist eine mögliche Differenz der nominalen Antennengewinne zwischen dem SSB-Beam, aus dem das stärkste gemessene Signal stammt, und dem PDSCH-Beam rechnerisch zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass auch hier wieder die 3D-Diagramme der SSB- und der PDSCH-Beams für die Auswertung der Messergebnisse zur Verfügung stehen müssen. Im Unterschied zur Schweizer Messempfehlung wird hier allerdings nicht thematisiert, wie zu verfahren ist, wenn mehr als eine Sektorantenne für die an der am Messpunkt vorhandenen Immission nennenswert verantwortlich ist (welcher Antennenkorrekturfaktor ist zu verwenden?).
- Bei TDD-Signalen ist je nach Duty Cycle ein zusätzlicher TDD-Korrekturfaktor anzuwenden oder es ist auf die Immission für den Fall einer Übertragung mit den kürzest möglichen Uplink-Pausen (Worst Case) zu referenzieren.

- Vermisst wird in der Verfahrensbeschreibung die Vorgabe, einen zusätzlichen Leistungskorrekturfaktor zu verwenden, wenn die Subcarrier im SSB auf eine andere Leistung pro RE eingestellt sind, als es bei den PDSCH-Carriern der Fall ist. In diesem Fall ist die reine Bandbreitenkorrektur (Signalbandbreite im Vergleich zur Messbandbreite) nicht ausreichend.

2.4.4.3.5 Codeselektive Messung

Eine codeselektive Erfassung von 5G-Signalen ist aktuell (2020) in der Messanweisung der BNetzA noch nicht spezifiziert, da das beim Prüf- und Messdienst vorhandene Messgerät SRM-3006 zum Zeitpunkt des Schreibens der Messanweisung noch keine Dekodieroption für 5G besaß.

2.4.4.4 *Zusammenfassung*

In der Messanweisung der BNetzA werden zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der maximal möglichen Immission spezifiziert:

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

Die erste Alternative kann aktuell nur bei den Basisstationen eines Netzwerkausrüsters angewendet werden. Für alle anderen Stationen ist nur die zweite Alternative möglich.

So lange der Bundesnetzagentur noch keine codeselektiven Messgeräte für 5G zur Verfügung stehen, kann das zweite Verfahren nur mittels einer frequenzselektiven Messung durchgeführt werden. Damit hierbei die Messergebnisse nicht durch überlagerten Verkehr beeinflusst werden, wird in der Messanweisung ein sehr umfangreicher Messaufbau beschrieben, der vermutlich dieses Problem in den Griff bekommt, jedoch die Messungen sehr verkompliziert. Es ist daher zu erwarten, dass die Messvorschrift baldmöglichst auch codeselektive Verfahren beschreiben wird. Alternativ wäre denkbar, dass zukünftig bei allen Standorten eine SimuLoad-Betriebsart möglich wird, wobei zu bedenken ist, dass für diese Art der Messung ein Techniker des Betreibers oder Ausrüsters vor Ort verfügbar sein muss, was bei einer codeselektiven Messung des SSS nicht notwendig ist, da ein Eingriff in die Betriebsweise der Basisstation entfällt.

Bezüglich der Berücksichtigung der unterschiedlichen Antennendiagramme gibt die Messvorschrift Beispieldiagramme zur Erläuterung an, im Vergleich zur Schweizer Messempfehlung bleibt die Ermittlung des Gewinnunterschiedsfaktors hier jedoch vergleichsweise einfach (z.B. keine Fallunterscheidung je nach Lage des Messpunktes relativ zur Antenne). Dies ist nicht unbedingt als Nachteil zu werten, denn es liegen aktuell keine ausreichenden Untersuchungsergebnisse vor, die nahelegen würden, welche Detaillierung notwendig ist, um bei der Antennenfaktorkorrektur regelmäßig ausreichend verlässliche Ergebnisse zu erhalten.

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, die sich stark an die in der Schweiz geübte Praxis anlehnt. Insbesondere die Frage, wie mit der Unsicherheit bei der Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors umgegangen werden soll, wird nicht thematisiert.

2.4.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden vier Dokumente näher gesichtet und analysiert, die Messverfahren zur Immissionsbestimmung bei 5G-Basisstationen behandeln. Dabei handelt es sich um eine Veröffentlichung, welche die grundlegend denkbaren Verfahren beschreibt, ohne auf Details zur praktischen Durchführung näher einzugehen [Kel 19], sowie um drei Dokumente, die korrekte Messungen vor Ort sowie die zusätzlich notwendige Auswertung der Ergebnisse zum Teil sehr detailliert beschreiben [IEC 62232],[METAS 20],[BNetzA 20].

Nicht alle Dokumente beschäftigen sich auch mit Verfahren zur Bestimmung der aktuell vorhandenen Immission bzw. Exposition, der Schwerpunkt liegt vielmehr auf der Spezifikation von Verfahren zur Bestimmung der maximal möglichen Immission. Hierzu werden zwei grundsätzliche Verfahren vorgeschlagen:

- Messung der Maximalimmission durch Erzwingen eines Beams in Richtung zum Messpunkt mit maximal möglicher EIRP.
- Messung (frequenz- oder codeselektiv) eines Referenzsignals und anschließender Hochrechnung.

Der Hauptvorteil des ersten Verfahrens liegt darin, dass hier die Maximalimmission direkt durch Messung des dafür verantwortlichen Signals (PDSCH) bestimmt wird und nicht - wie bei den Verfahren mit Hochrechnung der Fall - die gemessene (und anschließend extrapolierte) Immission von einem Signal generiert wird (SSB, CSI-RS), das bei mMIMO-Antennen mit anderer Strahlungscharakteristik abgegeben wird als der PDSCH, wodurch zusätzliche Unsicherheiten entstehen. Nachteilig hingegen ist, dass bei Anwendung des ersten Verfahrens in die Betriebsweise der Basisstation eingegriffen werden muss, so dass derartige Messungen nur mit personeller Unterstützung durch den Anlagenbetreiber oder Netzwerkausrüster vor Ort vorgenommen werden können.

Für das zweite Verfahren kann festgehalten werden, dass sich die frequenzselektive Erfassung der Referenzsignale vergleichsweise kompliziert gestaltet, wenn sich die Anlage im Wirkbetrieb befindet, sodass Verkehrslast auftreten kann. Zudem kann bei Vorhandensein mehrerer Antennen eines Betreibers am Standort die Extrapolation auf die maximal mögliche Immission nicht zellspezifisch und daher nur mit begrenzter Verlässlichkeit erfolgen.

Daher erscheint die auf einer codeselektiven Erfassung der Referenzsignale basierende Extrapolation die deutlich überlegene Alternative, da diese eine verkehrslastunabhängige und präzisere, weil zellspezifische Hochrechnung ermöglicht.

2.5 Erkenntnisse aus Projekten der Projektnehmer

Die Projektnehmer haben im Rahmen zweier Projekte mit der Deutschen Telekom Technik GmbH in den Jahren 2018 und 2019 Vorarbeiten hinsichtlich der Entwicklung eines Mess- und Hochrechnungsverfahrens zur Bestimmung der Momentan- und Maximalimmission durch Massive-MIMO-Antennen bei LTE- und 5G-Basisstationen geleistet. Die Arbeiten wurden als Beiträge für die BioEM 2019, EMV 2020 sowie BioEM 2020 eingereicht.

Da sich die Entwicklung eines Mess- und Hochrechnungsverfahrens zur Bestimmung der Maximalimmission in zwei voneinander unabhängige Aufgaben separieren lässt, wurden das eigentliche Messverfahren für 5G sowie die Herausforderungen, die Beamforming für die Hochrechnung mit sich bringt, entkoppelt voneinander betrachtet. Die im Rahmen der Vorarbeiten gewonnenen Erkenntnisse zur Bestimmung der Momentanimmission sowie für ein Mess- und Hochrechnungsverfahren zur Bestimmung der Maximalimmission werden nachfolgend vorgestellt.

2.5.1 Messverfahren für 5G zur Bestimmung der Momentanimmission

Das entwickelte Messverfahren zur Bestimmung der Momentanimmission basiert auf der frequenzselektiv messenden Betriebsart „Safety Evaluation“ des Narda SRM-3006, bei der die Immission im gesamten 5G-Kanal eines Betreibers im 3,6-GHz-Band durch Bandintegration bestimmt wird [SKB+ 20]. Damit das Auflösefilter für eine Glättung der kleinskaligen Signalfuktuationen sorgt (analog zum Videofilter in der Betriebsart „Level Recorder“), ist die Auflösesebandbreite (RBW) kleiner als der Trägerabstand der Anlage SCS zu wählen. Da anzunehmen ist, dass die Immission in großem Maße von der Frage abhängt, ob während der Messung ein Traffic Beam zum Messpunkt ausgerichtet ist oder nicht, sollen Messungen sowohl im Standby (kein Datenverkehr, nur Signalisierung), als auch mit provozierte Verkehrslast durchgeführt werden. Die Ausrichtung eines Traffic Beams kann dabei je nach untersuchter Anlage durch ein am Messpunkt aktiviertes 5G-Endgerät provoziert oder durch „simulierte Verkehrslast“ (SimuLoad) erzeugt werden.

Um die zeitlichen Feldstärkevariationen durch eine schwankende Auslastung der Basisstation bei Nutzung eines 5G-Endgeräts bzw. durch einen zeitveränderlichen Ausbreitungskanal sowie die örtlichen Feldstärkevariationen zu erfassen, wird die isotrope Messantenne geschwenkt und im Anschluss der Mittelwert bestimmt. Nach Ansicht der Autoren ist eine Mittelungszeit bzw. Schwenkdauer von 60 s, in die Messwerte aus etwa 40-45 Messdurchläufen einfließen, angemessen, um die lokalen Feldstärkevariationen sowie die zeitveränderlichen Feldstärken durch unterschiedliche Auslastungs- und Beam-Ausrichtungszustände zu erfassen. Vergleichende Untersuchungen mit deutlich längeren Mittelungszeiten (sechs Minuten) zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Ergebnisse der damit durchgeführten Messungen sind in Teilkapitel 0 dokumentiert.

2.5.2 Messverfahren für 5G als Basis für eine Hochrechnung

Für die Entwicklung eines 5G-Messverfahrens, das als Basis für eine Hochrechnung auf Anlagenvollauslastung dienen soll, wurden Untersuchungen zur korrekten Wahl des Messmodus sowie der Messeinstellungen beim Narda SRM-3006 durchgeführt [KBS+ 20]. Da für das

SRM-3006 keine codeselektive 5G-Messoption verfügbar war, wurden *frequenzselektive Messverfahren* untersucht. In einem ersten Schritt wurden unter Laborbedingungen gepulste Sinussignale (vom Duty Cycle her einem WLAN-Bakensignal bzw. einem SSB mit einer Periode von 20 ms entsprechend) leitungsgebunden mit verschiedenen Betriebsarten des SRM-3006 vermessen. Dabei hat sich gezeigt, dass in der Betriebsart „Spectrum Analysis“ Pulse teilweise erst nach einigen zehn Sekunden vom Gerät detektiert wurden. Eine isotrope Feldmessung unter Verwendung der Schwenkmethode ist damit ausgeschlossen. In der Betriebsart „Level Recorder“ wurden die Sinuspulse hingegen unmittelbar pegelrichtig detektiert. Auch eine leitungsgebundene dreiachsige Messung des SSB-ähnlichen Signals führte innerhalb kürzester Zeit zu plausiblen Messergebnissen, sodass diese Betriebsart auch für die Schwenkmethode geeignet ist.

Im Folgenden wurde aufgrund der Erkenntnisse der Labormessungen ausschließlich die Betriebsart „Level Recorder“ weiterverfolgt. Zur Ableitung von optimalen Messeinstellungen am SRM-3006 zur Messung echter 5G-Signale mit rauschähnlichem Zeitverlauf wurden theoretische Überlegungen zur Videobandbreite (VBW) vorgestellt [KBS+ 20]. Im Modus „Level Recorder“ dient das Videofilter zur zeitlichen Glättung von Signalfluktuationen z.B. aufgrund der digitalen Modulation und weist damit eine andere Funktionalität als beim Laborspektrumanalysator auf, bei dem die zeitliche Glättung mithilfe des RMS-Detektors erfolgt und bei dem die Videobandbreite möglichst groß sein soll. Bei der Erfassung gepulster rauschähnlicher Signale mit dem SRM-3006 muss die Mittelungsdauer des Videofilters groß genug sein, um die Immission nicht zu überschätzen, aber auch nur so groß, dass die Immission nicht unterschätzt wird. An einer Anlage im Regelbetrieb wurde messtechnisch validiert, dass bei einem gepulsten Hochfrequenzsignal die optimale Mittelungsdauer zwischen einer halben und ganzen Pulsdauer liegen muss [BKH+ 20]. Dies stellt einen Kompromiss zwischen einer Unterschätzung durch das Einschwingverhalten des Videofilters bei Mittelung über den ganzen Puls und einer Überschätzung durch unzureichende Glättung der Signalfluktuationen bei Mittelung über einen halben Puls dar (für weitere Details zu diesem Sachverhalt sei auf Teilkapitel 3.2 verwiesen). Für eine Messung des SSB-Pulses, der eine Dauer von 4 OFDM-Symbolen (143 μ s) aufweist, liegt die optimale Mittelungsdauer für eine Videobandbreite zwischen 2,2 kHz und 4,5 kHz vor. Für eine Messung des PDSCH, der eine Mindestdauer von einem OFDM-Symbol aufweist, liegt die optimale Mittelungsdauer bei einer Videobandbreite zwischen 8,9 kHz und 17,8 kHz vor.

2.5.3 Pauschales Hochrechnungsverfahren für Massive-MIMO-Antennen (LTE)

Für die Entwicklung eines Hochrechnungsverfahrens wurden zur Reduzierung der Komplexität der Aufgabenstellung zunächst Messungen an einer LTE-TDD-basierten Massive-MIMO-Basisstation im 3,6-GHz-Band durchgeführt [BKS+ 19]. Das zellspezifische Referenzsignal wurde zellweit durch einen Broadcast Beam abgestrahlt, während der Traffic in unterschiedliche Zellrichtungen ausgesendet werden konnte.

Alle Messungen wurden mit dem SRM-3006 von Narda und der zugehörigen triaxialen E-Feld-Antenne durchgeführt. Mit diesem Ansatz konnte das etablierte *codeselektive LTE-Messverfahren* als Basis für eine Hochrechnung verwendet werden (Betriebsmodus „LTE-TDD“). Das Hochrechnungsverfahren von LTE wurde dahingehend erweitert, dass neben dem

konventionellen Hochrechnungsfaktor, der den spektralen Anteil eines Referenzsignalsymbols am Gesamtspektrum einbezieht, ein weiterer Faktor zur Berücksichtigung des Beamformings eingeführt wurde. Dieser Faktor entspricht *pauschal* der Differenz zwischen dem insgesamt größten Antennengewinn der Traffic Beams und dem größten Gewinn des Broadcast Beams (hier: 7 dB). Zur Validierung des pauschalen Hochrechnungsverfahrens wurde mithilfe des Betriebsmodus „Level Recorder“ eine spektrale Messung der Immission durchgeführt, während die Anlage provoziert durch einen FTP-Download eines Endgeräts einen vollausgelasteten Traffic Beam auf den Messpunkt ausgerichtet hat. Dies wurde während der Messung von Vertretern des Netzausrüsters überwacht. Die dabei ermittelten Messwerte wurden als Referenz zum Vergleich mit den hochgerechneten Maximalimmissionen herangezogen.

In Bild 2.5.1 sind die Ergebnisse als farbkodierte Differenz zwischen der codeselektiven Messung mit Hochrechnung und der spektralen Vergleichsmessung dargestellt. Zusätzlich sind die Abdeckungsbereiche von Traffic und Broadcast Beams (als auf die Messebene projizierte Halbwertsbreiten der Antennendiagramme des Broadcast Beams und der Einhüllenden der Traffic Beams) als farbige Flächen gekennzeichnet. Die Ergebnisse zeigen, dass das pauschale Hochrechnungsverfahren an bestimmten Messpunkten zu einer guten Übereinstimmung mit der Referenzmessung führt. Insbesondere gilt das für Messpunkte, die innerhalb der 3-dB-Abdeckungsbereiche von Traffic *und* Broadcast Beams liegen, direkte Sichtverbindung

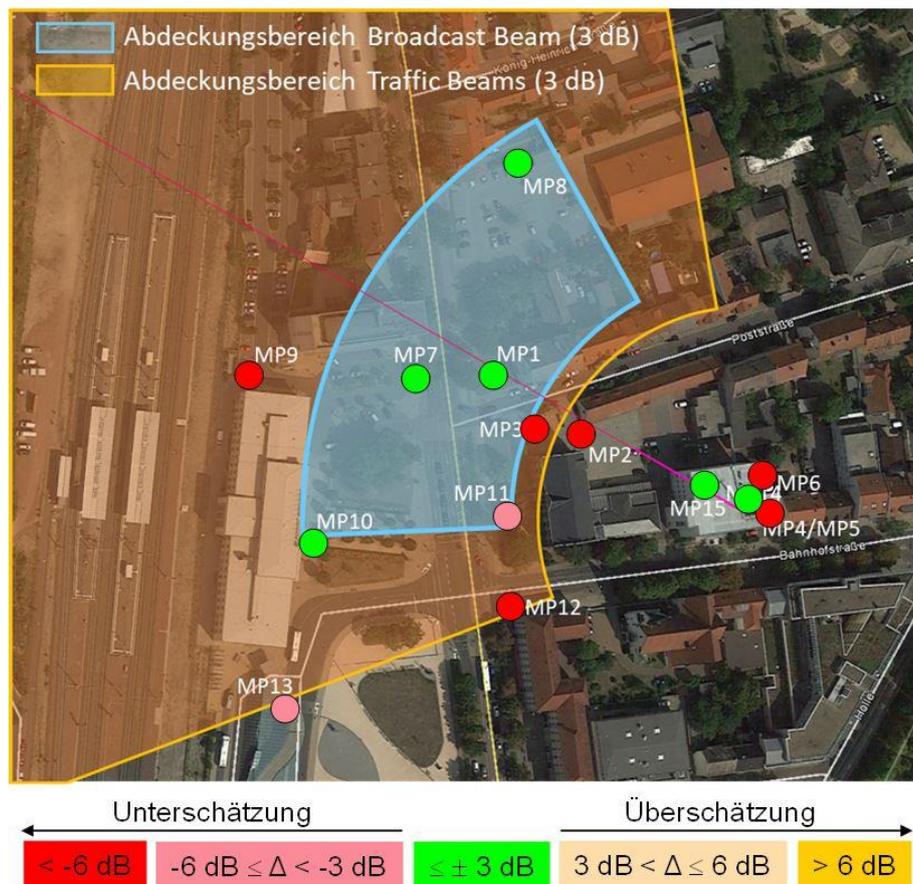


Bild 2.5.1: Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen der auf maximal mögliche Immission hochgerechneten und der gemessenen Immission bei erzwungener Maximalabstrahlung in Richtung zum Messpunkt im Umfeld der untersuchten LTE-TDD-basierten Massive-MIMO-Anlage. Die 3-dB-Abdeckungsbereiche der Einhüllenden der Traffic Beams und des Broadcast Beams sind als orangene bzw. blaue Flächen dargestellt (aus [BKS+ 20]).

(LOS) zur Antenne haben und sich im Außenbereich befinden (MP1, MP7, MP8, MP10). Bereits bei fehlender Sichtverbindung (MP11) kommt es zu Unterschätzungen der Maximalimmission. Auch an anderen Messpunkten wurden teilweise große Unterschätzungen festgestellt, d.h. die durch Extrapolation mittels eines pauschalen Faktors ermittelte Immission fällt deutlich geringer aus, als die real am Messpunkt mögliche Maximalimmission. An MP5 (unterhalb der Anlage, im Anlagengebäude, NLOS) nahm die Unterschätzung mit 33 dB den höchsten Wert an. Aber selbst an günstiger gelegenen Messpunkten wie MP12 (outdoor, LOS zur Antenne, am Rand des 3-dB-Abdeckungsbereiches der Einhüllenden der Traffic Beams) lag durch die pauschale Hochrechnung eine Unterschätzung von 22 dB vor.

2.5.4 Messpunktabhängiges Hochrechnungsverfahren für Massive-MIMO-Antennen

Da das pauschale Hochrechnungsverfahren für Massive-MIMO-Antennen nur an ausgewählten Messpunkten vertretbare Ergebnisse hervorbrachte und vor allem zum Zellrand hin zu teilweise hohen Unterschätzungen der Immission führte, wurde es dahingehend modifiziert, dass der Hochrechnungsfaktor abhängig vom Messpunkt gewählt wird. Konkret bedeutet dies, dass der Unterschied der Antennengewinne zwischen Traffic und Broadcast Beam in Abhängigkeit von Azimut und Elevation zur Massive-MIMO-Antenne bestimmt wird. Das messpunktabhängige Hochrechnungsverfahren wurde im Rahmen von Messungen an zwei 5G-Massive-MIMO-Basisstationen bei 3,6 GHz mit jeweils nur einem Zellsektor angewendet [BKH+ 20]. Die Anlage befand sich während der Messungen zunächst im Leerlauf und es wurde mithilfe der Betriebsart „Level Recorder“ (siehe Teilkapitel 2.5.2) die höchste SSB-Immission durch die sieben ausgesendeten Broadcast Beams gemessen. Anschließend wurde unter Berücksichtigung der ortsabhängigen Antennengewinndifferenzen von Traffic und Broadcast Beams eine Hochrechnung auf Anlagenvollauslastung durchgeführt. Zum Vergleich wurde die Immission erneut im Betriebsmodus „Level Recorder“ gemessen, während die Basisstation durch den Download eines 5G-Endgeräts dazu provoziert wurde einen Traffic Beam mit möglichst vielen Ressourcen auf den Messpunkt auszurichten. Es wird angenommen, dass dies in guter Näherung einer Vollauslastung der Basisstation entspricht.

In Bild 2.5.2 sind die Messergebnisse im Umfeld der beiden Basisstationen als farbkodierte Differenz zwischen auf Anlagenvollauslastung hochgerechneter Immission und bei tatsächlicher Anlagenvollauslastung gemessener Immission (Vergleichsmessung) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen gegenüber dem pauschalen Hochrechnungsverfahren eine deutlich verbesserte Genauigkeit. Die beste Übereinstimmung liegt für Punkte mit LOS zur Antenne und in der Horizontalmitte der Zelle vor (z.B. MP1 und MP4 bei Messung 1 sowie MP4-MP7 bei Messung 2). MP5 (Messung 1) und MP9-MP10 (Messung 2) weisen keine LOS zur Antenne auf, dort wird die Immission um mehr als 6 dB überschätzt. An MP2 und MP7 (Messung 1), die beide am horizontalen Zellrand liegen, kommt es ebenfalls zu einer Überschätzung der Immission um mehr als 6 dB. Es sei darauf hingewiesen, dass die Überschneidung der Abdeckungsbereiche von Traffic und Broadcast Beams bei den hier untersuchten Anlagen im Horizontalschnitt deutlich größer ausfällt, als bei der im Zuge der Untersuchung des pauschalen Hochrechnungsverfahrens in Teilkapitel 2.5.3 untersuchten Anlage. Dennoch zeigen sich mit dem

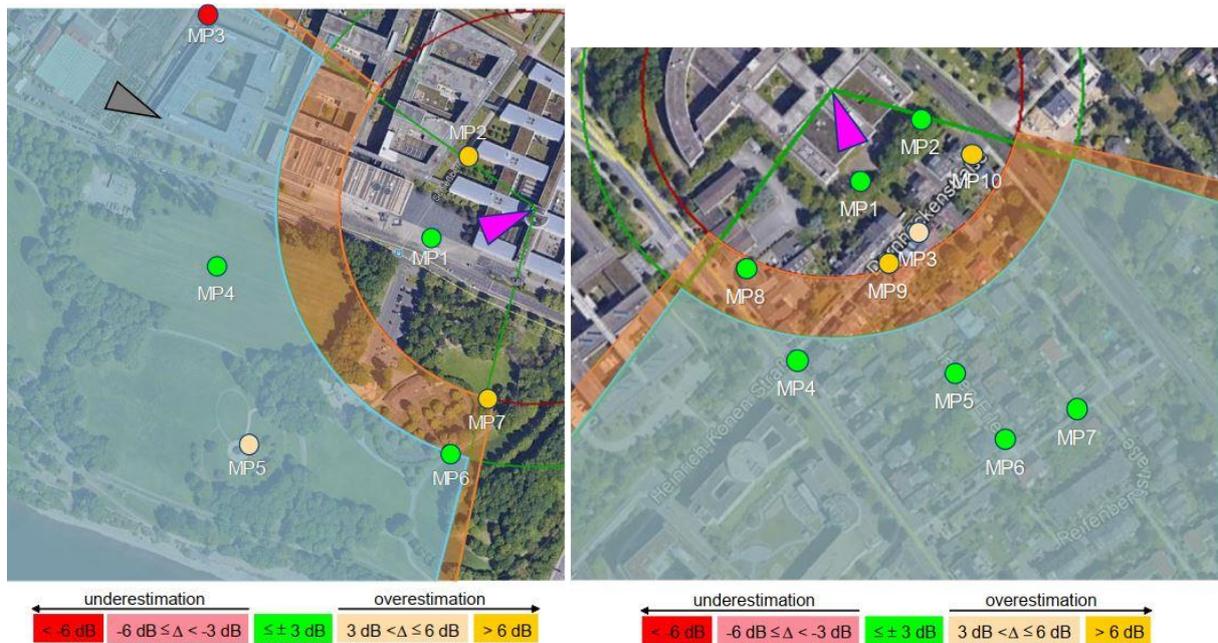


Bild 2.5.2: Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen der auf maximal mögliche Immission hochgerechneten und der gemessenen Immission bei erzwungener Maximalabstrahlung in Richtung zum Messpunkt im Umfeld zweier 5G-Massive-MIMO-Anlagen (links: Messung 1; rechts: Messung 2). Die 3-dB-Abdeckungsbereiche der Einhüllenden der Traffic und Broadcast Beams sind als orangene bzw. blaue Flächen dargestellt (aus [BKH+ 20]).

diesen Verfahren auch außerhalb der gemeinsamen Abdeckungsbereiche sowohl im Horizontal- als auch im Vertikalschnitt gute Übereinstimmungen bzw. Fehlbewertungen mehrheitlich in Form von Überschätzungen.

Bis auf MP3 (Messung 1) wurde keine signifikante (d.h. mehr als 3 dB) Unterschätzung der Immission festgestellt. Wie sich im Nachgang der Messungen herausgestellt hat, befand sich MP3 im Versorgungsbereich einer benachbarten 5G-Anlage mit ebenfalls nur einem Sektor (siehe graues Dreieck in Bild 2.5.2 links), die bei der Bestimmung des ortsabhängigen Hochrechnungsfaktors nicht berücksichtigt wurde. Dadurch, dass das Endgerät aber durch die nicht berücksichtigte Anlage versorgt wurde, fiel der Hochrechnungsfaktor in diesem Szenario zu niedrig aus. Dies unterstreicht nach Ansicht der Autoren die Notwendigkeit einer codeselektiven Messmöglichkeit zur Immissionsbestimmung, da nur auf diese Weise eine gemessene SSB-Immission zuverlässig der verursachenden Zelle zugeordnet werden kann.

2.5.5 Diskussion

Beim Messverfahren zur *Bestimmung der Momentanimmission* wurde das SRM-3006 in der Betriebsart „Safety Evaluation“ verwendet. Dabei muss die Auflösungsbreite RBW so gewählt werden, dass sie nicht größer als der Trägerabstand des 5G-Signals ist, um bei möglichst geringer Dauer pro Messdurchlauf eine angemessene Mittelung zu erreichen. Das Messverfahren ist nach Ansicht der Autoren gut geeignet, um Messungen der Momentanimmission durchzuführen. Der Aufwand dieser Messungen ist gering. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit wurden nicht durchgeführt.

Das entwickelte frequenzselektive *Messverfahren*, das als Basis zur Hochrechnung auf *Maximalimmission* dient und bei dem das SRM-3006 in der Betriebsart „Level Recorder“ verwendet

wird, ist nach Ansicht der Autoren gut geeignet, um die Immission des dominanten SSB zu bestimmen. Das Verfahren wurde unter Laborbedingungen für WLAN sowie für ein gepulstes SSB-ähnliches Signal validiert. Auf theoretischer Basis wurden optimale Messeinstellungen abgeleitet und diese im Nachgang an einer Anlage im Regelbetrieb validiert. Das Messverfahren wurde jedoch nicht leitungsgebunden unter Laborbedingungen anhand eines definierten 5G-Signals im Leerlauf (SSB) überprüft. Zur Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit des Messverfahrens wurden von den Autoren keine Angaben gemacht. Erstere lässt sich jedoch auf das Rauschlevel des SRM-3006 bei der verwendeten Frequenz und der verwendeten Auflösungsbreite (RBW) zurückführen. Der Aufwand zur Durchführung der Messungen ist vergleichbar mit Messungen bei anderen Mobilfunkgenerationen. Das eingesetzte Messgerät ist portabel, es können alle drei Raumachsen quasi-simultan vermessen werden und es kann die Schwenkmethode zur Abtastung des Messvolumens angewendet werden. Da es sich um ein frequenzselektives Messverfahren handelt, liefert es keine verlässlichen Ergebnisse, wenn eine hohe Zellauslastung vorliegt und diese den SSB überdeckt. Außerdem kann die SSB-Immission nicht einzelnen Zellen zugeordnet werden. Aus diesem Grund sprechen sich die Autoren mittelfristig für die Verwendung codeselektiver Messmöglichkeiten aus.

Das *pauschale Hochrechnungsverfahren*, das den Antennengewinnunterschied zwischen Traffic und Broadcast Beams zellweit pauschal berücksichtigt, ist nach Ansicht der Autoren nicht geeignet, um eine verlässliche Aussage über die Maximalimmission zu treffen. Das Verfahren lieferte lediglich an outdoor-Messpunkten im gemeinsamen Abdeckungsbereich von Traffic und Broadcast Beams sowie mit LOS zur Antenne sinnvolle Ergebnisse. An Messpunkten, bei denen diese Bedingungen nicht zutrafen, kam es zu teils massiven Unterschätzungen der Immission.

Das *messpunktabhängige Hochrechnungsverfahren*, das den Antennengewinnunterschied zwischen Traffic und Broadcast Beams abhängig vom Messpunkt und der jeweiligen Lage zur Antenne berücksichtigt, ist nach Ansicht der Autoren besser geeignet, um eine Aussage über die Maximalimmission zu treffen. Gegenüber der pauschalen Berücksichtigung des Antennengewinnunterschieds führt das messpunktabhängige Hochrechnungsverfahren zu einer höheren Genauigkeit in LOS zur Antenne sowie in der Zellmitte. Im Gegensatz zum pauschalen Ansatz führt es bei NLOS sowie am horizontalen Zellrand zu einer Überschätzung der Immission. An den untersuchten Anlagen lag im Vergleich zur Anlage, an dem das pauschale Hochrechnungsverfahren erprobt wurde, im Horizontalschnitt zwar eine deutliche größere Überschneidung zwischen den Abdeckungsbereichen von Traffic und Broadcast Beams vor, jedoch konnte gezeigt werden, dass auch außerhalb der Abdeckungsbereiche im Horizontal- und vor allem im Vertikalschnitt eine gute Übereinstimmung vorlag. Bei den bisher durchgeführten Messungen befand sich ein Großteil der Messpunkte in LOS zur Antenne sowie outdoor. Messpunkte, die indoor lagen, wurden nicht ausgewählt. Insbesondere an diesen Messpunkten aber auch im Allgemeinen ist unklar, wie sich die in der Praxis erzielbare Genauigkeit bei der Bestimmung des relativen Azimuts und der relativen Elevation zur Antenne auf die Unsicherheit des Hochrechnungsverfahrens auswirkt. Inwiefern die Antennendiagramme der Hersteller, aus denen die Gewinnunterschiede abgelesen werden müssen, im Feld repräsentativ sind, ist eine zusätzliche potenzielle Unsicherheit. Ein weiterer Punkt, der nicht unmittelbar das Hochrechnungsverfahren, sondern dessen Validierung betrifft, ist die Frage ob es auch langfristig möglich sein wird, einen vollausgelasteten Traffic Beam auf den jeweiligen Messpunkt

auszurichten, um den Zustand der Anlagenvollauslastung für Vergleichsmessungen zu erzeugen. Da bei einer steigenden Marktpenetration von 5G-fähigen Endgeräten mit einer höheren Zellauslastung zu rechnen ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass weiterhin alle Ressourcen in einen Traffic Beam gebündelt werden. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens wurde nicht untersucht. Gegenüber bisher verwendeten Hochrechnungsverfahren ist der Aufwand beim messpunktabhängigen Hochrechnungsverfahren deutlich erhöht, da der Hochrechnungsfaktor für jeden Messpunkt individuell bestimmt werden muss. Dafür werden Informationen über den relativen Azimut- und Elevationswinkel zur Antenne sowie die Antennendiagramme (d.h. die Differenz zwischen Traffic und Broadcast Beams) benötigt.

2.6 Erkenntnisse aus weiteren Projekten anderer Stellen

2.6.1 Universität Gent und Ericsson (Mobile World Forum)

Im Rahmen einer Förderung durch das Mobile World Forum wurde die Universität Gent (Belgien) mit der Entwicklung eines Messverfahrens für 5G beauftragt. Zusammen mit der Firma Ericsson wurden die Erkenntnisse im Rahmen eines Artikels bei IEEE Access veröffentlicht [AVB+ 19].

Die Autoren setzen sich zum Ziel ein Messverfahren für handelsübliche (Labor-)Spektrumanalysatoren zu entwickeln. Für die Messungen und zur Ableitung der erforderlichen Messeinstellungen wurde der Laborspektrumanalysator und -signalanalysator FSV30 von Rohde & Schwarz verwendet. Zusätzlich wurde eine Messoption genutzt, die die Darstellung eines Spektrogramms im Zeitbereich ermöglicht (FSV-K14). Für die Erfassung des Feldes wird die dreiaxiale Antenne AT6000 von Clampco Sistemi verwendet. Da deren Antennenfaktoren bekannt sind, kann eine Umrechnung auf die elektrische Feldstärke erfolgen. Die für jede Antennenachse bestimmten Feldstärken werden nicht geräteintern, sondern als Nachverarbeitungsschritt vektoriell zu einer Summenfeldstärke addiert. Die Messungen der Downlink-Immission erfolgen stationär im Umfeld einer Anlage an einem festen Messpunkt. Methoden zur räumlichen Abtastung der Feldstärke wie die Schwenkmethode werden nicht angewandt. Zum eingesetzten Antennenkabel werden keine Angaben gemacht.

In [AVB+ 19] wird zur Durchführung aller Messungen ein fünfschrittiges Verfahren präsentiert, das sich abgesehen von Schritt 1 („Spektrumübersicht“ zur Lokalisierung des 5G-Bands) in die Blöcke *Messverfahren* und *Hochrechnungsverfahren* unterteilen lässt. Bei den Messverfahren wird zwischen Messungen zur Bestimmung der Momentanimmission und Messungen zur Hochrechnung auf Anlagenvollauslastung unterschieden. Neben dem Hochrechnungsverfahren zur Bestimmung der Maximalimmission („theoretical maximum exposure“) wird auch kurz auf die in der IEC 62232 vorgestellten Reduktionsfaktoren zur Bestimmung der „actual maximum exposure“ eingegangen, im Verlauf aber nicht weiterverfolgt.

2.6.1.1 Messverfahren zur Bestimmung der Momentanimmission

Bei der Bestimmung der zeitgemittelten Momentanimmission („time-averaged instantaneous exposure“) wird die Feldstärke über die gesamte 5G-Signalbandbreite der untersuchten Basisstation eines Betreibers (max. 100 MHz) fortlaufend gemessen und anschließend zeitlich

gemittelt (z.B. über 6 Minuten). Die Autoren schreiben, dass eine Mittelung über eine Dauer von etwa einer Minute ausreicht, um eine repräsentative Aussage zu treffen.

Zur Durchführung der Messung werden zwei Verfahren vorgeschlagen: Bei der *spektralen Messung* wird der gesamte 5G-Kanal mit einem entsprechenden Span und einer Auflösesebandbreite (RBW) von 1 MHz abgetastet und durch Bandintegration der Effektivwert (RMS-Detektor) bestimmt. Dabei wird zur zeitlichen Glättung bei 101 Sweep-Points (einzustellende Anzahl der Horizontalpixel beim Spektrumanalysator) die Sweep-Zeit so gewählt, dass die Messzeit pro Sweep-Point der SSB-Periodizität (20 ms im Falle der untersuchten Anlage) entspricht (Sweep-Zeit: $(101-1) \cdot 20 \text{ ms} = 2,0 \text{ s}$). Im Anschluss erfolgt eine Mittelung der jeweiligen gemessenen Gesamtfeldstärken über alle Messdurchläufe.

Bei der *Zero-Span-Messung* wird der gesamte 5G-Kanal entsprechend der maximal einstellbaren Messbandbreite des Spektrumanalysators (28 MHz beim FSV30) in mehrere Subbänder zerlegt und die jeweilige Gesamtfeldstärke je Subband mittels RMS-Detektor bestimmt. Dabei wird zur zeitlichen Glättung der Signalschwankungen bei einer Sweep-Dauer von 60 s die Anzahl der Sweep-Points so gewählt, dass die Messzeit pro Sweep-Point der maximal möglichen SSB-Periodizität von 160 ms entspricht (Anzahl der Sweep-Points: $60 \text{ s}/160 \text{ ms} + 1 = 376$). Die je Subband bestimmte Gesamtfeldstärke wird über alle Messdurchläufe gemittelt und abschließend über alle Subbänder aufsummiert. Die Abweichung zwischen beiden Messverfahren lag zwischen 0,4 dB und 1,3 dB, wobei die Zero-Span-Messung niedrigere Werte ergab.

2.6.1.2 Messverfahren zur Bestimmung einer Basis für die Hochrechnung

Für die Bestimmung der Maximalimmission wird die Feldstärke des dominanten SSB als Basis für eine Hochrechnung verwendet. In einem ersten Schritt („step 2“) wird hierzu die Lage des SSB im Spektrum bestimmt. Dazu wird der gesamte 5G Kanal spektral mit einer Auflösesebandbreite RBW von 1 MHz abgetastet, da dies die größte Auflösesebandbreite darstellt, die kleiner als die minimale Bandbreite des SSB ist (1,9 MHz bei 15 kHz Trägerabstand). Die Sweep-Dauer wird so gewählt, dass die Messdauer pro Sweep-Point der Dauer eines SSB (143 μs)

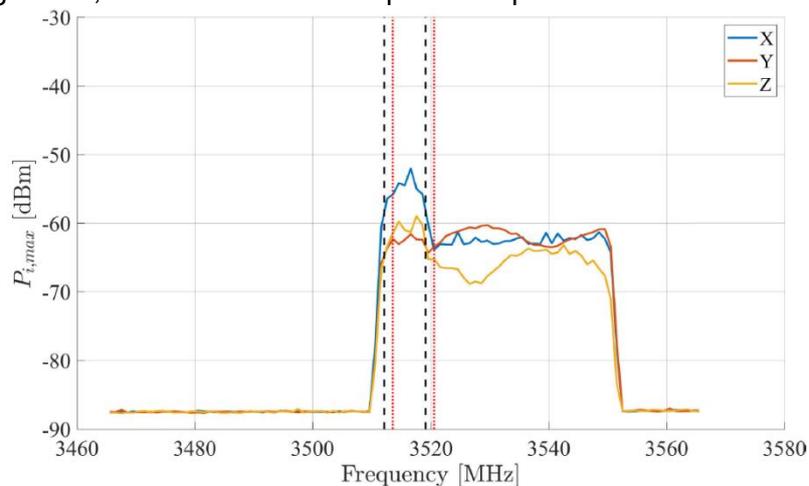


Bild 2.6.1: Detektion der Lage des SSB am unteren Rand des Spektrums im 5G-Kanal (aus [AVB+ 19]). Aufgrund des für 5G festgelegten Frequenzrasters sind nur diskrete Positionen für den SSB im Spektrum möglich (die schwarz gestrichelten und rot gepunkteten vertikalen Linien deuten mögliche Positionen im Spektrum an).

bei einem Trägerabstand von 30 kHz entspricht. Unter der Voraussetzung, dass kein Verkehr von der Basisstation abgestrahlt wird, lässt sich die Lage des SSB im Spektrum bestimmen (siehe Bild 2.6.1).

In einem zweiten Schritt („step 3“) erfolgt dann die eigentliche SSB-Feldstärkemessung auf der Mittenfrequenz des SSB, die im zeitkontinuierlichen Zero-Span-Modus durchgeführt wird. Auch hier beträgt die Auflösungsbreite (RBW) 1 MHz. Die Sweep-Zeit wird so gewählt, dass bei einer hohen zeitlichen Auflösung bei der Anzeige (horizontale Pixelanzahl von 32.001) die Messdauer pro Pixel der Dauer eines OFDM-Symbols bei 30 kHz Trägerabstand entspricht (35,63 μ s). Im Zeitbereich lässt sich die Feldstärke des dominanten SSB bestimmen. Durch eine geschickte Skalierung der x-Achse auf 20 ms (SSB-Periode) und Auftragung aufeinanderfolgender 20-ms-Messungen entlang der y-Achse lässt sich ein Wasserfalldiagramm wie in Bild 2.6.2 erzeugen. Über alle Messdurchläufe einer Antennenachse wird der Median der SSB-Feldstärken bestimmt und bezogen auf ein Resource Element (RE) angegeben. Abschließend werden die E-Feldkomponenten aller drei Antennenachsen aufsummiert.

Zur Validierung der gemessenen SSB-Feldstärke wurde mithilfe des Netzwerkscanners TSME von Rohde & Schwarz und der 5G-Demodulationssoftware ROMES eine codeselektive Bestimmung des RSRP (Reference Signal Received Power) der im SSB enthaltenen Signale PSS und SSS durchgeführt. Die Abweichung zwischen spektraler und codeselektiver Messung lag bei 0,8 dB.

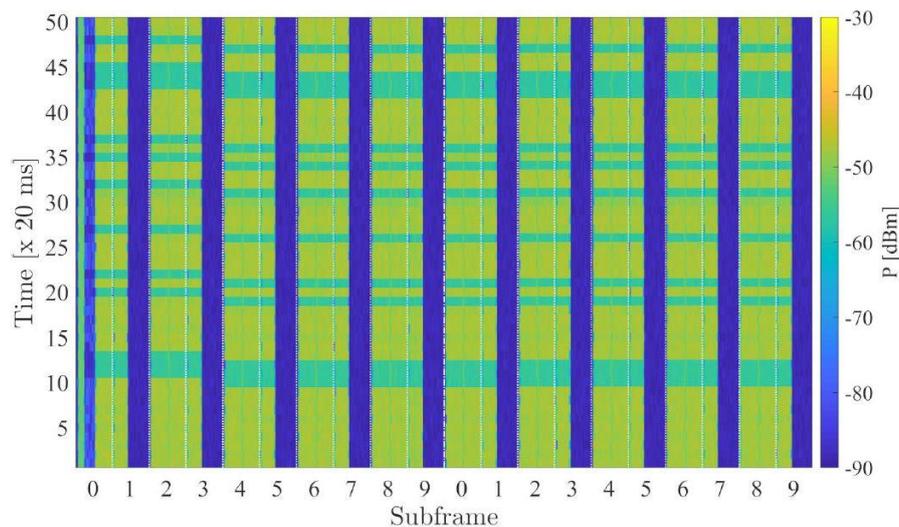


Bild 2.6.2: Darstellung der Empfangsleistung im SSB-Spektrum für eine Antennenachse (1 MHz Auflösungsbreite) im Zeitbereich, während ein vollausgelasteter Traffic Beam auf den Messpunkt ausgerichtet war (aus [AVB+ 19], „waterfall reconstruction“). Dabei sind auf der x-Achse zwei 5G-Frames bzw. eine SSB-Periode (20 ms) dargestellt. Nachfolgende Messungen über jeweils 20 ms wurden entlang der y-Achse aufgetragen, sodass sich das zeitliche wasserfallartige Diagramm ergibt. Zu erkennen ist der einzelne SSB in Subframe 0 (grüne vertikale Linie ganz links) sowie die periodisch auftretenden TDD-Downlink-Pausen (blaue Balken).

2.6.1.3 Hochrechnungsverfahren zur Bestimmung der Maximalimmission

Die eigentliche Hochrechnung auf Maximalimmission („theoretical maximum exposure“) besteht aus drei Nachverarbeitungsschritten:

- 1) *TDD-Faktor*: Der zeitliche Anteil des Downlinks wird aus Messungen bei Vollauslastung bestimmt. Daraus resultiert ein Faktor, der kleiner als 1 ist (im Falle der konkreten Messungen in [AVB+ 19] beträgt der Faktor 0,725). Es wird nicht klar, ob diese Methode, bei der die Anlage in den Zustand maximaler Auslastung gebracht werden muss, seitens der Autoren als erforderlich zur Durchführung von Messungen an einer Anlage angesehen wird.
- 2) *Differenz zwischen SSB- und Traffic-Gewinn*: Aus den Verteilungen der Empfangsleistungen der SSB- und Traffic-Samples während Anlagenvollauslastung (nur für die x-Achse der Antenne ermittelt) wird ein Faktor abgeleitet, der eine Approximation des maximalen Antennengewinnunterschieds zwischen Traffic und Broadcast Beams darstellen soll. Wie in Bild 2.6.3 zu sehen, weisen die Messwerte der SSB in erster Näherung die Form einer Gauß-Verteilung auf, während die Verteilung der Traffic-Samples aus vier unterschiedlichen und teilweise überlagerten gaußähnlichen Verteilungen besteht. Um den maximalen Unterschied der Antennengewinne zwischen Traffic und Broadcast Beams zu bestimmen, wird die logarithmische Differenz zwischen dem Medianwert der leistungsstärksten Verteilung der Traffic-Samples und dem Medianwert der Verteilung der SSB-Samples berechnet (in diesem Fall 7,3 dB).
- 3) *Spektrale Hochrechnung*: Unter Berücksichtigung des TDD-Faktors, der Gewinndifferenz zwischen SSB- und Traffic-Beam sowie der Signalbandbreite bzw. Trägeranzahl wird die auf ein RE bezogene SSB-Feldstärke auf das theoretische Maximum hochgerechnet.

Die an dem Messpunkt durchgeführte Hochrechnung lieferte eine Maximalimmission von etwa 4,7 V/m. Die zur Validierung der Hochrechnung gemessene Feldstärke unter Vollauslastung der Anlage und Ausrichtung des Traffic Beams auf den Messpunkt betrug etwa 3,7 V/m, was in dem Fall auf eine Überbewertung der Immission durch das vorgeschlagene Verfahren um etwa 2,1 dB hindeutet.

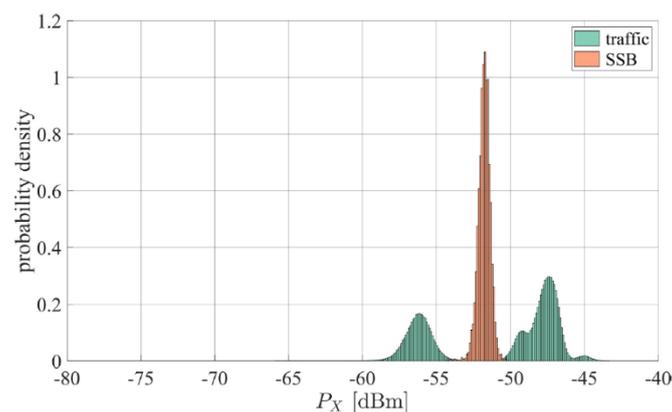


Bild 2.6.3: Histogramm der Empfangsleistungen für SSB-Symbole (orange) und Traffic-Symbole (grün), während die Basisstation vollausgelastet war, zur Ableitung des maximalen Antennengewinnunterschieds zwischen Traffic und Broadcast Beams (aus [AVB+ 19]).

2.6.1.4 Diskussion

Grundsätzlich sind die vorgestellten frequenzselektiven Messverfahren sehr detailliert dokumentiert. Hinsichtlich der eingesetzten Messverfahren und des Messequipments gibt es folgende Anmerkungen:

- Alle Messungen erfolgten separat für jede Antennenachse und daher nur stationär an einem festen Punkt. Mit den eingesetzten Messverfahren ist die Anwendung der Schwenkmethode zur räumlichen Maximalwertsuche daher nicht möglich.
- Die Detektion der spektralen Lage des SSB wurde nur im Leerlauf der Basisstation durchgeführt. Bei Abstrahlung von Verkehr wäre eine Detektion mit dem vorgestellten Verfahren vermutlich nicht möglich.
- Die Ableitung des maximalen Gewinnunterschieds zwischen Traffic und Broadcast Beams erfolgt unabhängig von Angaben des Herstellers bzw. Netzbetreibers, indem die Intensitätsunterschiede von Traffic- und SSB-Symbolen gemessen werden, was grundsätzlich machbar erscheint. Allerdings kann die Bestimmung nur dann funktionieren, wenn während der Messung auch tatsächlich ein vollausgelasteter Traffic Beam auf den Messpunkt ausgerichtet ist. In diesem Fall aber könnte die Maximalimmission bei einer stationären Messung direkt über eine Momentanwertmessung bestimmt werden und es bedürfte keines aufwändigen Hochrechnungsverfahrens mehr. Sollte das vorgeschlagene Verfahren auch zur Anwendung der Schwenkmethode geeignet sein, müsste der Beam hinreichend lange auf den Messpunkt ausgerichtet sein. Des Weiteren müsste die auf Messungen basierende Bestimmung des Gewinnunterschieds individuell für jeden Messpunkt erfolgen, da davon auszugehen ist, dass die Unterschiede zwischen den Richtcharakteristika von Traffic und Broadcast Beams winkelabhängig sind. Dies wiederum würde den Aufwand des vorgestellten Verfahrens erhöhen.
- Es werden keine Angaben zur Empfindlichkeit des eingesetzten Messequipments und Messverfahrens gemacht. Die Genauigkeit (Abweichung zur Referenzmessung) an einem Messpunkt lag für die Messung der SSB-Feldstärke bei 0,8 dB und für die Hochrechnung bei 2,1 dB.
- Der Aufwand zur Durchführung der Messungen ist vergleichsweise hoch. Insbesondere der Einsatz von nicht-mobilem und nicht-batteriebetriebenem Messequipment in Kombination mit der Durchführung von separaten Messungen für alle drei Antennenachsen wird als großer Zusatzaufwand gesehen. Zur Reproduzierbarkeit der Messverfahren gibt es keine Angaben.

Eine Validierung des Messverfahrens an nur einer 5G-Anlage und nur einem Messpunkt wird als nicht ausreichend angesehen, die Tauglichkeit des Messverfahrens nachzuweisen. Zudem ist anhand der Beschreibung nur grob abschätzbar, wo sich der Messpunkt in Bezug zur Zellmitte bzw. zu den Zellgrenzen befand.

2.6.2 Sonstige Arbeiten

Neben den in den vorangegangenen Teilkapiteln vorgestellten Arbeiten wurden wissenschaftliche Publikationen zum Thema Messverfahren für 5G und Massive MIMO durch Recherche in Datenbanken identifiziert. Die Suche erfolgte in den Datenbanken „IEEE Explore“, „Web of Science“, „Scopus“ sowie im „Bioelectromagnetics Journal“. Als Suchbegriffe wurden „5G Exposure“, „5G EMF“, „Massive MIMO Exposure“ und „Massive MIMO EMF“ verwendet. Ein Großteil der Suchergebnisse beschäftigt sich mit Massive-MIMO-Antennen im Millimeterwellenbereich. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Publikationen, die sich mit der numerischen

Expositionserfassung beschäftigen. Nur ein geringer Anteil der Publikationen bezieht sich auf Massive-MIMO-Antennen für Basisstationen im FR1, mehrheitlich wird der Einfluss von Massive MIMO auf die Exposition durch das Endgerät untersucht. Nachfolgend werden die als relevant identifizierten Publikationen vorgestellt.

2.6.2.1 *Agentschap Telecom (Niederlande)*

In [AT 19] wurden Immissionsmessungen im Umfeld dreier Massive-MIMO-Anlagen im 2,6-GHz-Band (LTE) bzw. 3,5-GHz-Band (5G) durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit einem Breitbandmessgerät (Narda NBM-550) sowie mit tragbaren (Narda SRM-3006) und Laborspektrumanalysatoren (Rohde & Schwarz FSV, Tektronix RSA306A). Als Messantenne wurde die Hornantenne EMCO 3115 verwendet. Zu den eingesetzten Messverfahren liegen im Bericht nur wenig Details vor: Alle Messungen außer diejenigen mit dem Breitbandmessgerät wurden spektral durchgeführt. Teilweise wurde in einem sehr kleinen Ausschnitt des Spektrums gemessen (3 MHz) und anschließend auf die Gesamtbandbreite des Kanals extrapoliert.

Die Schlussfolgerungen der Autoren lauten:

- Das Breitband-Feldstärkemessgerät (Narda NBM-550) kann für Messungen von 5G-Signalen eingesetzt werden. Voraussetzung ist, dass das für die Kommunikation mit der Basisstation verwendete und verkehrslasterzeugende 5G-Endgerät nicht zu nah am Messgerät ist, da es ansonsten die Messung beeinflusst. Außerdem sollen alle anderen hochfrequenten Umgebungssignale mindestens 13 dB unter dem zu messenden 5G-Signal liegen. Es wird weiter darauf eingegangen, wie das überprüft werden soll.
- Das Messgerät Narda SRM-3006 eignet sich zur Messung im Lastzustand der Anlage. Es war bei einem Messpunkt in 130 m Entfernung jedoch nicht möglich, die Synchronisierungssignale zu erfassen. Damit konnte das in [Kel 19] vorgeschlagene auf einer Feldstärkemessung des Broadcast Beams basierende Extrapolationsverfahren auf Maximallast nicht überprüft werden.
- Das Narda SRM-3006 scheint für Messungen von 5G-Signalen, die größer als die aktuelle Bandbreite des SRM-3006 (20 MHz) sind, weniger geeignet zu sein.
- Ein Echtzeit-Spektrumanalysator bietet die Möglichkeit 5G-Signale zu visualisieren und Messungen an ihnen durchzuführen.

Hinsichtlich der eingesetzten Messverfahren und der abgeleiteten Schlussfolgerungen gibt es folgende Anmerkungen:

- Die durchgeführten Messungen wurden primär mit dem Ziel durchgeführt, die während der Messung vorliegende *Momentanmission* zu erfassen. Hierfür ist eine Messung mit einer kleineren als der gesamten Signalbandbreite (also z.B. 3 MHz oder 20 MHz) mit anschließender Bandbreitenkorrektur potenziell fehlerträchtig, da der Scheduler in der Basisstation die Frequenzressourcen nicht über das gesamte Frequenzband gleichmäßig verteilt. Bei Verwendung des integrierenden Modes „Safety Evaluation“ des SRM-3006 sind Immissionen für quasi beliebige Signalbandbreiten bestimmbar.
- Messungen mit einer Breitbandmessgerät sind nur dann sinnvoll, wenn die Feldstärke der 5G-Anlage am Messpunkt nicht zu niedrig ausfällt und die Feldstärken anderer

Hochfrequenzsignale deutlich schwächer sind (siehe Teilkapitel 2.4.1 bzw. [Kel 19]). Des Weiteren ist basierend auf einer Breitbandmessung in der Regel keine zuverlässige Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung möglich.

- Der Crestfaktor eines OFDM-Signals beschreibt in der Regel die kleinskaligen Signalleistungsschwankungen die sich aus den Eigenschaften des OFDM-Multiträgersignals ergeben. Diese „schnellen“ Leistungsschwankungen im Mikrosekundenbereich dürfen nicht verwechselt werden mit den „langsamen“ Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Verkehrsauslastung der Basisstation. Zur Berücksichtigung der modulationsbedingten Schwankungen wird am Laborspektrumanalysator in der Regel ein RMS-Detektor verwendet. Beim SRM-3006 wird in den Modi „Spectrum Analysis“ und „Level Recorder“ alternativ ein Videofilter benutzt, dessen Bandbreite sorgfältig zu wählen ist [Wus 19]. Leider liegen aus dem Bericht keine Informationen vor, ob diese Methode der Signalglättung verwendet wurde. Insofern sind die erzielten Messergebnisse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.
- Unklar ist in diesem Zusammenhang auch, was genau mit dem „Average“ Mode gemeint ist. Sofern hier der „Result Type“ des SRM-3006 gemeint ist, führt dies in der Tat zu einer RMS-Mittelung des Signals. Ist hingegen der Average-Detektor eines herkömmlichen Spektrumanalysators gemeint, führt dies zu fehlerhaften Ergebnissen, da aufgrund der geräteinternen Realisierung des Detektors hinter dem Logarithmierer dann über logarithmierte Werte gemittelt wird.
- Warum die Messung des Synchronisierungssignals (gemeint ist wahrscheinlich der SSB) mit dem SRM-3006 nicht zufriedenstellend durchgeführt werden konnte, ist unklar. Vermutlich konnte dieses Signal aufgrund seines gepulsten Auftretens (20 ms Pulsperiode) im verwendeten „Spectrum Analysis“ Mode aufgrund der fehlenden Synchronisation zwischen SSB-Signal und Sweepzeit des SRM nicht stabil gemessen werden. Hier bietet aber z.B. der „Level Recorder“ Mode des Gerätes eine wesentlich bessere und zuverlässigere Möglichkeit, so dass diese Aussage der Autoren nicht verallgemeinert werden darf.

Details zu den Messergebnissen dieser Publikation werden in Teilkapitel 2.7.1 vorgestellt.

2.6.2.2 Telstra (Australien)

In [WKI 19] wurde an einer LTE-TDD-basierten Massive-MIMO-Basisstation im 2,3-GHz-Band über mehrere Zeiträume die über jeweils eine Minute gemittelte Momentanmission bestimmt. Anschließend wurde daraus ein gleitender 6-Minuten-Mittelwert gebildet. Die Messungen erfolgten stationär unter Verwendung von fünf Narda SRM-3006 und zwei SRM-300 mit triaxialen E-Feld-Antennen. Die Autoren machen keine Angaben zur Betriebsart und den Einstellungen der eingesetzten Messgeräte.

In einer anderen Veröffentlichung von Telstra [WW 19] werden Messungen an einer 5G-Massive-MIMO-Basisstation im 3,5-GHz-Band präsentiert. Das Poster mit dem Titel „5 Surveys of 5G“ wurde den Projektnehmern auf Anfrage von der Firma Telstra freundlicherweise zur Verfügung gestellt und enthält wesentlich detailliertere Angaben zu den Messungen als das Abstract Book der BioEM 2019. Während der Messungen wurden mit Hilfe eines HTC 5G Wi-

Fi Smart Hub und eines Samsung Galaxy 10 5G Smartphones Datenverbindungen zur Basisstation aufgebaut, wobei entweder eine Speed-App lief, ein 4k-Video gestreamt wurde oder mit iPerf eine Datenübertragung erfolgte. Die untersuchte Anlage war mit einer Antenne Ericsson AIR 6488 bestückt, die ein 5G-Signal mit 40 MHz Bandbreite mit einer Sendeleistung von maximal 40 W abstrahlte. Der maximale Gewinn von Broadcast und Traffic Beam betrug 17 dBi. Die Messungen wurden „nach IEC 62232:2017 durchgeführt“ (diese Version des Standards enthält jedoch noch keine 5G-spezifischen Geräteeinstellungen bzw. kein 5G-spezifisches Protokoll); die Messergebnisse wurden über 6 Minuten gemittelt. Aus den Bildern des Posters ist zu ersehen, dass das Messgerät Narda SRM-3006 eingesetzt wurde. Offenbar wurde die Schwenkmethode nicht verwendet, sondern die isotrope Messsonde befand sich auf einem Stativ. Im Hinblick auf eine Hochrechnung der bestimmten Feldstärkewerte auf typische zukünftige Realisierungsvarianten (Vervierfachung der Sendeleistung, ein gegenüber dem Broadcast Beam um 7 dB höherer Gewinn der Traffic Beams) wird lediglich ein leistungsbezogener Hochrechnungsfaktor von 4 angegeben.

Leider liegen keine Detailinformationen zum eingesetzten Messverfahren bzw. den verwendeten Messmodi beim SRM-3006 vor, so dass die Tauglichkeit des Verfahrens nicht eingeschätzt werden kann. Positiv hervorzuheben ist, dass während der Messung die 5G-Basisstation mit Endgeräten in einen typischen Auslastungszustand versetzt wurden. Nicht nachvollziehbar ist hingegen, warum bei der Extrapolation auf zukünftig eingesetzte 5G-Konfigurationen nur die höhere Sendeleistung (Faktor 4), aber nicht der 7 dB betragende Gewinnzuwachs der Traffic Beams einbezogen wurde. Wenn man diesen adäquat einbezieht, ergäbe sich ein maximaler zusätzlicher Feldstärkefaktor von etwa 2,2.

Details zu den Messergebnissen dieser Publikation finden sich in Teilkapitel 2.7.2.

2.6.2.3 Regionale Umweltschutzbehörde Lazio (Italien)

In [FCG+ 20] werden Verfahren zur Bestimmung des TDD-Faktors sowie zur Abschätzung des Effekts von Broadcast Beamforming vorgestellt. Selbst formuliertes Ziel der Autoren ist die Quantifizierung der Auswirkungen von Beamforming auf Immissionsmessungen und die Lieferung einer Grundlage für ein Hochrechnungsverfahren zur Überprüfung der Grenzwerteinhalten.

In einem ersten Schritt wurden Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt. Hierfür wurde mithilfe eines vektoriiellen Signalgenerators von Keysight (MXG N5182B) ein 5G-FDD-Signal mit acht SSB pro Burst bei 3,5 GHz erzeugt. Mittels des Signalanalysators Keysight UXA N9040B wurde gezeigt, dass sich die Lage des SSB im Leerlauf der Basisstation durch eine spektrale Messung bestimmen lässt. Die Auswirkungen von Beamforming konnten aufgrund des Umstands, dass es sich um leitungsgebundene und nicht um Over-the-Air-Messungen handelte, nicht gezeigt werden.

Um die Auswirkungen des SSB-Beamforming zu verdeutlichen, wurden an einer kommerziellen 5G-Basisstation im 3,6-GHz-Band mit sechs SSB-Beams Messungen mit dem Signalanalysator Keysight MXA N9020A und der logarithmisch-periodischen Antenne HL050 von Rohde & Schwarz in Kombination mit einem phasenstabilen Kabel von Sucoflex durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Zero-Span-Modus und einer Auflösungsbreite RBW von 620 kHz und einer Sweep-Dauer von 5 ms bei 1001 Horizontalpixeln. Dies führt zu einer Messdauer

von 5 μ s pro Pixel. Es wird lediglich festgestellt, dass die verschiedenen abgestrahlten SSB-Beams durch das Beamforming am Messort unterschiedlich hohe Empfangsleistungen erzeugen, ohne konkret auf die Immissionswerte bzw. Hochrechnungsfaktoren einzugehen.

Abschließend wird noch über Faktoren zur Abschätzung von TDD sowie Beamsweeping zur Verwendung in Hochrechnungsverfahren diskutiert. Das TDD-Verhältnis (der zeitliche Anteil des Downlinks) lässt sich im Zeitbereich durch Zählen der aufeinanderfolgenden Downlink-Symbole zwischen der Übertragung von Uplink-Symbolen bestimmen. Der Faktor zur Abschätzung der Auswirkungen des SSB-Beamforming wird als Verhältnis zwischen mittlerer und maximaler SSB-Empfangsleistung angegeben.

Im Rahmen dieser Publikation werden eher grundlegende Untersuchungen an 5G beschrieben. Hinsichtlich der eingesetzten Messverfahren und -einstellungen gibt es folgende Anmerkungen:

- Die Publikation beschäftigt sich primär mit dem frequenzselektiven Messverfahren zur Bestimmung der SSB-Immission, wobei die Angaben zu Messeinstellungen nicht vollständig sind. Die Messdauer pro Pixel bei der Zero-Span-Messung ist mit 5 μ s deutlich kürzer als ein OFDM-Symbol bei 30 kHz Trägerabstand und könnte zu einer unzureichenden zeitlichen Glättung und somit zu einer Überschätzung der Immission führen. Es werden auch keine Angaben zum Detektor gemacht.
- Die vorgestellte frequenzselektive SSB-Detektion funktioniert lediglich im Leerlauf der Basisstation. Bei Abstrahlung von Verkehr wird der SSB überdeckt.

Die Auswirkungen des SSB-Beamforming werden lediglich durch einen pauschalen Faktor berücksichtigt, der das Verhältnis zwischen mittlerer und maximaler SSB-Empfangsleistung angibt. Es ist unklar, inwiefern dieser Faktor nützlich für eine Hochrechnung sein soll, da die Maximalimmission durch die Traffic Beams und nicht durch die Broadcast Beams bestimmt wird.

2.6.2.4 *Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI, Korea)*

In [JLU+ 19] wird ein Mess- und Hochrechnungsverfahren für 5G auf theoretischer Ebene diskutiert. Die Bestimmung der Maximalimmission soll auf der Messung der SSB-Feldstärke basieren, konkret auf der Feldstärke des PBCH DMRS. Nach Ansicht der Autoren entspricht das PBCH DMRS dem Referenzsignal von LTE. Des Weiteren geben die Autoren an, dass die Sendeleistung des PBCH DMRS konstant ist und dessen Feldstärke codeselektiv bestimmt werden kann. Die Hochrechnung auf Maximalimmission erfolgt über das Verhältnis von maximaler Sendeleistung zur Sendeleistung des PBCH DMRS, was beim Betreiber zu erfragen ist. Außerdem wird der TDD-Faktor berücksichtigt.

Abschließend nehmen die Autoren eine hypothetische Feldstärke des PBCH DMRS von 0,1 V/m an und berechnen, dass sich die maximale Immission auf 3,68 V/m beläuft. In Zukunft planen die Autoren Messungen zur Validierung durchzuführen.

In dieser Publikation werden eher grundlegende Ansätze zu Mess- und Hochrechnungsverfahren für 5G diskutiert. Hinsichtlich der vorgestellten Ideen gibt es folgende Anmerkungen:

- Offensichtlich berücksichtigen die Autoren kein Beamforming. Zum einen behaupten sie, dass das PBCH DMRS bei 5G dem Referenzsignal bei LTE entspricht. Dies ist nur dann der Fall, wenn es nur einen SSB gibt, der zellweit abgestrahlt wird. Im Allgemeinen gilt die Äquivalenz nicht. Zum anderen bezieht der Hochrechnungsfaktor mögliche Antennengewinnunterschiede zwischen Traffic und Broadcast Beams überhaupt nicht ein.
- Es wurden keine Messungen zur Validierung des Mess- und Hochrechnungsverfahrens durchgeführt. Zu Messequipment und -einstellungen für zukünftig durchzuführende Messungen werden keine Angaben gemacht.

2.7 Ergebnisse aus Messkampagnen

In vorliegendem Teilkapitel werden die Rechercheergebnisse aus den Teilkapiteln 2.5 und 2.6 um erhobene Messdaten ergänzt. Die zugehörigen Mess- und Bewertungsmethoden sind bereits in den Teilkapiteln 2.3 und 2.6 beschrieben. Folgende Arbeiten, in denen relevante Daten publiziert wurden, konnten identifiziert werden:

- Niederländische Telekommunikationsbehörde „Agentschap Telecom“, Bericht über Feldstärkemessungen an 5G-Testorten vom 23. September 2019 [AT 19]
- Telstra Australien, Posterpräsentation über 5G-Immissionsmessungen in Australien auf der BioEM 2019 [WW 19]
- Vorarbeiten der Projektnehmer zu 5G-Immissionsmessungen, eingereicht für die BioEM 2020 [SKB+ 20]

2.7.1 Agentschap Telecom

Die Niederländische Telekommunikationsbehörde „Agentschap Telecom“ hat im Zeitraum Februar bis September 2019 Feldstärkemessungen an Mobilfunk-Basisstationen in Groningen, Maastricht und Rotterdam durchgeführt. Diese Anlagen wurden zum Zeitpunkt der Messungen in 5G-Frequenzbändern betrieben. Es wurden eine 4G-Testanlage mit Massive-MIMO-Antennen und zwei 5G-Testanlagen untersucht. Die Sendeleistungen und Bandbreiten der Versuchsanlagen hingen während der Messungen von der 5G-Testanordnung und der erteilten Versuchslizenz ab. Deswegen weist die Telekommunikationsbehörde in ihrem Bericht [AT 19] darauf hin, dass die Messungen nicht repräsentativ für die erwartete 5G-Praxis in Bezug auf Sendeleistung und Datenverkehr sind und nur einen *Hinweis* auf die Feldstärken einer Massive-MIMO-Antenne geben.

Die Messungen wurden sowohl bei Verkehrslast („Traffic Mode“; mit einem Endgerät oder mit simulierter Last erzeugt), als auch im Standby-Modus („Broadcast Mode“) durchgeführt. An der Anlage in Rotterdam wurde festgestellt, dass die durchschnittlichen Immissionen bei Verkehrslast etwa 12 dB höher sind als im Standby-Modus. Für die Messungen wurden sowohl ein Breitbandmessgerät (Narda NBM-550), als auch diverse tragbare (Narda SRM-3006) und Laborspektrumanalysatoren (Rohde & Schwarz FSV, Tektronix RSA306A) sowie eine Hornantenne (EMCO 3115) genutzt.

Alle Messungen außer diejenigen mit dem Breitbandmessgerät wurden spektral durchgeführt. Teilweise wurde in einem sehr kleinen Ausschnitt des Spektrums gemessen (3 MHz) und nachher auf die Gesamtbandbreite des Kanals extrapoliert.

Bei den Messungen wurden folgende Immissionswerte festgestellt:

Tabelle 2.11: Übersicht der Feldstärkemessungen in den Niederlanden, aus [AT 19]. Bei „statisch mMIMO“ war der Traffic Beam auf eine feste Ausrichtung eingestellt.

Ort	Antenne	Frequenz	Messabstand	Technologie	Feldstärke
Groningen	statisch mMIMO	2605 MHz	53 m	LTE	3 V/m
Maastricht	dynamisch mMIMO	3465 MHz	140 m	5G NR	1,1 V/m
Rotterdam	dynamisch mMIMO	3675 MHz	170 m	5G NR	2,6 V/m

In der Diskussion wird unter der Rubrik „Spitzenwert oder Durchschnittswert messen?“ thematisiert, dass die Spitzenwerte bis zu 12 dB über dem Durchschnittswert liegen können. Dies wird auch als Crestfaktor (oder PAPR, Peak to Average Power Ratio) des OFDM-Signals bezeichnet. Als Konsequenz wird abgeleitet, dass zur korrekten Erfassung der so genannte „Average Mode“ anstatt des „Peak Mode“ am Messgerät verwendet werden soll. Hierbei ist anzumerken, dass die korrekte zeitliche Mittelwertbildung gemäß ICNIRP-Richtlinien unbedingt mit einem RMS-Detektor (oder äquivalent) und nicht mit einem Mittelwertdetektor am Spektrumanalysator erfolgen sollte.

Grundsätzlich erscheinen die gemessenen elektrischen Feldstärken plausibel. Die eingesetzten Messverfahren und abgeleiteten Schlussfolgerungen der Autoren werden in Teilkapitel 2.6.2.1 diskutiert.

2.7.2 Untersuchungen von Telstra

Das Telstra Innovation Centre Team hat zusammen mit den Partnern Ericsson, Narda und Total Radiation Solutions im Zeitraum November 2018 bis Mai 2019 messtechnische Immissionsuntersuchungen an 5G-Basisstationen in Australien durchführen lassen und auf der BioEM 2019 als Poster präsentiert. Ziel der Untersuchungen waren EMF-Messungen in der Nähe von 5G-Basisstationen von Telstra unter typischen Nutzungsbedingungen an „Orten von öffentlichem Interesse“. Diese beinhalteten Sportanlagen, Straßen, Cafés und Wohnungen.

Die untersuchten Anlagen waren jeweils mit Antennen des Typs Ericsson AIR 6488 bestückt, die ein 5G-Signal bei 3,5 GHz und 40 MHz Bandbreite mit einer Sendeleistung von maximal 40 W abstrahlten. Der maximale Gewinn von Broadcast und Traffic Beam betrug 17 dBi.

Während der Messungen wurden mit Hilfe von Smartphones typische Datenverbindungen zur Basisstation aufgebaut (Speed-App, Streaming eines 4k-Videos, Datenübertragung mit iPerf). Die Entfernung der Messpunkte zur jeweiligen 5G-Anlage betrug zwischen 75 m und 200 m.

Die Messergebnisse in öffentlichen Bereichen erreichten leistungsbezogene Grenzwertschöpfungen zwischen 0,0003 und 0,025 % des ICNIRP-Referenzwertes. Rechnet man diese Werte auf elektrische Feldstärken um, ergibt sich ein Bereich von etwa 0,1 bis 1 V/m. Messungen auf einem für die Allgemeinheit nicht zugänglichen Dach ergaben Messwerte zwischen 0,019 % und 0,8 % der ICNIRP-Leistungsflussdichte-Referenzwerte entsprechend 0,8 und

5,5 V/m. Nach Angaben der Autoren können diese Messwerte auf typische zukünftige Realisierungsvarianten (80 MHz Bandbreite und 160 W Leistung, maximal 17 dBi im Broadcast Beam und maximal 24 dBi im Traffic Beam) hochgerechnet werden; damit ergäbe sich laut Autoren ein leistungsbezogener Hochrechnungsfaktor von 4. Somit betrügen die resultierenden Feldstärken dann umgerechnet 0,2 bis 2 V/m (öffentliche Bereiche) und 1,6 bis 11 V/m (Dach, kontrollierbarer Bereich). Die Schlussfolgerung der Autoren lautet, dass die ermittelten 5G-Immissionen weit unterhalb der ICNIRP-Referenzwerte liegen und in vielen Fällen weniger als ein Promille (als leistungsbezogene Grenzwertausschöpfung) betragen.

Die maximalen Messwerte erreichen ähnliche Werte wie in den Untersuchungen der niederländischen Telekommunikationsbehörde und sind damit plausibel. Eine Diskussion des Messverfahrens und der -einstellungen findet sich in Teilkapitel 2.6.2.2.

2.7.3 Arbeiten der Projektnehmer

2.7.3.1 Bestimmung der Momentanimmission in 5G-Zellen

Die Projektnehmer haben im Rahmen des bereits in Teilkapitel 2.5 angesprochenen Projektes mit der Deutschen Telekom Technik GmbH im Jahr 2019 unter anderem auch Immissionsmessungen mit dem Ziel vorgenommen, einen ersten Anhaltspunkt über die Veränderung der Immissionssituation im Umfeld von 5G-Basisstationen zu bekommen. Die Arbeiten wurden als Beitrag bei der BioEM 2020 veröffentlicht [SKB+ 20].

Die Messungen der zeitgemittelten Momentanimmission (siehe Teilkapitel 2.5.1) wurden dabei an vier Messpunkten im Umfeld von drei 5G-Anlagen im Frequenzbereich um 3,5 GHz in Bonn und Darmstadt durchgeführt. Hinsichtlich der Messpunkte wurde der Fokus auf typische Aufenthaltsbereiche von Personen gelegt, wie z.B. an einer Bushaltestelle. In Tabelle 2.12 sind die Messpunkte mit ihren Entfernungen und Sichtverbindungen zur Basisstation dokumentiert.

Tabelle 2.12: Übersicht über die Messpunkte der Messungen aus [SKB+ 20]

Messpunkt	Distanz zur Basisstation	Sichtverbindung	Ort
MP1	150 m	Ja	Bonn, Anlage 1
MP2	157 m	Ja	Darmstadt
MP3	253 m	Nein	Bonn, Anlage 2
MP4	96 m	Ja	Bonn, Anlage 2

Für die Messungen wurde das Gerät Narda SRM-3006 mit isotroper Feldstärkesonde in der Betriebsart „Safety Evaluation“ verwendet. Die Feldstärke wurde sowohl im Standby der Basisstation (nur Signalisierung) als auch mit provozierte Verkehrslast gemessen. Dabei wurde an den Anlagen Bonn 1 und Darmstadt die Ausrichtung eines Traffic Beams durch ein am Messpunkt aktiviertes 5G-Endgerät provoziert; bei Bonn 2 wurde die Anlage mit „simulierter Verkehrslast“ (SimuLoad) betrieben, wobei hier der Traffic Beam nicht genau auf die beiden Messpunkte MP3 und MP4 ausgerichtet werden konnte. Tabelle 2.13 zeigt die ermittelten Feldstärkewerte:

Tabelle 2.13: Ergebnisse der 5G-Messungen aus [SKB+ 20]

MP	Feldstärke im Standby	Feldstärke bei Verkehr	Feldstärkedifferenz
MP1	0,14 V/m	2,4 V/m	24,7 dB
MP2	0,05 V/m	2,4 V/m	33,6 dB
MP3	0,02 V/m	0,06 V/m	9,5 dB
MP4	0,10 V/m	0,47 V/m	13,4 dB

Die Feldstärkewerte bei Verkehr liegen insbesondere an den ersten beiden Messpunkten im Bereich der Werte, die auch bei den in Teilkapitel 2.7.1 beschriebenen Messungen in den Niederlanden festgestellt wurden. Vor allem an MP3 und in geringerem Maße auch an MP4 ist der Messwert jedoch deutlich geringer, was bei MP3 neben dem nicht direkt auf den Messpunkt ausgerichteten Traffic Beam primär auf die nicht vorhandene Sichtverbindung zur Anlage zurückgeführt werden kann.

Die Feldstärkedifferenz zwischen Verkehr und Standby schwankt zwischen 9,5 dB und 33,6 dB. Bei den Messpunkten MP3 und MP4 weist sie ähnliche Werte auf wie bei den Messungen in den Niederlanden (12 dB). Da bei MP3 und MP4 der Traffic Beam aber nicht genau auf den Messpunkt ausgerichtet war, liegt die Vermutung nahe, dass dies auch bei den Messungen in den Niederlanden der Fall gewesen sein könnte. Bei den MP1 und MP2 erreicht die Differenz bei direkt auf den Messpunkt ausgerichtetem Traffic Beam deutlich höhere Werte

2.7.3.2 Einfluss von Beamforming auf die lokale Immission in einer 5G-Zelle

Zur Bestimmung der Auswirkungen von Beamforming auf die lokale Immission in einer 5G-Mobilfunkzelle wurden von den Autoren außerhalb des Projektrahmens weitere Untersuchungen durchgeführt und im Rahmen der Konferenz BioEM 2021 vorgestellt [KBW+ 21]. Hierzu wurde an drei verschiedenen gelegenen Punkten in der Zelle die 5G-Immission gemessen, während ein aktives in das 5G-Netz (3,6 GHz) eingebuchte Endgerät, auf dem ein Speed-Test lief, durch die Zelle bewegt wurde. Zusätzlich wurde an einem Messpunkt die 4G-Immission bestimmt, während über das durch die Zelle bewegte Endgerät ein Speed-Test über 4G (900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz und 2,6 GHz) durchgeführt wurde. Bei der Auswahl der Wege wurde darauf geachtet, dass möglichst alle Horizontalwinkel und ein möglichst großer Vertikalwinkelbereich zwischen Basisstationsantenne und Endgerät abgedeckt werden, um den Einfluss von Beamforming auf die lokale Immission veranschaulichen zu können.

Die Messungen zeigen, dass aktive Beamforming-Antennen im Gegensatz zu passiven Antennen in der Lage sind, einen Großteil der Leistung gezielt in die Richtungen abzustrahlen, in denen sich zu versorgende Nutzer befinden (Hauptkeule des Antennenendiagramms). Die Abstrahlung durch die Nebenkeulen des Antennenendiagramms sind deutlich reduziert. So beträgt der festgestellte Immissionsunterschied zwischen den Fällen, dass sich der Messpunkt innerhalb der Hauptkeule oder außerhalb der Hauptkeule (Nebenkeule) der Traffic Beams befindet, bis zu 13 dB. Der Immissionsunterschied nimmt ab, sofern sich der Messpunkt hinsichtlich des Vertikalwinkels nicht in der Hauptkeule befindet und ohnehin nur über Nebenkeulen bzw. Reflexionen versorgt werden kann. Sofern sich der Messpunkt hinsichtlich des Vertikalwinkels im

Bereich der Hauptkeule befindet, hängt die resultierende Immission am stärksten vom Horizontalwinkelunterschied zwischen Messpunkt und aktivem Endgerät ab. Hierbei ist zu beachten, dass der Traffic Beam einen Öffnungswinkel (HPBW) mindestens in der Größenordnung 10° aufweist und die Immission daher nicht punktuell auf das Endgerät begrenzt sein kann, sondern Zellbereiche ausgeleuchtet werden. So führt die Bewegung des Endgeräts aus Sicht des Messpunktes in einem Horizontalwinkelbereich von -13° bis $+18^\circ$ zu keiner signifikanten Änderung der Immissionshöhe. Bei einem verschobenen Horizontalwinkelbereich von 12° bis 44° ist der Effekt auf die Immission durch das Beamforming hingegen bereits sichtbar.

Bei passiven Basisstationsantennen (4G) sollte die lokale Immission in der Zelle prinzipiell unabhängig von der Position des Endgeräts in der Zelle sein. Die Messungen haben jedoch gezeigt, dass bei Nutzung von Carrier Aggregation je nach Versorgungslage bzw. Standort des aktiven Endgeräts Secondary Serving Cells zwischen unterschiedlichen Basisstationen gewechselt werden können, was sich auch auf die lokale Immission in der Zelle auswirkt. Insgesamt fallen die Auswirkungen auf die Immission jedoch geringer aus als bei Beamforming-Antennen.

3 Entwicklung und Vorschlag von Messverfahren zur Bestimmung von 5G-Immissionen

Im vorliegenden Kapitel werden unter Berücksichtigung der Arbeiten in Kapitel 2 in-situ-Messverfahren zur Bestimmung der Immission von 5G-Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen entwickelt und vorgeschlagen. In der Praxis grundsätzlich vorhandene starke zeitliche und räumliche Immissionsschwankungen, die z.B. auf die zeitabhängige Zellauslastung sowie durch Veränderung des Ausbreitungspfades und Interferenz zurückzuführen sind, fließen je nach Messverfahren unterschiedlich in das Messergebnis ein. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird das Augenmerk insbesondere auf jene zeitlichen und räumlichen Immissionsschwankungen gelegt, die sich durch die dynamische Abstrahlcharakteristik beim Beamforming ergeben.

Im Hinblick auf die Messverfahren wird zwischen der Bestimmung der Momentanimmission sowie der Maximalimmission unterschieden. Die *Momentanimmission* ist die zur Messzeit vorherrschende Immission an einem Immissionsort im Einwirkungsbereich von ggf. mehreren Anlagen. Sie kann prinzipiell als Maß für typische Immissionen verwendet werden. Aufgrund der sich schnell ändernden Immissionshöhen durch schwankende Zellauslastung und Beamforming wird die Momentanimmission gemittelt über ein verhältnismäßig kurzes Zeitintervall bestimmt und ist nicht mit dem 6-Minuten-Mittelwert gleichzusetzen. Das Messverfahren zur Bestimmung von Momentanimmissionen wird in Teilkapitel 3.1 vorgestellt.

Die *Maximalimmission* ist die am Immissionsort unabhängig vom Zeitpunkt der Messung maximal mögliche Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung. Die Bestimmung kann, wie bei den bisherigen Mobilfunkstandards 2G, 3G und 4G, durch Hochrechnung der Immission eines verkehrslastunabhängigen Signalisierungssignals auf höchste betriebliche Anlagenauslastung erfolgen. Bei 5G eignet sich hierfür der SS/PBCH Block (SSB). Das Messverfahren, das auf einer frequenzselektiven Messung der SSB-Immission basiert, wird in Teilkapitel 3.2 vorgestellt. In Teilkapitel 3.3 werden Untersuchungen zu Messgeräten vorgestellt, mit denen eine codeselektive Messung der SSB-Immission möglich ist. Basierend auf der frequenz- oder codeselektiv gemessenen Immission wird in Teilkapitel 3.4 das Hochrechnungsverfahren zur Bestimmung der Maximalimmission vorgestellt, in dem auch die dynamische Abstrahlcharakteristik der Beamforming-Antennen berücksichtigt wird. Alternativ kann die Bestimmung der maximal möglichen Immission auch durch direkte Messung bei provozierter Vollauslastung durch ein Endgerät erfolgen. Das Verfahren wird in Teilkapitel 3.5 vorgestellt.

3.1 Messverfahren zur Bestimmung der 5G-Momentanimmission

Basierend auf dem Feldstärkemessgerät SRM-3006 von Narda wird im Folgenden ein Messverfahren vorgestellt und erläutert, das in der Lage ist, einen räumlich und zeitlich geeignet gemittelten Wert für die Momentanimmission zu liefern. Die Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf konventionelle Laborspektumanalysatoren übertragen.

3.1.1 Anforderungen an den Mittelungsprozess

3.1.1.1 Zeitliche Mittelung

Unter Momentanimmersion ist ein Messwert der am Messort vorhandenen Feldstärke zu verstehen, der die aktuell dort vorhandene Hochfrequenzimmersion angibt. Dabei ist darauf zu achten, dass bei deren Bestimmung kein länger andauernder Mittelungsprozess zugrunde liegt, da es bei Mobilfunkbasisstationen zu auslastungsabhängiger Leistungsabstrahlung und damit zu Feldstärkeschwankungen am Immissionsort kommt. Bei 5G-Anlagen mit mMIMO kann zusätzlich noch eine deutliche Veränderung der am Messpunkt vorhandenen Feldstärke durch die dynamische Abstrahlcharakteristik der Antennen entstehen. Die Messzeit sollte also so kurz sein, dass zwar die im Signal vorhandenen kurzzeitigen Pegelfluktuationen, die durch die Modulation bzw. die pulsartige Struktur erzeugt werden, korrekt ausgemittelt sind, jedoch die im Vergleich zur Pulslänge langsamen auslastungsabhängigen bzw. durch das Beamforming verursachten Schwankungen noch keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis ausüben.

Da bei 5G die größte zeitliche Periode im Downlinksignal durch die Periodizität der SSB-Bursts (20 ms) bestimmt wird, kann dieser Wert als untere Grenze für die Messzeit angesehen werden. In der Praxis sind jedoch etwas größere Messzeiten sinnvoll, denn das Messgerät benötigt zur Durchführung der spektral-integrativen Messung über eine bestimmte Signalbandbreite eine bestimmte Messzeit. Zudem ist bei der Durchführung einer isotropen Messung zu berücksichtigen, dass die drei orthogonal zu einander stehenden Dipole des Sensors nacheinander an den Analysator geschaltet werden, was die Messzeit gegenüber der einachsigen Messung mindestens verdreifacht.

Eine Mittelung über einen Zeitraum von beispielsweise sechs Minuten (wie es in einigen Empfehlungen und Normen für manche Arten von Messungen empfohlen wird) liefert bei Signalen von Mobilfunkbasisstationen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr die Momentanimmersion, sondern bereits einen Messwert, auf dessen Größe langsame Pegelfluktuationen bereits einen nennenswerten Einfluss ausgeübt haben können.

3.1.1.2 Räumliche Mittelung

Erfolgt die Messwertaufnahme lediglich an einem festen Punkt, sind Pegelunsicherheiten in der Größenordnung von 10 dB und mehr möglich, die durch Mehrwegeausbreitung und die dadurch verursachten räumlichen Feldstärkeschwankungen verursacht werden (siehe dazu beispielsweise die Ausführungen in [BSW 06]).

Um diese Messunsicherheit zu verringern, wird in vielen Normen eine Messung an mehr als einem Punkt im Untersuchungsvolumen, gefolgt von einer räumlichen Mittelung der Einzelmesswerte vorgeschlagen. Die EN 50492 [EN 50492] schlägt beispielsweise für Messungen, bei denen die über das Körpervolumen einer stehenden Person gemittelte Immersion als Beurteilungsgröße herangezogen werden soll, eine isotrope Erfassung an drei oder sechs Punkten in einer fest definierten räumlichen Geometrie mit anschließender leistungsbezogener Mittelwertbildung vor (siehe Bild 3.1.1).

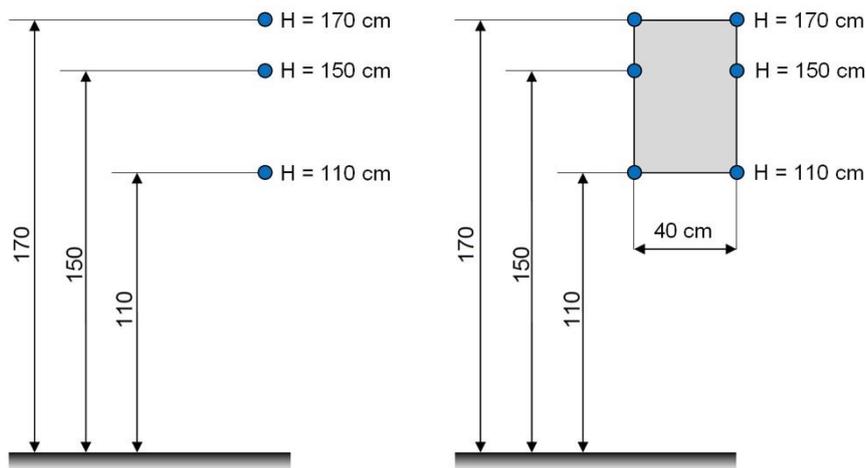


Bild 3.1.1: Punktrastermethode, Rastergeometrie nach [EN 50492].

3.1.2 Vorgeschlagenes Verfahren

Beim vorgeschlagenen Verfahren wird folgender Ansatz für den Mittelungsprozess verfolgt: Jeder durch das Messgerät ermittelte Feldstärkewert soll bereits einen korrekten Momentanimmissionswert im Hinblick auf die zeitliche Mittelung darstellen. Im Falle einer Messung an einem festen Punkt könnte die Momentanimmission auf diese Weise in einem Messdurchlauf bestimmt werden. Für den Fall einer räumlichen Mittelung wie in Teilkapitel 3.1.1.2 gefordert erfolgt die Mittelwertbildung auf Basis einzelner zeitlich bereits korrekt gemittelter Momentanimmissionswerte, sodass keine undefinierte Mischung aus zeitlicher und räumlicher Mittelung entsteht.

3.1.2.1 Umsetzung der zeitlichen Mittelung

Zur Messung der aktuellen Immission eines ganzen Kanals eignet sich beim SRM-3006 die Betriebsart „Safety Evaluation“. Im Gegensatz zu den Betriebsarten „Spectrum“ und „Level Recorder“ ist diese in der Lage, innerhalb eines Messdurchlaufs die Summenimmission einer Immissionsquelle in einem breiten Spektrum zu erfassen (d.h. auch über die in Deutschland für 5G maximale Kanalbandbreite von 90 MHz im 3,6-GHz-Band). Ziel bei der Bestimmung der Momentanimmission ist die Ermittlung des thermischen Äquivalents, d.h. des leistungsbezogenen Mittelwerts (RMS-Wert) der Immission des rauschähnlichen 5G-Signals. Dieses lässt sich beim SRM-3006 in der Betriebsart „Safety Evaluation“ grundsätzlich auf zwei Arten bewerkstelligen:

1. Mittelung über mehrere Messdurchläufe: Bei Anzeige des Result Types „Average“ werden die erfassten Immissionen über mehrere aufeinanderfolgende Messdurchläufe gemittelt. Der angezeigte Wert ist hierbei weitestgehend unabhängig von der Bandbreite des für die Messung verwendeten Auflösefilters (RBW), d.h. die Breite der Intervalle, in die das zu messende Signal zur schrittweisen Integration unterteilt wird. Da die Dauer für einen Messdurchlauf mit steigender RBW sinkt, ist prinzipiell eine möglichst große RBW zu empfehlen. Allerdings ist auf diese Weise zwingend über eine große Anzahl von Messdurchläufen zu mitteln, da die einzelnen Messwerte keine zeitlich korrekt gemittelten Momentanimmissionen darstellen.

2. Mittelung durch ein schmales Auflösefilter: Bei Anzeige des Result Types „Actual“ und gleichzeitig einer im Vergleich zur Signalbandbreite sehr kleinen Auflösesebandbreite der Messung (RBW) wird die erfasste Immission bereits nach einem Messdurchlauf zeitlich korrekt gemittelt geliefert [Kel 09] (für nähere Details zum Mittelungsprinzip sei auf Teilkapitel 3.2.2 verwiesen). Die Auflösesebandbreite RBW muss hierbei so gewählt werden, dass es weder zu einer Unter- noch zu einer signifikanten Überbewertung der Immission kommt. Bei der Wahl der RBW ist außerdem zu beachten, dass die Messdauer für einen Durchlauf mit sinkender RBW steigt. Sofern das Maximum über mehrere Messdurchläufe der Anzeige „Actual“ ermittelt werden soll, ist die „Maximum“-Anzeige zu verwenden.

Aufgrund der Anforderung, dass jeder Messwert bereits einen zeitlich korrekt gemittelten Momentanimmissionswert darstellen soll, wird das Mittelungsverfahren über eine schmale Schrittweite bei der spektralen Integration vorgeschlagen. Der zur Messdurchführung geeignete Wert lässt sich analog zur Ermittlung der geeigneten Videobandbreite VBW für die Modi „Spectrum“ und „Level Recorder“ bestimmen (für eine Herleitung hierzu sei auf Teilkapitel 3.2.2 verwiesen). Für eine Mittelung über eine halbe Symboldauer müsste die Auflösesebandbreite somit einen Wert von 17,8 kHz annehmen. Beim SRM-3006 betragen die nächstmöglichen einstellbaren Werte 10 kHz und 20 kHz. Während es bei einer RBW von 10 kHz zu einer Unterschätzung der Immission kommen kann, kann eine RBW von 20 kHz zu einer leichten Überschätzung der Immission führen. Im Sinne eines konservativen Ansatzes wird daher eine RBW von 20 kHz vorgeschlagen. Die damit einhergehende Überschätzung liegt in der Größenordnung von 0,2 dB und ist somit vernachlässigbar (siehe hierzu Teilkapitel 3.2). Die Dauer, die das SRM-3006 für eine dreiachsige Messung über ein 5G-Signal der Bandbreite 90 MHz mit einer Schrittweite von $RBW = 20$ kHz benötigt, beträgt etwa 0,67 s (ca. 0,2 s pro Antennenachse zzgl. der Achsenumschaltzeiten). Bei diesen Geräteeinstellungen ist kein nennenswerter Einfluss der langsamen, auslastungsabhängigen Schwankungen auf das Messergebnis zu erwarten. Die Validierung des vorgeschlagenen Verfahrens für das SRM-3006 erfolgt in Teilkapitel 3.1.3.

Prinzipiell lässt sich das für das SRM-3006 vorgeschlagene Konzept zur zeitlichen Mittelung auch auf Laborspektrumanalysatoren übertragen. Diese bieten ähnlich zum Betriebsmodus „Safety Evaluation“ beim SRM-3006 ebenfalls die Möglichkeit zur Durchführung von Kanalleistungsmessungen (Channel Power Measurements). Auch hierbei erfolgt die Glättung des Signals durch eine schmalbandige spektral-integrative Messung. Das Auflösefilter ist dabei auch eine Bandbreite von etwa 10 % der Signalbandbreite einzustellen, um eine ausreichend feine Integration bei nicht zu großer Messzeit zu erreichen [BSW 09]. Für korrekte Messergebnisse ist zusätzlich zwingend der RMS-Detektor zu verwenden.

3.1.2.2 Umsetzung der räumlichen Mittelung

Eine über das Körpervolumen gemittelte Momentanimmission kann man bei Feldquellen mit konstanter Leistungsabgabe sehr einfach mittels nacheinander durchgeführter Einzelmessungen (z.B. an drei Punkten) und anschließender Mittelwertbildung bestimmen. Bei Quellen mit schwankender Leistungsabgabe müssten die Einzelmessungen idealerweise hingegen gleichzeitig durchgeführt werden, damit keine undefinierte Mischung aus räumlicher und zeitlicher

Mittelung entsteht. Dies führt zu einem unverhältnismäßig großen Geräteaufwand, da hierfür drei bzw. sogar sechs Messgeräte mit isotropen Sonden notwendig wären, die bezüglich des Zeitpunkts der Messung auch noch synchronisiert sein müssten.

Unter der Annahme von langsamen Feldstärkeschwankungen erweist sich in der Praxis hingegen die sequentielle Messung der Momentanimmission als zweckmäßig. Wie in 3.1.2.1 bereits erläutert, beträgt die Messzeit pro Punkt für 5G-Immissionen weniger als eine Sekunde. Dieses Verfahren unterliegt natürlich streng genommen in gewissem Umfang den auslastungsabhängigen Einflüssen auf die Momentanimmission, weil die Messungen nicht exakt zum gleichen Zeitpunkt erfolgen. Da eine Messung beispielsweise in drei unterschiedlichen Höhen von einem geübten Messtechniker jedoch in weniger als zehn Sekunden durchgeführt werden können, bleibt dieser Einfluss in der Praxis tolerierbar. Untermauert wird das durch Langzeitmessungen der Momentanimmission (siehe Kapitel 5), für die nachträglich ein gleitender zeitlicher Mittelwert bestimmt wurde. Dabei zeigte sich, dass etwa bis zu einer Mittelungsdauer von 30 Sekunden die großskaligen Schwankungen der Feldstärke weiterhin erfasst wurden. Bei einer Mittelungsdauer von 6 Minuten wurden Feldstärkeschwankungen hingegen größtenteils rausgeglättet.

Diese Überlegungen zeigen auch, dass es wenig sinnvoll ist, zur Bestimmung einer körpergemittelten Momentanimmission an drei bzw. sechs Punkten jeweils für eine Zeit von sechs Minuten zu messen und anschließend räumlich zu mitteln. In diesem Fall würde man drei beziehungsweise sechs nacheinander aufgenommene 6-Minuten-Mittelwerte erhalten, die zeitlich nacheinander gewonnen wurden und somit natürlich deutlich stärker durch Pegelschwankungen beeinflusst werden können. Es würde eine undefinierte Mischung aus zeitlicher und räumlicher Mittelung entstehen. Zudem wäre eine derartige Strategie aufgrund des hohen Zeitaufwands von mindestens 18 Minuten pro Messvolumen in der Praxis kaum wirtschaftlich umsetzbar.

Die sequentielle Messung mittels einer handgeführten isotropen Messantenne kann auf zwei Arten erfolgen:

- In Anlehnung an die drei unterschiedlichen Höhen in Bild 3.1.1 kann die Immission jeweils an den diskreten Punkten aufgenommen werden. Hilfreich kann hierbei der Einsatz einer vertikal aufgestellten hölzernen Stange mit Markierungen in den drei relevanten Höhen sein. Das SRM-3006 unterstützt zusätzlich mit einem halbautomatischen Modus (Spatial Averaging, discrete) derartige Punktrastermessungen und ermittelt am Ende automatisch das leistungsbezogene Mittel über alle Messpunkte.
- Eine Alternative zur diskreten Messung an mehreren vordefinierten Punkten stellt die Messung während einer kontinuierlichen Bewegung der Messantenne im Messvolumen wie bereits in [BSW 06] vorgestellt oder entlang einer vertikalen Linie (z.B. von 1,1 bis 1,7 Meter über dem Boden) dar. Das Gerät wird dabei so eingestellt, dass es einen leistungsbezogenen Mittelwert über alle Messdurchläufe ermittelt (beim SRM-3006 mithilfe der Anzeige „Average“ im Betriebsmodus „Safety Evaluation“). Das SRM-3006 unterstützt auch eine derartige Strategie auch mit einem halbautomatischen Modus (Spatial Averaging, continuous).

3.1.3 Validierung des Verfahrens

Nachfolgend werden die Ergebnisse zur Validierung des in 3.1.2 vorgeschlagenen Verfahrens vorgestellt. Da es erforderlich war ein definiertes 5G-Signal zu erzeugen bzw. dessen Momentanmission zu bestimmen, musste die Validierung leitungsgebunden unter Laborbedingungen erfolgen.

3.1.3.1 Erzeugte 5G-Downlink-Signale

Mithilfe der „5G-Toolbox“ von MATLAB wurden für die Untersuchungen zur Momentanmission standardkonforme 5G-Downlink-Signale generiert, die folgende Eigenschaften aufweisen:

- Dauer: 20 ms bzw. 560 OFDM-Symbole
- Signalbandbreite: 88,2 MHz (entsprechend einer Kanalbandbreite von 90 MHz)
- SSB-Periodizität: 20 ms
- Anzahl SSB pro Periode: 8

Die generierten Signale liegen als komplexe Signale mit Inphase- und Quadraturkomponente (IQ-Daten) im Basisband vor. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Geräteeinstellungen auf die Messung wurden gemäß Tabelle 3.1 sieben verschiedene Downlink-Signale generiert, die sich hinsichtlich der Belegung der spektralen Ressourcen (Physical Resource Blocks, PRB) sowie der zeitlichen Ressourcen (Symbolbelegung) unterscheiden.

Tabelle 3.1: Zur Untersuchung von Messverfahren zur Bestimmung der 5G-Momentanmission erzeugte 5G-Downlink-Signale. Signal 7 besteht lediglich aus einem Symbol, d.h. es enthält keinen SSB.

	Signal 1	Signal 2	Signal 3	Signal 4	Signal 5	Signal 6	Signal 7
Symbol-belegung	100 %	84 %	71 %	100 %	50 %	21 %	0,18 % (kein SSB)
PRB-Belegung	100 %	84 %	100 %	71 %	100 %	100 %	100 %

Bild 3.1.2 zeigt beispielhaft das resultierende Resource Grid von Signal 5, das lediglich aus über den PDSCH ausgesendeten Traffic sowie den acht SSB besteht. Spektral weist das Signal eine Ressourcenbelegung von 100 % auf, während im Zeitbereich im Mittel 50 % der Ressourcen belegt sind.

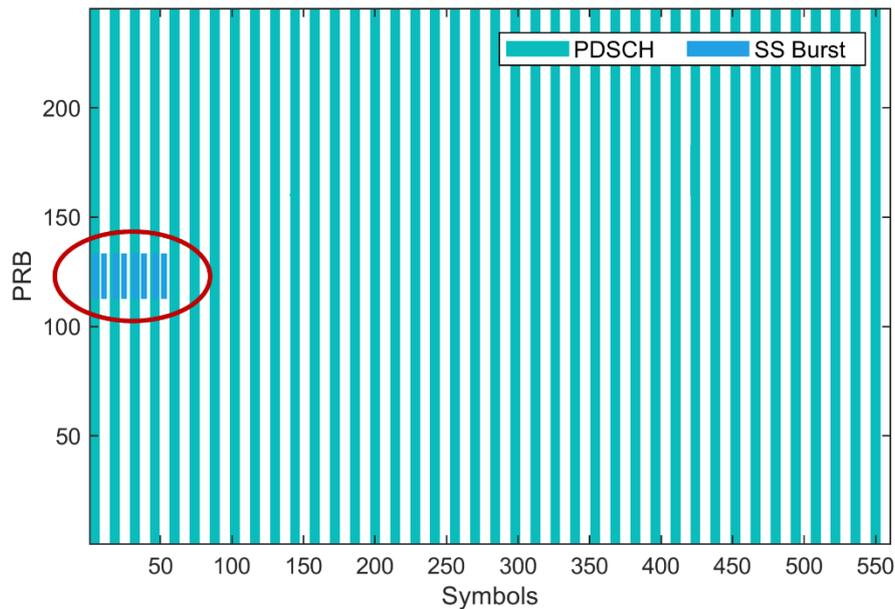


Bild 3.1.2: Resource Grid des zur Bestimmung der 5G-Momentanimmission erzeugten Signals 5 mit einer PRB-Belegung von 100 % und einer Symbolbelegung von 50 %. Die SSBs sind rot eingekreist.

3.1.3.2 Messaufbau

In Bild 3.1.3 ist der Messaufbau zur Untersuchung von Messverfahren zur Bestimmung von 5G-Momentanimmissionen dargestellt. Die in Teilkapitel 3.1.3.1 vorgestellten mit MATLAB generierten IQ-Daten der Dauer 20 ms werden mithilfe des Arbiträrsignalgenerators AWG5202 von Tektronix auf eine Trägerfrequenz von 1,5 GHz moduliert und mit einer Amplitude von 0,5 V in einer Endlosschleife ausgesendet. Mithilfe eines HF-Kabels, dessen Dämpfung bekannt ist, wird der Ausgang des Arbiträrsignalgenerators mit dem SRM-3006 verbunden. Zur Validierung der mit dem SRM-3006 durchgeführten Messungen, wird die mittlere Leistung derselben Signale mit dem Leistungsmesser NRVD von Rohde & Schwarz in Kombination mit dem thermischen Leistungsmesskopf NRV-Z51 bestimmt.

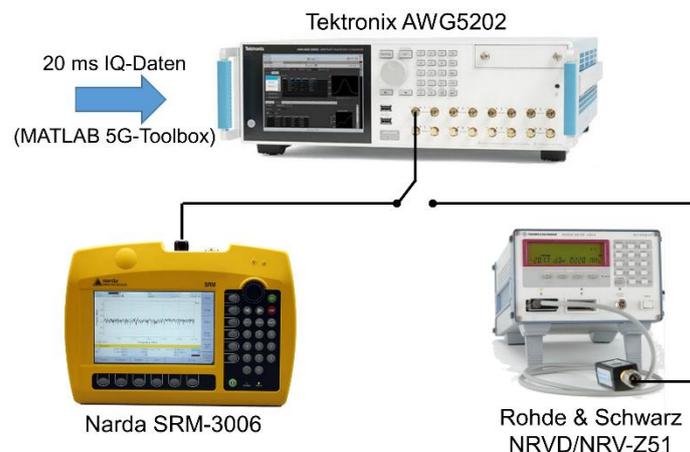


Bild 3.1.3: Setup zur Untersuchung von Messverfahren zur Bestimmung der 5G-Momentanimmission.

3.1.3.3 Einfluss der Auflösungsbreite RBW in der Betriebsart „Safety Evaluation“

Um den Einfluss der Auflösungsbreite RBW in der Betriebsart „Safety Evaluation“ zu untersuchen, wurde die Immission des in 3.1.3.1 vorgestellten 5G-Downlink-Signals 5 (volle spektrale Ressourcenbelegung, 50 % Duty Cycle) mit verschiedenen Auflösungsbreiten gemessen. Die Untersuchungen erfolgten sowohl für die Average-Anzeige, die nach 3.1.2.1 weitestgehend unabhängig von der RBW ist, als auch mit der Maximum-Anzeige, welche wiederum stark von der eingestellten RBW abhängt. Die Actual-Anzeige wurde nicht verwendet, da diese aufgrund der alternierenden Symbolbelegung zu schwankenden Messwerten führte. Da die Maximum-Anzeige das Maximum über alle Messdurchläufe der Actual-Anzeige ausgibt, entspricht diese der maximal aufgetretenen Momentanimmission. Beim vorliegenden Signal kommt es mit dieser Anzeige aufgrund des Duty Cycles von 50 % im Mittel daher zu einer Überschätzung der Momentanimmission um 3 dB. Aus diesem Grund wurde der Messwert nachträglich um den Faktor 3 dB reduziert.

Bild 3.1.4 zeigt den Vergleich zwischen der Average- (AVG) und der Maximum-Anzeige (MAX, abzüglich 3 dB zur Berücksichtigung des Duty Cycles des gemessenen Signals) bei der Messung von Signal 5 mit verschiedenen Auflösungsbreiten zwischen 20 kHz und 20 MHz bei Messdauern von jeweils sechs Minuten. Während der Messwert der Average-Anzeige nahezu unabhängig von der Auflösungsbreite ist (erst ab RBW = 20 MHz kommt es zu einem Abfall der gemessenen Leistung), ist bei den Messwerten der Maximum-Anzeige insgesamt ein Trend zu erkennen, dass das Signal mit zunehmender RBW nicht mehr ausreichend geglättet wird und der angezeigte Messwert steigt. So sind für eine optimale RBW von 20 kHz Maximum- und Average-Anzeige für das untersuchte Signal fast identisch. Für höhere RBW-Werte divergieren die Anzeigen. Auffällig sind die Ausreißer bei Auflösungsbreiten von 300 kHz und 10 MHz, die in weiteren Messungen desselben Signals reproduziert werden konnten. Damit

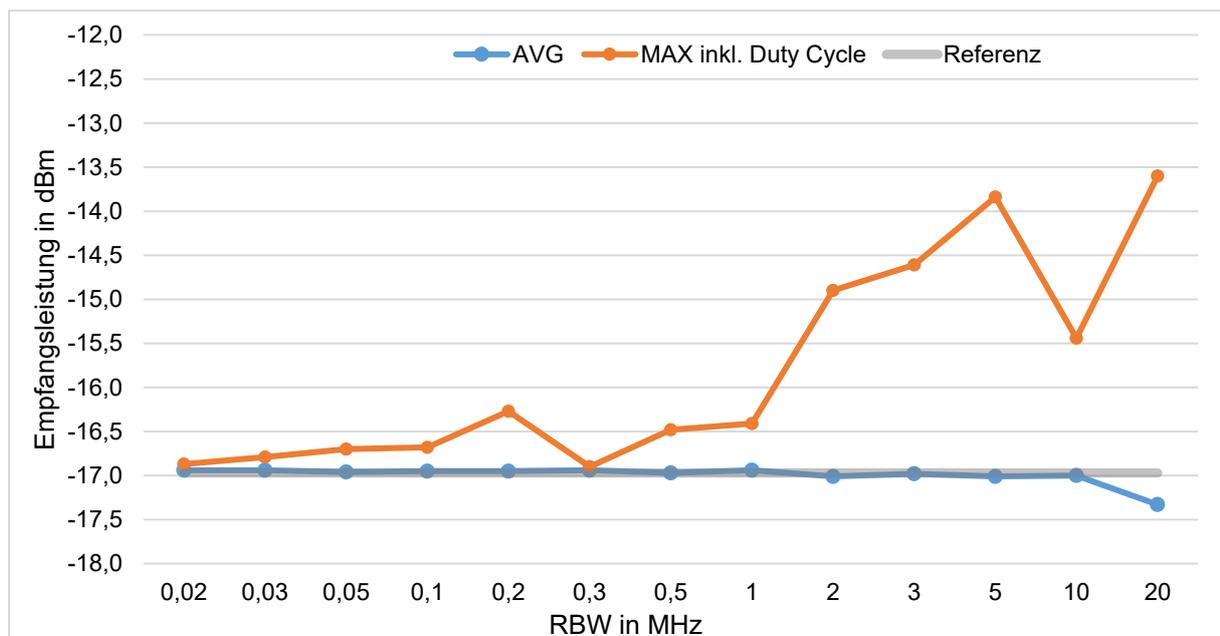


Bild 3.1.4: Vergleich zwischen der Average- und der Maximum-Anzeige des SRM-3006 in der Betriebsart „Safety Evaluation“ und der thermischen Referenz bei der leitungsgebundenen Messung von Signal 5 (Duty Cycle: 50 %) unter Laborbedingungen für verschiedene Auflösungsbreiten des SRM-3006. Jede Messung wurde über eine Dauer von 6 Minuten durchgeführt.

kann ausgeschlossen werden, dass es sich um zufällige Effekte handelte. Möglicherweise handelt es sich hierbei um Artefakte, die durch die FFT-Analyse im SRM-3006 zustande kommen. Eine thermische Referenzmessung der mittleren Leistung hat ergeben, dass die Differenz zur Average-Anzeige bis zu RBW-Werten von 10 MHz weniger als 0,1 dB beträgt (siehe graue Linie). Mit der Maximum-Anzeige liegt für eine RBW von 20 kHz somit auch eine gute Übereinstimmung vor.

3.1.3.4 Vergleich mit thermischer Referenz

Zur Validierung des vorgeschlagenen Messverfahrens zur Bestimmung der Momentanimmission wurde für alle in 3.1.3.1 vorgestellten 5G-Downlink-Signale unterschiedlicher Auslastung ein Vergleich zwischen der gemessenen Momentanimmission und dem thermischen Referenzmesswert gezogen. Die Messung der Momentanimmission erfolgte nach dem in 3.1.2 vorgeschlagenen Verfahren, d.h. in der Betriebsart „Safety Evaluation“ mit einer Auflösungsbreite von 20 kHz. Aufgrund der unterschiedlichen Duty Cycles der Signale und damit einhergehend den mehr oder weniger stark schwankenden Messwerten bei der Verwendung der Acutal-Anzeige wurde zur Vergleichbarkeit mit der thermischen Referenz die Average-Anzeige verwendet. Es sei aber darauf hingewiesen, dass bei dieser Messung entsprechend des Vorschlags jeweils nur für eine kurze Dauer (ca. 10 Sekunden) gemessen wurde. Die Average-Anzeige führte somit lediglich zu einer Reduzierung der Schwankungsbreite der aufgrund des verwendeten schmalbandigen Auflösefilters bereits korrekt gemittelten einzelnen Momentanimmissionswerte, um diese mit der thermischen Referenz vergleichen zu können.

In Bild 3.1.5 ist für die untersuchten 5G-Signale mit unterschiedlicher Auslastung eine vergleichende Übersicht der Differenzen zwischen thermischer Messung (Referenz) und den mit dem SRM-3006 ermittelten Werten für die Momentanimmission dargestellt. Die Übereinstimmung ist insbesondere für die Signale 1 bis 4 sehr gut. Bei Signalen mit geringerem Duty Cycle führt die Messung mit dem SRM-3006 zu einer leichten Überschätzung von 0,5 dB (Signal 5) bzw. knapp 0,7 dB (Signal 6); diese liegen allerdings innerhalb der Messunsicherheit des Messgerätes. Für Signal 7 konnte aufgrund des sehr niedrigen Duty Cycles von lediglich 0,18 % (ein



Bild 3.1.5: Messung der zeitlich gemittelten Momentanimmission: Differenz zwischen thermischer Messung (NRVD) und Messung mit dem SRM-3006 nach dem vorgeschlagenen Verfahren (Average-Anzeige, RBW = 20 kHz) für die verschiedenen Eingangssignale.

OFDM-Symbol mit einer Dauer von 35,7 μs , das alle 20 ms nur einmal ausgesendet wird) und der damit verbundenen niedrigen mittleren Signalleistung mit dem NRVD kein thermischer Referenzwert mehr ermittelt werden, so dass kein Vergleich erfolgen konnte.

3.1.3.5 Fazit

Das vorgeschlagene Messverfahren zur Bestimmung der 5G-Momentanmission basiert auf dem Messgerät SRM-3006 im Betriebsmodus „Safety Evaluation“. Mithilfe der damit verbundenen spektral-integrativen Messung lässt sich die Immission des gesamten Kanals bestimmen. Bei Nutzung der Anzeige „Actual“ (bzw. „Maximum“, womit das Maximum der „Actual“-Messwerte über alle Durchläufe angezeigt wird) und Verwendung einer schmalen Auflösungsbreite wird in nur einem Messdurchlauf ein zeitlich korrekt gemittelter Immissionswert ermittelt. Die optimale am Messgerät einzustellende Auflösungsbreite beträgt 20 kHz. Durch einen Vergleich mit einer thermischen Referenzmessung konnte für verschiedene Signale unterschiedlicher zeitlicher Auslastung eine gute Übereinstimmung mit dem auf die vorgeschlagene Weise gemessenen Momentanmissionswert festgestellt werden. Das Verfahren ist grundsätzlich auch auf Laborspektrumanalysatoren übertragbar, bei denen es ebenfalls die Möglichkeit zur Durchführung von Kanalleistungsmessungen gibt. Dabei soll die Auflösungsbreite kleiner als 10 % der Signalbandbreite betragen und es ist ein RMS-Detektor zu verwenden [BSW 09].

Wenn neben der zeitlichen zusätzlich noch eine räumliche Mittelwertbildung durchgeführt werden soll, wird unter Beibehaltung der schmalbandigen Auflösungsbreite die Verwendung der Average-Anzeige empfohlen. Damit wird über die einzelnen bereits korrekt gemittelten Momentanmissionswerte der Actual-Anzeige ein leistungsbezogener Mittelwert bestimmt. Wenn die Messantenne während der Messung entweder ortsdiskret oder kontinuierlich entlang eines Punktrasters bewegt wird, wird auf diese Weise ein räumlicher Mittelwert bestimmt. Die vorgeschlagene räumliche Mittelwertbildung konnte leitungsgebunden nicht validiert werden. Jedoch wird hierbei im Hinblick auf eine praktikable Messdurchführung auf ein Verfahren zurückgegriffen, das bereits in [BSW 06] erprobt wurde und sich als zweckmäßig erwiesen hat.

3.2 Frequenzselektives Messverfahren zur Bestimmung einer Basis für die Hochrechnung auf 5G-Maximalimmissionen

In diesem Teilkapitel wird ein frequenzselektives Messverfahren zur Bestimmung der Immission des in den Broadcast Beams abgestrahlten SS/PBCH Blocks (SSB) vorgestellt. Das Verfahren adressiert sowohl das SRM-3006 von Narda als auch konventionelle Laborspektrumanalysatoren. Basierend auf der Immission des SSB lässt sich eine Hochrechnung auf Maximalimmission (siehe Teilkapitel 3.3) durchführen.

Im Rahmen der Entwicklung von Messverfahren für LTE wurden in [BSW 12] korrekte Einstellparameter zur Durchführung frequenzselektiver Messungen des PSS (Primary Synchronization Signal) und des SSS (Secondary Synchronization Signal) mit Laborspektrumanalysatoren diskutiert. Diese vorgeschlagenen Einstellungen flossen anschließend in die METAS-Messempfehlung für LTE ein [METAS 20]. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Detektor: RMS
- Auflösebandbreite RBW: mindestens 945 kHz zur Erfassung des kompletten PSS bzw. SSS
- Trace: Maximum (Max-Hold)
- Messmodus: Zero Span
- Sweep Time: muss so gewählt werden, dass die Messzeit pro Anzeigepixel nicht 70 μ s übersteigt, was etwa der Dauer eines OFDM-Symbols bei LTE entspricht (71,5 μ s).

Das dort vorgeschlagene Messverfahren für LTE wurde erfolgreich validiert und erprobt. Durch die Nutzung von OFDMA ist 5G im Physical Layer hinsichtlich seiner Eigenschaften (rauschartiger Zeitverlauf, Pulsung in Form von OFDM-Symbolen) vergleichbar mit LTE (siehe Teilkapitel 2.1). Daher können die in [BSW 12] vorgestellten Messeinstellungen zur frequenzselektiven Messung von Synchronisierungssignalen von LTE mit einem Laborspektrumanalysator auch auf die frequenzselektive Messung von Synchronisierungssignalen bei 5G übertragen werden.

Im Folgenden werden daher die auf die Eigenschaften von 5G bzw. des SSB angepassten Messeinstellungen für Laborspektrumanalysatoren vorgestellt. Darüber hinaus werden entsprechende Messeinstellungen zur Durchführung der Messungen mit dem SRM-3006 diskutiert und validiert. Die Gegenstücke des SRM-3006 zum Betriebsmodus „Zero Span“ bei Laborspektrumanalysatoren sind die Betriebsmodi „Level Recorder“ bzw. „Scope“. Da es bei „Scope“ zeitlich hochaufgelöst nicht möglich ist dreiaxsig zu messen, um einen isotropen Messwert zu erhalten, wird ausschließlich der Modus „Level Recorder“ betrachtet. Dieser ermöglicht eine quasi-lückenlose Bestimmung der Kanalleistung durch direkte Messung im Zeitbereich ohne FFT-Berechnung und ist daher besonders für die Messung gepulster Signale geeignet. Zunächst wird daher auf die Anforderungen zur zeitlichen Glättung sowie das Mittelungsprinzip des SRM-3006 eingegangen, um mögliche Messeinstellungen ableiten zu können.

3.2.1 Anforderungen an die zeitliche Mittelung

Bei der frequenzselektiven Messung als Basis für eine Hochrechnung auf Maximalimmission besteht eine besondere Herausforderung in der adäquaten Mittelung von zeitlichen Pegelfluktuationen des 5G-Signals, die durch die digitale Modulation entstehen und einen rauschartigen Verlauf im Zeitbereich erzeugen. Wichtig hierbei ist, dass die Mittelungszeit im Zeitbereich nicht zu lang ist, um eine Unterschätzung der Immission zu vermeiden. Diese würde bei einem gepulsten Signal dann auftreten, wenn die Mittelungszeit länger als die Pulsdauer ist, da dann nicht nur eine Mittelung über den rauschähnlichen Puls erfolgt, sondern auch die darauffolgenden Lücken in die Mittelung einbezogen werden. Im Falle einer zu kurzen Mittelungsdauer, wird die Mittelung hingegen nur über Teile des Pulses durchgeführt, was zu einer Überwertung der Immission führen kann.

Bei 5G ist die kürzeste Einheit im Zeitbereich *ein* OFDM-Symbol. Der für die Immissionshochrechnung relevante SSB besteht immer aus *vier* aufeinanderfolgenden Symbolen, wobei nur die spektral in der Mitte liegenden 127 von 240 Trägern (entsprechend einer Bandbreite von 3,81 MHz bei einem Trägerabstand von 30 kHz) auch in allen vier Symbolen belegt sind (siehe

Bild 3.2.1). Dies hat zur Konsequenz, dass die Mittelung beim frequenzselektiven Messverfahren derart ausgelegt sein muss, dass im Idealfall über die Dauer eines Pulses, d.h. über vier OFDM-Symbole (SSB) gemittelt wird. Eine Mittelung über nur ein Symbol des SSB ist zwar prinzipiell möglich. Da der SSB aber immer über vier Symbole ausgesendet wird, würde bei einer Mittelung über nur ein Symbol für den Fall, dass eines der Signale eine höhere spektrale Leistung aufweist, eine Überbewertung in Kauf genommen.

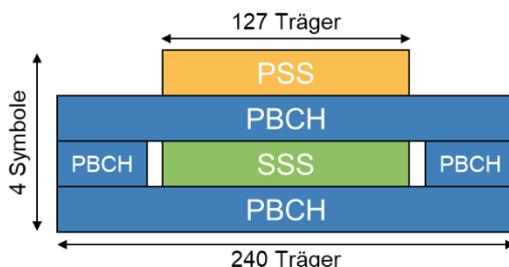


Bild 3.2.1: Schematische Darstellung eines SSB bestehend aus den Signalen PSS, SSS sowie dem PBCH, die im Zeitbereich 4 OFDM-Symbole um im Frequenzbereich bis zu 240 Träger umfassen.

Durch Aktivierung der „Max-Hold“-Anzeige kann die maximale RMS-Immission über alle gemessenen Pulse detektiert werden, sodass auch die Ermittlung des räumlichen Maximums möglich ist. Dieses wiederum kann dann als Basis für eine Immissionshochrechnung auf Anlagenvollauslastung herangezogen werden.

3.2.2 Mittelungsprinzip des SRM-3006

Zur Mittelung von rauschartigen Signalfluktuationen wird bei Laborspektrumanalysatoren in der Regel der RMS-Detektor eingesetzt, der die während der Verweildauer pro Sweep Point (Horizontalpixel) einlaufenden statistisch unabhängigen Messwerte leistungsbezogen mittelt und das Ergebnis dieser Mittelung dem entsprechenden Sweep Point zuordnet.

Das Narda SRM-3006 verfügt im Gegensatz zu klassischen Spektrumanalysatoren, über keinen RMS-Detektor zur zeitlichen Glättung des Signals. Die Glättung erfolgt in den Betriebsarten „Spectrum“ und „Level Recorder“ durch ein zusätzlich aktivierbares Videofilter mit einstellbarer Videobandbreite (VBW). Gerade bei gepulsten Signalen wie dem SSB ist die Wahl der korrekten VBW von entscheidender Bedeutung, um eine Unter- bzw. eine Überschätzung der Immission möglichst auszuschließen. Die Mittelungszeit ist hierbei antiproportional zur VBW [Kel 11]:

$$T = \frac{1}{\pi \cdot VBW}$$

Aufgrund der exponentiell abklingenden Impulsantwort des im SRM-3006 implementierten Filters ergibt sich gemäß [KBS+ 20] je nach Videobandbreite VBW und Pulsdauer t_{puls} eine Unterbewertung der Pulsleistung (Verhältnis zwischen gemessener Pulsleistung P_{mess} und tatsächlicher Pulsleistung P_{Puls}) um den Faktor:

$$\frac{P_{mess}}{P_{Puls}} = 1 - e^{-2\pi \cdot VBW \cdot t_{puls}}$$

Für den Fall, dass die Mittelungsdauer genau der Dauer des Pulses entspricht, führt die Mittelung zu einer Unterbewertung von 0,6 dB. Für den Fall, dass die Mittelungsdauer einer halben Pulsdauer entspricht, sinkt die Unterbewertung auf 0,1 dB. Die Unterbewertung der Immission, die durch das exponentiell abklingende Videofilter entsteht, wird bei Mittelung über nur die halbe Pulsdauer zusätzlich durch eine Überschätzung überlagert. Diese entsteht aufgrund von unzureichender Mittelung der rauschähnlichen Signalfluktuationen, da nur noch die Hälfte der Messwerte des Pulses in die Mittelwertbildung einbezogen werden. Daher ist die Videobandbreite derart zu wählen, dass keine Unterbewertung durch zu lange Mittelung entsteht, sondern im Sinne einer konservativen Immissionsabschätzung eine geringfügige Überbewertung der Immission.

Bei Spektrumanalysatoren mit RMS-Detektor wird nur dann die mittlere Signalleistung angezeigt, wenn der RMS-Wert aus einer ausreichend großen Anzahl statistisch unabhängiger Samples bestimmt werden kann [BSW 09]. Bei zu kurzen Sweep-Zeiten bzw. zu großer Anzahl von Sweep-Points (Horizontalpixel) ist die Verweildauer je Sweep Point bei der Messung zu kurz, sodass zu wenige Mess-Samples in die Mittelung einbezogen werden und der rauschähnliche zeitliche Verlauf des Pulses nicht ausreichend geglättet wird. Bei zu großen Sweep-Zeiten bzw. zu geringer Anzahl von Sweep Points ist die Verweildauer je Sweep-Point bei der Messung zu groß, sodass zu viele Mess-Samples in die Mittelung einbezogen werden und somit die Pausen vor oder nach dem Puls in die Glättung einfließen. Analog zum SRM-3006 ist beim Spektrumanalysator die Mittelungsdauer derart einzustellen, dass die verbleibende Überbewertung aufgrund der endlichen Anzahl an Mess-Samples gering ist, aber es zu keiner Unterbewertung aufgrund von Mittelung in die Pulspausen kommt.

3.2.3 Validierung des Verfahrens

Im Folgenden werden Untersuchungen zu optimalen Messeinstellungen zur Durchführung frequenzselektiver Messungen mit dem SRM-3006 im Betriebsmodus „Level Recorder“ vorgestellt. Für verschiedene Messeinstellungen werden die mit dem SRM-3006 ermittelten Ergebnisse mit denen eines Laborspektrumanalysators (Rohde & Schwarz FSW) verglichen, dessen Messwerte als Referenz fungieren.

3.2.3.1 Erzeugtes 5G-Downlink-Signal

Für die Untersuchung des frequenzselektiven Messverfahrens zur Bestimmung der SSB-Immission wurde mithilfe der 5G-Toolbox von MATLAB ein standardkonformes Downlink-Signal erzeugt, das die folgenden aufgelisteten Eigenschaften aufweist:

Tabelle 3.2: Übersicht über die Eigenschaften des erstellten 5G-Signals zur Untersuchung des frequenzselektiven Messverfahrens zur Bestimmung der SSB-Immission.

	Parameter	Wert
Allgemein	Signalbandbreite (Kanalbandbreite)	38,16 MHz (40 MHz)
	Subcarrier Spacing	30 kHz
	Anzahl PRB	106
SSB	Anzahl pro Durchlauf	7

	Periodizität	20 ms
PDSCH	Modulationsschema	QPSK
	Boosting Faktor gegenüber SSB	0 dB
	TDD-Faktor	100 %
	Allokierte PRB	0-39 und 66-105

Bild 3.2.2 zeigt den Zeit-Frequenz-Bereich des erzeugten Downlink-Signals, das aus 106 Physical Resource Blocks im Frequenzbereich und 560 Symbolen im Zeitbereich (20 ms) besteht. Der SSB Burst liegt in der Kanalmitte und dessen Spektrum ist zu keinem Zeitpunkt vom PDSCH belegt. Damit lassen sich SSB und PDSCH frequenzselektiv separieren. Im restlichen Spektrum wird der PDSCH in jedem Symbol übertragen (TDD-Faktor von 100 %).

Dass das SSB-Spektrum während der Messdauer nicht von anderen Signalen (z.B. dem PDSCH) überlagert wird, stellt auf den ersten Blick den Idealfall dar, da es in der Praxis durchaus auch zu Belegungen des SSB-Spektrums durch den PDSCH kommen kann. Ob es dabei allerdings zu Überlagerungen des SSB kommt, hängt jedoch davon ab, ob während der Messung der PDSCH übertragen wird und wenn ja, wo sich aktive Endgeräte in Relation zum

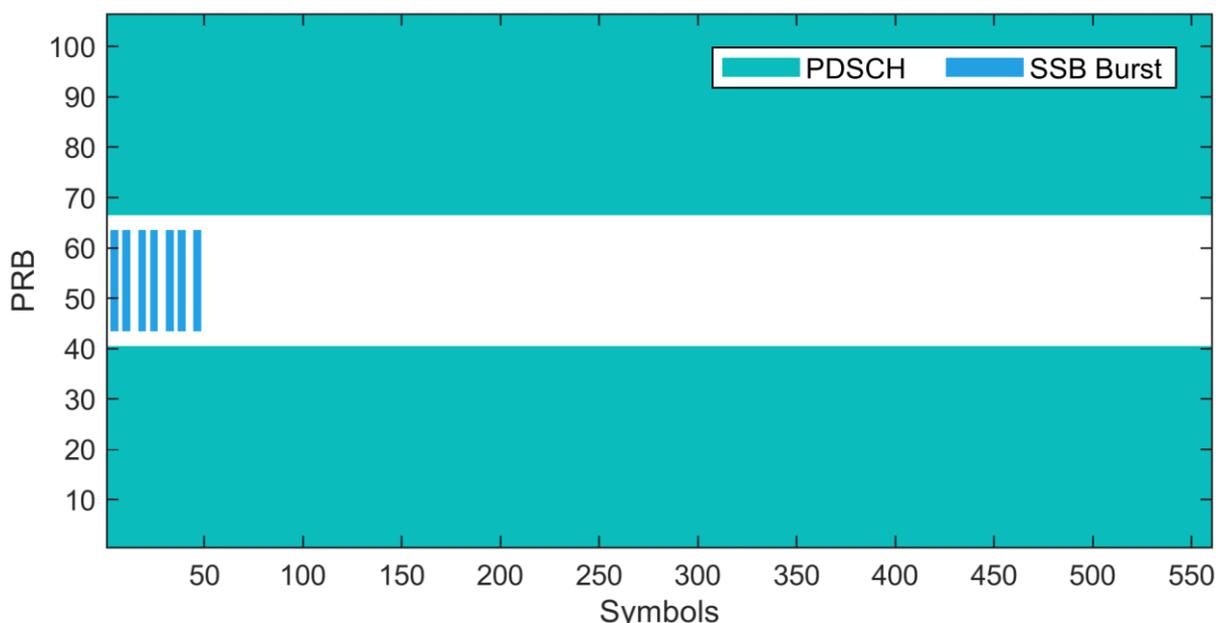


Bild 3.2.2: Zeit-Frequenz-Darstellung des erzeugten 5G-Signals zur Untersuchung des frequenzselektiven Messverfahrens mit 7 SSBs in der Kanalmitte. Der PDSCH spart das SSB-Spektrum zu jedem Zeitpunkt aus, damit der SSB frequenzselektiv gemessen werden kann. Im restlichen Spektrum wird der PDSCH in jedem Symbol übertragen.

Messort befinden, die möglicherweise zu einer Ausrichtung von Traffic Beams in die Nähe des Messpunktes führen. Darüber hinaus hängt eine mögliche Überlagerung von weiteren basisstationsspezifischen Parametern wie z.B. dem Antennendiagramm und den eingestellten Sendeleistungen für SSB und PDSCH ab. Bei näherer Betrachtung wird also ersichtlich, dass das frequenzselektive Messverfahren ohnehin nur dann verlässlich funktioniert, wenn der SSB während der Messdauer nicht von anderen Signalen überlagert wird. Für diesen Fall lassen sich mithilfe des zu untersuchenden Signals gültige Erkenntnisse ableiten. Für alle anderen

Fälle ist das frequenzselektive Messverfahren nicht anwendbar und es wird zwingend zur Anwendung codeselektiver Messverfahren geraten (siehe Teilkapitel 3.3).

3.2.3.2 Messaufbau

Das mit MATLAB erzeugte komplexe und im Basisband vorliegende 5G-Signal der Dauer 20 ms wurde mithilfe des Arbiträrsignalgenerators AWG5202 von Tektronix auf eine Trägerfrequenz von 2 GHz moduliert und in einer Dauerschleife ausgesendet. Mit jeweils demselben HF-Kabel wurde es nacheinander einem SRM-3006 von Narda Safety Test Solutions sowie dem Laborspektrumanalysator FSW von Rohde & Schwarz zugeführt (siehe Bild 3.2.3).

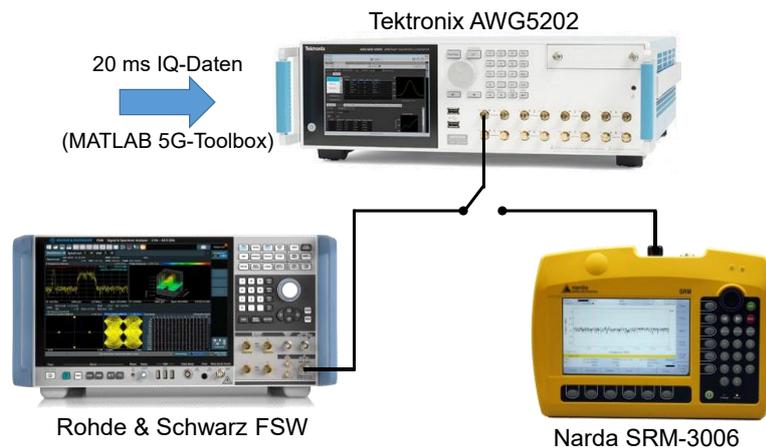


Bild 3.2.3: Messaufbau zur Untersuchung des frequenzselektiven Messverfahrens zur Bestimmung der SSB-Immission. Zur Veranschaulichung des Messaufbaus sind die beiden Messgeräte im Bild per Umschalter mit dem Kabel des Signalgenerators verbunden. Während der Messung wurde bei beiden Messgeräten jedoch dasselbe HF-Kabel ohne Umschalter verwendet."

3.2.3.3 Vergleich zwischen SRM-3006 und FSW

Basierend auf Voruntersuchungen zu korrekten Einstellparametern bei der Bestimmung der SSB-Immission für das SRM-3006 [KBS+ 20] wurden tiefergehende Untersuchungen für eine korrekte leistungsbezogene Mittelung über einen SSB durchgeführt. Hierfür wurde das in 3.2.3.1 vorgestellte 5G-Signal verwendet.

Abgeleitet von den Anforderungen in Abschnitt 3.2.1 wurden die Messungen mit dem SRM-3006 in der Betriebsart „Level Recorder“ durchgeführt. Dabei wurden Videobandbreiten verwendet, die zu Mittelungsdauern führen, die der vollständigen, der halben sowie einem Viertel der Pulsdauer entsprechen.

Zum Vergleich und als Referenz zur Bewertung der mit dem SRM-3006 ermittelten Messergebnisse wurden für den FSW äquivalente Mittelungszeiten gewählt. Die Messungen mit dem FSW wurden hierbei im klassischen Spectrum-Modus (Span > 0 Hz) und wie in [BSW 09] vorgeschlagen im Zero-Span-Modus (Span = 0 Hz) durchgeführt. Während im klassischen Spectrum-Modus die Mittelung über die Anzahl der Sweep-Points eingestellt wurde, wurde sie im Zero-Span-Modus über die Sweep-Dauer festgelegt. Da zur leistungsbezogenen Mittelung über die Einzelmesswerte der RMS-Detektor verwendet wurde, wurde gemäß [BSW 09] eine Videobandbreite von 10 MHz gewählt.

Die jeweiligen Messeinstellungen sind in Tabelle 3.3 dokumentiert. Die verwendeten Sweep-Zeiten des FSW wurden auf eine Nachkommastelle gerundet. Der SSB wurde mit einer Auflösesebandbreite von 3,2 MHz (SRM-3006) bzw. 3 MHz (FSW, Ergebnisse inkl. spektraler Extrapolation auf 3,2 MHz) bestimmt.

Tabelle 3.3: Untersuchte Messeinstellungen für SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (konventioneller Spectrum-Modus und Zero-Span-Modus) zur frequenzselektiven Messung der leistungsbezogen gemittelten SSB-Immission.

Mittelungsdauer		SRM-3006	FSW (Spectrum)		FSW (Zero Span)	
t_{puls}	t_{symbol}	VBW in kHz	Sweep-Zeit in ms	Sweep Points	Sweep-Zeit in ms	Sweep-Points
1	4	2	35,8	251	143	1001
0,5	2	4	35,8	501	71,5	1001
0,25	1	8	35,8	1001	35,8	1001

In Tabelle 3.4 sind die Differenzen der Messergebnisse zwischen SRM-3006 und FSW *im Zero-Span-Modus* bei der Bestimmung der SSB-Leistung für unterschiedliche Mittelungszeiten dargestellt. Wie zu erwarten war, zeigt sich, dass die Messwerte umso besser übereinstimmen, je ähnlicher die Mittelungszeiten ausfallen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das SRM-3006 für längere Mittelungszeiten einen stärkeren Abfall der gemessenen Leistung aufweist. Während der Messwert des FSW beim Übergang der Mittelungszeit von zwei zu vier Symbolen um 0,26 dB sinkt, fällt der Messwert des SRM um 0,56 dB niedriger aus. Diese Abnahme korrespondiert gut mit der theoretisch erwarteten Abnahme durch das nicht vollständig einschwingende Videofilter in Höhe von 0,5 dB (siehe Teilkapitel 3.2.2) und verdeutlicht, dass beim SRM-3006 bevorzugt eine Mittelung über die halbe Pulsdauer (zwei Symbole) einzustellen ist, um eine Unterschätzung der Immission zu vermeiden.

Tabelle 3.4: Differenzen der Messwerte von SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (Zero Span) in dB bei der Messung des SSB mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Differenz der SSB-Messwerte zwischen SRM-3006 und FSW in dB		FSW-Mittelungsdauer (Zero Span)		
		$4 \cdot t_{\text{symbol}}$	$2 \cdot t_{\text{symbol}}$	t_{symbol}
SRM-Mittelungsdauer (VBW)	$4 \cdot t_{\text{symbol}}$ (2 kHz)	-0,4	-0,6	-1,0
	$2 \cdot t_{\text{symbol}}$ (4 kHz)	0,2	-0,1	-0,5
	t_{symbol} (8 kHz)	0,6	0,4	0,0

Ergänzend sind in Tabelle 3.5 die Differenzen der Messergebnisse zwischen SRM-3006 und FSW *im konventionellen Spectrum-Modus* bei der Bestimmung der SSB-Leistung für unterschiedliche Mittelungszeiten dargestellt. Im Wesentlichen werden die Erkenntnisse aus dem Zero-Span-Modus bestätigt. Die Messwerte des FSW fallen in diesem Modus jedoch systematisch um knapp 0,1 dB niedriger aus als bei Zero Span. Dies unterstreicht die bessere Eignung einer Messung auf einer festen Frequenz (Zero Span) bei gepulsten Signalen. Auch hier zeigt sich, dass es mit dem SRM-3006 bei einer Mittelung über vier Symbole zu einer Unterschätzung der Immission kommt (0,3 dB), wenn auch es bei einer Mittelung über zwei Symbole aufgrund der niedrigeren Messwerte des FSW zu einer betragsmäßig ähnlich hohen Überschätzung kommt.

Tabelle 3.5: Differenzen der Messwerte von SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (Spectrum) in dB bei der Messung des SSB mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Differenz der SSB-Messwerte zwischen SRM-3006 und FSW in dB		FSW-Mittelungsdauer (Spectrum)		
		$4 \cdot t_{\text{symbol}}$	$2 \cdot t_{\text{symbol}}$	t_{symbol}
SRM-Mittelungsdauer (VBW)	$4 \cdot t_{\text{symbol}}$ (2 kHz)	-0,3	-0,6	-0,9
	$2 \cdot t_{\text{symbol}}$ (4 kHz)	0,3	0,0	-0,3
	t_{symbol} (8 kHz)	0,7	0,4	0,1

3.2.4 Vorgeschlagenes Verfahren

In Tabelle 3.6 sind die zur Durchführung von frequenzselektiven Messungen der SSB-Immission für das SRM-3006 vorgeschlagenen Messeinstellungen dokumentiert. Zusätzlich werden die basierend auf den Untersuchungen für LTE abgeleiteten Parameter für den Laborspektrumanalysator FSW für die beiden Betriebsmodi „Spectrum“ und „Zero Span“ zusammengefasst. Das Verfahren ist für die Schwenkmethode zur Bestimmung des räumlichen Immissionsmaximums geeignet. Für die Hochrechnung auf Maximalimmission sind die mit leicht unterschiedlichen Auflöseseitenbreiten ermittelten Messwerte auf eine feste Bezugsbandbreite (z.B. analog zu codeselektiven Messungen auf die Breite eines OFDM-Trägers) zu skalieren. Hierbei ist anstelle der Auflöseseitenbreite RBW von der äquivalenten Rauschbandbreite NBW des für die Messung gewählten Selektionsfilters auszugehen (siehe Anhang „Beschreibung der Verfahren zu Kapitel 3“).

Tabelle 3.6: Vorgeschlagene bzw. abgeleitete Einstellparameter zur Durchführung frequenzselektiver Messungen der SSB-Immission mit dem SRM-3006 bzw. mit dem FSW.

	SRM-3006	FSW	
Betriebsart	Level Recorder	Spectrum	Zero Span (bevorzugt)
Mittelfrequenz	Mittelfrequenz des SSB		
Auflösebandbreite (RBW)	3,2 MHz	3 MHz	3 MHz
Anzeige/Trace	Peak Max	Maximum	Maximum
Mittelwertbildung	Videofilter mit der Bandbreite VBW = 4 kHz	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 35,8 ms Sweep-Points: 501	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 71,5 ms Sweep-Points: 1001

3.2.5 Fazit

Mithilfe des frequenzselektiven Messverfahrens zur Bestimmung der SSB-Immission wird eine Basis zur Hochrechnung auf Maximalimmission geschaffen. Hierzu ist es zum einen erforderlich das Maximum der räumlich und ggf. zeitlich schwankenden SSB-Immission festzustellen (z.B. mithilfe des Schwenkverfahrens). Zum anderen ist es auch erforderlich, dass die Immission bezogen auf die Dauer des SSB-Pulses leistungsbezogen gemittelt wird. Aus früheren

Untersuchungen im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz zu Immissionsmessverfahren für LTE [BSW 12] ist bekannt, dass die Mittelungsdauer die Länge eines Pulses nicht überschreiten soll. Bei einer längeren Mittelungsdauer kommt es aufgrund der Einbeziehung möglicher Pausen zwischen den Pulsen zu einer Unterschätzung der Immission. Bei einer kürzeren Mittelungsdauer kann es aufgrund der nicht mehr vollständigen Glättung der Signalfluktuationen innerhalb des Pulses zu einer Überschätzung der Immission kommen.

Für Laborspektrumanalysatoren wurde in [BSW 12] bereits ein geeignetes Mittelungsverfahren zur Messung von LTE-Synchronisierungssignalen validiert. Dieses basiert auf der Verwendung des RMS-Detektors und einer einstellbaren Verweildauer pro Anzeigepunkt des Messgeräts. Da 5G im Physical Layer hinsichtlich des rauschähnlichen Signalverlaufs und der Pulsung aufgrund der Nutzung von OFDM für Immissionsmessungen vergleichbar mit LTE ist, kann das Mittelungsverfahren auf 5G übertragen werden. Wegen des bei 3,6 GHz verwendeten Trägerabstands von 30 kHz sind die OFDM-Symbole lediglich halb so lang wie bei LTE.

Für die Messung von rauschähnlichen gepulsten Signalen mit dem SRM-3006 eignet sich der Betriebsmodus „Level Recorder“. Mithilfe des integrierten Videofilters lässt sich die Mittelungsdauer einstellen. Aufgrund der exponentiell abklingenden Impulsantwort des Videofilters führt eine Mittelung über alle vier Symbole des SSB zu einer Unterbewertung der Signalleistung von 0,6 dB. Sofern die Mittelungsdauer auf zwei Symbole verkürzt wird, reduziert sich die durch das Einschwingverhalten des Filters bedingte Unterbewertung auf 0,1 dB. Jedoch wird damit nicht mehr über die gesamte Pulsdauer gemittelt, sodass die verbleibenden Signalfluktuationen zu einer Überbewertung der Signalleistung führen können. Diese beiden Effekte (Unter- und Überbewertung) treten überlagert auf. Im Sinne einer konservativen Immissionsabschätzung wird daher eine Mittelung über die halbe Pulsdauer (zwei Symbole) empfohlen.

Beim SRM-3006 ergibt eine leistungsbezogene Mittelwertbildung des SSB-Pulses bei Mittelungen über zwei Symbole (halber Puls) sowie über ein Symbol (Viertelpuls) äquivalente Ergebnisse wie die entsprechende Mittelung mit einem Spektrumanalysator mittels des RMS-Detektors. Bei Mittelungen über vier Symbole (ganzer Puls) bestätigen sich die theoretischen Erwartungen und beim SRM-3006 kommt es zu Unterbewertungen der Immission.

Eine zusätzliche Validierung der Messwerte mithilfe einer thermischen Messung konnte aufgrund des niedrigen Duty Cycles des SSB nicht durchgeführt werden. Für Messungen des PDSCHE, welcher zwar eine Mindestdauer von nur einem OFDM-Symbol aufweist, aber mit deutlich höherem Duty Cycle gesendet werden kann, wurden thermische Referenzmessungen durchgeführt und in Teilkapitel 3.5 dokumentiert.

3.3 Codeselektive Messtechniken zur Bestimmung von 5G-Maximalimmissionen

3.3.1 Einleitung und Übersicht der codeselektiven Messgeräte

In diesem Kapitel werden die in Teilkapitel 2.3.2 anhand ihrer technischen Spezifikationen vergleichend gegenübergestellten codeselektiven Messgeräte exemplarisch erprobt. Die Erprobungen fanden einerseits im Feld, d.h. „over-the-air“ an einer 5G-Basisstation im Regelbetrieb, statt. Zusätzlich wurden auch leitungsgebundene Labormessungen an einem Signalgenerator

durchgeführt, der ein 5G-Signal erzeugte. Da die Möglichkeiten des Signalgenerators hinsichtlich der Generierung eines Signals mit mehreren Physical Cell-IDs (PCI, mehrere Sektoren einer oder mehrerer Basisstationen) sowie mit mehreren SSB-Beams (die mit der Systemtechnik von Huawei in Deutschland betriebenen Anlagen strahlen insgesamt sieben SSB-Beams pro Zelle in verschiedene Richtungen aus) eingeschränkt sind, wird den Feldmessungen eine höhere Priorität beigemessen. Die Messungen am Signalgenerator dienten in erster Linie zur Überprüfung der Empfindlichkeit der codeselektiven Messgeräte bei definierten verschiedenen absoluten und relativen Eingangspegeln, die im Feld nur schlecht nachbildbar sind.

In die Untersuchungen wurden folgende codeselektive Messgeräte einbezogen:

- VIAVI CellAdvisor 5G CA5000
- Keysight N9912A/N9952A FieldFox Handheld RF Analyzer
- Rohde & Schwarz TSMA6
- Anritsu Field Master Pro MS2090A

Da die durchgeführten Untersuchungen primär dazu dienen sollen, die Möglichkeiten und Grenzen von codeselektiven Messgeräten an sich darzustellen und nicht eine Beschaffungsempfehlung für ein konkretes Gerät auszusprechen, werden die nachfolgenden Ergebnisse in anonymisierter Form dargestellt, d.h. als

- Gerät 1
- Gerät 2
- Gerät 3
- Gerät 4.

Die Reihenfolge der Geräte stimmt dabei nicht mit der oben genannten konkreten Herstellerliste überein.

Bis auf den Anritsu Field Master Pro MS2090A, der sich im Bestand der RWTH Aachen bzw. des mit dem dortigen Institut für Hochfrequenztechnik kooperierenden Fraunhofer Instituts für Hochfrequenzphysik und Radartechnik befindet, wurden alle Geräte unentgeltlich von den jeweiligen Herstellern zur Verfügung gestellt. Die Hersteller waren bei den Messungen nicht anwesend; lediglich die Labormessungen wurden bei der Firma Rohde & Schwarz in München durchgeführt.

3.3.2 Vergleichsmessungen

3.3.2.1 Feldtests

Die Feldtests wurden im August 2020 an einer 5G-Anlage der Deutschen Telekom in Berlin durchgeführt. Die Anlage arbeitet bei einer Mittenfrequenz von 3,65 GHz. Sie wird mit massive MIMO Antennen und Systemtechnik von Huawei betrieben und sendet insgesamt sieben SSB-Beams aus, die im Weiteren mit 0...6 indiziert sind. Bild 3.3.2 zeigt ein Lagebild der Anlage und des Messpunktes. Die Anlage ist als dreisektorige Station aufgebaut; der Abstand zwischen Messpunkt und Anlage beträgt etwa 54 m. Der Messpunkt lag etwa am horizontalen

Zellrand, d.h. in der Übergangszone zwischen den Sektoren mit den Physical Cell IDs (PCI) 393 und 395. Vom Messpunkt bestand freie Sicht zur Anlage.

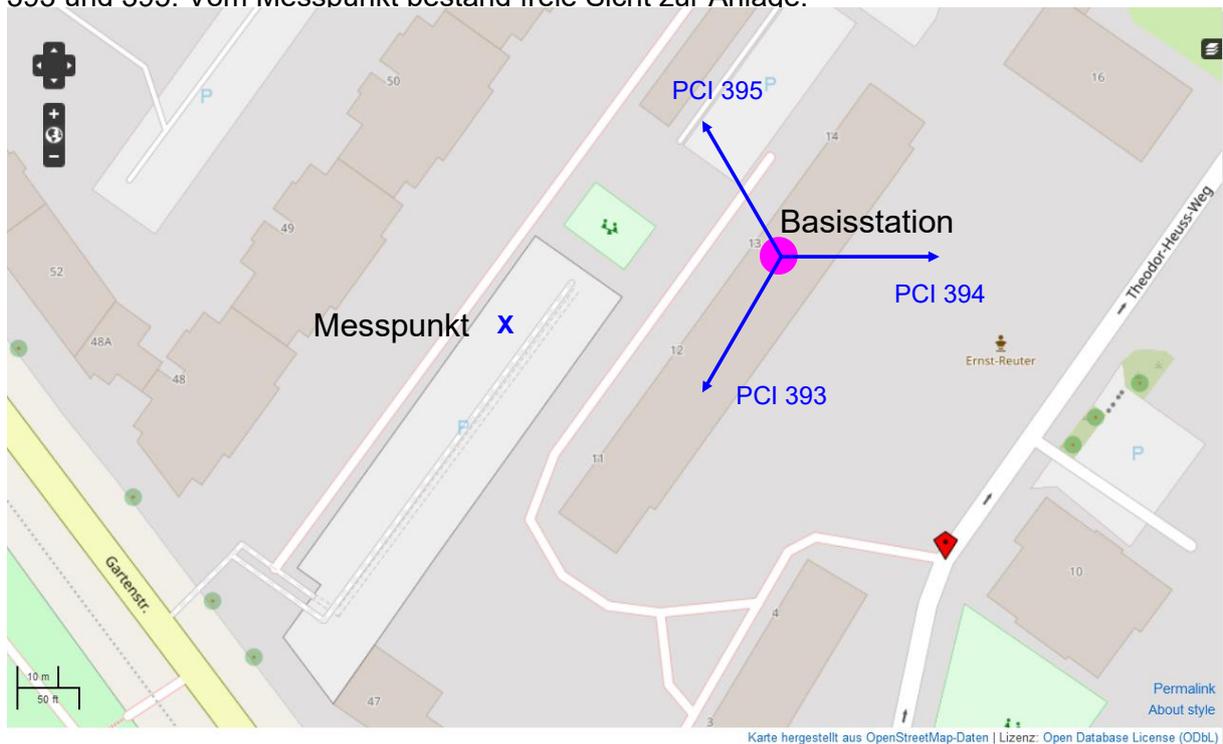


Bild 3.3.2: Lageplan der für die codeselektiven Feldtests verwendeten Anlage und des Messpunkts. Die blauen Pfeile kennzeichnen die Sektorausrichtungen. Karte von OpenStreetMap, © OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org, Nutzungsbedingungen unter www.openstreetmap.org/copyright.

Am Messpunkt wurde eine logarithmisch-periodische Antenne (Rohde & Schwarz HL 025) auf einem Stativ befestigt und auf die Anlage ausgerichtet. An die Antennen wurden nacheinander die zu überprüfenden codeselektiven Messgeräte und – als Referenz – das Narda SRM-3006 mit demselben Kabel angeschlossen. Durch den Stativaufbau konnte sichergestellt werden,



Bild 3.3.1: Lage des Messpunktes in Relation zur Basisstation (links) und Aufbau der Messantenne auf dem Stativ mit den untersuchten Messgeräten (rechts)

dass jedes Messgerät genau dieselben SSB-Signale zur Verfügung gestellt bekam (siehe Bild 3.3.1).

Die Messergebnisse wurden, ohne die Berücksichtigung eines Antennenfaktors, direkt als Leistungswerte in dBm abgelesen. Als gemeinsame Referenz wurde das Narda SRM-3006 in der Betriebsart „Scope“ verwendet; die sich dabei ergebenden Messwerte sind in Bild 3.3.3 dargestellt. Dieser Modus beinhaltet beim Narda SRM-3006 keine codeselektive Messmöglichkeit sondern eine frequenzselektive Messung, diese ist aber hinsichtlich des geräteinternen Messablaufs und der optimalen Einstellparameter äquivalent zum bereits in Teilkapitel 3.2 zur Erfassung der SSB-Immissionen präferierten Mode „Level Recorder“. Dies wurde am Messpunkt durch Vergleichsmessungen in den Modi „Scope“ und „Level-Recorder“ überprüft. Im Gegensatz zum „Level-Recorder“ gestattet der Scope-Mode jedoch die separate Erfassung der Immission durch alle SSB-Beams.

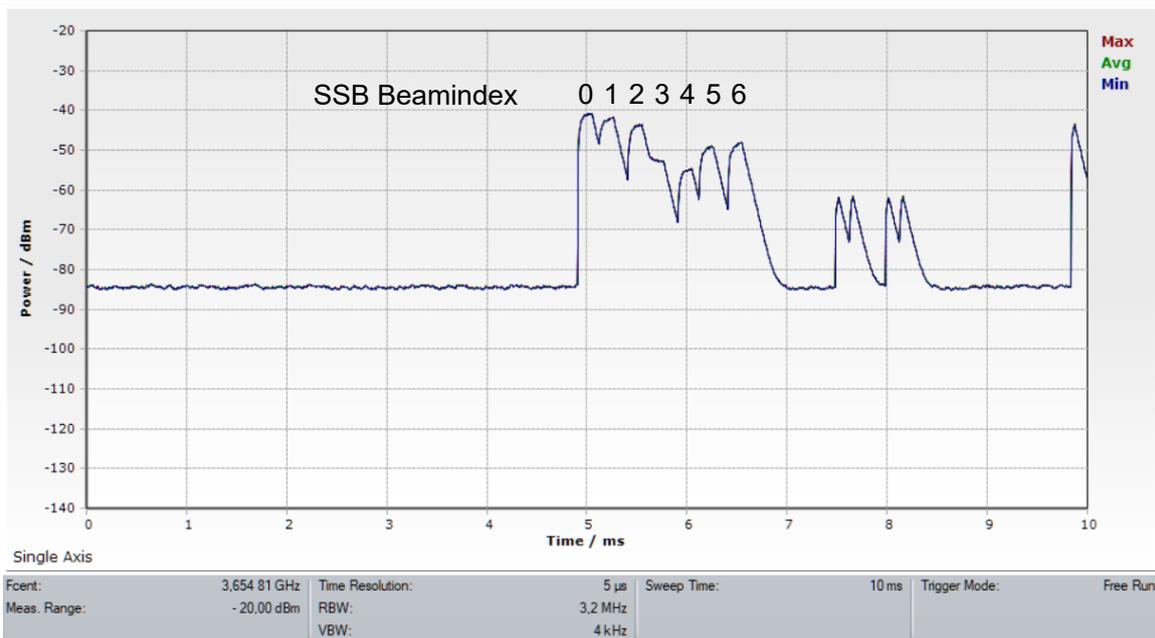


Bild 3.3.3: Ergebnisse der Referenzmessung mit dem Narda SRM-3006. (Anmerkung: Die Min-, Avg und Max-Kurven sind identisch und liegen übereinander)

Bei den codeselektiven Messungen wurde die vom Messgerät ausgegebene Leistung des Secondary Synchronization Signals ausgewertet, die sich als Leistung bezogen auf ein Resource Element versteht (EPRE S-SS). Da das SRM-3006 mit den gewählten Geräteeinstellungen alle Träger innerhalb der eingestellten Messbandbreite von 3,2 MHz erfasst (also 106 Träger bei einem Trägerabstand von 30 kHz), ist vom Ablesewert noch der Wert von 20,3 dB abzuziehen ($10 \cdot \log 106$), um auf die EPRE zu schließen. Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass alle Resource Elemente innerhalb des SSB mit derselben EPRE abgestrahlt werden, was bei dieser Anlage laut Angabe der Deutschen Telekom der Fall war. Darüber hinaus ist zu beachten, dass mit dem SRM eine leistungsbezogene Summation der Immissionsanteile aller drei Sektoren (und ggf. noch anderer auf derselben Frequenz arbeitenden Basisstationen) erfolgt. Deswegen wurden bei der Auswertung die mittels der codeselektiven Messungen ermittelten Werte ebenfalls über alle drei Sektoren leistungsbezogen aufaddiert. Durch die Referenzmessung im Scope-Modus konnte ausgeschlossen werden, dass der SSB während der Messungen durch Verkehr überdeckt war.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind in Tabelle 3.7 dargestellt. Als „Δ Referenz“ ist die Differenz zwischen codeselektivem Messwert und Referenzwert ausgewiesen. Der Vergleich der Messwerte erfolgt beamspezifisch.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Vergleichsmessungen der codeselektiven Messungen im Feld.
Ein „-“ bedeutet, dass kein Messwert ausgegeben wurde.

Gerät	Immissionsmesswert in dBm für Beamindex						
	0	1	2	3	4	5	6
SRM-3006	-40,7	-41,8	-43,5	-52,6	-54,6	-48,9	-48,1
Referenzwert	-61,0	-62,1	-63,8	-72,9	-74,9	-69,2	-68,4
Gerät 1							
PCI 393	-61,7	-63,3	-64,3	-	-75,5	-69,7	-68,4
PCI 395	-	-	-64,8	-74,0	-75,3	-69,7	-68,4
PCI 394	-	-	-	-	-	-	-
Summe	-61,7	-63,3	-61,5	-74,0	-72,4	-66,7	-65,4
Δ Referenz	-0,7	-1,2	+2,3	-1,1	+2,5	+2,5	+3,0
Gerät 2							
PCI 393	-61,8	-62,0	-73,6	-86,1	-80,4	-70,9	-70,3
PCI 395	-72,6	-75,5	-64,2	-73,6	-76,6	-74,2	-70,3
PCI 394	-70,4	-85,5	-81,5	-92,0	-93,5	-84,0	-81,9
Summe	-60,9	-61,8	-63,7	-73,3	-75,0	-69,1	-67,1
Δ Referenz	+0,1	+0,3	+0,1	+0,4	-0,1	+0,1	+1,3
Gerät 3							
PCI 393	-61,5	-62,5	-64,2	-	-	-69,4	-
PCI 395	-	-	-64,8	-	-	-	-
PCI 394	-	-	-	-	-	-	-
Summe	-61,5	-62,5	-61,5	-	-	-69,4	-
Δ Referenz	-0,5	-0,4	+1,3	-	-	-0,2	-
Gerät 4							
PCI 393	-	-62,5	-70,9	-	-	-70,3	-70,2
PCI 395	-	-76,2	-63,7	-	-	-74,9	-74,2
PCI 394	-	-79,7	-78,4	-	-	-85,3	-82,6
Summe	-	-62,2	-62,8	-	-	-68,9	-68,6
Δ Referenz	-	-0,1	+1,0	-	-	+0,3	-0,2

Eine Abschätzung mit Hilfe des Gewinns der verwendeten Messantenne (etwa 6,6 dBi bei 3.650 MHz) und der Verluste des Zuleitungskabels (ca. 1,8 dB bei 3.650 MHz) ergibt, dass ein gemessener Leistungspegel von -70 dBm EPRE einer Feldstärke von etwa 74 dBµV/m (Feldstärke pro Resource Element) vor der Antenne entspricht.

Aus den Messergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei der Empfindlichkeit der Messgeräte gibt es erhebliche Unterschiede. Lediglich Gerät 2 war in der Lage, jeweils alle sieben Beams aller drei Sektoren anzuzeigen (Bemerkung: Gerät 2 hat darüber hinaus auch alle Beams und alle Sektoren von einer etwa 1 km Luftlinie entfernten Nachbarstation ohne Sichtverbindung desselben Betreibers dekodieren können, obwohl die logarithmisch-periodische Messantenne auf die Anlage vor Ort ausgerichtet war). Die anderen Messgeräte konnten einzelne Beams bzw. einzelne Sektoren nicht dekodieren. Das betrifft bei Gerät 4 auch Beam 0 des Sektors mit der PCI 393, der die größte Einzelfeldstärke am Messpunkt erzeugte. Dies ist umso erstaunlicher, als dass Gerät 4 ansonsten bei denjenigen Beamindizes, die erkannt werden, alle drei Zellen dekodieren konnte.
- Hinsichtlich der Genauigkeit geben die Geräte 2, 3 und 4 ein ähnliches Bild ab: Die Abweichungen zum Referenzwert liegen meist unter $\pm 0,5$ dB mit jeweils einem Ausreißer pro Gerät. Die Abweichungen vom Gerät 1 erreichen mit bis zu $+3,0$ dB durchgängig höhere Werte.
- Insgesamt erreicht Gerät 2 hinsichtlich Empfindlichkeit und Genauigkeit die besten Ergebnisse. Die anderen Geräte fallen mehr oder weniger deutlich ab, da sie nicht in der Lage sind, alle Beams bzw. alle Zellen zu dekodieren und speziell im Fall von Gerät 1 eine deutlich schlechtere Genauigkeit aufweisen.

Bei den Messungen wurden auch die Dekodiergeschwindigkeiten bzw. Aktualisierungsraten untersucht, d.h. wieviel Zeit wird für einen Dekodierungsdurchlauf benötigt (vergleichbar mit der „Sweepzeit“ beim Spektrumanalysator). Diese Aktualisierungszeit war mit 0,75 s beim Gerät 2 am besten. Gerät 1 erreichte mit 0,8 s einen ähnlich guten Wert, gefolgt von Gerät 4 mit 1 s. Am langsamsten und damit für die Schwenkmethode ungeeignet ist Gerät 3 mit 2,5 s pro Dekodierungsdurchlauf.

3.3.2.2 Labortests

Die Labortests wurden im August 2020 bei Rohde & Schwarz in München durchgeführt. Für die Erzeugung des 5G-Signals wurden verwendet:

- 1 x Rohde & Schwarz CMX für die 5G-Signalerzeugung im Basisband
- 2 x Rohde & Schwarz CMWflexx als Frontend
- 1 x Rohde & Schwarz CMW-C als Kontrollrechner

Mit diesen Geräten wurden zwei 5G SSB-Signale bei 3.576 MHz mit den PCI 0 und PCI 1 erzeugt, die zwei Zellen einer Basisstation nachbilden sollten. Im Gegensatz zu den Feldmessungen konnte pro Zelle nur ein einziger SSB-Beam generiert werden. Bei den Messungen wurden die Pegel für beide Zellen sowohl absolut, als auch relativ variiert, um Messpunkte mit verschiedenem Abstand zur Basisstation und unterschiedlicher Lage zwischen zwei Sektoren nachzubilden. In nachfolgender Tabelle sind die jeweiligen Generatoreinstellungen (jeweils als EPRE für S-SS) für die Zellen PCI 0 und PCI 1 angegeben, wobei zu berücksichtigen ist, dass zwischen Generatorausgang und Messgeräteeingang Kabel- und Combinerverluste von etwa

6 dB auftraten. Im Gegensatz zu den Feldmessungen wurde keine Referenzmessung mit dem SRM-3006 durchgeführt.

Tabelle 3.8 fasst die ermittelten Messwerte zusammen. Die Zuordnung der Geräte 1-4 ist identisch zu den Untersuchungen in Teilkapitel 3.3.2.1. In Tabelle 3.8 ist zu berücksichtigen, dass in der linken Spalte die *am Generator eingestellten Leistungspegel* angegeben werden, die aufgrund der Combiner- und Kabelverluste aber um etwa 6 dB gedämpft am Eingang des jeweiligen Messgerätes vorlagen. Die exakten Verluste durch Combiner und Kabel wurden jedoch nicht messtechnisch ermittelt.

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Vergleichsmessungen der codeselektiven Messungen am Signalgenerator. Ein „-“ bedeutet, dass kein Messwert ausgegeben wurde.

Generatorleistung in dBm für		Vom Messgerät angezeigte Leistung in dBm							
		Gerät 1		Gerät 2		Gerät 3		Gerät 4	
PCI 0	PCI 1	PCI 0	PCI 1	PCI 0	PCI 1	PCI 0	PCI 1	PCI 0	PCI 1
-75,0	-75,0	-	-	-81,1	-81,1	-81,3	-	-82,2	-
-65,0	-65,0	-73,5	-72,2	-71,3	-71,7	-71,4	-	-71,6	-
-65,0	-71,0	-74,4	-76,1	-71,3	-78,0	-72,2	-	-72,0	-
-65,0	-75,0	-74,7	-	-71,3	-81,3	-72,3	-	-71,5	-
-65,0	-85,0	-74,5	-	-71,3	-	-72,1	-	-71,4	-
-65,0	-55,0	-74,2	-64,0	-71,3	-61,2	-72,5	-62,5	-71,3	-61,2
-55,0	-45,0	-63,5	-53,3	-61,5	-51,4	-62,8	-52,6	-61,3	-51,2

Aus den Messergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Empfindlichkeitsschwelle ist messgeräteabhängig und liegt etwa im Bereich zwischen -70 dBm und besser als -80 dBm.
- Bei Vorliegen von zwei gleich starken Signalen aus unterschiedlichen Zellen (PCI) sind einige Messgeräte nur in der Lage, eine der beiden Zellen anzuzeigen. Dies führt im Mittel zu einer Unterbewertung der Summenimmission von 3 dB.
- Nur Gerät 2 war in der Lage, Pegeldifferenzen von 10 dB zwischen den beiden Zellen korrekt aufzulösen. Bei einer Differenz von 20 dB kam jedoch auch dieses Messgerät an seine Grenzen, wobei zu bemerken ist, dass aus Immissionsicht keine Notwendigkeit für eine Auflösung solcher hoher Pegelunterschiede besteht.
- Die Messgenauigkeit der Messgeräte 2-4 ist vergleichbar gut bzw. im Falle von Messgerät 2 auch sehr gut. Lediglich Messgerät 1 weist eine geringere Messgenauigkeit auf, was grundsätzlich die Ergebnisse der Feldmessungen bestätigt.

Bei den Messgeräten 1, 3 und 4 ist die Messgenauigkeit des Pegels für die Zelle 0 bei unveränderter Generatorleistung vom eingestellten Generatorpegel der Zelle 1 abhängig. Lediglich Gerät 2 zeigt bei allen Messdurchläufen mit einem für Zelle 0 eingestellten Pegel von -65 dBm

konstant einen Wert von -71,3 dBm an. Bei den anderen Geräten variiert die Anzeige um bis zu 1,2 dB (Gerät 1).

3.3.2.3 Fazit

Als Gesamtfazit der durchgeführten Untersuchungen an den codeselektiven Messgeräten unter Feld- und Laborbedingungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Grundsätzlich sind mit allen der getesteten codeselektiven Messgeräte Immissionsmessungen an 5G-Anlagen möglich. Im konkreten Anwendungsfall gibt es jedoch folgende Einschränkungen, die die Anwendbarkeit der Geräte beeinflussen können:

- **Empfindlichkeit:** Nicht alle Geräte sind gleich empfindlich. Die Empfindlichkeitsschwelle ist messgeräteabhängig und liegt etwa im Bereich zwischen -70 dBm EPRE und besser als -80 dBm EPRE. Die in den Herstellerunterlagen angegebenen Empfindlichkeiten (siehe Tabelle 2.10) werden bei den Feld- und Laboruntersuchungen nicht erreicht. Eine Mindestempfindlichkeit von -80 dBm EPRE führt unter Verwendung der in Teilkapitel 3.3.2.1 angesetzten Werte für Antennengewinn und Kabeldämpfung auf eine entsprechende Feldstärke von 64 dB μ V/m EPRE. Diese würde bei Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung einer 5G mMIMO Anlage bei 3,6 GHz (Signalbandbreite 98,28 MHz entsprechend 3.276 Resource Elemente, angenommener maximaler Gewinnunterschied zwischen Traffic Beams und Broadcast Beam von 7 dBi) einer extrapolierten Feldstärke von 0,2 V/m bzw. 0,3 % Grenzwertausschöpfung entsprechen, die noch sicher nachgewiesen werden könnte. Bei -70 dBm EPRE hingegen könnten noch 0,6 V/m bzw. 1 % Grenzwertausschöpfung nachgewiesen werden.
- **Messgenauigkeit:** Abgesehen von Gerät 1 liegen alle Messgeräte in einem für Immissionsmessungen geeigneten Genauigkeitsbereich (d.h. innerhalb etwa ± 1 dB). Allerdings ist festzustellen, dass die Anzeigegenauigkeit bei einigen Geräten auch davon abhängt, ob und wie stark Immissionen von Nachbarzellen der gleichen Anlage bzw. von benachbarten Anlagen am Messpunkt vorliegen. Signale durch Nachbarzellen können im Extremfall auch dazu führen, dass sie überhaupt nicht mehr dekodiert werden können, auch wenn sie gleich oder ähnlich stark wie die der „Hauptzelle“ sind.
- **Dekodierzeit:** Die aus der Dekodierzeit ableitbare Aktualisierungszeit reicht von 0,75 s bis zu 2,5 s. Sofern bei den Messungen die Schwenkmethode angewendet wird, sind Aktualisierungszeiten von mehr als einer Sekunde nicht praktikabel. Es ist zu beachten, dass die oben ermittelten Aktualisierungszeiten sich bei der Verwendung einer einachsigen Antenne ergeben. Würden ungeachtet einer Ansteuermöglichkeit solcher Antennen durch das Gerät isotrope Antennen mit automatischer Umschaltung der drei Messachsen verwendet, erhöht sich die Aktualisierungszeit um mehr als den Faktor 3 und liegt damit bei allen Geräten außerhalb des praktikablen Bereiches. Deswegen muss bei den getesteten Geräten grundsätzlich die Verwendung einer einachsigen Antenne empfohlen werden, sofern die Schwenkmethode verwendet wird.
- **Maxhold:** Für Immissionsmessungen ist die Maxhold-Funktionalität des Messgerätes, d.h. ein „Festhalten“ des während der Messzeit ermittelten Maximalwertes, unabdingbar. Derzeit verfügt nur das Gerät Nr. 2 über die Maxhold-Funktion.

3.4 Verfahren zur Bestimmung maximal möglicher 5G-Immissionen mittels Hochrechnung

3.4.1 Vorstellung des Hochrechnungsverfahrens

3.4.1.1 Vorbemerkung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Ermittlung der am Messpunkt vorhandenen Maximalimmission durch Extrapolation codeselektiv gemessener Referenzsignale. Hierbei sollen nur Verfahren betrachtet werden, bei denen die Messung ohne spezielle Unterstützung durch den Netzbetreiber oder Systemtechniklieferanten jederzeit erfolgen kann. An der Basisstation sollen also vorab keine speziellen Betriebszustände eingestellt werden; die Messung kann an Stationen erfolgen, die sich im gewöhnlichen Wirkbetrieb befinden. Vergleichbare Verfahren wurden in den letzten 15 Jahren bereits für GSM-, UMTS- und LTE-Mobilfunkbasisstationen entwickelt und erprobt [BS 05], [BSW 06], [BSW 12]. Das Messverfahren für 5G-Antennen soll in seiner grundsätzlichen Philosophie diesen folgen.

3.4.1.2 Hochrechnung bei 5G-Anlagen ohne Beamforming-Antennen

Konventionelle Antennen ohne elektronische Strahlschwenkung verhalten sich statisch, d.h. ihre Abstrahlcharakteristik ist zeitinvariant, insbesondere wird kein schmaler Antennenbeam ausgebildet, dessen Hauptstrahlrichtung verändert werden kann. Vielmehr wird die gesamte Funkzelle durch die abgestrahlten Signale ausgeleuchtet. Je nachdem wo sich der Messort relativ zur Hauptsenderichtung der Antenne befindet, werden die gemessenen Immissionen größer oder kleiner ausfallen.

Werden also bei 5G konventionelle Antennen ohne Strahlschwenkung eingesetzt, wird die maximal am Messort mögliche Immission dann auftreten, wenn die Antenne mit ihrer maximal möglichen Leistung gespeist wird, so dass sie die größtmögliche EIRP abstrahlt. Zudem werden Broadcast- und Trafficsignale über die gleiche Antennencharakteristik in die Funkzelle abgestrahlt. Die Maximalfeldstärke E_{\max} kann daher in vergleichbarer Art und Weise ermittelt werden, wie es bei LTE-Sendeanlagen bereits seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert wird, denn 5G und LTE verwenden beide als Vielfachzugriffsverfahren OFDM.

Das Prinzip dieser Messung beruht auf der Ermittlung der Feldstärke, verursacht durch ein auslastungsunabhängiges Referenzsignal mit anschließender Extrapolation. Die Erfassung sollte hierbei zellspezifisch, also codeselektiv erfolgen. Allerdings ist bis zur Verfügbarkeit geeigneter codeselektiver Messgeräte für 5G auch die frequenzselektive Erfassung des SSB-Blocks denkbar. Die Extrapolation kann dann allerdings in vielen Fällen nur mit begrenzter Genauigkeit erfolgen, da die Feldstärkewerte der einzelnen Referenzsignale nicht zellspezifisch aufgelöst werden können. Daher wird auf diese Alternative im Folgenden nicht näher eingegangen.

Für die codeselektive Messung ist das sekundäre Synchronisationssignal (SSS) im SSB-Block des 5G-Signals am besten als Referenzsignal für die Extrapolation geeignet, da dieses zellspezifisch codiert ist [Kel 19]. Meist wird hierbei vom Messgerät die Feldstärke pro Resource Element, also pro Subcarrier geliefert. Die von diesem Referenzsignal erzeugte Feldstärke

$E_{SSS,RE}$ wird mittels eines Leistungskorrekturfaktors K_P auf die Immission extrapoliert, die das Signal in seiner gesamten Bandbreite bei Vollauslastung generiert (d.h. alle Resource Elemente sind aktiviert und senden mit ihrer maximal möglichen Leistung).

Der Extrapolationsfaktor K_P errechnet sich aus der maximalen Leistung der Funkzelle $P_{max,cell}$ und der Leistung des SSS pro Resource Element $P_{SSS,RE,cell}$:

$$K_P = \sqrt{\frac{P_{max,cell}}{P_{SSS,RE,cell}}}$$

Die maximale Leistung $P_{max,cell}$ der Anlage und die Leistung $P_{SSS,RE}$, mit der ein Resource Element des SSS abgestrahlt wird („SS-PBCH-Block-Power“) sind vom Netzbetreiber zu erfragen.

Wie auch bei LTE praktiziert, ist bei 5G-Systemen, welche die Betriebsart TDD (Time Division Duplex) verwenden, zusätzlich noch ein TDD-Korrekturfaktor K_{TDD} einzubeziehen ($K_{TDD} < 1$), dessen Größe von der im Netz eingestellten TDD-Konfiguration abhängig ist.

Bei Anlagen im TDD-Mode wird immer ein bestimmter Zeitanteil eines Radio Frame für den Uplink reserviert. Wie Abschnitt 2.1.3.3 bereits erwähnt, sind bei 5G eine viel größere Anzahl an UL/DL-Konfigurationen möglich, als es bei 4G der Fall ist. Ist die für die Anlage eingestellte UL/DL-Konfiguration nicht bekannt oder verwendet die Anlage eine sich adaptiv ändernde UL/DL-Konfiguration, sollte zur Sicherheit der Korrekturfaktor $K_{TDD} = 1$ (0 dB) gewählt werden, um eine Unterbewertung der Exposition zu vermeiden.

Wird hingegen eine statische UL/DL-Konfiguration verwendet und vom Netzbetreiber mitgeteilt, wieviel Prozent der Dauer eines Radio Frame für den Downlink reserviert ist, lässt sich der TDD-Korrekturfaktor daraus ermitteln.

$$K_{TDD} = \sqrt{\frac{t_{DL}}{10 \text{ ms}}}$$

t_{DL} = Zeit, die pro Radio Frame (Dauer: 10 ms) für den Downlink reserviert ist.

Bei 5G-Anlagen in Deutschland ist im Frequenzband um 3,6 GHz aktuell zirka 75 Prozent eines Radio Frame für den Downlink reserviert. Der TDD-Korrekturfaktor ergibt sich somit zu $K_{TDD} = 0,75$ (-1,25 dB).

Für Anlagen, welche die Betriebsart FDD (Frequency Division Duplex) verwenden, ist hingegen immer der TDD-Korrekturfaktor $K_{TDD} = 1$ zu verwenden.

Somit ergibt sich folgende Formel zur Extrapolation des Ergebnisses einer codeselektiven Messung des 5G-Referenzsignals (SSS):

$$E_{max} = E_{SSS,RE} \cdot K_P \cdot K_{TDD}$$

Damit steht für die Bestimmung der maximal möglichen Immission bei 5G-Anlagen ohne mMIMO-Antennen, d.h. beispielsweise für Anlagen, die in den unteren Mobilfunkbändern arbeiten (typisch bei oder unter 2 GHz) oder bei Small-Cell- und Indoorsystemen, ein Messverfahren für die Bestimmung der Maximalimmission zur Verfügung, das im Prinzip eine Abwandlung des entsprechenden Verfahrens bei LTE-Basisstationen darstellt.

3.4.1.3 Hochrechnung bei 5G-Anlagen mit Beamforming-Antennen

Die Bestimmung der Maximalimmission bei Anlagen mit Beamforming basiert grundsätzlich auf der gleichen Vorgehensweise, wie sie in Teilkapitel 3.4.1.2 für Anlagen mit Antennen ohne elektronische Strahlschwenkung beschrieben wurde. Allerdings muss hier noch ein weiterer Parameter, der „Antennenkorrekturfaktor“ K_{Ant} eingeführt werden, da bei Beamforming-Antennen die Möglichkeit besteht, dass das gemessene Referenzsignal (SSS) mit einer anderen Antennencharakteristik abgestrahlt wird (über den so genannten „Broadcast Beam“), als die für die Immission primär verantwortlichen und über den „Traffic Beam“ abgestrahlten Verkehrssignale (PDSCH). Abhängig von der eingestellten Anlagenkonfiguration werden die Verkehrssignale unter Umständen mit deutlich stärkerer Antennenbündelung und damit mit einem höheren Antennengewinn ($G_{Traffic}$) in Richtung des Immissionspunktes gesendet, als es beim Referenzsignal ($G_{Broadcast}$) der Fall ist. Da die Abstrahlcharakteristiken von Broadcast und Traffic Beam hierbei stark von Azimut φ und Elevation ϑ abhängig sind, ist der Korrekturfaktor ebenfalls eine Funktion von Azimut und Elevation, unter dem der Immissionspunkt aus Sicht der Antenne erscheint. Der Antennenkorrekturfaktor $K_{Ant}(\varphi, \vartheta)$ errechnet sich zu:

$$K_{Ant}(\varphi, \vartheta) = \sqrt{\frac{G_{Traffic}(\varphi, \vartheta)}{G_{Broadcast}(\varphi, \vartheta)}}$$

Somit ergibt sich für Anlagen mit Beamforming-Antennen die auf maximale Immission durch den Traffic Beam hochgerechnete Feldstärke zu:

$$E_{max} = E_{SSS,RE} \cdot K_P \cdot K_{TDD} \cdot K_{Ant}(\varphi, \vartheta)$$

Obige Formel kann auch als allgemeingültig für alle 5G-Anlagen angesehen werden. Bei Anlagen mit Antennen ohne Beamforming vereinfacht sich diese Formel, da wegen der Abstrahlung von Broadcast- und Trafficsignalen über die identische Antennencharakteristik der Antennenkorrekturfaktor zu $K_{Ant} = 1$ wird.

Erste publizierte Untersuchungen [BKS+ 19] von Messungen an Anlagen mit Beamforming zeigten bereits deutlich, dass die Einführung eines winkelabhängigen Antennenkorrekturfaktors (Azimut und Elevation) unverzichtbar ist, da eine Extrapolation unter Anwendung eines festen Korrekturfaktors (z.B. das Verhältnis aus dem jeweils größten Antennengewinn von

Traffic und Broadcast Beam) keine verlässlichen Resultate liefert. In [BKS+ 20] wird verdeutlicht, dass bei einer derartigen Vereinfachung insbesondere eine deutliche Unterbewertung der Maximalimmission auftreten kann.

Die codeselektive Erfassung des SSS vermeidet die in Teilkapitel 2.4 bereits angesprochenen Probleme, die bei der frequenzselektiven Erfassung des SSB auftreten können (Synchronisationsaufwand, Überdeckung des SSB durch den PDSCH). Zudem ist man bei dieser Art von Messung in der Lage, auch zellspezifische Korrekturfaktoren anzuwenden, falls beispielsweise die Pegel der Referenzsignale individuell für jede Funkzelle unterschiedlich konfiguriert sind.

Diese grundsätzliche Vorgehensweise zur Extrapolation bei 5G-Anlagen wird auch in der für die Immissionsbestimmung bei Basisstationen relevanten Norm IEC 62232 [IEC 62232] und der aktuellen Messempfehlung von METAS (Schweiz) vorgeschlagen [METAS 20]. Siehe dazu auch Teilkapitel 2.3.

Auch in der Messempfehlung der Bundesnetzagentur [BNetzA 20] wird dieses Verfahren vorgeschlagen, aktuell basiert es jedoch noch auf einer (sehr geräteintensiven und daher für den praktischen Einsatz nur bedingt geeigneten) frequenzselektiven Messung des SSB, da der BNetzA noch keine codeselektiven Messgeräte zur Verfügung stehen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Hauptsenderichtung des Broadcast Beams schrittweise durch den zu versorgenden Sektor geschwenkt werden kann (maximal sind acht unterschiedliche Senderichtungen möglich), ist bei der messtechnischen Erfassung der Feldstärkewerte, verursacht durch das SSS-Signal, unbedingt eine Max-Hold-Funktion im Messempfänger notwendig, denn als Basis für die Extrapolation soll ja der Broadcast Beam herangezogen werden, der am Messpunkt den größten SSS-Feldstärkewert liefert. Dies ist in den meisten Fällen der Beam, welcher auch am besten auf den Immissionspunkt ausgerichtet ist. Es kann aber unter bestimmten Umständen (z.B. bei starker Dämpfung des direkten Signalpfades zwischen Basisstation und Messpunkt) auch vorkommen, dass ein SSB, der in eine deutlich andere Richtung abgestrahlt wird, am Messpunkt über eine Reflexion das stärkste Signal erzeugt. Dann dient dieser als Referenz, zudem dann mit hoher Wahrscheinlichkeit auch ein in diese Richtung ausgesendeter Traffic Beam die Versorgung übernehmen wird.

Grundsätzlich muss aber an dieser Stelle festgehalten werden, dass bei indirekter Versorgung über Reflexionen der Antennenkorrekturfaktor vermutlich erhöhten Unsicherheiten unterworfen ist. Bisher wurde diese Fragestellung in der Literatur noch nicht genauer untersucht.

3.4.2 Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors K_{Ant}

3.4.2.1 Auswertung der Antennendiagramme

Wie in Teilkapitel 3.4.1.3 bereits erwähnt, ist für die Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors K_{Ant} die Größe des Antennengewinns von Broadcast Beam beziehungsweise Traffic Beam in Richtung zum Immissionsort notwendig. Um diese bestimmen zu können, müssen möglichst die dreidimensionalen Antennendiagramme beider Beams vom Antennenhersteller zur Verfügung gestellt werden. Da der Traffic Beam aber auch der Broadcast Beam bezüglich ihrer Hauptsenderichtungen geschwenkt werden können, müssen diese Diagramme für alle mögli-

chen Ausrichtungen der Beams vorliegen. Aus den Einzeldiagrammen ist dann das einhüllende Antennendiagramm („Hüllkurvendiagramm“) zu bilden, d.h. es ist für alle Raumrichtungen (φ, ϑ) als Antennengewinn der größte Wert aus allen vorliegenden Einzeldiagrammen zu verwenden.

Aktuell ist noch nicht abschließend geklärt, ob von den Antennenherstellern dreidimensionale Diagramme zur Verfügung gestellt werden oder ob sich die Dokumentation der Antennencharakteristik auf die Lieferung von den bisher in der Mobilfunk-Antennentechnik üblichen zweidimensionalen Diagrammen (Horizontal- und Vertikaldiagramm) beschränkt. In diesem Fall müsste die dreidimensionale Abstrahlcharakteristik aus den beiden Diagrammen durch Interpolation ermittelt werden, was jedoch niemals mit hundertprozentiger Genauigkeit erfolgen kann (siehe dazu beispielsweise die Ausführungen in [BS 05]). Zudem ist noch nicht ausreichend untersucht, in wie weit die im Labor ermittelten Antennendiagramme durch die reale Montageumgebung bzw. aufgrund von Reflexionen verändert werden und wie stark sich dies auf die Größe des Antennenkorrekturfaktors auswirkt.

Folgendes Bild zeigt beispielhaft das über 17 mögliche horizontale Beams einer mMIMO-Antenne (Winkelabstand zu einander jeweils 4°) gebildete einhüllende horizontale Antennendiagramm (Azimutdiagramm).

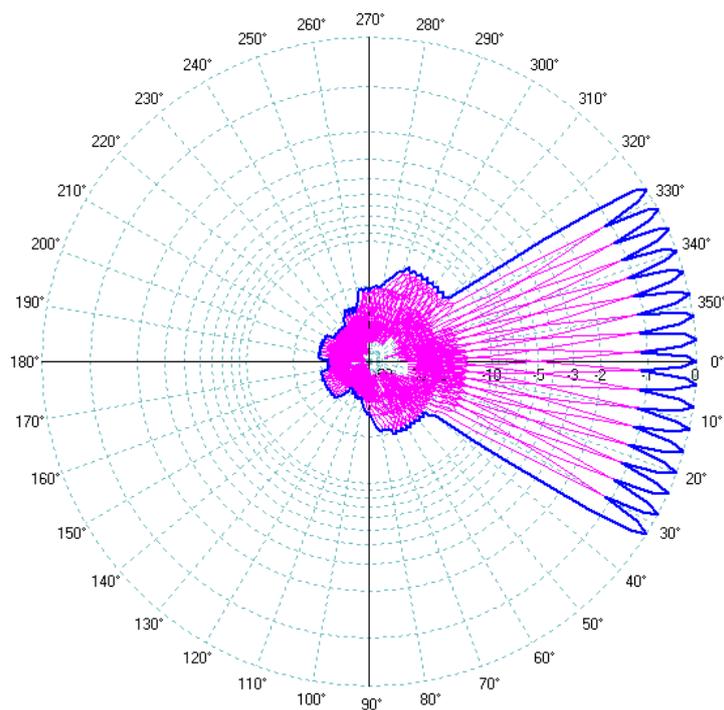


Bild 3.4.1: Prinzipdarstellung (Azimutdiagramm) des Hüllkurvendiagramms (blau) über 17 horizontal unterschiedlich ausgerichtete Antennenbeams (magenta). Normierte Darstellung im logarithmischen Maß (dB).

Der zur Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors $K_{Ant}(\varphi, \vartheta)$ notwendige Antennengewinnfaktor für Broadcast Beam und Traffic Beam ergibt sich bei Verwendung von zweidimensionalen Diagrammen als Produkt aus dem jeweils für den Winkel ϑ aus dem einhüllenden Vertikaldiagramm abgelesenen Gewinnfaktor G_{vert} und der für den Winkel φ aus dem einhüllenden Horizontaldiagramm ermittelten Winkeldämpfung A_{hor} . Liegen die Gewinn- bzw. Dämpfungswerte

im logarithmischen Maß (d.h. in dB) vor, wird statt dem Produkt die Summe der in den Diagrammen abgelesenen Werte gebildet.

Im Beispiel von Bild 3.4.1 erkennt man, dass über den gesamten horizontalen Schwenkbereich der Antenne (hier $\pm 32^\circ$) der Antennengewinn vergleichsweise konstant bleibt. Die Einzüge im Diagramm belaufen sich auf maximal etwas mehr als 1 dB.

3.4.2.2 Bestimmung des Azimut- (φ) und Elevationswinkels (ϑ)

Der Azimutwinkel φ , unter dem der Immissionspunkt aus Sicht der Antenne erscheint, lässt sich vergleichsweise einfach aus geeignetem Kartenmaterial bestimmen. Alternativ ist er auch aus den GPS-Koordinaten des Antennenstandortes und des Immissionspunktes errechenbar. Eine manuelle Ermittlung vor Ort ist bei vorliegender Sichtverbindung zwischen Immissionsort und Antenne beispielsweise mittels eines handelsüblichen Fernglases mit eingebauter Kompassskala möglich.

Der Elevationswinkel ϑ , unter dem der Immissionswinkel aus Sicht der Antenne erscheint, kann prinzipiell ebenfalls aus vorliegenden GPS-Daten des Immissionsortes und des Antennenstandortes ermittelt werden, wobei die zusätzlich notwendige Montagehöhe der Antenne am Standort meist der Standortbescheinigung der BNetzA entnommen werden kann.

Aus früheren Projekten bestehen auch gute Erfahrungen mit einer manuellen Bestimmung des Elevationswinkels bei vorliegender Sichtverbindung zwischen Immissionsort und Antenne durch Verwendung einer elektronischen Wasserwaage mit digitaler Neigungswinkelanzeige, auf die von einem Büchsenmacher ein Zielfernrohr angebracht und einjustiert wurde (siehe Bild 3.4.2).



Bild 3.4.2: Neigungswinkelmesser, bestehend aus einer elektronischen Wasserwaage mit angebrachtem Zielfernrohr.

Im Zubehörhandel für den Jagdbedarf werden Ferngläser angeboten, die mit Entfernungs- und Vertikalwinkelmesseinrichtungen ausgestattet sind.

Liegen jedoch keine GPS-Daten vor und besteht auch keine direkte Sichtverbindung zwischen Immissionsort und 5G-Antenne, können Azimut und Elevation unter Umständen vor Ort nur näherungsweise bestimmt werden. Allerdings treten an derartigen Orten (z.B. innerhalb von Gebäuden und dort speziell auf der Gebäudeseite, die bezüglich der 5G-Antenne abgewandt ist) meist deutlich geringere Immissionen auf, als an Orten mit direkter Sicht zur Antenne, so dass ein größerer Unsicherheitsfaktor bezüglich der Extrapolation toleriert werden kann, zumindest, wenn es um die Frage der Grenzwerteinhaltung geht.

3.4.2.3 Besonderheiten in der Messempfehlung von METAS

Seit Anfang Februar 2020 liegt die Schweizer Empfehlung zur Messung von Immissionen an 5G-Basisstationen im Frequenzbereich bis 6 GHz vor [METAS 20]. Diese wurde als technischer Bericht vom nationalen Schweizer Metrologischen Institut (METAS) veröffentlicht. Auch in dieser Empfehlung wird für die Bestimmung der Maximalimmission ein Messverfahren vorgeschlagen, das in seiner grundsätzlichen Philosophie mit den älteren Schweizer Messempfehlungen (GSM, UMTS, LTE) so weit wie möglich übereinstimmt. Daher schlägt auch die Schweizer Messempfehlung für die Bestimmung der theoretisch maximal möglichen Immission als primäres Verfahren vor, die Immission eines mit definierter Leistung abgestrahlten Referenzsignals (SSS) zu messen und das Ergebnis auf die theoretische Maximalimmission mittels geeigneter Faktoren zu extrapolieren.

Im Unterschied zu der in Teilkapitel 3.4.1 beschriebenen Vorgehensweise schreibt die Schweizer Empfehlung vor, bei Anlagen, die eine Sequenz von mehreren SSB (SSB Burst) aussenden, nicht nur das stärkste Signal als Basis für die Extrapolation heranzuziehen, sondern die leistungsbezogene Summe aller vorhandenen SSS eines Sektorscans zu bilden (entweder direkt vom Messgerät automatisch errechnet oder nachträglich im Rahmen des Postprocessing ermittelt).

Da in der Empfehlung von METAS aufgrund der in der Schweiz üblichen Vorgehensweise bei der Bewilligung von Mobilfunksendeanlagen nicht mit Leistungswerten, sondern mit ERP-Werten gearbeitet wird (ERP = Effective Radiated Power = Leistung multipliziert mit dem Antennengewinn, bezogen auf den Halbwellendipol), werden im weiteren Text die in der Schweizer Empfehlung zu findenden Unterschiede bei der Hochrechnung auf die in Teilkapitel 3.4.1 beschriebene Vorgehensweise sinngemäß übertragen, damit eine Übersichtlichkeit gewährleistet bleibt.

Der in Teilkapitel 3.4.1 bereits vorgestellte Korrekturfaktor K_P (Leistungskorrektur pro Resource Element des SSS im Vergleich zur Maximalleistung der Antenne) wird bei METAS sinngemäß in gleicher Art und Weise angewendet. Der TDD-Korrekturfaktor K_{TDD} findet sich ebenfalls in der METAS-Empfehlung, er wird dort allerdings als „Duplexfaktor“ bezeichnet.

Da bei der Messung der SSS-Signale gemäß METAS eine leistungsbezogene Summation der Felder, verursacht von mehreren nacheinander ausgesendeten Beams vorgenommen wird, darf auch beim Antennendiagramm für den Broadcast Beam nicht mehr das einhüllende Diagramm, sondern das Summendiagramm als Basis für die Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors herangezogen werden. Das Summendiagramm ergibt sich durch Summation aller in den jeweiligen Einzeldiagrammen für eine bestimmte Richtung (φ, ϑ) vorhandenen Antennengewinne $G(\varphi, \vartheta)$ in Dezibel bzw. durch Multiplikation der korrespondierenden Gewinnfaktoren im linearen Maßstab.

In Bild 3.4.3 ist das sich bei Verwendung der für Bild 3.4.1 verwendeten 17 Einzeldiagramme entstehende Summendiagramm dem bereits im Bild 3.4.1 gezeigten Hüllkurvendiagramm gegenübergestellt. Man erkennt, dass durch die Summenbildung die Einzüge zwischen den einzelnen Hauptsenderichtungen der Einzeldiagramme im Vergleich zum konventionellen Hüllkurvendiagramm stärker aufgefüllt werden, so dass sich über den gesamten Abdeckungsbe-

reich der Antenne ein nahezu konstanter Antennengewinn ergibt. Die Autoren der Messempfehlung erhoffen sich, mit dieser Strategie eine bessere Übereinstimmung von Messung und Berechnung der Immissionen sowie eine größere Zuverlässigkeit bei der Anwendung des Antennenkorrekturfaktors zu erzielen [Pyt 20].

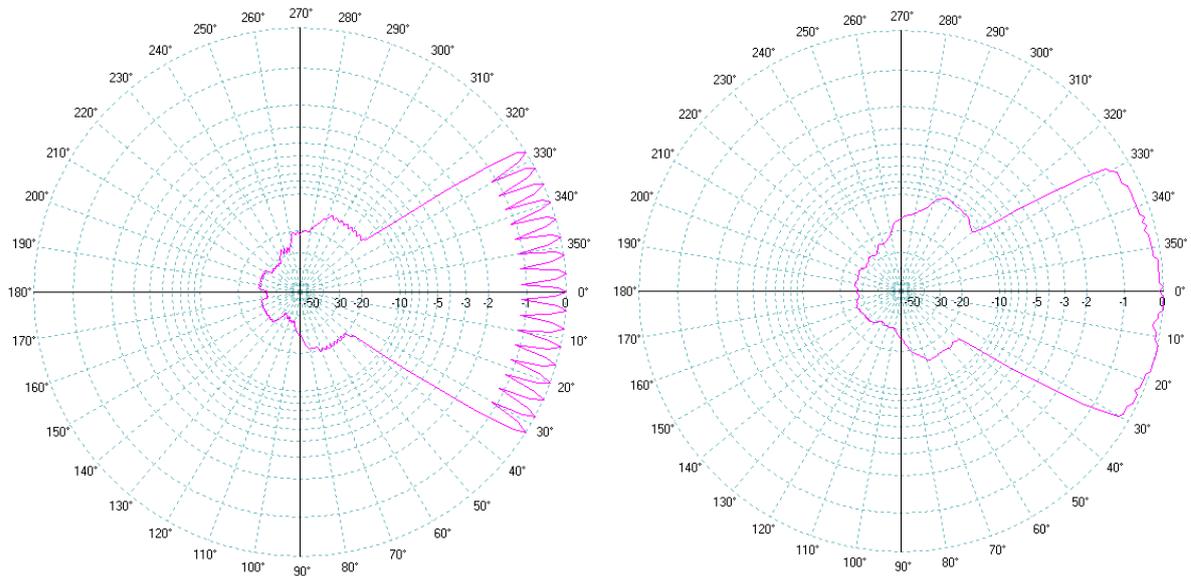


Bild 3.4.3: Vergleich des Hüllkurven- (links) und des Summendiagramms (rechts) über 17 horizontal unterschiedlich ausgerichtete Antennenbeams. Normierte Darstellung im logarithmischen Maß (dB).

Das Summendiagramm wird allerdings nur für den Broadcast Beam verwendet, da hier bei der Messung eine Summation einzelner zeitlich auf einander folgender Signale vorgenommen wird. Für den Traffic Beam ist nach METAS-Empfehlung hingegen das gewöhnliche Hüllkurvendiagramm zu verwenden.

Die Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors erfolgt in zwei Schritten:

Zunächst wird aus dem größten im Summendiagramm der Broadcast Beams vorhandenen Antennengewinn ($G_{Broadcast,max}$) und dem Maximalwert des Gewinns im Hüllkurvendiagramm der Traffic Beams ($G_{Traffic,max}$) ein winkelunabhängiger Antennenkorrekturfaktor K'_{Ant} ermittelt:

$$K'_{Ant} = \sqrt{\frac{G_{Traffic,max}}{G_{Broadcast,max}}}$$

Dieser Korrekturfaktor beinhaltet im Vergleich zum Ansatz aus Teilkapitel 3.4.1 bereits eine gewisse Worst-Case-Strategie: Die möglicherweise im Hüllkurvendiagramm vorhandenen Einzüge der Traffic Beams werden vernachlässigt, es wird im ersten Schritt immer mit dem maximalen Antennengewinn der Traffic Beams extrapoliert.

Der winkelabhängige Unterschied zwischen dem Gewinn im Broadcast Diagramm im Vergleich zum Traffic Diagramm wird erst in einem zweiten Antennenkorrekturfaktor $K''_{Ant}(\varphi, \vartheta)$ berücksichtigt. Hierbei werden drei Fälle unterschieden:

Fall 1:

Der Immissionsort befindet sich **innerhalb** des Abdeckungsbereichs des Broadcast Diagramms. Der Abdeckungsbereich beinhaltet hierbei alle Richtungen (φ, ϑ) , bei denen der Gewinn $G(\varphi, \vartheta)$ in Richtung zum Immissionsort maximal um 20 dB gegenüber dem maximalen Gewinn $G_{\text{Broadcast, max}}$ des Diagramms abgefallen ist (d.h. die Winkeldämpfung $A_{\text{Broadcast}}$ im für die betrachtete Richtung (φ, ϑ) im Broadcast Diagramm beträgt maximal 20 dB).

Zusätzlich muss als zweite Randbedingung erfüllt sein, dass für die betrachtete Richtung (φ, ϑ) die Winkeldämpfung des Traffic-Diagramms (A_{Traffic}) größer ausgeprägt sein muss als die des Broadcast-Diagramms ($A_{\text{Broadcast}}$). Mit anderen Worten: Der Gewinnunterschied zwischen Traffic Diagramm und Broadcast Diagramm ist **nicht größer**, als es sich bei der Errechnung des ersten, winkelunabhängigen Korrekturfaktors K'_{Ant} ergab.

Für alle Immissionsorte, die dem Fall 1 zuzurechnen sind, ist der zweite Antennenkorrekturfaktor unnötig, er wird daher zu $K''_{\text{Ant}}(\varphi, \vartheta) = 1$ (= 0 dB) gesetzt.

Fall 2:

Die erste Bedingung bleibt gegenüber Fall 1 unverändert, d.h. der Immissionsort befindet sich weiterhin **innerhalb** des Abdeckungsbereichs des Broadcast Diagramms.

Die zweite Randbedingung von Fall 1 ist nun nicht mehr erfüllt, d.h. der Gewinnunterschied zwischen Traffic Diagramm und Broadcast Diagramm ist nun **größer**, als es sich bei der Errechnung des ersten, winkelunabhängigen Korrekturfaktors K'_{Ant} ergab. Diese Tatsache wird mittels des zweiten, winkelabhängigen Antennenkorrekturfaktors kompensiert, der sich aus den real für die Richtung (φ, ϑ) vorhandenen Winkeldämpfungswerten im Broadcast und im Traffic Diagramm errechnet:

$$K''_{\text{Ant}}(\varphi, \vartheta) = \sqrt{\frac{A_{\text{Broadcast}}(\varphi, \vartheta)}{A_{\text{Traffic}}(\varphi, \vartheta)}}$$

Fall 3:

Die erste Bedingung der Fälle 1 und 2 ist nicht mehr erfüllt, d.h. der Immissionsort befindet sich **außerhalb** des Abdeckungsbereichs des Broadcast Diagramms, da für die betrachtete Richtung (φ, ϑ) die Winkeldämpfung $A_{\text{Broadcast}}$ im Summendiagramm größer als 20 dB ist.

In diesem Fall wird als Korrekturfaktor K''_{Ant} wieder ein konstanter, winkelunabhängiger Wert angenommen, und zwar der größte Korrekturfaktor, der sich unter Annahme von Fall 2 für alle Richtungen (φ, ϑ) im Abdeckungsbereich des Broadcast Diagramms finden lässt.

$$K''_{\text{Ant}} = \text{const} = \text{Max} \{K''_{\text{Ant}}(\varphi, \vartheta)\}_{\text{Fall 2}}$$

Folgendes Bild aus [METAS 20] soll die verschiedenen Fälle für den eindimensionalen Fall (Horizontaldiagramm) vereinfacht, dafür aber anschaulich visualisieren:

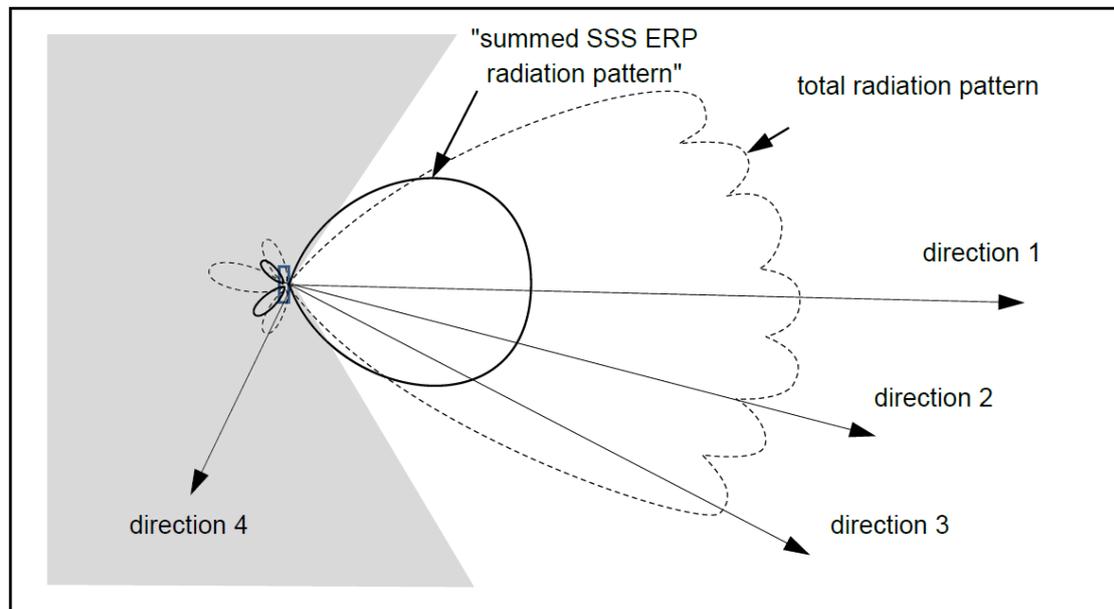


Bild 3.4.4: Schematische Darstellung des Broadcast Diagramms (durchgezogene Linie) und des Traffic Diagramms (gestrichelte Linie). Der Abdeckungsbereich des Broadcast Diagramms (Winkeldämpfung < 20 dB) ist weiß, der Winkelbereich außerhalb ist grau hinterlegt [METAS 20].

Die Richtungen 1 bis 3 befinden sich im Abdeckungsbereich des Broadcast Diagramms (weiß hinterlegter Bereich). Somit sind diese dem Fall 1 oder 2 zuzuordnen.

In Richtung 1 ist die Winkeldämpfung beider Diagramme etwa 0 dB, da man sich in Hauptstrahlrichtung beider Diagramme befindet. Auf jeden Fall ist die Winkeldämpfung des Broadcast Diagramms nicht größer als die des Traffic Diagramms (allein schon wegen des deutlich breiteren Diagramms ohne lokale Einzüge). Somit ist diese Richtung dem Fall 1 zuzuordnen.

Gleiches gilt für die Richtung 2. Man befindet sich nun zwar bereits ein wenig außerhalb der Hauptstrahlrichtung des Broadcast Diagramms, die Winkeldämpfung ist jedoch weiterhin nahe bei 0 dB. Im Traffic Diagramm befindet man sich hingegen in einem lokalen Minimum (Winkeldämpfung hier etwa 0,4 dB), so dass wiederum gilt, dass hier die beide Bedingungen für den Fall 1 erfüllt sind.

Somit kann für die Richtungen 1 und 2 der zweite Korrekturfaktor zu $K'' = 1$ (= 0 dB) gesetzt werden.

Die Bedingungen für Fall 2 werden hingegen erfüllt in Richtung 3. Hier befindet sich man in einem lokalen Maximum des Traffic Diagramms (Winkeldämpfung gegenüber Richtung 1 aufgrund der Strahlauslenkung etwa 0,2 dB), jedoch bereits im leicht abfallenden Bereich des Broadcast Diagramms (Winkeldämpfung etwa 2 dB). Hier ist also ein winkelabhängiger Korrekturfaktor von $K''(\varphi, \vartheta) = 1,8$ dB anzusetzen.

In Richtung 4 befindet man sich außerhalb des Abdeckungsbereichs des Broadcast Diagramms, so dass Fall 3 anzuwenden ist. Als Korrekturfaktor ist somit pauschal der größte Unterschied in der Winkeldämpfung zwischen Broadcast und Traffic Diagramm, den man im

weiß hinterlegten Richtungsbereich finden kann, zu verwenden. Ein Blick auf Bild 3.4.4 zeigt, dass dieser Wert in guter Näherung in Richtung 3 auftritt. Somit ist für den gesamten grau hinterlegten Winkelbereich als Korrekturfaktor ein Wert von $K'' = 1,8$ dB zu verwenden.

Inwieweit die Extrapolationsstrategie von METAS mit Verwendung eines Summendiagramms für die Broadcast Beams und die Fallunterscheidung je nach Richtung relativ zur Antenne im Vergleich zu dem in Teilkapitel 3.4.1 vorgeschlagenen Verfahren verlässlichere Ergebnisse liefert, insbesondere am Rand und außerhalb des Abdeckungsbereichs des Broadcast Diagramms, müssen die für Teil 3 dieses Projekts geplanten Messungen an 5G-Anlagen zeigen. Es ist hier beabsichtigt, beide Extrapolationsstrategien anzuwenden und die resultierenden Ergebnisse zu vergleichen.

3.4.3 Validierung des code- und frequenzselektiven Hochrechnungsverfahrens durch provozierte Vollauslastung

Zusätzlich zu den bereits durchgeführten Untersuchungen in [BKH+ 20] wurde das in Teilkapitel 3.4 vorgestellte Hochrechnungsverfahren an einer Anlage im Regelbetrieb erprobt und die auf Maximalimmission hochgerechneten Werte mit einer Referenz verglichen. Bei der Referenz handelt es sich um die direkt gemessene Maximalimmission durch den dominanten Sektor bei provozierte Auslastung durch ein Endgerät. Da sowohl das Messverfahren zur Bestimmung der provozierten Maximalimmission als auch die Fähigkeit des Endgeräts die Basisstation zur Abstrahlung all ihrer Ressourcen in Richtung zum Messpunkt zu provozieren validiert wurde (siehe Teilkapitel 3.5.5), ist dieses Verfahren zur Validierung der hochgerechneten Immission geeignet.

Die Hochrechnung auf Maximalimmission wurde sowohl für die frequenzselektiv als auch für die codeselektiv gemessene Immission des SSB durchgeführt. Bei der Hochrechnung basierend auf der codeselektiven Messung wurde die Immission des dominanten Sektors zugrunde gelegt. Die Untersuchungen fanden im Umfeld der Anlage Mies-van-der-Rohe-Straße 1 in Aachen statt. Auf einem Hausdach in zirka 38 m Höhe ist dort u.a. eine dreisektorige 5G-Anlage mit Massive-MIMO-Antennen installiert, die im 3,6-GHz-Band arbeitet. Die zur Durchführung der Hochrechnung erforderlichen Angaben wurden vom Betreiber (Deutsche Telekom) zur Verfügung gestellt.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sektorantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in Bild 3.4.5 dargestellt. In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an sechs Punkten mit Sicht zur Anlage durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Orientierungen und Entfernungen gewählt. In Tabelle 3.9 wird die Lage der Messpunkte beschrieben.

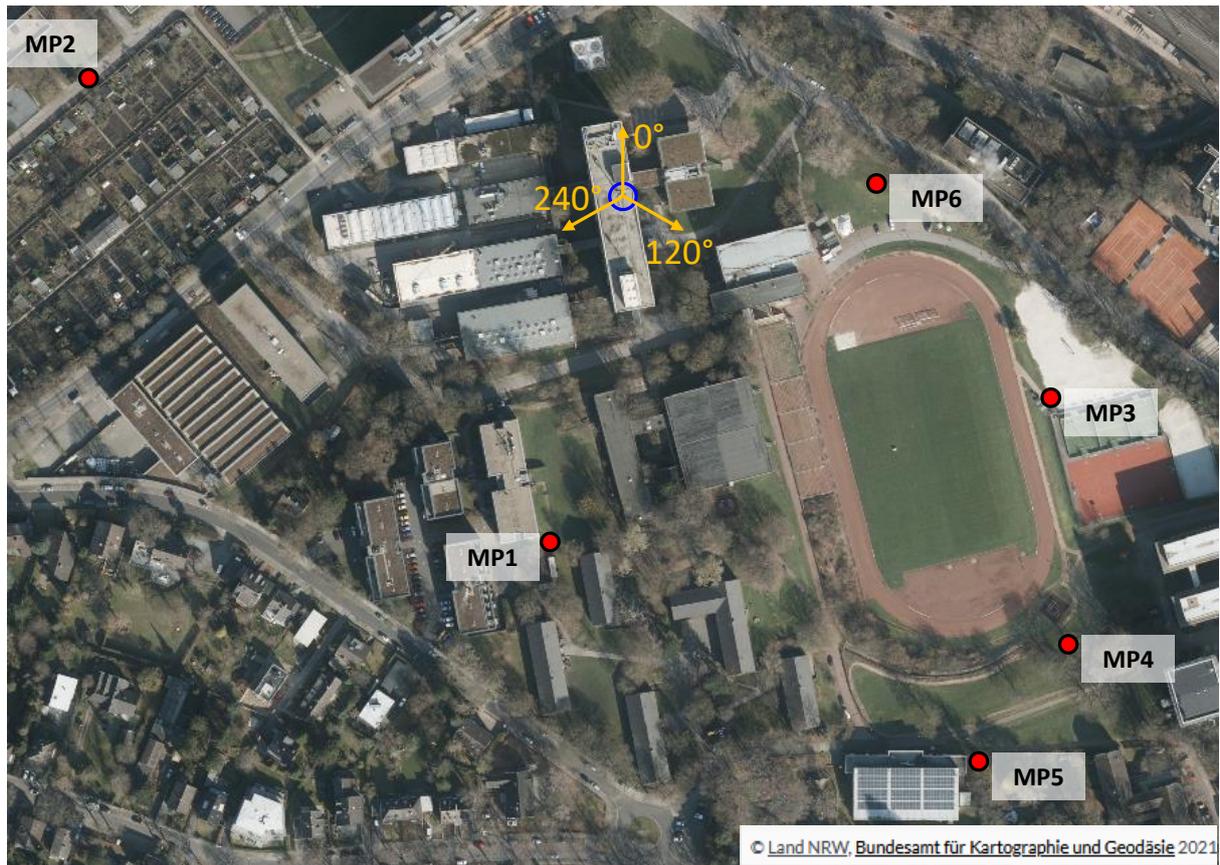


Bild 3.4.5: Standort zur Validierung des Hochrechnungsverfahrens: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sektorantennen und Verteilung der Messpunkte

Tabelle 3.9: Validierung des Hochrechnungsverfahrens: Beschreibung der Messpunkte

Messpunkt	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage
1	Auf der Wiese zwischen dem Studentenwohnheim FAHO und den Sporthallen Königshügel	160 m
2	Kopernikusstraße 14	246 m
3	Übergang vom Sportplatz Königshügel zu den Beachvolleyballfeldern	213 m
4	Aus Sicht der Anlage hinter der Outdoor-Fitness-Anlage am Sportplatz	286 m
5	Neben der Sporthalle Eckertweg	298 m
6	Auf der östlich vom Anlagengebäude gelegenen Wiese	116 m

In der folgenden Tabelle ist für jeden Messpunkt die Differenz zwischen der nach Teilkapitel 3.4 hochgerechneten Maximalimmission und der nach Teilkapitel 3.5.1 provozierten und direkt gemessenen Maximalimmission dokumentiert. Die Differenzen sind sowohl für die auf der frequenz- als auch für die auf der codeselektiven Messung basierenden Hochrechnung angegeben.

Tabelle 3.10: Differenzen zwischen der hochgerechneten und der provozierten Maximalimmission. Positive Werte zeigen somit an, dass die basierend auf der SSB-Messung hochgerechneten Maximalimmissionen größer ausfallen als die bei erzwungener Maximalauslastung direkt gemessenen Maximalimmissionen (Referenz).

Messpunkt	Differenz zwischen hochgerechneter und bei provozierter Maximalauslastung gemessener Immission in dB	
	Frequenzselektive SSB-Messung	Codeselektive SSB-Messung
1	0,2	-0,6
2	2,5	1,6
3	0,8	-0,6
4	1,2	2,7
5	-0,6	-0,1
6	-4,1	-6,7

Mit Ausnahme von Messpunkt 6 zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der basierend auf der codeselektiven SSB-Messung hochgerechneten Maximalimmission und der provozierten Maximalimmission. Die Abweichungen sind an fünf Messpunkten größtenteils deutlich geringer als die erweiterte Messunsicherheit von ± 3 dB.

Die Hochrechnung basierend auf der frequenzselektiven Messung schneidet ähnlich gut ab. Im Vergleich zur codeselektiven Messung zeigen sich keine systematischen Abweichungen der hochgerechneten Werte nach oben oder nach unten.

An Messpunkt 6 führt nicht nur die Hochrechnung basierend auf der codeselektiven, sondern auch die Hochrechnung basierend auf der frequenzselektiven Messung zu einer Unterschätzung der Maximalimmission in Höhe von 6,7 dB bzw. 4,1 dB. Es ist anzunehmen, dass dies durch die Lage des Messpunktes bzw. durch Unsicherheiten bei der Bestimmung des Antennengewinnkorrekturfaktors bedingt ist. Der Messpunkt liegt im Bereich zwischen der ersten Nullstelle und der ersten Nebenkeule des Vertikalschnitts des SSB-Antennendiagramms. In diesem Bereich weist das Antennendiagramm eine große Steilheit auf, sodass es an solchen Messpunkten in hohem Maße auf die Genauigkeit der Winkelbestimmung sowie auf die Größe des Schwenkbereichs ankommt. Sofern sich der ermittelte Vertikalwinkel nur um 1° ändert, reduziert sich die Unterschätzung auf 0,8 dB (frequenzselektiv) bzw. 3,4 dB (codeselektiv). Dadurch, dass zusätzlich noch die direkte Sichtverbindung zwischen Messpunkt und 5G-Antenne durch Vegetation gestört war, wurde das SSB-Signal stärker gedämpft bzw. gestreut als

das Traffic-Signal, welches durch den wesentlich größeren vertikalen Öffnungswinkel deutlich stärkere Bodenflexionen aufweist. Durch Vergrößerung des Schwenkvolumens konnte der SSB-Messwert um knapp 3 dB erhöht und die Abweichung entsprechend um knapp 3 dB reduziert werden.

3.4.4 Fazit

In Teilkapitel 3.4 wurde ein Messverfahren vorgestellt und im Detail erläutert, mit dem bei 5G-Anlagen mit und ohne Beamforming die maximal am Messort mögliche Immission durch Messung eines Referenzsignals mit anschließender Extrapolation ermittelt werden kann, ohne dass dazu ein spezieller Eingriff in die Basisstation durch den Betreiber oder Systemtechniklieferanten erfolgen muss.

Der entscheidende Parameter bei der Hochrechnung an Anlagen mit Beamforming-Antennen ist der winkelabhängige „Antennenkorrekturfaktor“, mit dem eventuell vorhandene Gewinnunterschiede zwischen dem Broadcast Beam (über den das zu messende Referenzsignal abgestrahlt wird) und dem Traffic Beam (welcher überwiegend zur Abstrahlung der für die maximal mögliche Immission verantwortlichen Signale dient) ausgeglichen werden.

Die Hochrechnung kann entweder auf dem Ergebnis einer frequenzselektiven Messung des Referenzsignals (SSB) beruhen. Vorteilhafter, weil verkehrslastunabhängig und genauer bei Vorhandensein mehrerer etwa gleich starker 5G-Signale aus verschiedenen Funkzellen ist jedoch die codeselektive Messung des SSS im SSB.

Das vorgestellte Verfahren deckt sich in den wesentlichen Punkten mit einem von METAS (Schweiz) vorgeschlagenen Verfahren [METAS 20]. Kleinere Unterschiede finden sich hauptsächlich bei der Bestimmung des winkelabhängigen Antennenkorrekturfaktors.

Erste Messungen, die auf der Hochrechnung von frequenzselektiv gemessenen SSB basieren, wurden bereits veröffentlicht [BKH+ 20]. Es ergaben sich bei Verwendung von winkelabhängigen Extrapolationsfaktoren gute Übereinstimmungen zwischen den extrapolierten Messergebnissen und den direkt gemessenen Resultaten bei erzwungener Maximalabstrahlung in die Richtung zum Immissionsort. Insbesondere wurden keine übermäßigen Unterbewertungen bei den hochgerechneten Messergebnissen im Vergleich zu den bei erzwungener Maximalimmission gefundenen Werten festgestellt.

Zusätzlich wurde im Rahmen dieses Projektes ebenfalls eine Validierung der beiden vorgeschlagenen Hochrechnungsverfahren vorgenommen (Abschnitt 3.4.3). Es zeigte sich sowohl beim codeselektiven als auch beim frequenzselektiven Verfahren eine gute Übereinstimmung zwischen der basierend auf der codeselektiven SSS-Messung bzw. frequenzselektiven SSB-Messung hochgerechneten und der bei provozierte Maximallast direkt gemessenen Immission (Unterschiede z.T. deutlich kleiner als 3 dB). Nur an einem Punkt mit eingeschränkter Sichtverbindung zur Sendeantenne lieferte das Hochrechnungsverfahren einen um etwas mehr als 3 dB geringeren Immissionswert als durch das Referenzverfahren ermittelt wurde, was vermutlich auf die stärkere Bündelung des Vertikaldiagramms im Broadcast Beam im Vergleich zum Traffic Beam und einen damit verbundenen größeren Einfluss der Dämpfung durch das Sichthindernis zurückzuführen ist.

3.5 Frequenzselektives Messverfahren zur direkten Bestimmung maximal möglicher 5G-Immissionen bei provozierter Auslastung

Maximalimmission liegt bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung vor, die sich gemäß [LAI 14] aus maximaler Sendeleistung über alle Kanäle unter Berücksichtigung von Verlusten sowie dem Antennengewinnfaktor ergibt. Im Gegensatz zu passiven Basisstationsantennen, bei denen es für den Immissionsort unerheblich ist, wo sich aktive Nutzer in der Zelle befinden, ist dies bei Beamforming-Antennen von hoher Relevanz, da es die Ausrichtung der ausgesendeten Traffic Beams bestimmt. In diesem Fall kann die maximal mögliche Immission an einem Ort nur dann auftreten, wenn ein Traffic Beam mit maximal möglicher EIRP in Richtung zum Immissionsort ausgesendet wird [BKS+ 19]. Maximal mögliche EIRP liegt vor, wenn der Traffic Beam mit höchster Sendeleistung (d.h. mit allen zur Verfügung stehenden spektralen Ressourcen) sowie mit höchstmöglichem Antennengewinn zum Immissionsort abgestrahlt wird.

Im Folgenden wird ein Messverfahren vorgestellt, mit dem sich die Maximalimmission messtechnisch direkt bestimmen lässt. Hierzu muss der Zustand der Maximalimmission provoziert werden. Im vorgeschlagenen Verfahren geschieht dies mithilfe eines Endgeräts in der Nähe des Immissionsortes, das durch einen aktiven Download die Ausrichtung eines Traffic Beams zum Immissionsort provoziert.

Bevor das Messverfahren beschrieben wird, wird zunächst auf die Anforderungen hinsichtlich der durch das Endgerät provozierten Auslastung eingegangen. Anschließend wird die Validierung des Messverfahrens unter Labor- und Feldbedingungen vorgestellt.

3.5.1 Anforderungen

3.5.1.1 Zeitliche Mittelung

Hinsichtlich der zeitlichen Mittelung gelten für das frequenzselektive Messverfahren zur direkten Bestimmung der Maximalimmission analoge Anforderungen wie für das Messverfahren zur Bestimmung der SSB-Immission (siehe Teilkapitel 3.2.1). Die zeitlichen Pegelfluktuationen des 5G-Signals, die durch die digitale Modulation entstehen und einen rauschartigen Verlauf im Zeitbereich erzeugen, müssen adäquat geglättet werden, um den leistungsbezogenen (thermischen) Mittelwert der Immission zu ermitteln. Da es während der Messung zu zeitlichen Schwankungen der Immission durch eine sich ändernde Zellauslastung und einen zeitveränderlichen Übertragungskanal kommen kann, ist es wichtig die Immission höchstens über die Dauer des kürzest möglichen Pulses zu mitteln. Die Mittelungszeit darf nicht länger ausfallen, da im Falle einer Übertragung nur eines Pulses die Pause in die Mittelung einfließt, was zu einer Unterschätzung der Immission führt. Auf der anderen Seite darf die Mittelungszeit auch nicht wesentlich kürzer ausfallen, da ansonsten nur Teile des Pulses in die Mittelung einfließen, was zu einer Überwertung der Immission führen kann.

Bei 5G wird die Maximalimmission im Wesentlichen durch den über die Traffic Beams abgestrahlten PDSCH dominiert. Dessen kürzeste Einheit im Zeitbereich ist *ein* OFDM-Symbol, was bei einem Subcarrier Spacing SCS von 30 kHz einer Dauer von 35,7 μ s entspricht. Daher

muss die Mittelung beim frequenzselektiven Messverfahren derart ausgelegt sein, dass im Idealfall über die Dauer eines OFDM-Symbols gemittelt wird.

3.5.1.2 Provozierte Auslastung

Bei der messtechnischen Bestimmung der Maximalimmission sollten während der Messung im Idealfall sowohl zeitlich als auch spektral alle Ressourcen der Basisstation belegt sein (Verwendung aller Frequenzträger in jedem Downlink-Symbol). Zudem sollten diese gebündelt in einem zum Messpunkt ausgerichteten Traffic Beam ausgesendet werden.

In der Praxis müssen die Ressourcen jedoch nicht zwingend zu jedem Zeitpunkt belegt sein. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass

- die volle Belegung der Frequenzträger regelmäßig auftritt und
- dass das zugrundeliegende Messverfahren in der Lage ist die dann auftretende Immission verlässlich zu erfassen.

Darüber hinaus ist es zur Bestimmung der Maximalimmission auch nicht zwingend notwendig, dass alle Frequenzträger belegt sind. Sofern die Messbandbreite auf einen Ausschnitt des Signalspektrums begrenzt wird, genügt es, wenn lediglich in diesem Ausschnitt alle Träger belegt sind. Bei Annahme eines flachen Spektrums lässt sich die Maximalimmission anschließend durch spektrale Extrapolation bestimmen.

Die ausgebildeten Traffic Beams weisen Öffnungswinkel in der Größenordnung von 10° auf. Gerade in der Mitte der Hauptkeule bleibt der Gewinn über einen Bereich von mehreren Grad nahezu konstant. Aus diesem Grund genügt es hinsichtlich der Ausrichtung der Beams in der Praxis, wenn diese grob (d.h. mit einer Präzision von wenigen Grad) in Richtung des Messpunktes abgestrahlt werden. Zur Vermeidung einer Überschreitung der Downlink-Immissionen durch die Uplink-Immissionen des für die provozierte Auslastung verwendeten Endgeräts, kann sich das Endgerät daher wenige Meter vom Immissionsort entfernen.

3.5.2 Vorgeschlagenes Verfahren

In Tabelle 3.11 sind die vorgeschlagenen Messeinstellungen zur Durchführung von frequenzselektiven Messungen zur direkten Bestimmung der Maximalimmission für das SRM-3006 dokumentiert. Zusätzlich werden die basierend auf den Untersuchungen für LTE in [BSW 12] abgeleiteten Parameter für den Laborspektrumanalysator FSW für die beiden Betriebsmodi „Spectrum“ und „Zero Span“ zusammengefasst. Das Verfahren ist für die Schwenkmethode zur Bestimmung des räumlichen Immissionsmaximums geeignet. Für die Hochrechnung auf Maximalimmission sind die mit leicht unterschiedlichen Auflösebandbreiten ermittelten Messwerte auf die maximale Signalbandbreite B_{Signal} zu extrapolieren. Streng genommen ist hierbei anstelle der Auflösebandbreite RBW die äquivalente Rauschbandbreite NBW des für die Messung gewählten Selektionsfilters anzusetzen (siehe Anhang „Beschreibung der Verfahren zu Kapitel 3“). Sofern der TDD-Verhältnis zusätzlich zu berücksichtigen ist (da die Maximalimmission basierend auf den aktuellen Betriebsparametern der Anlage bestimmt werden soll oder das TDD-Verhältnis in der von der BNetzA bescheinigten maximalen Sendeleistung der Anlage enthalten ist), ist die spektral extrapolierte Maximalimmission zusätzlich mit diesem Verhältnis (≤ 1) zu multiplizieren.

Tabelle 3.11: Vorgeschlagenes Einstellparameter zur Durchführung frequenzselektiver Messungen zur direkten Bestimmung der Maximalimmission mit dem SRM-3006 bzw. mit dem FSW.
¹ Anstelle der Auflösesebandbreite ist zur Extrapolation streng genommen die äquivalente Rauschbandbreite des für die Messung gewählten Selektionsfilters zu verwenden.

	SRM-3006	FSW	
Betriebsart	Level Recorder	Spectrum	Zero Span (bevorzugt)
Mittenfrequenz	Mittenfrequenz des Kanals		
Auflösebandbreite (RBW)	3,2 MHz	3 MHz	3 MHz
Anzeige/Trace	Peak Max	Maximum	Maximum
Mittelwertbildung	Videofilter mit der Bandbreite VBW = 16 kHz	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 35,8 ms Sweep-Points: 2001	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 17,9 ms Sweep-Points: 1001
Spektraler Extrapolationsfaktor	$\frac{B_{Signal}}{RBW^1}$	$\frac{B_{Signal}}{RBW^1}$	

Während der Messung ist mit einem geeigneten 5G-Endgerät in der Nähe des Messpunktes ein Download durchzuführen, der die Basisstation dazu provoziert einen Traffic Beam, in dem möglichst viele Ressourcen gebündelt sind, auf den Messpunkt auszurichten. Durch vorherige Überprüfung der Downlink- und Uplink-Feldstärken im Zeitbereich ist sicherzustellen, dass die Uplink-Immissionen durch das Endgerät während der Messung nicht höher sind, als die Downlink-Immissionen durch die Basisstation.

3.5.3 Validierung der Messeinstellungen des SRM-3006 zur pulsbezogenen Mittelung durch Vergleich mit dem Spektrumanalysator FSW

Zur Überprüfung, ob mit dem vorgeschlagenen Messverfahren tatsächlich die über eine Pulsdauer leistungsbezogen gemittelte Immission bestimmt wird, wurden Untersuchungen zu optimalen Messeinstellungen zur Durchführung frequenzselektiver Messungen mit dem SRM-3006 im Betriebsmodus „Level Recorder“ durchgeführt. Für verschiedene Messeinstellungen werden die mit dem SRM-3006 ermittelten Ergebnisse mit denen eines Laborspektrumanalysators (Rohde & Schwarz FSW) verglichen, dessen Messwerte als Referenz fungieren.

3.5.3.1 Erzeugtes 5G-Downlink-Signal

Für die Untersuchung des Messverfahrens wurde analog zur frequenzselektiven Bestimmung der SSB-Immission (siehe 3.2.3.1) dasselbe standardkonforme Downlink-Signal erzeugt, dessen Eigenschaften in folgender Tabelle zusammengefasst sind.

Tabelle 3.12: Übersicht über die Eigenschaften des erstellten 5G-Signals zur Untersuchung des frequenzselektiven Messverfahrens zur direkten Bestimmung der Maximalimmission.

	Parameter	Wert
Allgemein	Signalbandbreite (Kanalbandbreite)	38,16 MHz (40 MHz)
	Subcarrier Spacing	30 kHz
	Anzahl PRB	106
SSB	Anzahl pro Durchlauf	7
	Periodizität	20 ms
PDSCH	Modulationsschema	QPSK
	Boosting Faktor gegenüber SSB	0 dB
	TDD-Faktor	100 %
	Allokierte PRB	0-39 und 66-105

Das Resource Grid des erzeugten Downlink-Signals besteht aus 106 Physical Resource Blocks (PRBs) im Frequenzbereich und 560 Symbolen im Zeitbereich (20 ms). Der PDSCH liegt im oberen sowie im unteren Bereich des Spektrums und besteht somit aus zwei Teilbändern à 40 PRBs (14,4 MHz). Der SSB Burst in der Kanalmitte wird zu keinem Zeitpunkt vom PDSCH belegt. Damit lassen sich SSB und PDSCH frequenzselektiv separieren. Im den vom PDSCH belegten Teilen des Spektrums erfolgt eine Übertragung in jedem Symbol (TDD-Faktor von 100 %).

3.5.3.2 Messaufbau

Für die Messung wurde derselbe Messaufbau wie bei der frequenzselektiven Messung der SSB-Immission verwendet (siehe 3.2.3.2 bzw. Bild 3.2.3). Da die Messungen mit einer im Vergleich zur PDSCH-Bandbreite kleinen Auflösebandbreite durchgeführt wurden und der PDSCH aus zwei Teilbändern besteht, erfolgten die Messungen separat für beide Teilbänder. Da die Messwerte in beiden Teilbändern fast identisch ausfielen, werden im Folgenden die Ergebnisse nur eines (des spektral tiefer liegenden) Teilbands vorgestellt.

3.5.3.3 Vergleich zwischen SRM-3006 und FSW

Abgeleitet von den Anforderungen hinsichtlich der zeitlichen Mittelung in 3.5.1.1 wurden die Messungen mit dem SRM-3006 in der Betriebsart „Level Recorder“ durchgeführt. Dabei wurden Videobandbreiten verwendet, die zu Mittelungsdauern führen, die der Dauer eines vollständigen, eines halben sowie dem Viertel eines OFDM-Symbols entsprechen.

Zum Vergleich und als Referenz zur Bewertung der mit dem SRM-3006 ermittelten Messergebnisse wurden für den FSW Mittelungszeiten gewählt, die einer vollständigen bzw. einer halben Symboldauer entsprechen. Die Messungen mit dem FSW wurden hierbei im klassischen Spectrum-Modus (Span > 0 Hz) und wie in [BSW 09] vorgeschlagen im Zero-Span-Modus (Span = 0 Hz) durchgeführt. Während im klassischen Spectrum-Modus die Mittelung über die Anzahl der Sweep-Points eingestellt wurde, wurde sie im Zero-Span-Modus über die Sweep-Dauer festgelegt. Da zur leistungsbezogenen Mittelung über die Einzelmesswerte der

RMS-Detektor verwendet wurde, wurde gemäß [BSW 09] eine Videobandbreite von 10 MHz gewählt.

Die jeweiligen Messeinstellungen sind in Tabelle 3.13 dokumentiert. Die verwendeten Sweep-Zeiten des FSW wurden auf eine Nachkommastelle gerundet. Das PDSCH-Symbol wurde mit einer Auflösebandbreite von 3,2 MHz (SRM-3006) bzw. 3 MHz (FSW, Ergebnisse inkl. spektraler Extrapolation auf 3,2 MHz) bestimmt.

Tabelle 3.13: Untersuchte Messeinstellungen für SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (konventioneller Spectrum-Modus und Zero-Span-Modus) zur frequenzselektiven Messung der leistungsbezogen gemittelten Immission eines PDSCH-Symbols.

Mittelungsdauer	SRM-3006	FSW (Spectrum)		FSW (Zero Span)	
		VBW in kHz	Sweep-Zeit in ms	Sweep Points	Sweep-Zeit in ms
1	2	35,8	251	143	1001
0,5	4	35,8	501	71,5	1001
0,25	8	-	-	-	-

In Tabelle 3.14 sind die Differenzen der Messergebnisse zwischen SRM-3006 und FSW *im Zero-Span-Modus* bei der Bestimmung der PDSCH-Leistung für unterschiedliche Mittelungszeiten dargestellt. Wie bei der frequenzselektiven Messung des SSB zeigt sich, dass die Messwerte umso besser übereinstimmen, je ähnlicher die Mittelungszeiten ausfallen. Sowohl bei einer Mittelung über ein vollständiges als auch bei der Mittelung über ein halbes Symbol kommt es zu geringen Differenzen von 0,2 dB. Bei einer zu kurzen Mittelungsdauer des SRM-3006 von nur einem Viertelsymbol zeigt sich im Vergleich zum Messwert des FSW bei einer Mittelung über eine halbe Symboldauer hingegen bereits eine Überschätzung von 1,1 dB. Eine Unterschätzung durch eine zu lange Mittelungsdauer kann mit diesem Signal nicht gezeigt werden, da es im vom PDSCH belegten Spektrum keine Pulspausen aufweist, die in die Mittelwertbildung einfließen könnten. Für eine Untersuchung zu diesem Aspekt sei auf Teilkapitel 3.5.4 verwiesen.

Tabelle 3.14: Differenzen der Messwerte von SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (Zero Span) in dB bei der Messung des PDSCH-Symbols mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Differenz der Messwerte zwischen SRM-3006 und FSW in dB		FSW-Mittelungsdauer (Zero Span)	
		t_{symbol}	$0,5 \cdot t_{\text{symbol}}$
SRM-Mittelungsdauer (VBW)	t_{symbol} (8 kHz)	0,2	-0,4
	$0,5 \cdot t_{\text{symbol}}$ (16 kHz)	0,9	0,2
	$0,25 \cdot t_{\text{symbol}}$ (32 kHz)	1,8	1,1

Ergänzend sind in Tabelle 3.15 die Differenzen der Messergebnisse zwischen SRM-3006 und FSW *im konventionellen Spectrum-Modus* bei der Bestimmung der SSB-Leistung für unterschiedliche Mittelungszeiten dargestellt. Im Wesentlichen werden die Erkenntnisse aus dem Zero-Span-Modus analog zur Messung der SSB-Immission bestätigt. Die Messwerte des FSW fallen bei der Untersuchung in diesem Modus erneut um etwa 0,1 dB bis 0,3 dB niedriger aus

als bei Zero Span (siehe auch Abschnitt 3.2.3.3). Dies unterstreicht die bessere Eignung einer Messung auf einer festen Frequenz (Zero Span).

Tabelle 3.15: Differenzen der Messwerte von SRM-3006 (Level Recorder) und FSW (Spectrum) in dB bei der Messung des PDSCH-Symbols mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Differenz der Messwerte zwischen SRM-3006 und FSW in dB		FSW-Mittelungsdauer (Spectrum)	
		t_{symbol}	$0,5 \cdot t_{\text{symbol}}$
SRM-Mittelungsdauer (VBW)	t_{symbol} (8 kHz)	0,3	-0,1
	$0,5 \cdot t_{\text{symbol}}$ (16 kHz)	1,0	0,5
	$0,25 \cdot t_{\text{symbol}}$ (32 kHz)	1,9	1,4

Mithilfe der Untersuchungen kann für die Bestimmung des leistungsbezogenen Mittelwerts eines OFDM-Symbols gezeigt werden, dass das SRM-3006 bei äquivalenten Mittelungsdauern zu vergleichbaren Messergebnissen wie das FSW führt, für das der Mittelungsprozess bereits validiert wurde. Zur Bestimmung einer optimalen konkreten Mittelungsdauer für die Messung eines PDSCH-Symbols mit dem SRM-3006 wurden zusätzlich thermische Referenzmessungen an einem ähnlichen Signal durchgeführt, die im folgenden Teilkapitel dokumentiert sind.

3.5.4 Validierung der Messeinstellungen des SRM-3006 zur pulsbezogenen Mittelung durch thermische Referenzmessung

Mithilfe der Untersuchungen zur Mittelungszeit konnte in Teilkapitel 3.5.3 gezeigt werden, dass die Messergebnisse des Laborspektrumanalysators FSW sowie des portablen Feldstärkemessgeräts SRM-3006 vergleichbar sind, sofern ähnliche Mittelungszeiten gewählt werden. D.h. trotz der unterschiedlichen Implementierungen der Mittelung, wirken sie sich bei der Messung des rauschartigen 5G-Signals ähnlich aus.

Um die Validität der Messeinstellungen des SRM-3006 anhand einer weiteren Referenz zu bewerten, werden nachfolgend die Ergebnisse einer Vergleichsmessung zwischen SRM-3006 für unterschiedliche lange Mittelungszeiten bzw. unterschiedlich hohe Videobandbreiten sowie einem Power Meter in Kombination mit einem thermischen Leistungsmesskopf vorgestellt (wegen der begrenzten Auflösebandbreite des FSW von 10 MHz wurden die Untersuchungen ausschließlich mit dem SRM-3006 durchgeführt). Aufgrund der Trägheit des Leistungsmesskopfs, der eine Mittelungszeit von mindestens 115 ms aufweist und damit nicht in der Lage ist, eine Mittelung über lediglich ein OFDM-Symbol durchzuführen, und des Umstands, dass die thermische Messung breitbandig erfolgt, wurde das 5G-Signal aus den vorherigen Untersuchungen wie folgt modifiziert:

- Der Leistungsmesskopf erfasst die Signalleistung nicht nur frequenzselektiv, sondern breitbandig. Für einen Vergleich mit dem SRM-3006 muss die Signalbandbreite entsprechend gewählt werden, dass das Signal auch vom SRM-3006 vollständig erfasst werden kann. Da dessen maximale Auflösebandbreite im Modus „Level Recorder“ 32 MHz beträgt, wurde die Signalbandbreite auf den nächstkleineren Wert eingestellt (28,08 MHz).

- Zur Untersuchung, wie sich eine zu lange Mittelungsdauer auf den Messwert auswirkt, d.h. in welchem Maße es zu einer Unterschätzung kommt, wurde das Signal dahingehend modifiziert, dass alternierend ein Symbol gefolgt von einer Pause der Dauer eines Symbols übertragen wird, sodass das Signal einen Duty Cycle von 50 % aufweist.
- Bei dem bisher verwendeten Signal waren alle PDSCH-Symbole unterschiedlich. D.h. bei einer pulsbezogenen Mittelung sind die resultierenden RMS-Werte ebenfalls unterschiedlich. Mit Max-Hold konnte der leistungsstärkste Puls detektiert werden. Der Leistungsmesskopf führt aufgrund der Mittelungszeit von 115 ms eine Mittelung über fast sechs Signalperioden bzw. 3220 Symbole durch. Wenn alle Symbole leicht unterschiedliche Leistungen aufweisen würden, würde eine thermische Messung im Vergleich zur Messung mit dem SRM-3006 mit dem vorgeschlagenen Messverfahren (d.h. pulsbezogene Mittelung und Anzeige der maximalen mittleren Pulsleistung) zu niedrigeren Messwerten führen. Aus diesem Grund wurde das zu untersuchende Signal derart modifiziert, dass immer dasselbe Symbol übertragen wird. Aufgrund der Tatsache, dass das Signal einen Duty Cycle von 50 % aufweist, wurden auf den thermischen Messwert 3 dB aufaddiert. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Messwerte beider Messgeräte bzw. Messverfahren gewährleistet.

Die wesentlichen Eigenschaften des Signals sind in Tabelle 3.16 zusammengefasst.

Tabelle 3.16: Eigenschaften des modifizierten 5G-Signals zur Messung der mittleren Pulsleistung mit einem thermischen Power Meter. Das Signal besteht aus einer Wiederholung desselben alle 78 Träger einnehmenden PDSCH-Symbols gefolgt von einer Pause der Dauer eines Symbols.

	Parameter	Wert
Allgemein	Signalbandbreite (Kanalbandbreite)	28,08 MHz (30 MHz)
	Subcarrier Spacing	30 kHz
	Anzahl PRB	78
SSB	Anzahl pro Durchlauf	0
	Periodizität	-
PDSCH	Modulationsschema	QPSK
	Boosting Faktor gegenüber SSB	-
	TDD-Faktor	50 % (auf jedes Symbol folgte eine gleichlange Pause)
	Allokierte PRB	0-77

Bild 3.5.1 zeigt einen Vergleich der mit dem SRM-3006 bestimmten Messwerte für unterschiedliche Videobandbreiten mit der durch die thermische Messung bestimmten Referenz. Auf den thermischen Messwert wurden 3 dB aufgrund des Duty Cycles des Signals von 50% addiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die beste Übereinstimmung für eine Videobandbreite von 16 kHz vorliegt (Differenz von 0,02 dB). Diese Videobandbreite entspricht der Mittelung über ein halbes OFDM-Symbol. In diesem Bereich, in etwa zwischen 16 kHz und 25 kHz weist die Kurve eine abgeflachte Steigung auf. Für kleinere und für größere Videobandbreiten sind die Steigungen der Kurve leicht unterschiedlich, was auf die unterschiedlichen Effekte bei der Fehlbewertung der Signalleistung hindeutet.

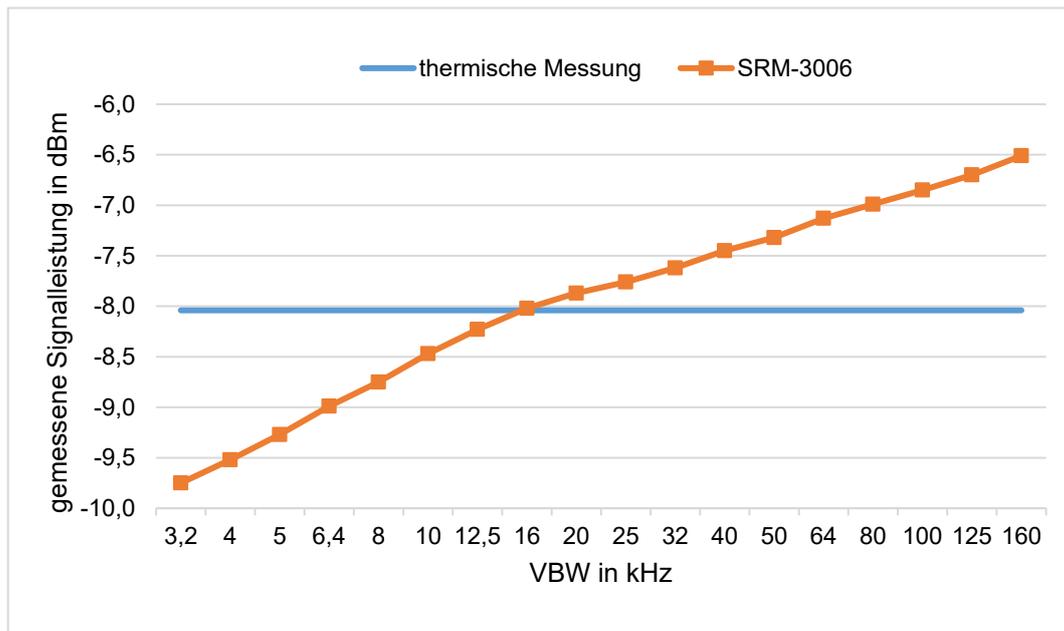


Bild 3.5.1: Vergleich zwischen mit dem SRM-3006 mit unterschiedlichen Videobandbreiten bestimmten Messwerten und der thermischen Referenz bei der Messung eines permanent wiederholten OFDM-Symbols gefolgt von einer gleichlangen Pause. Die beste Übereinstimmung liegt für eine Videobandbreite von VBW = 16 kHz vor.

Bei größeren Videobandbreiten (rechter Bereich) kommt die zunehmend ungenügende Glättung des digital modulierten Signals zum Tragen. Bei kleineren Videobandbreiten (linker Bereich) unter 8 kHz kommt es zu einer Mittelung in die Pausen zwischen den Symbolen, was beim untersuchten Signal theoretisch zu einer Unterschätzung von bis zu 3 dB führt. Wie in Teilkapitel 3.2.2 beschrieben wurde, kommt es aufgrund des Einschwingverhalten des Filters bei Videobandbreiten zwischen 8 kHz (Mittelungsdauer entspricht ganzem Symbol) und 16 kHz (Mittelungsdauer entspricht halbem Symbol) zusätzlich zu Unterbewertungen. Mit einem Wert von 0,7 dB stimmen die messtechnisch bestimmte Unterschätzung bei 8 kHz und die theoretisch zu erwartende Unterschätzung bei einer Mittelung über ein Symbol (0,6 dB) gut überein.

3.5.5 Validierung der messtechnischen ermittelten Maximalimmission durch Berechnung

Zur Überprüfung, ob mithilfe des vorgeschlagenen Verfahrens tatsächlich die Maximalimmission ermittelt werden kann, wurde ein Vergleich zwischen messtechnisch bestimmter Maximalimmission bei provozierter Auslastung und berechneter Maximalimmission durchgeführt.

Während der provozierten Auslastung wurde vor jeder Immissionsmessung mithilfe einer Messung im Zeitbereich sichergestellt, dass die Uplink-Immissionen des aktiven Endgeräts zu keiner Überschreitung der Downlink-Immissionen der Basisstation führen. Mithilfe eines Monitorings der Netzwerkparameter auf dem Endgerät konnte gewährleistet werden, dass das Endgerät abgesehen vom LTE-Ankerband ausschließlich das 3,6-GHz-Band nutzt, um den Download durchzuführen (kein Carrier Aggregation). Auch eine Unterstützung des Downloads durch eine weitere Basisstation (Coordinated Multi-Point, CoMP) zur Erhöhung der Übertragungsrate

konnte ausgeschlossen werden. Der Zellsektor, mit dem das Endgerät für die provozierte Auslastung verbunden war, konnte durch die verwendete Physical Cell ID (PCI) eindeutig zugeordnet werden.

Die erwartete Maximalimmission wurde unter der Annahme von Vollauslastung der Anlage und Ausrichtung eines Traffic Beams auf den Messpunkt berechnet. Hierfür wurden an jedem Messpunkt sowohl der Abstand d als auch die Horizontal- und Vertikalwinkel φ und θ zur Basisstationsantenne ermittelt. Mithilfe der Winkel konnte der richtungsabhängige Gewinn $G(\varphi, \theta)$ aus dem Antennendiagramm bestimmt werden. Mithilfe des Abstands d und der vom Netzbetreiber mitgeteilten Sendeleistung P bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung konnte die Maximalimmission unter Fernfeldbedingungen und unter der Annahme von Freiraumausbreitung (mit dem Freiraumwellenwiderstand $Z_0 \approx 377 \Omega$) zunächst mit folgender Formel berechnet werden:

$$E_{Freiraum} = \sqrt{\frac{P \cdot G(\varphi, \theta) \cdot Z_0}{4\pi \cdot d^2}}$$

Durch die Annahme von Freiraumausbreitung werden Flächen und Körper, die das 5G-Signal dämpfen bzw. reflektieren oder streuen nicht berücksichtigt. Daher wurden als Vergleich größtenteils Messpunkte ausgewählt, an denen eine uneingeschränkte Sichtverbindung zur Basisstationsantenne bestand. Damit können mit Ausnahme eines Messpunktes Zusatzdämpfungen bedingt durch Hindernisse auf dem Signalpfad vernachlässigt werden. Die Messungen unterliegen jedoch weiterhin Interferenzen verursacht durch Reflexionen (insbesondere durch den Boden, aber auch durch Gebäude) und Streuungen, sodass damit zu rechnen ist, dass die gemessene Feldstärke aufgrund der Ermittlung des räumlichen Maximums durch Anwendung der Schwenkmethode höher ausfällt als unter der Annahme reiner Freiraumausbreitung berechnet. Um den konstruktiven Feldstärkeüberlagerungen Rechnung zu tragen, wurde die unter der Annahme von Freiraumausbreitung berechnete Feldstärke abschließend gemäß [BSW+ 06] mit dem Faktor 1,414 multipliziert, was bei logarithmischer Darstellung einer Addition von 3 dB entspricht („Freiraum + 3 dB“):

$$E_{max} = E_{Freiraum} \cdot \sqrt{2}$$

Die damit berechnete Feldstärke E_{max} wird im Folgenden als Referenz zum Vergleich mit der messtechnisch ermittelten maximalen Feldstärke herangezogen.

Die Untersuchungen fanden an derselben 5G-Basisstation und an denselben Messpunkten wie die Validierung des Hochrechnungsverfahrens in Teilkapitel 3.4.3 statt. Die zur Berechnung der Maximalimmission (Referenz) erforderlichen Angaben wurden vom Betreiber (Deutsche Telekom) zur Verfügung gestellt. Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sektorantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind nochmals in Bild 3.5.2 dargestellt. Die Beschreibung der Messpunkte in Bezug zur Basisstationsantenne erfolgt in Tabelle 3.9 in Teilkapitel 3.4.3.

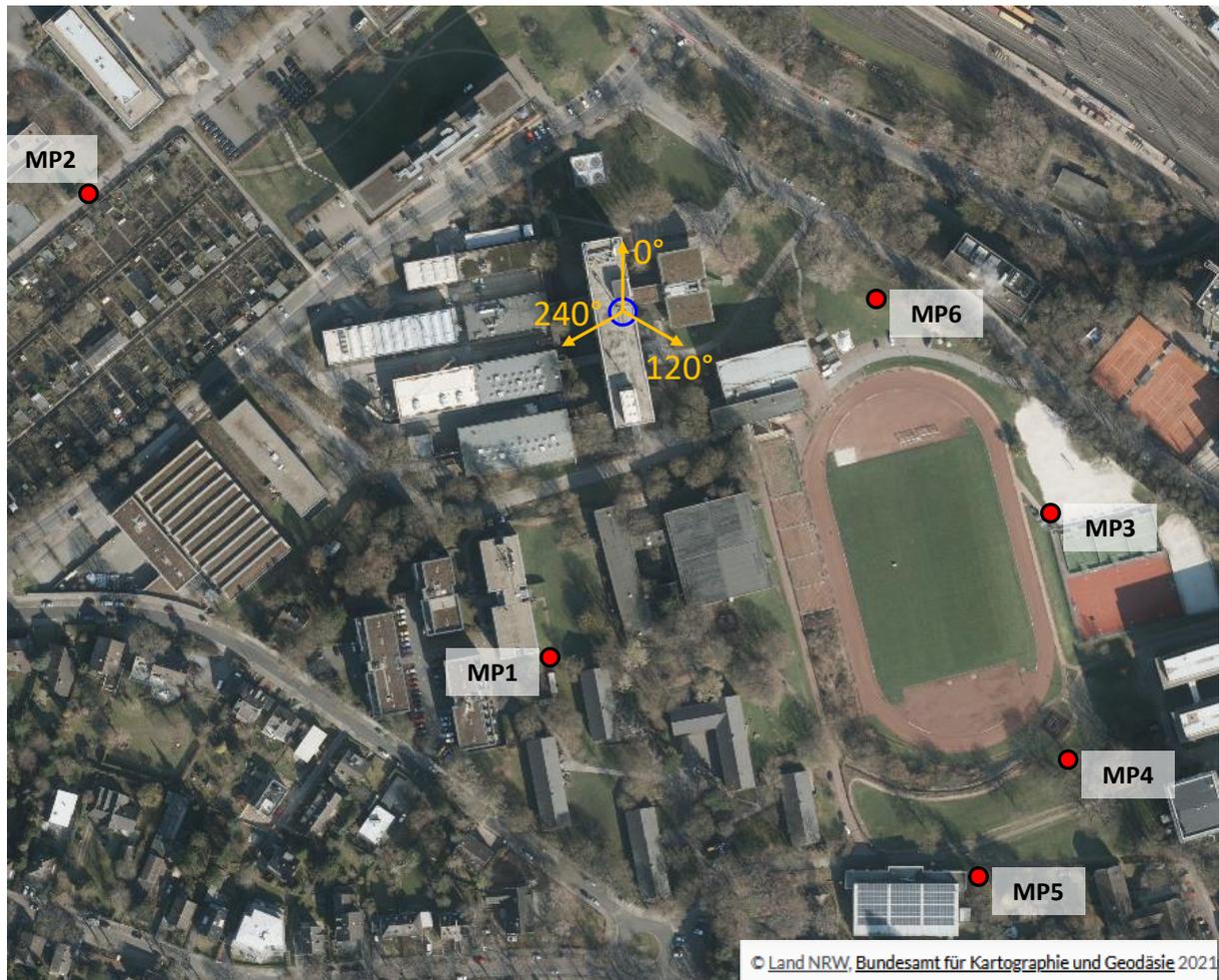


Bild 3.5.2: Standort zur Validierung der messtechnisch bestimmten Maximalimmission: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sektorantennen und Verteilung der Messpunkte

In Tabelle 3.17 ist für jeden Messpunkt die Differenz zwischen der nach Teilkapitel 3.5.2 messtechnisch ermittelten Maximalimmission und der berechneten Maximalimmission dokumentiert.

Tabelle 3.17: Differenzen zwischen der hochgerechneten und der provozierten Maximalimmission. Positive Werte zeigen somit an, dass die bei erzwungener Maximalauslastung direkt gemessenen Maximalimmissionen größer ausfallen als die berechneten Maximalimmissionen („Freiraum + 3 dB“, Referenz)

Messpunkt	Differenz zwischen Messung und Berechnung in dB
1	2,6
2	-0,7
3	-0,5
4	-0,3
5	3,0
6	-3,5

Lediglich an einem Messpunkt fällt die bei provozierte Auslastung messtechnisch bestimmte Maximalimmission signifikant niedriger aus als erwartet (dazu weiter unten mehr). Dies zeigt, dass die provozierte Auslastung durch das Endgerät dazu geeignet ist den Zustand der Maximalimmission an den Messpunkten zu provozieren und dass das vorgeschlagene Messverfahren dazu geeignet ist die in diesem Fall dort herrschende Immission zu ermitteln. Bis auf Messpunkt 6 liegen die Abweichungen zwischen provozierte und berechneter Maximalimmission zwischen -0,7 dB und 3,0 dB und damit innerhalb der erweiterten Messunsicherheit des Messverfahrens. Bezüglich der Abweichungen lassen sich die Messpunkte in zwei Kategorien unterteilen:

- An den Messpunkten 2 bis 4 gibt es abgesehen vom Boden keine großen reflektierenden Oberflächen in der Nähe der Messpunkte. Hier gibt es zwischen gemessener und berechneter Maximalimmission mit Werten zwischen -0,7 dB und -0,3 dB nur geringe Abweichungen.
- Die Messpunkte 1 und 5 liegen hingegen in unmittelbarer Nähe zu Gebäuden mit großen reflektierenden Oberflächen. Hier zeigt sich, dass es neben der bei der Berechnung berücksichtigten Bodenreflexion zusätzlich noch zu einer weiteren Reflexion über die Gebäude kommen muss, sodass die messtechnisch bestimmte Maximalimmission um 2,6 dB (MP1) bzw. 3,0 dB (MP5) höher ausfällt, als berechnet.

Lediglich an Messpunkt 6 werden 3,5 dB weniger gemessen als erwartet. Der niedrigere Messwert liegt offenbar an der Lage des Messpunktes, da dort Bäume die Sicht auf die Basisstationsantenne teilweise eingeschränkt und dadurch eine Zusatzdämpfung der Felder verursacht haben. Dies deckt sich mit den in [BSW+ 06] gewonnenen Kenntnissen, wonach die Berechnung der Maximalimmission mit der Methode „Freiraum + 3 dB“ zu deutlichen Überschätzungen der tatsächlichen Immission führen kann, sofern keine uneingeschränkte Sicht zur Sendeantenne besteht.

Abschließend kann festgestellt werden, dass durch die provozierte Auslastung mit einem Endgerät mithilfe des Messverfahrens eine Immission bestimmt werden kann, welche die bei ungestörten Ausbreitungsbedingungen theoretisch zu erwartende Maximalimmission nicht systematisch unterschreitet. Durch konstruktive Feldstärkeüberlagerungen, die durch das Schwenken der Messantenne erfasst werden, kommt es teilweise sogar zu höheren Messwerten als unter der Annahme von Freiraumausbreitung unter Berücksichtigung einer Reflexion („Freiraum + 3 dB“) berechnet. Die messtechnisch bestimmten Immissionen liegen an den Messpunkten, an denen lediglich die Bodenreflexion signifikanten Einfluss hat, im Bereich der berechneten Immission. An Messpunkten, an denen noch zusätzliche Reflexionen auftreten (z.B. an Gebäuden in der Nähe des jeweiligen Messpunktes), liegen sie um bis zu 3 dB höher als erwartet. Diese Effekte sind jedoch nicht 5G-spezifisch, sondern es handelt sich dabei um typische Ausbreitungseffekte in diesem Frequenzbereich.

3.5.6 Fazit

Die korrekte direkte messtechnische Ermittlung der Maximalimmission hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab. Zum einen muss das zugrundeliegende Messverfahren in der Lage sein für jeden Puls die leistungsbezogen gemittelte Pulsleistung (in diesem Fall hat der kürzeste Puls die Dauer eines OFDM-Symbols) und davon das Maximum zu bestimmen. Zum anderen

muss das verwendete Endgerät in der Lage sein die Basisstation dazu zu provozieren, zumindest innerhalb der Messbandbreite regelmäßig alle spektralen Ressourcen in Form eines Traffic Beams zum Messpunkt abzustrahlen.

Zur Validierung des Messverfahrens wurde für verschiedene Mittelungszeiten ein Vergleich zwischen den mit einem SRM-3006 von Narda und den mit einem FSW von Rohde & Schwarz (Referenz) ermittelten maximalen RMS-Leistungen durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die beiden Messgeräte trotz der unterschiedlichen Implementierungen zur Mittelwertbildung bei vergleichbaren Mittelungsdauern zu ähnlichen Messwerten führen. Analog zu den Ausführungen bezüglich der frequenzselektiven SSB-Immissionsmessung in Teilkapitel 3.2 gilt auch hier, dass bei einer Messung mit dem SRM-3006 die optimale Mittelungsdauer zwischen einer ganzen und einer halben Pulsdauer liegt. In Falle der PDSCH-Messung hat der kürzeste Puls die Dauer eines Symbols. Aufgrund der bekannten systematischen Unterschätzung bei Mittelung über ein Symbol, wird eine Mittelung über eine halbe Symboldauer empfohlen. Auf diese Weise kann es zwar zu leichten Überschätzungen der Immission kommen, da kurzzeitige Spitzen schwächer ausgemittelt werden, ist dies im Sinne einer konservativen Immissionsabschätzung jedoch zu bevorzugen.

Zur weiteren Validierung der Messeinstellungen des SRM-3006 wurde zudem eine thermische Referenzmessung durchgeführt. Das zu untersuchende Signal wurde so gewählt, dass sowohl die Auswirkungen einer zu langen als auch die Auswirkungen einer zu kurzen Mittelungsdauer untersucht wurden. Hierbei lieferte das SRM-3006 bei einer Mittelung über eine halbe Symboldauer (entsprechend einer Videobandbreite von 16 kHz) fast den identischen Messwert wie die thermische Messung. Für größere Videobandbreiten (d.h. bei kürzeren Mittelungsdauern) kam es zu einer Überbewertung der Immission seitens des SRM-3006 und für kleinere Videobandbreiten (d.h. bei längeren Mittelungsdauern) zu einer Unterbewertung.

Zur Validierung, ob ein Endgerät in der Lage ist, durch einen Download großer Datenmengen Maximalimmission am Messpunkt zu erzeugen, wurde die messtechnisch bestimmte Maximalimmission mit der berechneten Maximalimmission verglichen („Freiraum + 3 dB“). An Messpunkten, an denen es lediglich zu einer Bodenreflexion kommt, stimmen die Werte gut überein. An Messpunkten, an denen sich zusätzlich reflektierende Gebäudeoberflächen befinden, liegt die gemessene Maximalimmission um bis zu 3 dB höher. Lediglich an einem Messpunkt fiel der Messwert um 3,5 dB niedriger aus als erwartet, was auf eine Zusatzdämpfung durch Bäume in der direkten Sichtverbindung zwischen Messpunkt und Basisstationsantenne zurückzuführen ist. Die Untersuchungen zeigen, dass innerhalb der niedrigen Messbandbreite (3,2 MHz) offenbar regelmäßig alle Träger verwendet werden. Eine Aussage darüber, in welchem Maße diese Regelmäßigkeit vorliegen muss, kann basierend auf den Untersuchungen nicht getroffen werden. Jedoch zeigen diese, dass das verwendete Verfahren in der Lage ist, die bei ungestörten Ausbreitungsbedingungen theoretisch zu erwartende Maximalimmission nicht zu unterschreiten.

Bei den hier dokumentierten Untersuchungen wurde die Maximalimmission auf *einen* Zellsektor bezogen bestimmt. An den radialen Sektorgrenzen, an denen beide Sektoren in etwa die gleiche Immission erzeugen, muss zur Bestimmung der maximalen Summenimmission

beider Sektoren eine Messung je Sektor durchgeführt werden. Hierfür muss sichergestellt werden, dass sich das Endgerät am selben Ort in die unterschiedlichen Sektoren einbucht und dort für die Dauer des Downloads bzw. für die Dauer der Messung verbleibt.

4 Bestimmung der 5G-Immissionen an zehn Anlagenstandorten

4.1 Auswahl der Anlagenstandorte und Messpunkte

In vorliegendem Teilkapitel werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an verschiedenen 5G-Stationen mit Beamforming (5G-3600) vorgestellt. Bei den untersuchten Anlagenkonfigurationen wurde Wert auf eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Anlagenstandorte gelegt: Die Messungen erfolgten an insgesamt zehn unterschiedlichen, für 5G-Netze typischen Anlagenkonfigurationen. Die untersuchten Standorte sind:

1. Telekom-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld (Nürnberg)
2. Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städtisches Umfeld (Aachen)
3. Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, innerstädtisches Umfeld (Aachen)
4. Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand (Bonn)
5. Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld (Düsseldorf)
6. Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, Gewerbegebiet (Würselen)
7. Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld (Eschweiler)
8. Vodafone-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand (Nürnberg)
9. Vodafone-Anlage mit Huawei-Technik, Gewerbegebiet (Nürnberg)
10. Telefónica-Anlage mit Nokia-Technik, städtisches Umfeld (Frankfurt am Main)

An jeder Anlage wurden Immissionsmessungen an jeweils zehn Messpunkten durchgeführt. Die Messpunkte wurden dabei so ausgewählt, dass bezüglich der Abstände zur Basisstationsantenne eine möglichst große Heterogenität vorlag. Zusätzlich wurde bei der Messpunktauswahl auf möglichst unterschiedliche Horizontalwinkel zur Basisstationsantenne sowie auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Messpunkten mit Sicht (LOS) und Messpunkten ohne Sicht (NLOS) zur Basisstationsantenne geachtet. Die Messpunkte wurden nicht zufällig ausgewählt, sondern nach Sichtung vor Ort bewusst festgelegt. Sofern bei der Dokumentation der Messungen nicht explizit anders erwähnt, waren die Messpunkte outdoor und in Bodennähe gelegen.

An den Messpunkten wurden mehrere unterschiedliche Messungen vorgenommen, die nachfolgend beschrieben sind.

4.2 Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien

Im Hinblick auf die im Rahmen vorliegenden Forschungsvorhabens durchzuführenden Immissionsmessungen an 5G-3600-Anlagen wurden gemäß Tabelle 4.1 und Bild 4.2.1 bezüglich der Ausrichtung von Traffic Beams drei verschiedene typische Expositionsszenarien definiert, in denen Aussagen über die Höhe der typischen Immission getroffen werden.

Zur Provozierung von Downlink-Datenverkehr wurden 5G-fähige Endgeräte (Samsung S20 Ultra 5G, Huawei P40 Pro) eingesetzt: Für die Messung in den Szenarien nach 2a, 2b und 2c wurde ein Livestream des Fernsehsenders ARD initiiert.

Die Bestimmung der maximal möglichen Immission nach Szenario 3 mittels Hochrechnung (siehe Teilkapitel 3.3) konnte nicht angewendet werden, da nicht von allen Netzbetreibern die zur Hochrechnung erforderlichen Antennendiagramme von Broadcast und Traffic Beams zur Verfügung gestellt wurden. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen an allen untersuchten Anlagen zu wahren, wurde daher das in Teilkapitel 3.5 beschriebene Verfahren angewendet und die Immission bei provoziertem maximal möglichen Datenverkehr direkt bestimmt, da für dieses Verfahren keine Antennendiagramme benötigt werden. Die Erzeugung eines maximal möglichen Datenverkehrs geschah mit der App „Fast“ von Netflix. Diese führt einen Speed-Test durch, der maximale Ressourcen seitens der Basisstation anfordert. Die auf diese Weise ermittelte Immission entspricht der Maximalimmission, die durch den Zellsektor erzeugt wird, in dem das für den Speed-Test verwendete Endgerät eingebucht ist. Durch eine Kontrolle der Signalverläufe im Zeitbereich an jedem Messpunkt wurde ausgeschlossen, dass die gemessenen Feldstärken der 5G-Basisstation durch die Immissionen eigenen Endgerätes überdeckt wurden, das den/die Traffic Beam(s) zum Messpunkt lenkte.

Tabelle 4.1: Beschreibung der gemessenen Immissionsszenarien

Nr.	Beschreibung	Auslastungszustand der Basisstation
1	Tatsächliche Immission am Immissionsort während der Messung ohne aktives Endgerät	Unbekannt (aktuell typisch Leerlauf)
2a	Typische Immission. Aktives Endgerät nicht am Immissionsort, sondern in dessen Nähe, so dass auf den Immissionsort kein Traffic Beam einwirkt, sondern lediglich Broadcast Beams und allenfalls Nebenkeulen oder Reflexionen von Traffic Beams.	Typische Auslastung durch ARD-Livestream
2b	Typische Immission. Aktives Endgerät am Immissionsort, so dass auf den Immissionsort ein Traffic Beam bzw. dessen Hauptkeule einwirkt.	Typische Auslastung durch ARD-Livestream
2c	Typische Immission. Auf den Immissionsort wirkt ein Traffic Beam bzw. dessen Hauptkeule ein, obwohl am Immissionsort kein aktives Endgerät vorhanden ist. Stattdessen befindet sich der Immissionsort auf einem möglichen Ausbreitungspfad zwischen Basisstation und aktivem Endgerät oder dessen Verlängerung, wodurch die Immission z.B. aufgrund von Reflexionen auch höher ausfallen kann als am Ort des aktiven Endgerätes.	Typische Auslastung durch ARD-Livestream
3	Maximal mögliche Immission. Auf den Immissionsort wirkt nahezu das Maximum der der 5G-Basisstation zur Verfügung stehenden EIRP (Produkt aus Sendeleistung und richtungsabhängigem Antennengewinn) ein.	Provozierte Vollaustattung des verwendeten Zellsektors mit "Fast" App

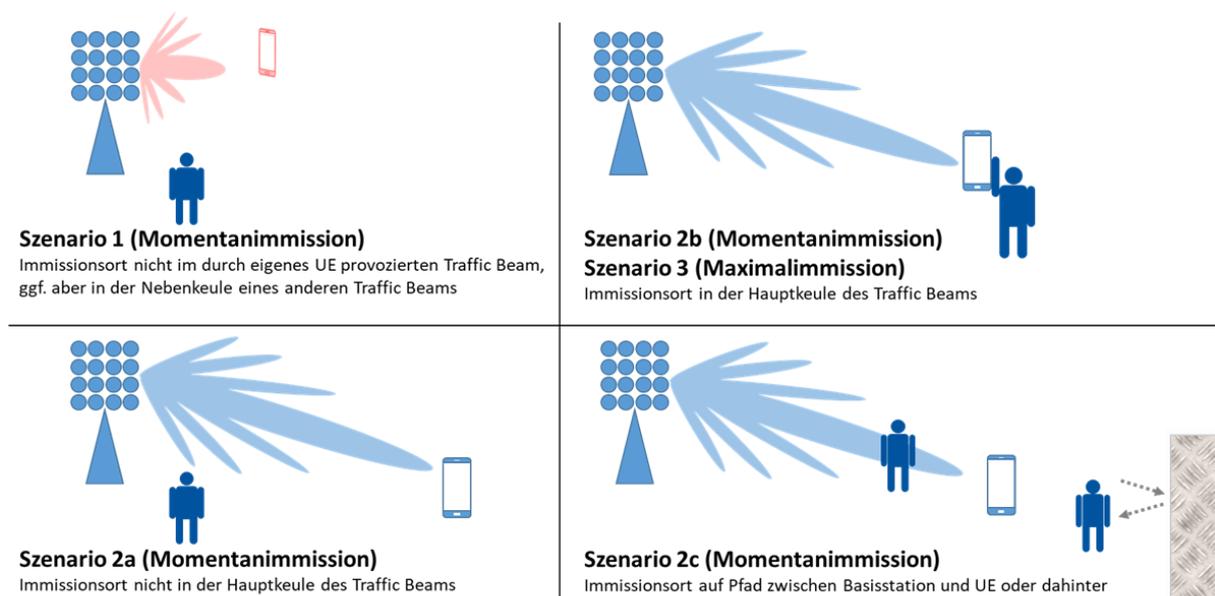


Bild 4.2.1: Illustration der Szenarien mit der Lage des Immissionsortes in Bezug zum Traffic Beam. Die Person kennzeichnet die Position des Messortes und das Handy den Ort des (aktiven) Endgerätes.

Neben der 5G-3600-Immission durch die Anlage vor Ort wurden an zehn der 100 Messpunkte auch Hintergrundimmissionen durch andere Mobilfunkanlagen (GSM, UMTS, LTE, TETRA, 5G bei anderen Frequenzen) bestimmt. Diese werden im Folgenden ausgewiesen als

- **Maximalimmission:** Hierzu wurden die Immissionen der direkt an der 5G-Anlage zusätzlich installierten Mobilfunksysteme gemessen und mit Hilfe von Betreiberdaten auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert. GSM und TETRA wurden frequenzselektiv, UMTS und LTE codeselektiv gemessen. Details zu den eingesetzten Messgeräten und deren Einstellungen sind in Teilkapitel 4.3 beschrieben.
- **Momentanimmission:** Zusätzlich zur Maximalimmission wurde für Hintergrundquellen auch die Momentanimmission gemessen. Im Gegensatz zur Maximalimmission wurden hier alle am Messpunkt innerhalb der Messempfindlichkeit des Messgerätes nachweisbaren Immissionen erfasst, d.h. eine Trennung von Hintergrundquellen an der Anlage vor Ort und Hintergrundquellen an umliegenden Standorten ist nicht möglich. Die Momentanimmission wurde über mehrere Minuten mit einer isotropen Antenne gemittelt, während die Antenne die Form einer „8“ auf einer Höhe von etwa 1,0 m bis 1,5 m über dem Boden durchschwenkte. Details zu den eingesetzten Messgeräten und deren Einstellungen sind in Teilkapitel 4.3 beschrieben.
- In Teilkapitel 4.6 sind die 5G-Maximal- und Momentanimmissionen der einzelnen Anlagen den entsprechenden Hintergrundimmissionen gegenübergestellt.

4.3 Eingesetzte Messtechnik

Für die Messungen wurde der Feldanalysator SRM-3006 (Hersteller: Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Deutschland) zusammen mit an die Frequenzbereiche der zu messenden Signale angepassten isotropen Antennen (Narda Typ 3501 und 3502, Frequenzbereich insgesamt 27 MHz bis 6 GHz) eingesetzt. Das batteriebetriebene frequenzselektive Hochfrequenz-Messgerät verfügt über verschiedene Messmodi, die sich optimal auf das zu messende Signal konfigurieren lassen. Vor Beginn der Messungen wurde eine Reihe von Geräte-Setups definiert. In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Geräteeinstellungen sowohl für die 5G-3600-Messungen (Maximalwerte und Momentanwerte), als auch für die Hintergrundimmis-sionen (Maximalwerte und Momentanwerte von TETRA, GSM, UMTS, LTE) aufgelistet.

Tabelle 4.2: Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006. Peak Max: Anzeige des Maximalwertes, CBW: Channel Bandwidth

Mobilfunk-system	Messmodus	Frequenzbereich	Weitere Einstellungen	Ablesewert	Hochrechnung
Maximalimmission (Szenario 3)					
5G-3600	Level Recorder	Mittenfrequenz auf Kanalmitte	RBW 3,2 MHz, VBW 16 kHz	Peak Max	mit Verhältnis Signalbandbreite zu RBW sowie Verhältnis beantragter zu aktueller Sendeleistung
LTE	LTE FDD	Mittenfrequenz auf Signalmitte	CBW 1,4 MHz	Max (RS _{max})	mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zur RS-Leistung
UMTS	UMTS	Mittenfrequenz auf Signalmitte	-	Max	mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zur CPICH-Leistung
GSM	Spectrum	918,1 – 960 MHz	RBW 200 kHz, VBW 2 kHz	Max	mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zu BCCH-Leistung
TETRA BOS	Spectrum	390 – 395 MHz	RBW 30 kHz, VBW 300 Hz	Max	mit Verhältnis aus der bei der BNetzA beantragten Leistung zur MCCH-Leistung
Momentanimmission (tatsächliche bzw. typische Immission), Szenarien 1, 2a-2c					
5G-3600	Safety Evaluation	Start- und Stopfrequenz entsprechend Betreiber	RBW 20 kHz	Average	keine
TETRA BOS	Safety Evaluation	390 – 395 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB07	Safety Evaluation	758 – 788 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB08	Safety Evaluation	791 – 821 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB09	Safety Evaluation	918,1 – 960 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB18	Safety Evaluation	1.805 – 1.880 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB21	Safety Evaluation	2.110 – 2.170 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine
MB26	Safety Evaluation	2.570 – 2.690 MHz	RBW 10 kHz	Average	keine

4.4 Grenzwerte

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 rechtliche 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 gelten die Grenzwerte der 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 Forschungsprojekt 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 4.3 nicht überschreiten.

Tabelle 4.3: 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 dieselbe 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 E sowie ein grenzwertbezogener Ausschöpfungsgrad GW_ASG gebildet.

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

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

E_i gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

E_{L,i} Grenzwert für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 4.3

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad 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 4.4 fasst die relevanten Grenzwerte der 26. BImSchV für die Abstrahlung der Basisstationen (Downlink) in den Mobilfunkbereichen TETRA, 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 durch die technologie neutrale Vergabe der Frequenzen in den durch die nachfolgenden beiden Ziffern codierte Frequenz („MB09“ entspricht Mobile Broadband 900 MHz) unterschiedliche Mobilfunksysteme arbeiten können (z.B. GSM-900 und LTE-900 bei MB09).

Tabelle 4.4: 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
TETRA	28,0	0,073
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

4.5 Messergebnisse 5G

4.5.1 Standort 1: Telekom-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Telekom-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Grolandstraße 56 in 90408 Nürnberg durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in zirka 24 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-800, GSM-900, LTE-900, LTE-1800, LTE-2100, 5G-2100 und LTE-2600 abgestrahlt werden. Andere Netzbetreiber sind am Standort nicht präsent.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.5.1: Standort 1: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.5: Anlagenstandort 1: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
1.01	Grolandstr. 67 (vor Garageneinfahrt Seniorenheim)	63 m	ja
1.02	Grolandstr. 65 (vor Hofeinfahrt)	164 m	nein
1.03	Grolandstr., Einmündung in Rollnerstraße	215 m	nein
1.04	Grolandstr. 65, Vorraum Kirche (indoor)	217 m	nein
1.05	Kobergerplatz (Südwest)	90 m	ja
1.06	Koberger Str. 30 (Fußweg östlich des Gebäudes)	110 m	ja
1.07	Kobergerplatz 11 (Spielplatz westlich des Gebäudes)	93 m	nein
1.08	Cordobastr. 5 (Fußweg südlich des Gebäudes)	121 m	nein
1.09	Cordobastr. 1 (Fußweg südlich des Gebäudes)	93 m	ja
1.10	Kreuzung Kreulstr. - Georg-Eberlein-Str. (SW-Ecke)	186 m	ja

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.6: Anlagenstandort 1: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
 * Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes;
 ** Am Messpunkt konnte keine 5G-Verbindung hergestellt werden
 *** Immission durch Endgerät war stärker als Immission durch Anlage

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
1.01	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	**	**
1.02	0,03*	0,05*	-	-	-	-	-	-	**	**
1.03	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	1,4	2,2
1.04	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,9	1,4
1.05	0,03	0,05	0,03*	0,05*	0,2	0,3	-	-	2,6	4,2
1.06	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,8	1,3
1.07	0,03*	0,05*	-	-	0,2	0,3	0,03	0,1	2,2	3,6
1.08	0,03*	0,05*	0,03	0,1	0,0	0,1	-	-	0,9	1,5
1.09	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	-	-	***	***
1.10	0,1	0,1	-	-	0,1	0,1	-	-	3,2	5,2

4.5.2 Standort 2: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städtisches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Weißenberg 16-18 in 52074 Aachen durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in zirka 20 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-800, GSM-900, LTE-900, LTE-1800, LTE-2100, 5G-2100 und LTE-2600 abgestrahlt werden. Am selben Standort werden von einem benachbarten Antennenträger LTE-800, LTE-1800, LTE-2100 sowie UMTS abgestrahlt (Betreiber: Telefónica).

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

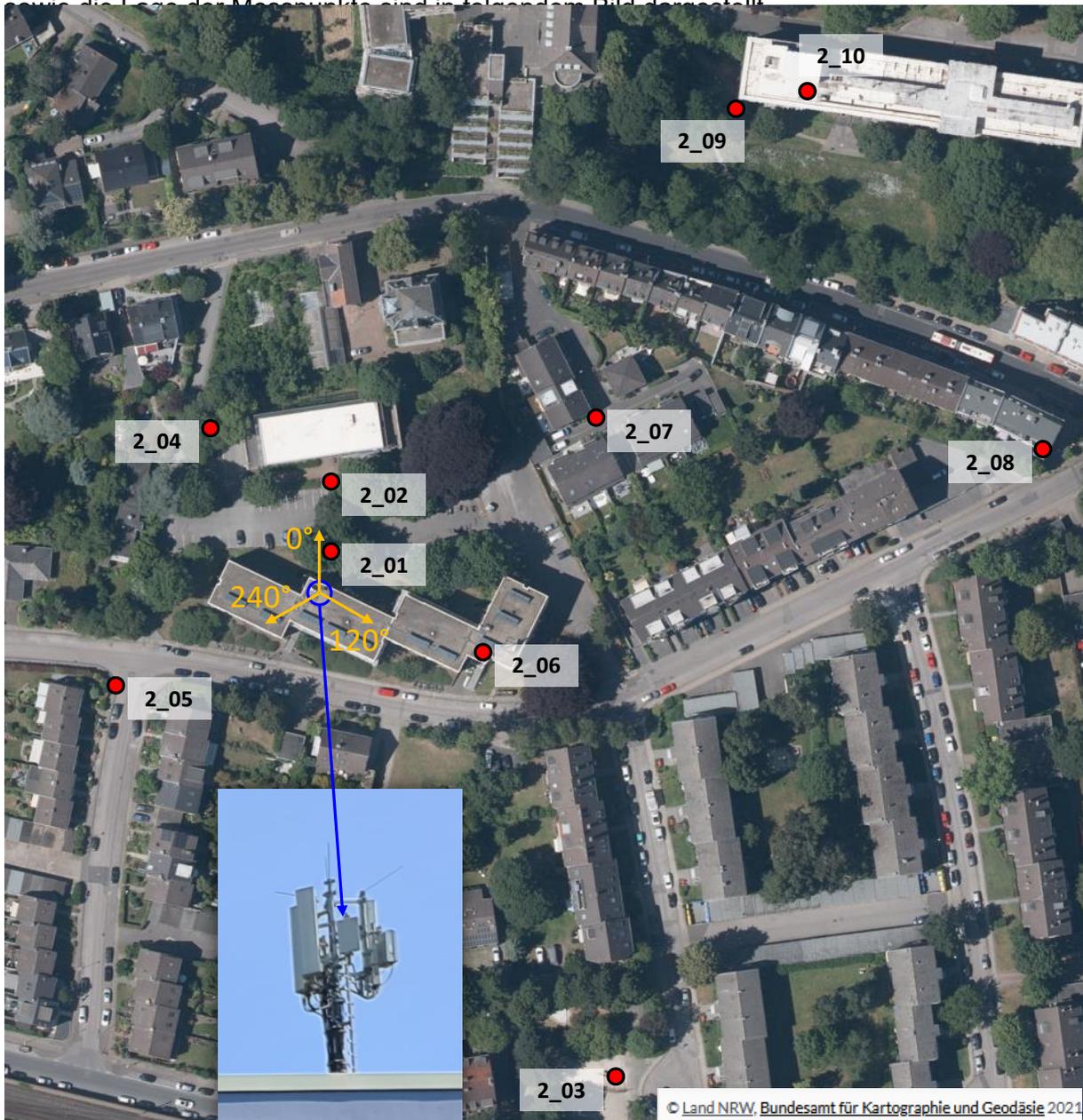


Bild 4.5.2: Standort 2: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.7: Anlagenstandort 2: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
2.01	Wiese vor dem Anlagengebäude	12 m	ja
2.02	Parkplatz/Zugang zu Hochschulgebäude	29 m	nein
2.03	Spielplatz Meerssener Straße	136 m	nein
2.04	Parkplatz/Durchgang zum Muffeter Weg	53 m	ja
2.05	Am Weißenberg/Ecke Weißenbergweg	63 m	ja
2.06	Eingangsbereich Am Weißenberg 16 (indoor)	47 m	nein
2.07	Zwischen Maastrichter Straße 77 und 83	89 m	ja
2.08	Maastrichter Straße 43, 2. OG (indoor)	199 m	nein
2.09	Wiese vor Gebäude Melatener Straße 25	175 m	nein
2.10	Melatener Straße 25, 5. OG (indoor)	191 m	nein

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.8: Anlagenstandort 2: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
2.01	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,5	-	-	6,8	11,2
2.02	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,2	0,4	5,8	9,5
2.03	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,04	0,07	-	-	1,2	2,0
2.04	0,1	0,13	0,3	0,4	0,6	1,1	-	-	9,2	15,1
2.05	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,5	-	-	8,7	14,2
2.06	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	2,6	4,3
2.07	0,2	0,3	0,1	0,2	0,4	0,6	-	-	11,0	18,0
2.08	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,5	0,9
2.09	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	-	-	0,15	0,2
2.10	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,4	0,7

4.5.3 Standort 3: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, innerstädtisches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, innerstädtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Franzstraße 34 in 52064 Aachen durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in zirka 23 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem

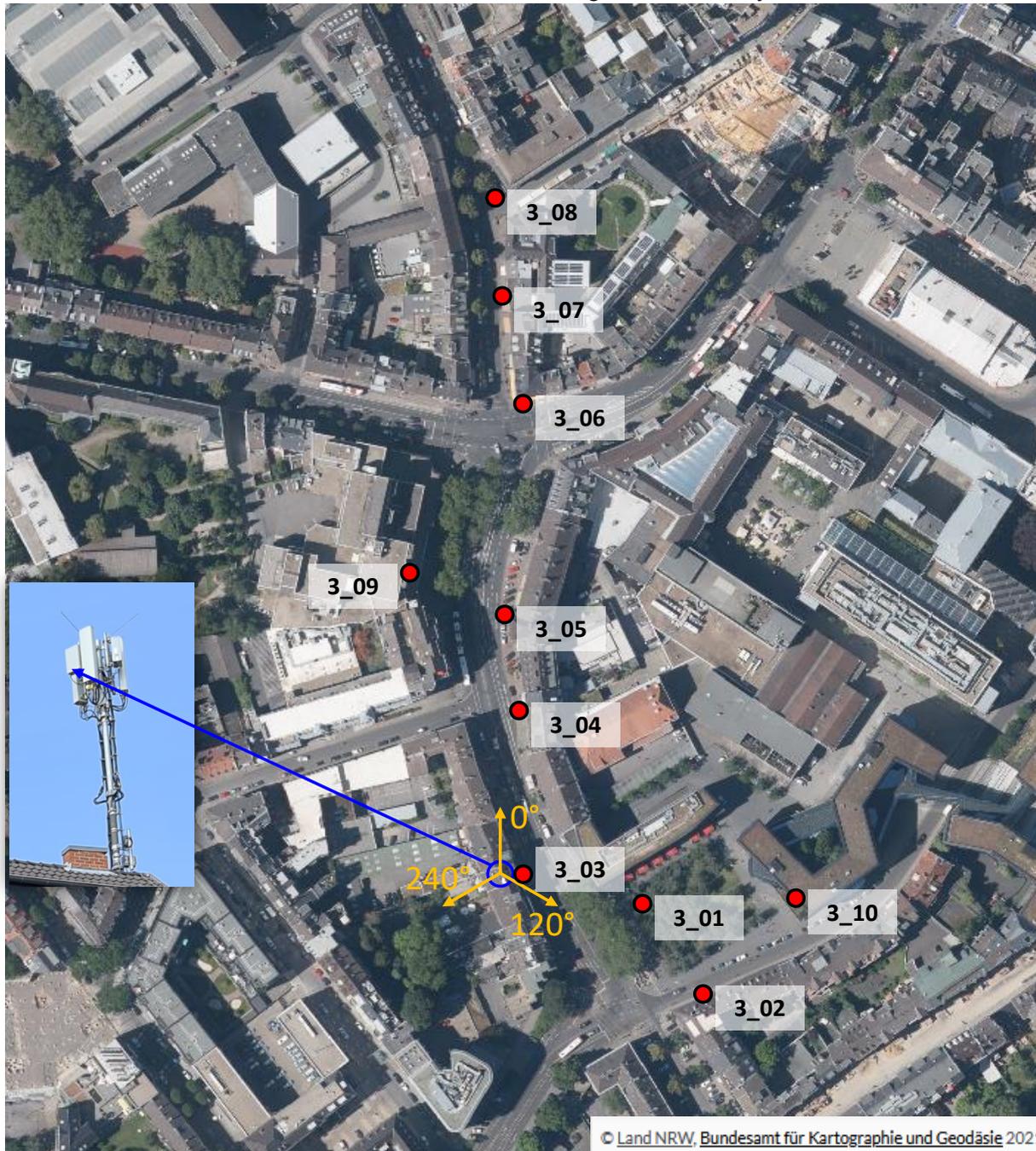


Bild 4.5.3: Standort 3: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte 4 bis 8 befinden sich auf einer nahezu radialen Linie in Hauptstrahlrichtung des 0°-Sektors. Dort bestand jeweils direkte Sicht zum Antennenstandort. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.9: Anlagenstandort 3: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
3.01	Park an der Ecke Franzstraße/Borggasse	61 m	nein
3.02	Borggasse 45 (vor dem Hauseingang)	98 m	ja
3.03	Franzstraße 34 (direkt vor dem Anlagengebäude)	8 m	nein
3.04	Franzstraße 21-23 (vor dem Hauseingang)	60 m	ja
3.05	Franzstraße 15 (an der Ecke des „Straßenknicks“)	103 m	ja
3.06	Kapuzinergraben/Ecke Kleinmarschierstraße (Bäckerei)	187 m	nein
3.07	Kleinmarschierstraße 55 (vor dem Hauseingang)	231 m	nein
3.08	Kleinmarschierstraße/Ecke Elisabethstraße	271 m	nein
3.09	Franzstraße 2 (Rolltreppe zu „Kik“, indoor)	127 m	nein
3.10	Borggasse 40 (Deutsche Post Filiale, indoor)	119 m	nein

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.10: Anlagenstandort 3: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
3.01	0,04	0,06	0,05	0,08	0,04	0,07	-	-	1,1	1,9
3.02	0,03	0,06	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	2,5	4,1
3.03	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	-	-	4,3	7,0
3.04	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	-	-	7,5	12,3
3.05	0,3	0,5	-	-	0,3	0,4	-	-	12,3	20,2
3.06	0,05	0,08	-	-	0,1	0,1	-	-	2,2	3,6
3.07	0,05	0,08	-	-	0,1	0,2	-	-	2,8	4,7
3.08	0,05	0,07	-	-	0,1	0,2	-	-	3,9	6,4
3.09	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,5	0,8
3.10	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	-	-	0,2	0,4

4.5.4 Standort 4: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand

Die Messungen am Anlagenstandort „Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand“ wurden an der Anlage Landgrabenweg 151 in 53227 Bonn durchgeführt. Auf zwei etwa 140 m voneinander entfernten Gebäudetürmen auf der Nord- bzw. Südseite des Gebäudekomplexes in zirka 34 Meter bzw. 37 Meter Höhe sind zwei 5G-3600 Sektoren (Hauptstrahlrichtungen 40° bzw. 250°) installiert. Darüber hinaus werden dort neben 5G-3600 auch GSM-900, LTE-900, LTE-1800, LTE-2100, 5G-2100 und LTE-2600 abgestrahlt. Andere Netzbetreiber sind am Standort nicht präsent.

Die nähere Umgebung des nördlichen Standorts (40° -Sektor), die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantenne, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

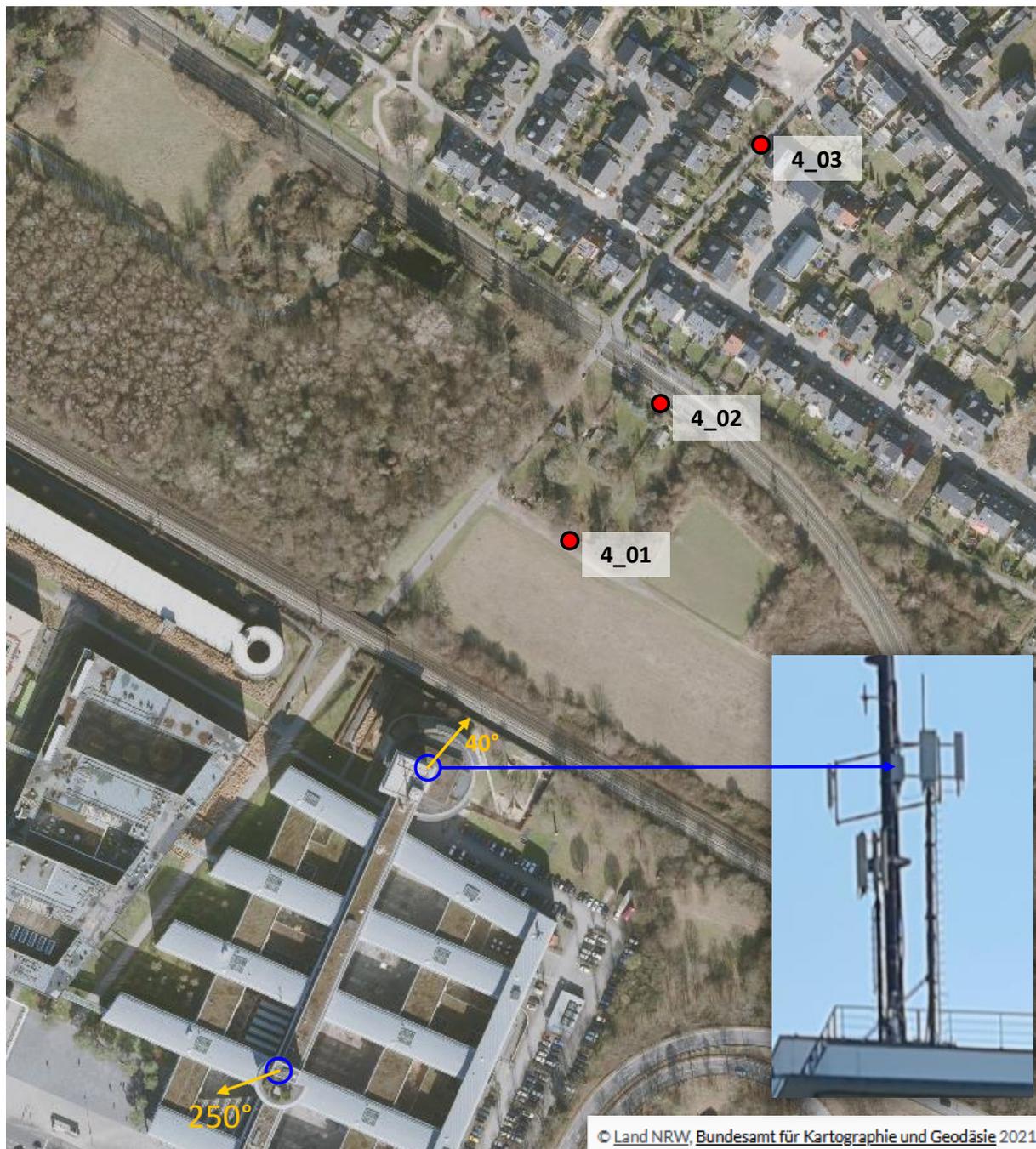


Bild 4.5.4: Standort 4 (40° -Sektor): Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantenne und Verteilung der drei Messpunkte

Die nähere Umgebung des südlichen Standorts (40°-Sektor), die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantenne, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

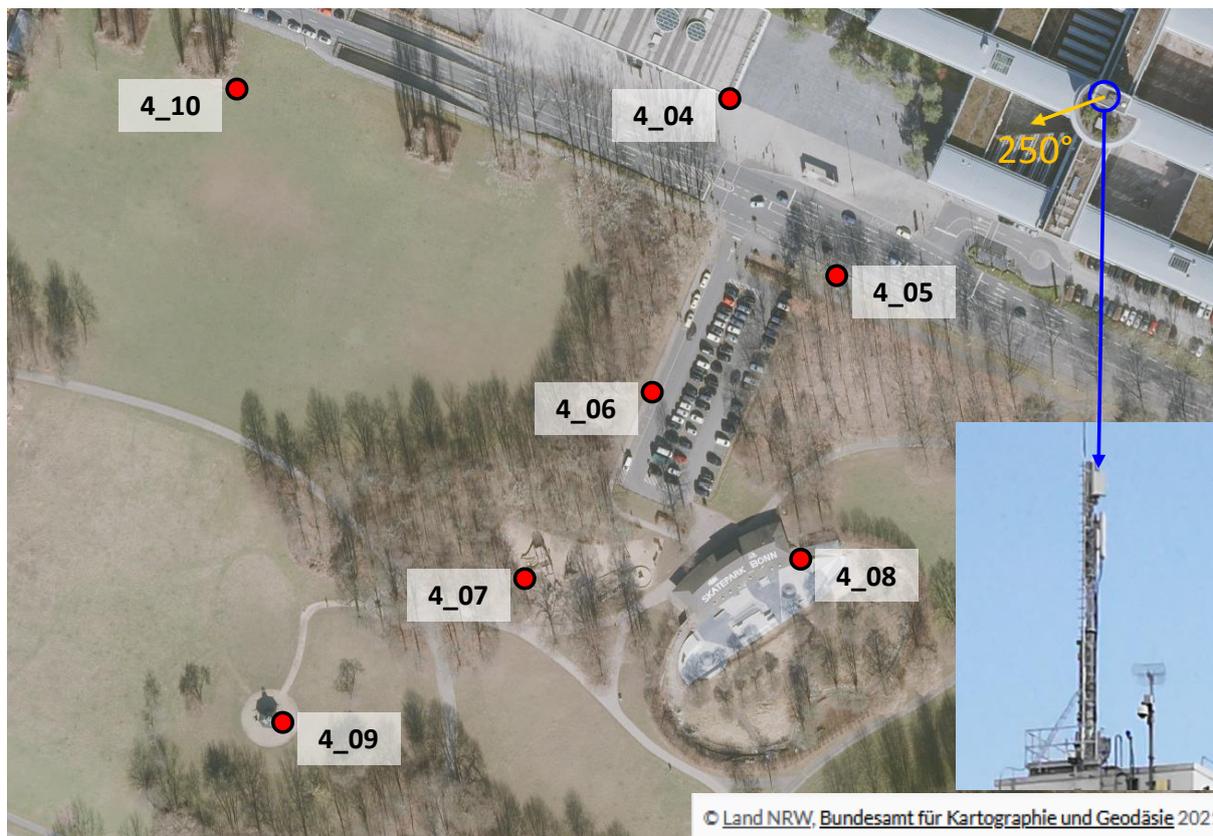


Bild 4.5.5: Standort 4 (250°-Sektor): Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantenne und Verteilung der sieben Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.11: Anlagenstandort 4: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
4.01	Feldweg vor Kleingartenanlage am Schießbergweg	123 m	ja
4.02	Straßenbahnhaltestelle „Bonn Schießbergweg“	197 m	nein
4.03	Schießbergweg (auf Höhe „An der Umkehr 9“)	311 m	nein
4.04	Landgrabenweg 151 (Außensitzbereich Café)	122 m	ja
4.05	Langgrabenweg, Bushaltestelle „Telekom Campus“	106 m	ja
4.06	Parkplatz „Hariboschiff“ (Taxistand)	178 m	ja
4.07	Spielplatz „Hariboschiff“	250 m	nein
4.08	Skatepark Bonn	187 m	nein
4.09	Grillhütte auf den Rheinauen	337 m	nein
4.10	Wiese auf den Rheinauen	281 m	ja

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.12: Anlagenstandort 4: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
4.01	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	-	-	8,3	13,6
4.02	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	-	-	5,7	9,3
4.03	0,04	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	2,5	4,1
4.04	0,1	0,2	0,8	1,4	0,3	0,5	0,5	0,8	15,5	25,5
4.05	0,2	0,4	0,4	0,7	0,3	0,5	-	-	9,7	15,8
4.06	0,1	0,2	0,3	0,6	0,3	0,5	-	-	7,8	12,7
4.07	0,03*	0,05*	-	-	0,1	0,1	-	-	1,4	2,2
4.08	0,1	0,1	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,5	0,8
4.09	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	-	-	0,4	0,7
4.10	0,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,8	-	-	8,6	14,2

4.5.5 Standort 5: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, städtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Ritastraße 2 in 40589 Düsseldorf durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in zirka 28 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-800, GSM-900, LTE-1800, LTE-2100, 5G-2100 und LTE-2600 abgestrahlt werden. Andere Netzbetreiber sind am Standort nicht präsent.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

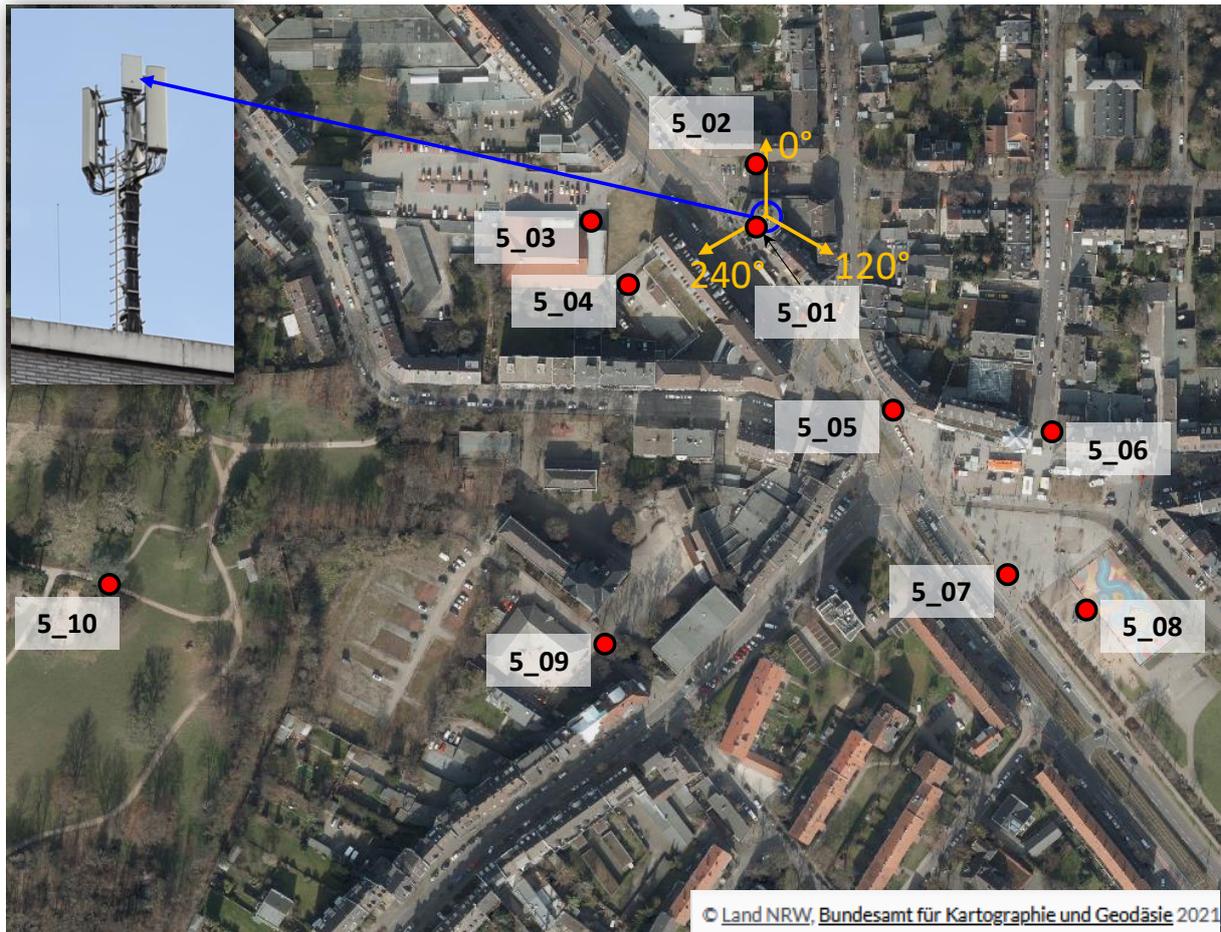


Bild 4.5.6: Standort 5: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Messpunkt 1 befindet sich im Anlagengebäude im Erdgeschoss nahezu unterhalb des Antennen-trägers. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.13: Anlagenstandort 5: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
5.01	Ritastr. 2 (Anlagengeb., Deutsche Bank Filiale, indoor)	5 m	nein
5.02	Ritastraße 1a (vor dem Hauseingang)	27 m	ja
5.03	Lidl-Parkplatz/DHL-Packstation	85 m	ja
5.04	Parkplatz hinter Gebäude Kölner Landstraße 435	76 m	nein
5.05	Bonner Straße 3 (Taxistand)	116 m	nein
5.06	Am Langen Weiher (Einmündung in den Wochenmarkt)	178 m	nein
5.07	Bonner Straße (Bushaltestelle „Holthausen“)	215 m	nein
5.08	Bonner Straße (Spielplatz „Kamper Acker“)	251 m	nein
5.09	Itterstraße 20 (zwischen Kindergarten und Schulhof)	229 m	nein
5.10	Park Elbroich (Bank neben einem Spielplatz)	370 m	nein

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.14: Anlagenstandort 5: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
5.01	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,03	0,06	-	-	2,8	4,6
5.02	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	9,2	15,1
5.03	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	-	-	6,2	10,2
5.04	0,04	0,07	0,04	0,07	0,1	0,1	-	-	2,5	4,1
5.05	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,5	-	-	9,0	14,7
5.06	0,03*	0,05*	-	-	0,2	0,3	-	-	2,3	3,7
5.07	0,03*	0,05*	-	-	0,04	0,07	-	-	1,2	1,9
5.08	0,1	0,1	-	-	0,04	0,07	-	-	4,7	7,7
5.09	0,03*	0,05*	-	-	0,1	0,1	-	-	2,3	3,8
5.10	0,03*	0,05*	-	-	0,1	0,2	-	-	4,9	8,0

4.5.6 Standort 6: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, Gewerbegebiet

Die Messungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, Gewerbegebiet“ wurden an der Anlage Palmestraße in 52146 Würselen durchgeführt. Auf einem Mast ist in einem Höhenbereich von 25-37 Meter ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-800, GSM-900, LTE-1800, LTE-2100 und 5G-2100 abgestrahlt werden. Andere Netzbetreiber sind am Standort nicht präsent.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

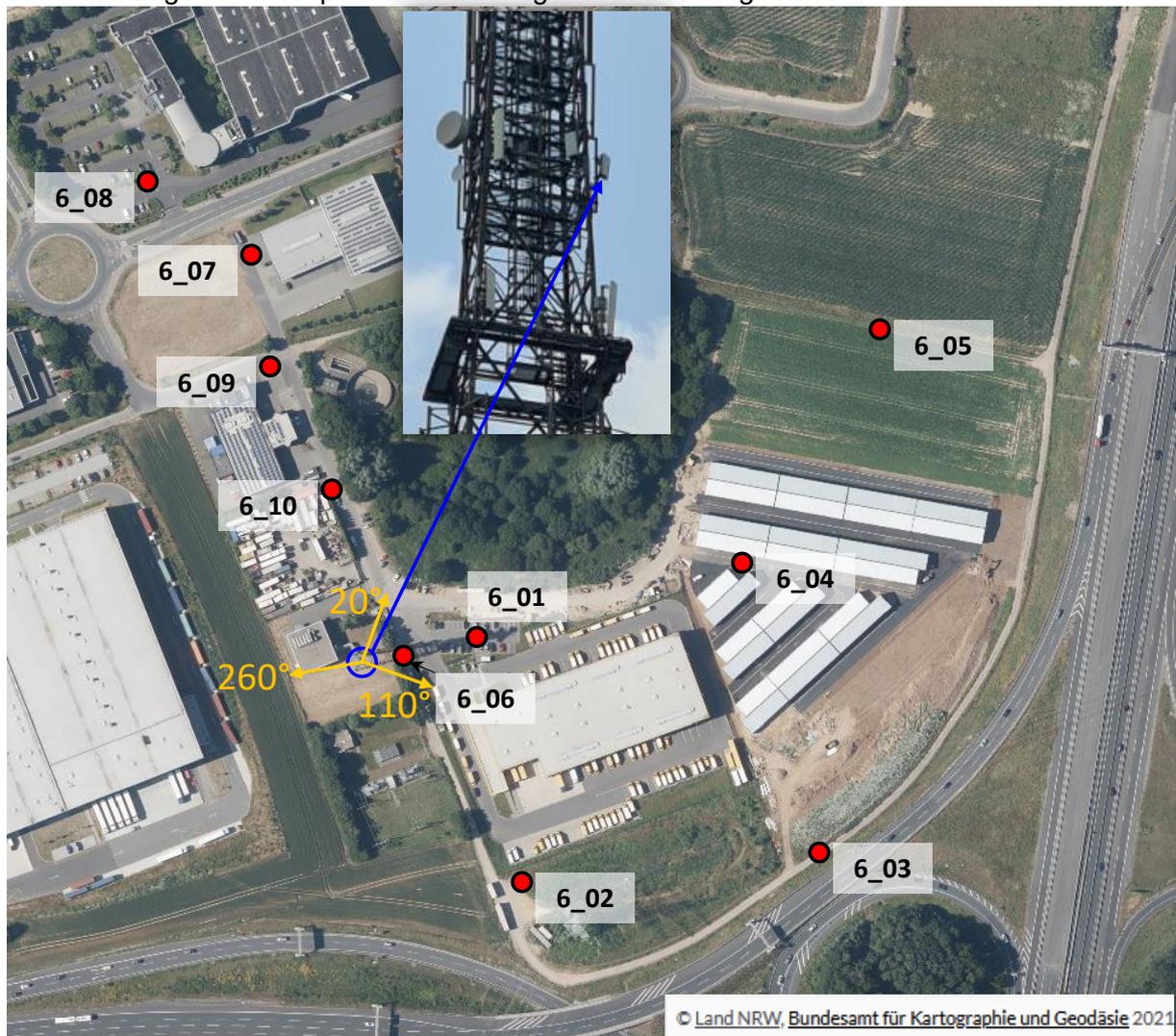


Bild 4.5.7: Standort 6: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.15: Anlagenstandort 6: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
6.01	Palmestraße (Mitarbeiterparkplatz DHL-Zustellbasis)	59 m	ja
6.02	Feldweg (hinter Stellplätzen vor den Laderampen)	134 m	ja
6.03	Feldweg (in HSR, direkt am Übergang A44/A4)	246 m	ja
6.04	Palmestraße (vor einem Lagerraumtor)	194 m	ja
6.05	Feldwg. (Steinbach, zw. A44 und Regenauffangbecken)	303 m	ja
6.06	Palmestraße (unmittelbar vor dem Anlagenmast)	23 m	ja
6.07	Palmestraße 3 (Kundenparkplatz Geschäft)	210 m	ja
6.08	Marshallstraße 1 (Parkplatz vor Firmengebäude)	280 m	ja
6.09	Palmestraße 10 (Kundenparkplatz Werkstatt)	152 m	ja
6.10	Palmestraße 12	86 m	ja

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.16: Anlagenstandort 6: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
6.01	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,04	0,06	-	-	1,4	2,3
6.02	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	-	-	2,9	4,7
6.03	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	-	-	3,3	5,4
6.04	0,1	0,2	-	-	0,1	0,2	0,3	0,5	3,8	6,2
6.05	0,03*	0,05*	0,1	0,1	0,05	0,08	-	-	1,2	1,9
6.06	0,03*	0,05*	0,04	0,07	0,1	0,2	-	-	2,3	3,8
6.07	0,1	0,1	-	-	0,2	0,3	-	-	3,9	6,4
6.08	0,03*	0,05*	0,1	0,2	0,1	0,1	-	-	2,3	3,8
6.09	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,1	0,1	-	-	1,1	1,8
6.10	0,03*	0,05*	0,03*	0,05*	0,1	0,1	0,04	0,07	0,8	1,3

4.5.7 Standort 7: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld“ wurden an der Anlage Grünstraße in 52249 Eschweiler-Dürwiß durchgeführt. Auf einem Mast ist in zirka 36 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-700, LTE-800, GSM-900, LTE-1800, LTE-2100 und 5G-2100 abgestrahlt werden. Andere Netzbetreiber sind am Standort nicht präsent.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

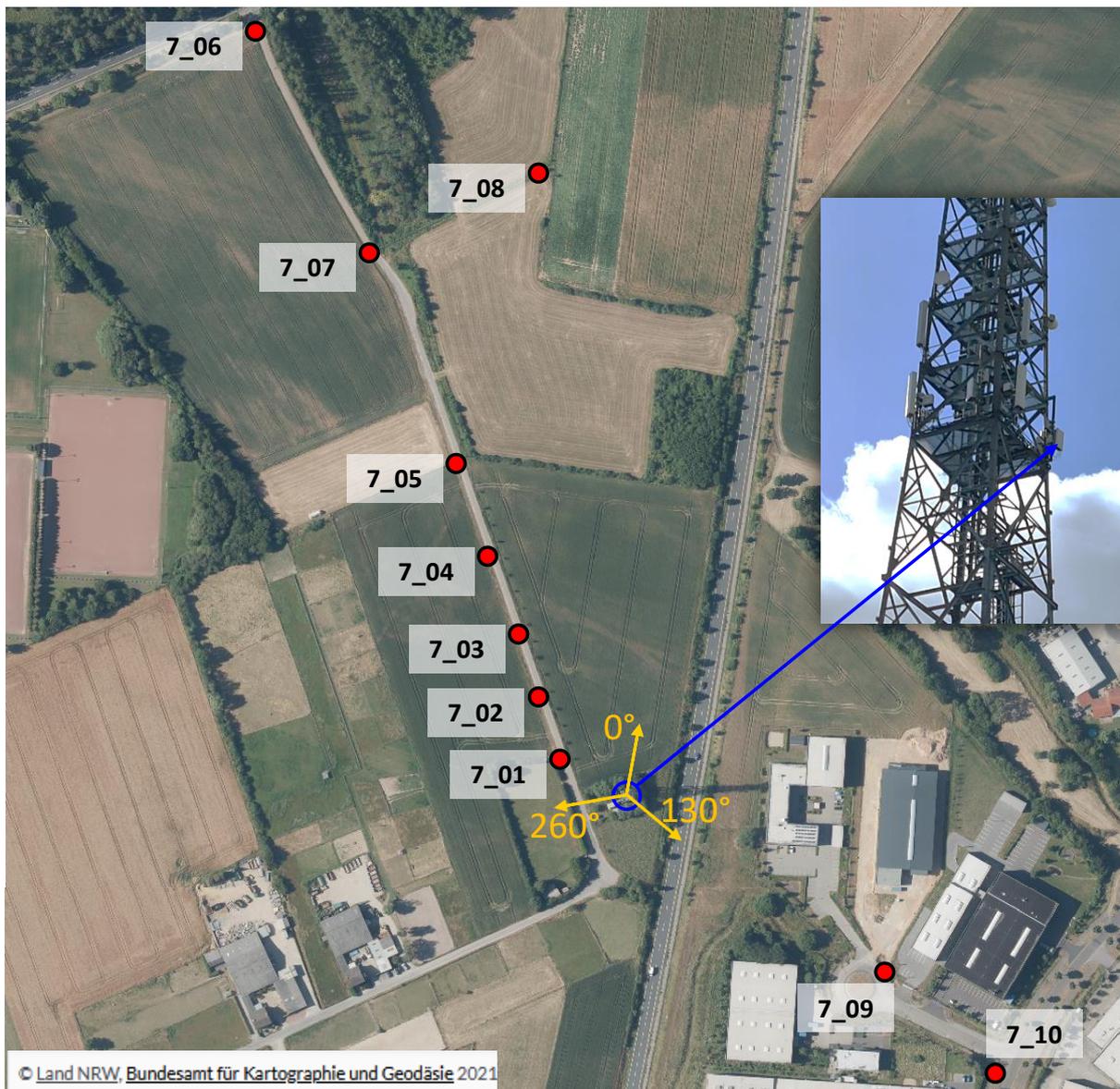


Bild 4.5.8: Standort 7: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Sieben Punkte liegen entlang einer näherungsweise radialen Linie relativ zum Anlagenstandort in einer Ausrichtung zwischen etwa 310° und 330°. Von diesen Punkten bestand jeweils direkte Sicht zum Antennenstandort. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.17: Anlagenstandort 7: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
7.01	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	51 m	ja
7.02	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	79 m	ja
7.03	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	119 m	ja
7.04	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	166 m	ja
7.05	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	231 m	ja
7.06	Grünstraße/Ecke Jülicher Straße (L238)	516m	ja
7.07	Grünstraße (Teil der Straße in Nord-Süd-Ausrichtung)	367 m	ja
7.08	Reitweg (von der Grünstr. nach Nordostost abgehend)	385 m	ja
7.09	Ernst-Abbe-Straße 30c (vor Einfahrt zum Firmengel.)	184 m	ja
7.10	Ernst-Abbe-Straße (Einmündung zw. Nr. 19/30/32)	277 m	ja

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.18: Anlagenstandort 7: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
7.01	0,03*	0,05*	0,1	0,1	0,2	0,3	-	-	6,6	10,9
7.02	0,03*	0,05*	0,03	0,05	0,0	0,1	-	-	1,2	2,0
7.03	0,04	0,06	0,1	0,1	0,3	0,6	-	-	4,7	7,8
7.04	0,03*	0,05*	0,2	0,3	0,4	0,6	-	-	7,4	12,1
7.05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	-	-	5,0	8,2
7.06	0,03*	0,05*			0,1	0,1	0,1	0,2	2,5	4,1
7.07	0,03*	0,05*	0,05	0,08	0,3	0,5	-	-	3,4	5,6
7.08	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	3,9	6,4
7.09	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	1,0	-	-	7,6	12,4
7.10	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,6	-	-	4,7	7,6

4.5.8 Standort 8: Vodafone -Anlage mit Huawei -Technik, Stadtrand

Die Messungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Huawei-Technik, Stadtrand“ wurden an der Anlage Dorfäckerstraße 43 in 90427 Nürnberg durchgeführt. An einem Mast ist in zirka 30 Meter Höhe ein dreisektoriges 5G-Mobilfunksystem installiert. Zusätzlich werden vom Betreiber über weitere Antennen (Montagehöhe etwa 29 m) auch LTE-800, GSM-900, LTE-1800 und LTE-2100 abgestrahlt. Außerdem wurden zum Zeitpunkt der Messungen noch UMTS-Signale vom Standort abgestrahlt (Betreiber: Telefónica).

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.5.9: Standort 8: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen entlang einer (nahezu) radialen Linie relativ zum Anlagenstandort und zur Ausrichtung einer der drei 5G-Antennen (60°) vorgenommen. Von diesen Punkten bestand jeweils direkte Sicht zum Antennenstandort. Zusätzlich erfolgten Messungen an drei Punkten quer zur Hauptsenderichtung einer der 5G-Antennen, wobei von zwei dieser Punkte keine direkte Sicht zum Standort bestand. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.19: Anlagenstandort 8: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
8.01	Feldweg (Linienmessung)	233 m	ja
8.02	Feldweg (Linienmessung)	249 m	ja
8.03	Feldweg (Linienmessung)	269 m	ja
8.04	Feldweg (Linienmessung)	296 m	ja
8.05	Feldweg (Linienmessung)	322 m	ja
8.06	Feldweg (Linienmessung)	344 m	ja
8.07	Feldweg (Linienmessung)	373 m	ja
8.08	Dorfäckerstraße 26 (Gehsteig südlich des Gebäudes)	111 m	ja
8.09	Dorfäckerstraße 22 (Gehsteig östlich des Gebäudes)	154 m	nein
8.10	Dorfäckerstraße 16 (Gehsteig östlich des Gebäudes)	247 m	nein

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.20: Anlagenstandort 8: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
8.01	0,05	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-	2,7	4,5
8.02	0,1	0,2	-	-	0,5	0,8	0,1	0,2	5,5	9,0
8.03	0,1	0,1	-	-	0,3	0,5	-	-	5,2	8,6
8.04	0,03	0,1	-	-	0,2	0,3	-	-	6,1	10,0
8.05	0,04	0,1	-	-	0,3	0,5	-	-	6,2	10,2
8.06	0,04	0,1	-	-	0,5	0,9	-	-	7,8	12,7
8.07	0,04	0,1	-	-	0,1	0,1	-	-	4,2	6,9
8.08	0,7	1,1	-	-	0,8	1,3	0,7	1,1	17,7	28,9
8.09	0,3	0,5	0,3	0,4	0,7	1,2	-	-	13,5	22,2
8.10	0,03*	0,05*	-	-	0,1	0,1	-	-	1,0	1,7

4.5.9 Standort 9: Vodafone -Anlage mit Huawei-Technik, Gewerbegebiet

Die Messungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Huawei-Technik, Gewerbegebiet“ wurden an der Anlage Regensburger Straße 418e in 90480 Nürnberg durchgeführt. An einem Mast ist in zirka 31 Meter Höhe ein dreisektoriges 5G-Mobilfunksystem installiert. Zusätzlich werden vom Betreiber über weitere Antennen (Montagehöhe zwischen etwa 29 und 41 m) auch LTE-800, GSM-900, LTE-1800 und LTE-2100 abgestrahlt.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

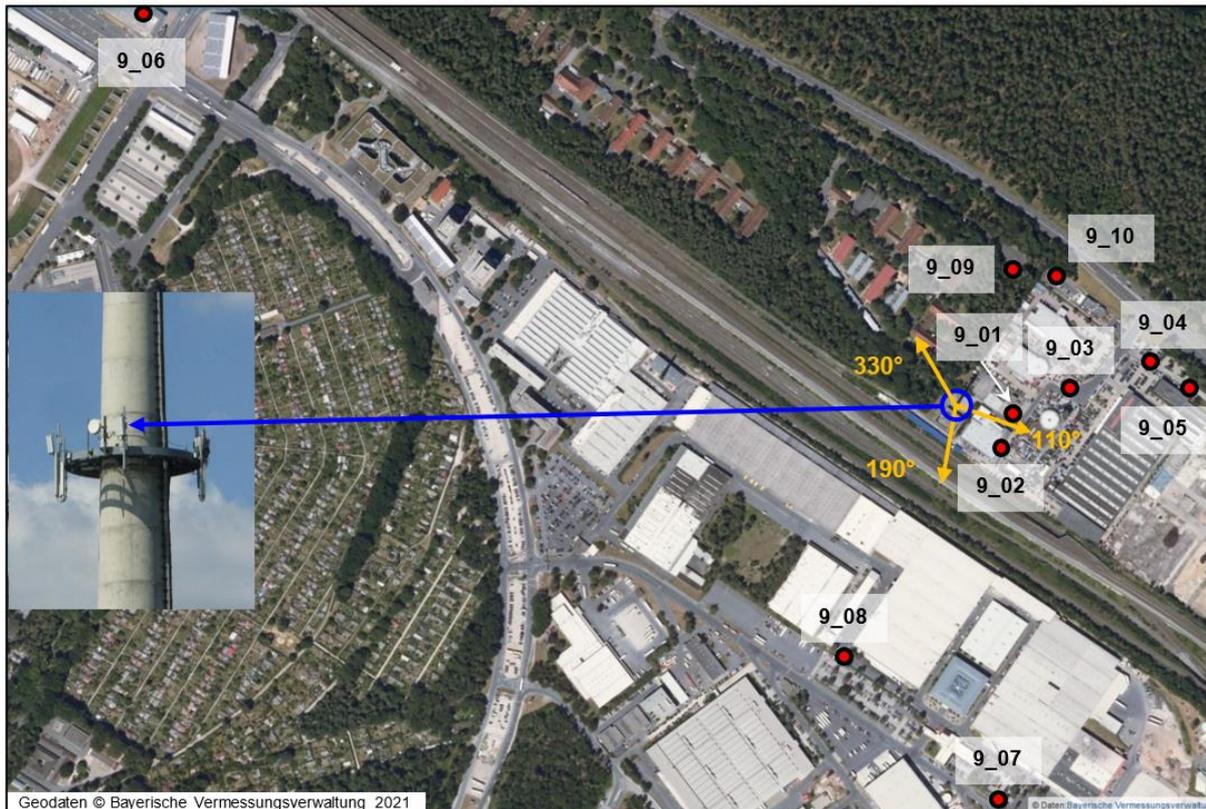


Bild 4.5.10: Standort 9: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.21: Anlagenstandort 9: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontale Entfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
9.01	Regensburger Str. (zwischen Nr. 418c und 418d)	74 m	ja
9.02	Regensburger Str. (Einfahrt südöstlich Nr. 418d)	75 m	nein
9.03	Regensburger Str. (nordöstlich Nr. 418a)	139 m	ja
9.04	Regensburger Str. (Parkplatz nordwestlich Nr. 420)	245 m	ja
9.05	Regensburger Str. 420 (Tor zum Betriebsgelände)	289 m	nein
9.06	Zeppelfeld (Tribüne Südost, oben)	1.107 m	nein
9.07	Max-Grundig-Platz (Gehsteig nördlich Nr. 53)	490 m	nein
9.08	Max-Grundig-Platz (Parkplatz nördlich Nr. 61)	340 m	ja
9.09	Regensburger Str. (Wendehammer nordöstlich Nr. 410)	180 m	nein
9.10	Regensburger Str. 416 (Parkplatz McDonald's)	194 m	ja

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.22: Anlagenstandort 1: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
 * Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes
 ** Am Messpunkt konnte keine 5G-Verbindung hergestellt werden

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
9.01	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,2	-	-	10,5	17,2
9.02	0,2	0,3	-	-	0,2	0,3	-	-	1,5	2,4
9.03	0,5	0,8	0,3	0,5	0,3	0,5	-	-	7,4	12,1
9.04	0,0	0,1	-	-	0,2	0,4	-	-	3,6	5,9
9.05	0,2	0,4	-	-	0,1	0,2	-	-	0,5	0,9
9.06	0,03*	0,05*	-	-	**	**	-	-	**	**
9.07	0,03*	0,05*	-	-	0,0	0,1	-	-	0,8	1,3
9.08	0,04	0,1	0,03*	0,05*	0,1	0,2	-	-	1,5	2,4
9.09	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,2	0,3
9.10	0,1	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-	1,9	3,2

4.5.10 Standort 10: Telefónica-Anlage mit Nokia-Technik, städtisches Umfeld

Die Messungen am Anlagenstandort „Telefónica-Anlage mit Nokia-Technik, städtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Auf dem Schafberg 41 in 65933 Frankfurt am Main durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in zirka 22 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-700, LTE-800, GSM-900, LTE-1800, LTE-2100 und 5G-2100 abgestrahlt werden.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

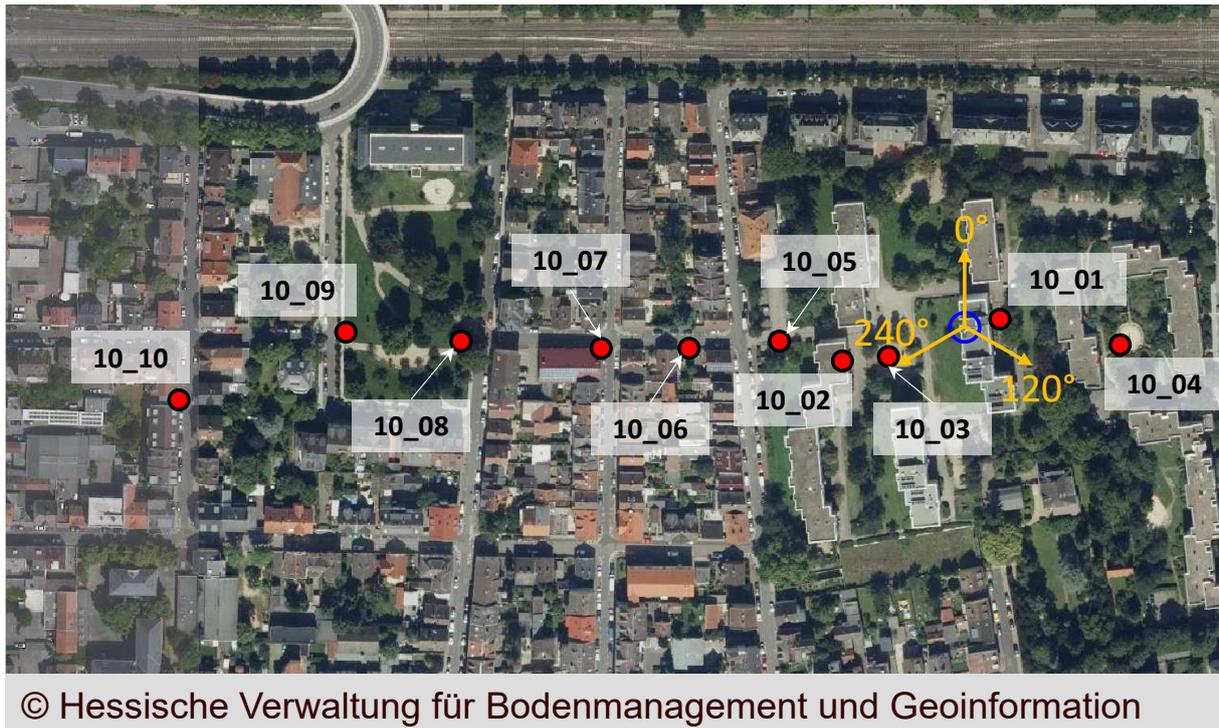


Bild 4.5.11: Standort 10: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte

In der Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Messpunkt 2 befindet sich im Treppenhaus des dritten Obergeschosses eines schräg gegenüber von der Anlage liegenden Wohngebäudes. Fünf Punkte (Messpunkte 5 bis 9) liegen entlang einer nahezu radialen Linie relativ zum Anlagenstandort in einer Ausrichtung von 270°. Bis auf Messpunkt 9 bestand jeweils direkte Sicht zum Antennenstandort. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Tabelle 4.23: Anlagenstandort 10: Beschreibung der Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Horizontalfentfernung zur Anlage	Sicht zur 5G-Antenne
10.01	Auf dem Schafberg 41 (vor dem Hauseingang)	12 m	nein
10.02	Auf dem Schafberg 23 (Treppenhaus, 3. OG, indoor)	56 m	ja
10.03	Auf dem Schafberg 23 (Spielplatz)	42 m	ja
10.04	Schöffenstraße 22 (Spielplatz)	68 m	nein
10.05	Auf dem Schafberg 23 (Ein-/Ausfahrt, Parkplatz)	81 m	ja
10.06	Nathan-Trier-Straße 5 (Bürgersteig)	123m	ja
10.07	Nathan-Trier-Straße/Ecke August-Bebel-Straße	158 m	ja
10.08	Am Brennhaus 25 (Beginn des Gemeindegarten Parks)	214 m	ja
10.09	Am Gemeindegarten 7 (Ende des Parks)	267 m	nein
10.10	Obere Rützelstraße 3 (Bürgersteig)	340 m	nein

In folgender Tabelle sind die Messergebnisse, unterteilt für die verschiedenen Immissionsszenarien, eingetragen.

Tabelle 4.24: Anlagenstandort 10: 5G-3600-Immission (-: nicht gemessen);
* Immission lag unter Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes

MP	Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie		3 maximal	
10.01	0,03*	0,04*	0,03*	0,04*	0,03*	0,04*	-	-	0,4	0,7
10.02	0,03	0,05	-	-	0,1	0,1	-	-	1,6	2,6
10.03	0,04	0,06	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	2,6	4,3
10.04	0,03*	0,04*	-	-	0,1	0,1	-	-	0,7	1,2
10.05	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	-	-	8,1	13,3
10.06	0,1	0,2	-	-	0,2	0,3	-	-	4,1	6,7
10.07	0,1	0,2	-	-	0,6	1,0	0,4	0,7	11,0	18,0
10.08	0,2	0,3	-	-	0,6	1,0	-	-	12,6	20,6
10.09	0,03*	0,04*	0,03	0,05	0,04	0,06	-	-	0,4	0,7
10.10	0,03*	0,04*	-	-	0,03*	0,04*	-	-	0,2	0,4

Anmerkung: Die SIM-Karte des zur Provozierung von Datenverkehr verwendeten Endgeräts war in der maximalen Downloadrate auf etwa 280 Mbit/s gedrosselt. An den Messpunkten 10.01 bis 10.09 wurde festgestellt, dass das SSB-Signal innerhalb der gewählten Auflösungsbreite am Messpunkt eine höhere Immission verursachte als der provozierte Datenverkehr. Da mit dem gewählten Messverfahren zur Erfassung der Maximalimmission (Immissionsszenario 3) das jeweils stärkste Signal detektiert wird, handelt es sich bei den in Tabelle 4.24 ausgewiesenen Werten für das Immissionsszenario 3 um eine Abschätzung nach oben nur für den Fall, dass die Immissionen des SSB-Signals und des provozierten Datenverkehrs innerhalb der Auflösungsbreite gleich hoch sind. Die Werte für die anderen Immissionsszenarien sind von diesem Umstand nicht betroffen.

4.6 Hintergrundimmission

Wie in Teilkapitel 4.2 beschrieben wurden zusätzlich zu den 5G-Immissionen an zehn Messpunkten auch die Hintergrundimmissionen durch andere Mobilfunkanlagen (GSM, UMTS, LTE, TETRA-BOS, 5G bei anderen Frequenzen) bestimmt. Diese werden sowohl als jeweils zur Messzeit vorherrschender Momentanwert sowie als hochgerechneter Maximalwert ausgewiesen.

In nachfolgender Tabelle sind die auf Maximalimmission hochgerechneten Immissionen von 5G-3600 denen der anderen Mobilfunksysteme gegenübergestellt.

Tabelle 4.25: Maximalimmission: Vergleich von 5G-Immission und Hintergrundimmission

MP	Maximalimmission: Messergebnisse in V/m bzw. %E			
	5G-3600		Hintergrund	
2.02	5,8	9,5	5,6	10,9
2.10	0,4	0,7	0,9	1,5
4.04	15,5	25,5	1,7	2,9
4.10	8,6	14,2	6,0	10,0
6.06	2,3	3,8	4,2	7,3
6.07	3,9	6,4	4,2	7,8
8.01	2,7	4,5	3,1	6,2
8.07	4,2	6,9	4,9	9,5
9.01	10,5	17,2	2,3	5,3
9.10	1,9	3,2	1,5	3,1

In nachfolgender Tabelle sind die zur Messzeit vorherrschenden Momentanimmissionen von 5G-3600 für die verschiedenen Expositionsszenarien denen der anderen Mobilfunksysteme gegenübergestellt.

Tabelle 4.26: Momentanimmission: Vergleich von 5G-Immission und Hintergrundimmission (-: nicht gemessen)

MP	Momentanimmission: Messergebnisse in V/m bzw. %E für die Immissionsszenarien									
	5G								Hintergrund	
	1 tatsächlich		2a typisch mit UE fern		2b typisch mit UE nah		2c typisch mit UE Linie			
2.2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,2	0,4	0,9	2,0
2.10	0,03*	0,05*	-	-	0,03*	0,05*	-	-	0,3	0,5
4.4	0,1	0,2	0,8	1,4	0,3	0,5	0,5	0,8	0,5	1,1
4.10	0,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,8	-	-	1,5	3,6
6.6	0,03	0,05	0,04	0,07	0,1	0,2	-	-	0,8	1,6
6.7	0,1	0,1	-	-	0,2	0,3	-	-	0,9	1,9
8.01	0,05	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-	0,6	1,5
8.07	0,04	0,1	-	-	0,1	0,1	-	-	0,8	1,7
9.01	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,2	-	-	0,7	1,7
9.10	0,1	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-	0,4	0,9

5 Analyse der 5G-Immissionen

5.1 Grundsätzliches

Die an den einzelnen Punkten in der Umgebung eines Standortes ermittelten maximalen 5G - Immissionswerte unterscheiden sich zum Teil deutlich. An allen Standorten betrug der leistungsbezogene Unterschiedsfaktor zwischen kleinstem und größtem Messwert mehr als 10. In den folgenden Diagrammen ist der Wertebereich der Maximalimmission für jeden der zehn Standorte dargestellt:

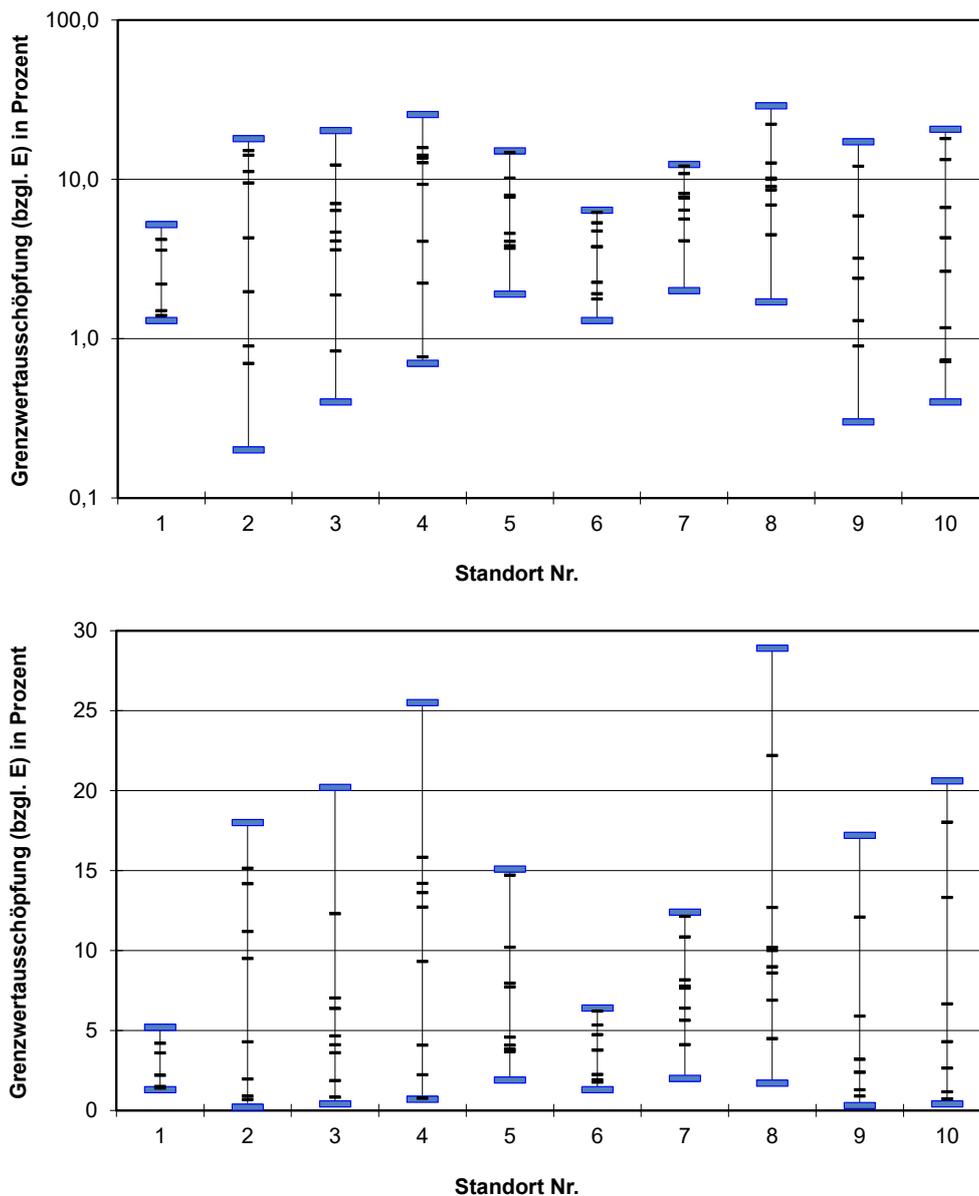


Bild 5.1.1: Zusammenfassende Darstellung der an den zehn untersuchten Standorten gemessenen maximalen 5G-Immissionen (in logarithmischer und linearer Darstellung). Blau: Größter bzw. kleinster Messwert; Schwarz: Übrige Messwerte.

Nachfolgend soll der Einfluss einiger Faktoren auf die Größe der Immission näher untersucht werden. Im Wesentlichen sind es die folgenden Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Immissionsort oder von beiden bestimmt werden:

Einflussfaktoren seitens der Sendeanlage:

- Sendeleistung der Anlage (Frequenzband, Anzahl der Betreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeantennen über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

- Abstand zur Sendeanlage,
- Höhe des Empfängerortes über Grund (bzw. relativer Höhenunterschied zur Sendeanlage), beschrieben durch den Vertikalwinkel unter dem die Antenne vom Messpunkt aus erscheint,
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Vorhandensein von dämpfenden Hindernissen zwischen Antenne und Immissionsort (Sichtbarkeit der Anlage).

Von diesen Einflussfaktoren sollen im Folgenden der (laterale) Abstand zur Sendeanlage, der relative Höhenunterschied vom Messpunkt (MP) zur Sendeanlage, und die Sichtverhältnisse (freie Sicht oder Sicht durch Hindernisse verdeckt) untersucht werden. Der relative Höhenunterschied wird hierbei durch den Vertikalwinkel charakterisiert, der während der Messungen mit einem Winkelmesser ermittelt beziehungsweise (bei nicht vorhandener Sichtverbindung vom Messort zur Antenne) aus der Montagehöhe der Antenne, dem Abstand sowie den topografischen Höhen von Anlagenstandort und Messpunkt errechnet wurde. Die drei näher untersuchten räumlichen Faktoren sind in Bild 5.1.2 veranschaulicht.

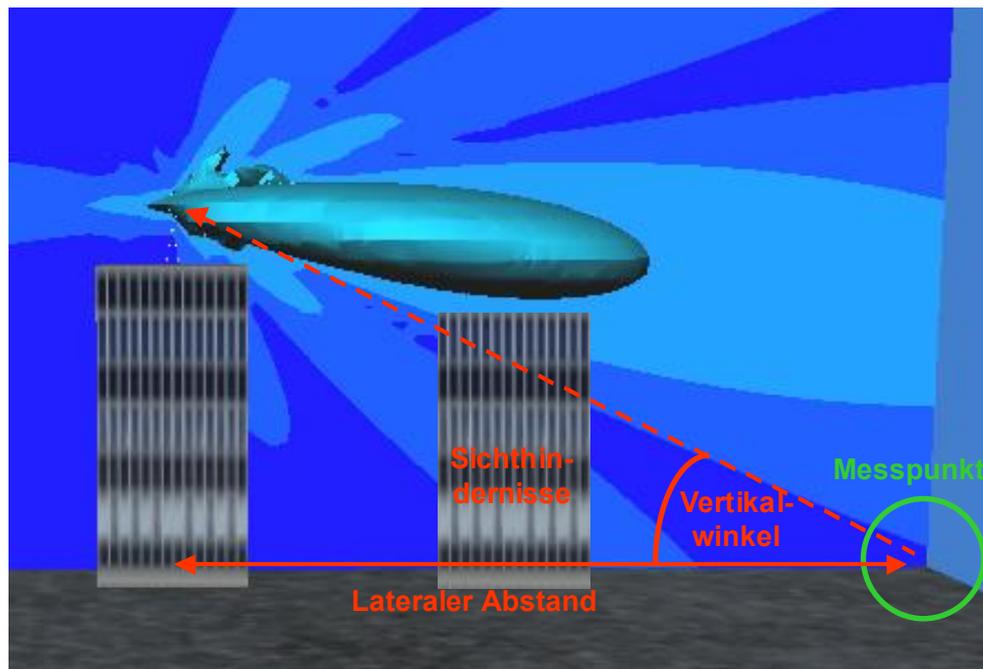


Bild 5.1.2: Untersuchte Einflussfaktoren

Im Folgenden soll überprüft werden, ob sich gewisse Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der Immission finden lassen. Insbesondere ist von Interesse, ob die in [BSW 13] für LTE-Anlagen ermittelten Gesetzmäßigkeiten tendenziell auch bei 5G-Standorten zu finden sind. Die im Folgenden dargestellten 5G-Immissionswerte sind wieder als prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für die vom Betreiber bei der BNetzA beantragte Maximalleistung und Maximalauslastung der verursachenden Sendeanlagen angegeben.

5.2 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse

Bevor die Messergebnisse speziell bezüglich der oben genannten Einflussfaktoren ausgewertet werden, sollen hier zunächst einige grundsätzliche Eigenschaften der an den Messpunkten gefundenen Immissionswerte dargestellt werden.

5.2.1 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse

Die 100 untersuchten Messpunkte können wie folgt charakterisiert werden:

Tabelle 5.1: Eigenschaften der Messpunkte

Lage der Messpunkte	Davon mit Sicht zu den Antennen	Davon ohne bzw. mit stark eingeschränkter Sicht zu Antennen
Indoor (8 Punkte)	1	7
Outdoor (92 Punkte)	57	35

5.2.2 Erzwungene 5G-Maximalimmission: Ergebnisse

An 96 der 100 Messpunkte wurde mittels eines FTP-Downloads eine 5G-Maximalimmission am Messpunkt erzwungen und gemessen. Das Endgerät befand sich dabei in Messpunktnähe, so dass davon ausgegangen werden kann, dass von der Anlage ein Antennenbeam in Richtung des Messpunktes erzeugt wurde. An vier Messpunkten konnte diese Messung nicht durchgeführt werden. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die größten bzw. kleinsten gemessenen 5G-Maximalimmissionswerte sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten.

Tabelle 5.2: Extremwerte und Spannweiten der gemessenen 5G-Maximalimmissionen

Kennwert	Resultat
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	28,9
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,2
Spannweite [dB] über alle MP	41,6
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	28,9
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,3
Spannweite [dB] bei Sicht	26,9
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	22,2
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,2
Spannweite [dB] ohne Sicht	39,3

Die größte festgestellte 5G-Immission beträgt 28,9 Prozent vom Feldstärkegrenzwert, die geringste 0,2 Prozent. Die Spannweite der Immission ist sehr groß, sie beträgt über alle Messpunkte mehr als 40 dB.

Die statistischen Mittelwerte sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde hierbei als leistungsgemittelter Wert errechnet.

Tabelle 5.3: Durchschnittliche 5G-Maximalimmission und Median über alle Messpunkte

Statistischer Mittelwert	Resultat
Durchschnittliche 5G-Maximalimmission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	9,33
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	4,71

Bild 5.2.1 zeigt in einem Balkendiagramm die Verteilung der ermittelten 5G-Maximalimmissionswerte:

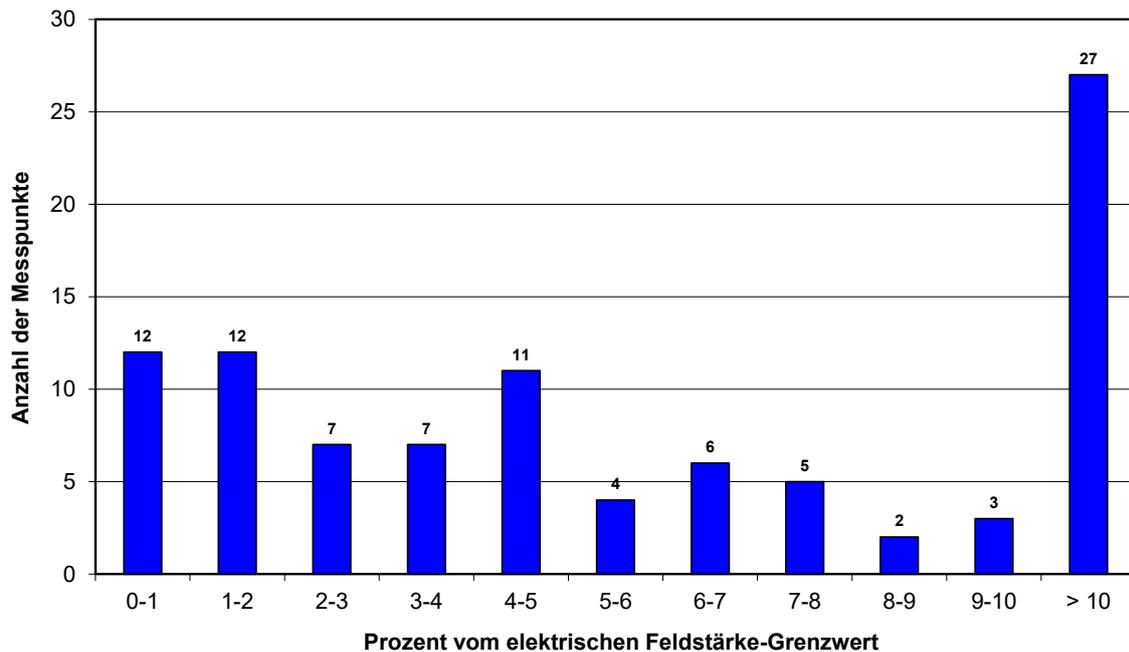


Bild 5.2.1: Verteilung der 5G-Maximalimmissionswerte in Grenzwertklassen

Die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Grenzwertausschöpfungen bei Maximalimmission unterscheidet sich deutlich von Verteilungen aus früheren für das BfS durchgeführten Untersuchungen an GSM-, UMTS- und LTE-Anlagen [BSW 06], [BSW 13] (siehe beispielsweise Bild 5.2.2). Allerdings muss hierbei angemerkt werden, dass bei der aktuellen 5G-Messkampagne ausschließlich systematisch ausgewählte Messpunkte in unmittelbarer Anlagenumgebung (häufig mit direkter Sicht zu den Antennen) untersucht und nicht, wie beispielsweise in [BSW 13] auch rein zufällig ausgewählte Messpunkte einbezogen wurden.

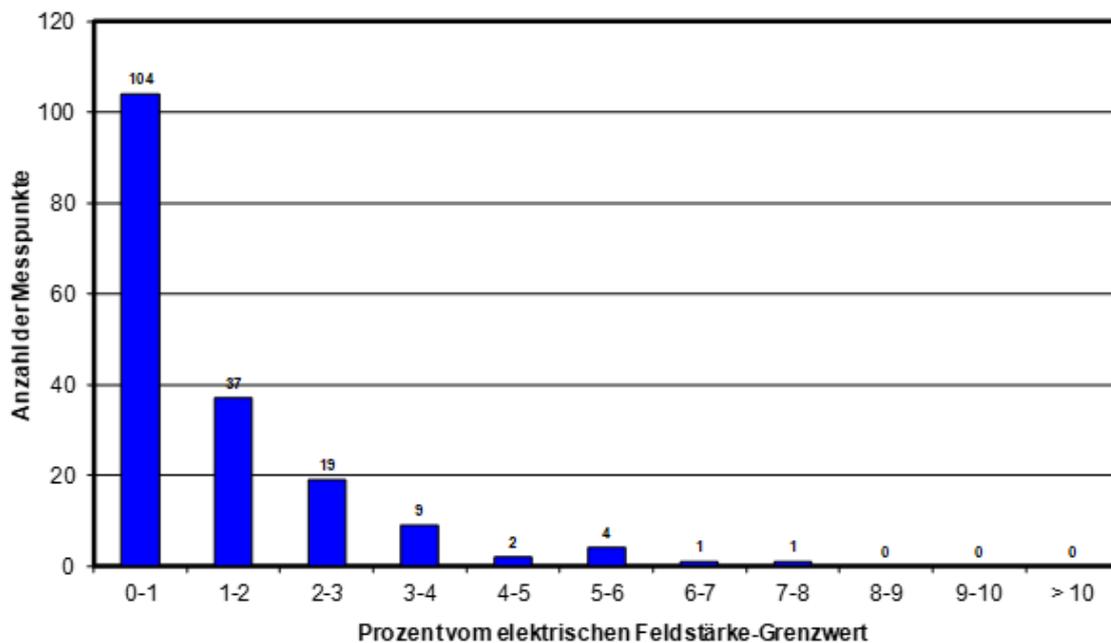


Bild 5.2.2: Verteilung der 4G-Maximalimmissionswerte in Grenzwertklassen aus den 2012/13 für das BfS durchgeführten Untersuchungen an LTE-Anlagen [BSW 13]

5.2.3 "Typische" 5G-Immission: Ergebnisse

An 97 der 100 Messpunkte wurde durch Streamen eines TV-Programms (ARD) eine "typische" 5G-Immission am Messpunkt erzeugt und gemessen. Das Endgerät befand sich dabei in Messpunktnähe, so dass davon ausgegangen werden kann, dass von der Anlage ein Antennenbeam in Richtung des Messpunktes erzeugt wurde. An drei Messpunkten konnte diese Messung nicht durchgeführt werden. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die größten bzw. kleinsten gemessenen "typischen" 5G-Immissionswerte sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten.

Tabelle 5.4: Extremwerte und Spannweiten der gemessenen "typischen" 5G-Immissionen

Kennwert	Resultat
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,30
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04
Spannweite [dB] über alle MP	30,2
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,30
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,05
Spannweite [dB] bei Sicht	28,3
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,20
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04
Spannweite [dB] ohne Sicht	29,5

Die größte festgestellte "typische" 5G-Immission beträgt 1,3 Prozent vom Feldstärkegrenzwert, die geringste 0,04 Prozent (dies ist in etwa auch die Nachweisgrenze des Messgeräts, was bedeutet, dass die reale Immission an einigen Punkten durchaus auch noch darunterliegen könnte). Die Spannweite der "typischen" Immission ist geringer als die der Maximalimmission, sie beträgt über alle Messpunkte etwa 30 dB.

Die statistischen Mittelwerte sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde hierbei als leistungsgemittelter Wert errechnet.

Tabelle 5.5: Durchschnittliche "typische" 5G-Immission und Median über alle Messpunkte

Statistischer Mittelwert	Resultat
Durchschnittliche "typische" 5G-Immission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,44
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,20

Bild 5.2.3 zeigt in einem Balkendiagramm die Verteilung der ermittelten "typischen" 5G-Immissionswerte:

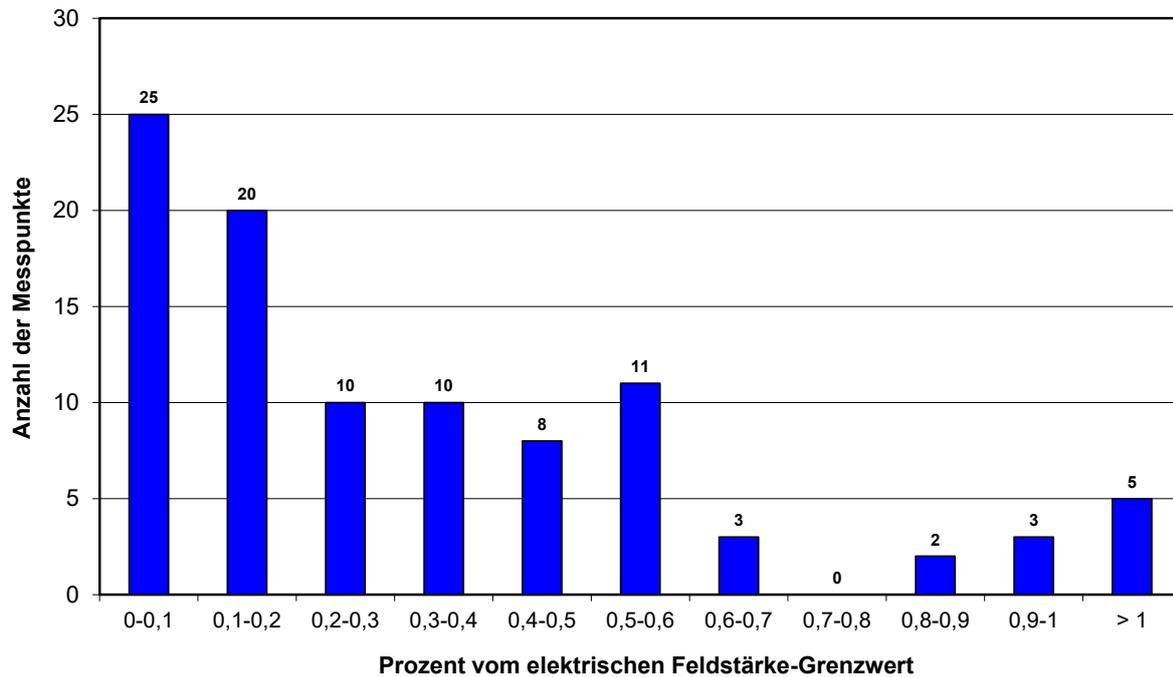


Bild 5.2.3: Verteilung der "typischen" 5G-Immissionswerte in Grenzwertklassen

Betrachtet man die "typische" 5G-Immission, die bei Streamen eines TV-Programms am Messpunkt entsteht, ergibt sich eine statistische Verteilung, die sich nicht mehr so deutlich von denen aus früheren Untersuchungen (GSM, UMTS, LTE; siehe z.B. Bild 5.2.2) unterscheidet wie es bei der Maximalimmission der Fall ist (Bild 5.2.1 im Vergleich zum Bild 5.2.2).

5.2.4 "Aktuelle" 5G-Immission: Ergebnisse

An allen 100 untersuchten Messpunkten wurde zusätzlich auch die "aktuelle" 5G-Immission ermittelt. Es handelt sich hierbei um die Immission, die feststellbar ist, wenn am Messort kein Datentransfer von der Basisstation durch ein Endgerät erzwungen wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der zum Zeitpunkt der Messungen (Sommer 2021) noch sehr geringen Verbreitung von 5G-Endgeräten bzw. Mobilfunkverträgen, die 5G-Dienste einschließen, die Messung der "aktuellen" Immission größtenteils bei sehr geringer Auslastung der betrachteten Anlage stattfand (was zusätzlich stichprobenartig durch Beobachten des Downlinksignals im Zeitbereich verifiziert wurde). Die hier dokumentierten Immissionswerte liegen daher vermutlich meist nahe an der durch die Anlage erzeugbaren Minimalimmission.

Tabelle 5.6 gibt einen Überblick über die größten bzw. kleinsten gemessenen "aktuellen" 5G-Immissionswerte sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten.

Tabelle 5.6: Extremwerte und Spannweiten der gemessenen "aktuellen" 5G-Immissionen

Kennwert	Resultat
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,10
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04
Spannweite [dB] über alle MP	28,8
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,10
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,05
Spannweite [dB] bei Sicht	27,1
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,50
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04
Spannweite [dB] ohne Sicht	21,9

Die größte festgestellte "aktuelle" 5G-Immission beträgt 1,1 Prozent vom Feldstärkegrenzwert, die geringste 0,04 Prozent. Die Spannweite der "aktuellen" Immission ist geringer als die der Maximalimmission, sie liegt jedoch mit 28,8 dB in einer ähnlichen Größenordnung wie die Spannweite der "typischen" Immission (30 dB).

Die statistischen Mittelwerte sind in Tabelle 5.7 aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde hierbei als leistungsgemittelter Wert errechnet.

Tabelle 5.7: Durchschnittliche "aktuelle" 5G-Immission und Median über alle Messpunkte

Statistischer Mittelwert	Resultat
Durchschnittliche "aktuelle" 5G-Immission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,21
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,09

Bild 5.2.4 zeigt in einem Balkendiagramm die Verteilung der ermittelten "aktuellen" 5G-Immissionswerte:

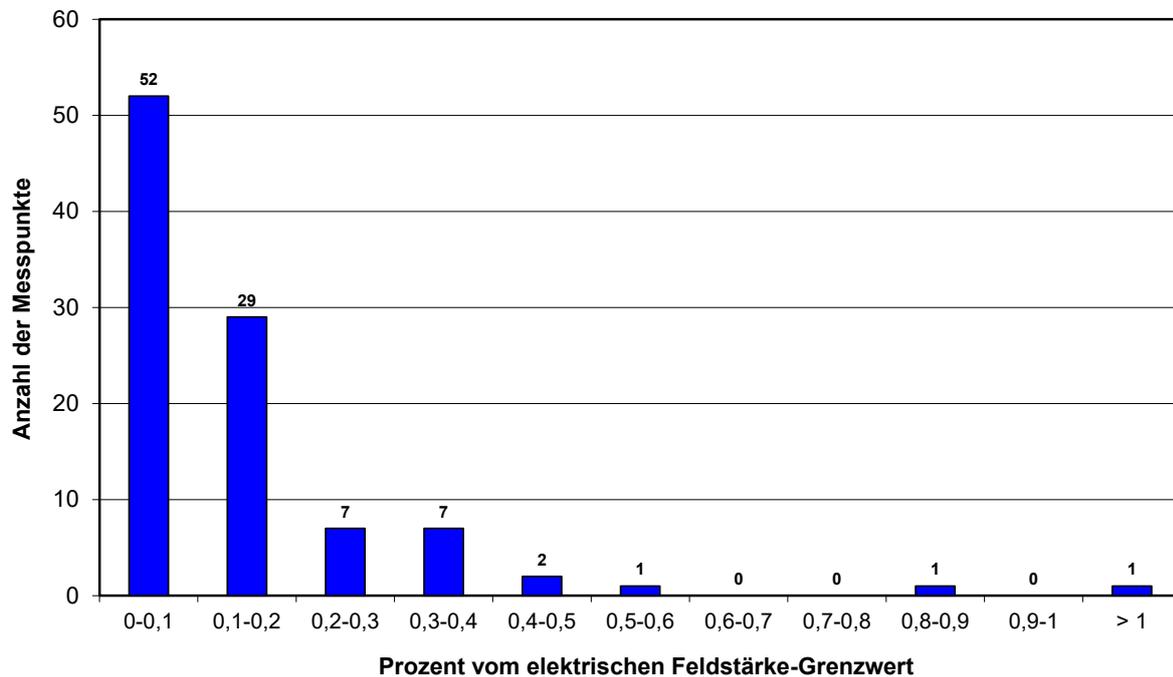


Bild 5.2.4: Verteilung der "aktuellen" 5G-Immissionswerte in Grenzwertklassen

Betrachtet man die aktuell am Messpunkt vorhandene 5G-Immission, ergibt sich eine statistische Verteilung, bei der sehr kleine Messwerte in der Nähe der Nachweisgrenze des Messgerätes stark dominieren.

5.2.5 Zusammenfassender Vergleich der drei ermittelten 5G-Immissionen

Abschließend erfolgt in Tabelle 5.8 ein größenmäßiger Vergleich der drei an den Messpunkten ermittelten 5G-Immissionen ("aktuell", "typisch", "maximal") und zwar durch Gegenüberstellen der jeweiligen Mediane bzw. Mittelwerte (aus Tabelle 5.3, Tabelle 5.5 sowie Tabelle 5.7).

Tabelle 5.8: Mittlere Unterschiede zwischen "aktuellen", "typischen" und maximalen Immission 5G-Immissionen

	Mittelwert	Unterschied zur akt. Immission	Median	Unterschied zur akt. Immission
	[%]	[dB]	[%]	[dB]
aktuelle Immission	0,21	-	0,09	-
typische Immission	0,44	6,4	0,20	8,0
Maximalimmission	9,33	33,0	4,71	35,4

Da offensichtlich war, dass die gemessenen "aktuellen" Immissionen derzeit in den meisten Fällen noch sehr nahe bei der Minimalimmission liegen, kann aus den Ergebnissen in Tabelle 5.8 geschlossen werden, dass eine 5G-Basisstation ohne Auslastung nur sehr geringe Hochfrequenzimmissionen generiert. Die Messungen bestätigen also die bereits theoretisch abgeschätzten großen Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalimmission bei 5G-Anlagen (siehe Anhang A zu diesem Bericht), wobei der Unterschied bei den hier betrachteten Antennen mit Beamforming (mMIMO) größer ausfallen kann, als bei Einsatz konventioneller Antennen. Aus Tabelle 5.8 ist ein Unterschied zwischen den Medianwerten von gemessener "aktueller" und „maximaler“ Immission von etwa 35 dB ablesbar (d.h. zirka Faktor 3.450 bezüglich der Leistung). Die einzelnen Unterschiedsfaktoren bewegten sich hierbei zwischen etwa 7 dB und 48 dB. Nur an sechs der 96 Messpunkte ergab sich ein Unterschiedsfaktor von weniger als 20 dB.

Im Vergleich zu anderen Mobilfunksystemen sind die von den Signalisierungssignalen der 5G-Anlagen permanent generierten Immissionen somit deutlich niedriger, was in Tabelle 5.9 verdeutlicht wird.

Tabelle 5.9: Vergleichende Gegenüberstellung des typisch permanent in die Funkzelle durch die "always on" Signalisierungssignale abgestrahlten prozentualen Anteils der gesamten verfügbaren Sendeleistung für die vier aktuell gebräuchlichen Mobilfunkstandards.

Mobilfunkstandard	Typischer prozentualer Anteil der Signalisierungsleistung	Quelle
GSM (2G)	ca. 25 % bis 100 %	[Wus 19]
UMTS (3G)	ca. 10 % bis 20 %	[BSW 06]
LTE (4G)	ca. 10 % bis 25 %	[KBS 17]
5G NR mit mMIMO	ca. 0,01 % bis 0,4 %	siehe Anhang A

Der mittlere Unterschied zwischen "typischer" und maximaler Immission ist mit zirka 27 dB (bzw. Faktor 500 bezüglich der Leistung) ebenfalls noch vergleichsweise groß. Offensichtlich bringt das Betrachten eines TV-Programms eine 5G-Basisstation bei weitem noch nicht in den Zustand der Maximalauslastung.

5.3 Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage

Häufig wird versucht, die Immission eines Messpunktes aufgrund seines Abstandes zur Sendequelle zu charakterisieren. Hierbei wird meist vereinfacht angenommen, dass die Immission umso geringer sein müsste, je weiter der Messpunkt von der Quelle entfernt ist. Ob dies im unmittelbaren Umfeld der untersuchten 5G-Anlagen zutrifft, soll die folgende Auswertung zeigen.

Dazu wurden die Resultate für die drei an den Outdoormesspunkten mit Sichtverbindung zur Antenne ermittelten Immissionsarten zusammen mit dem Abstand zur 5G-Anlage in ein Diagramm eingetragen. Messpunkte ohne Sicht wurden hier nicht einbezogen, da fehlende Sichtbedingungen, wie später noch gezeigt wird, ebenfalls einen großen Einfluss auf die Immission

haben. Das Ergebnis ist in Bild 5.3.1 dargestellt. Als Immission ist wieder die prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke dargestellt. Die drei Immissionsarten ("aktuell", "typisch (ARD)", "maximal") sind unterschiedlich eingefärbt, so dass hier nochmals die in Teilkapitel 5.2.5 bereits erörterten deutlichen Immissionsunterschiede sichtbar werden.

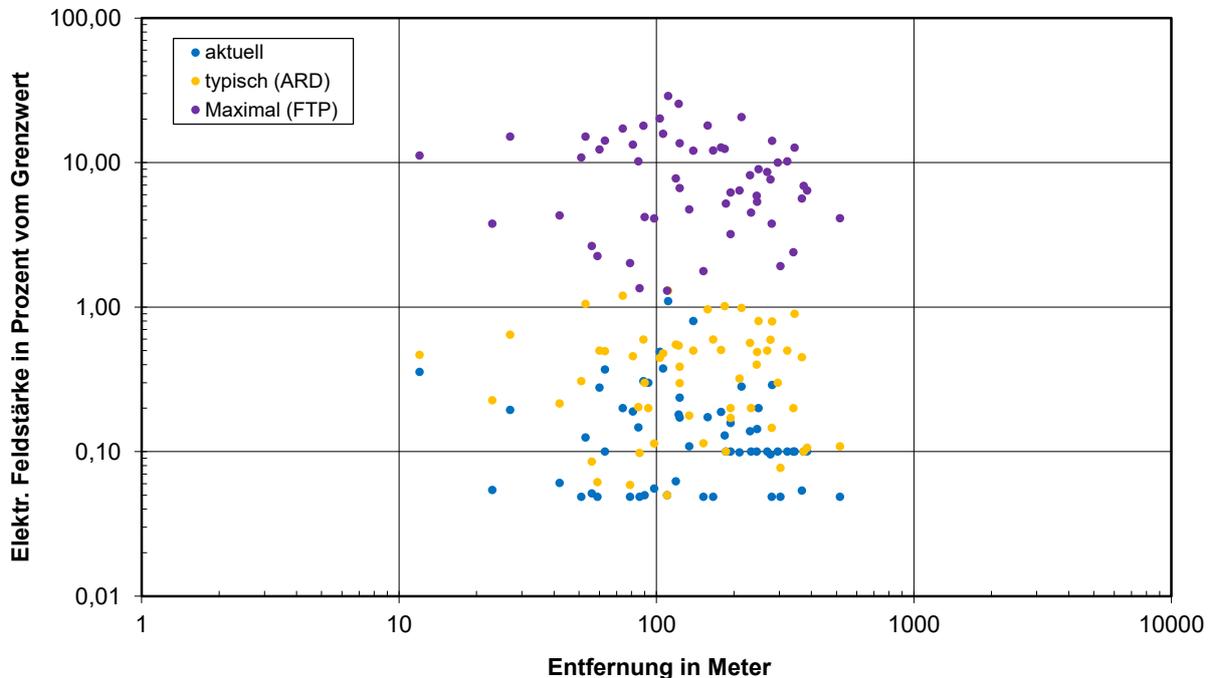


Bild 5.3.1: Immissionswerte als Funktion des lateralen Abstands für die 57 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur 5G-Beamformingantenne

Als Ergebnis wird deutlich, dass es bei den Outdoormesspunkten im unmittelbaren Umfeld der Sendeanlage (Entfernungen bis ca. einige hundert Meter) offenbar nicht gerechtfertigt ist, den Abstand als allein maßgebliches Kriterium für die Beurteilung der Immissionsgröße zu verwenden. Die größten Immissionen der Messreihe finden sich bei Abständen in der Größenordnung von etwa 100 Meter zur Anlage. Ab etwa 200 Meter ist zwar eine gewisse Abnahme der Immission mit dem Abstand erkennbar, für eine bestimmte Entfernung beträgt die Spannweite jedoch teilweise bis zu etwa 30 dB.

5.4 Einfluss des Vertikalwinkels

In Bild 5.4.1 ist für alle Messpunkte mit Sicht die Maximalimmission als Funktion des Vertikalwinkels dargestellt. Der Vertikalwinkel ist derjenige Winkel, unter dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht (siehe Bild 5.1.2). Kleine Vertikalwinkel bedeuten, dass der Messpunkt weit von der Antenne entfernt ist oder sich Messpunkt und Antenne auf nahezu derselben Höhe befinden. Bei großem Vertikalwinkel besteht zwischen Messpunkt und Sendeanlage ein großer Höhenunterschied oder man befindet sich sehr nahe am Antennenstandort. Der Vertikalwinkel kann damit als Indikator dafür dienen, ob der Messpunkt in Hauptstrahlrichtung oder außerhalb der vertikalen Hauptstrahlrichtung der Antenne liegt. Bei mMIMO-Antennen ist hierbei allerdings zu berücksichtigen, dass diese ihre vertikale Hauptstrahlrichtung in einem gewissen Bereich verändern können.

In Bild 5.4.1 ist die Immission jeweils gemittelt über verschiedene Vertikalwinkelbereiche angegeben. Über den Balken ist der mittlere laterale Abstand der Messpunkte zur Sendeanlage für die jeweilige Vertikalwinkelklasse angegeben (siehe Tabelle 5.10).

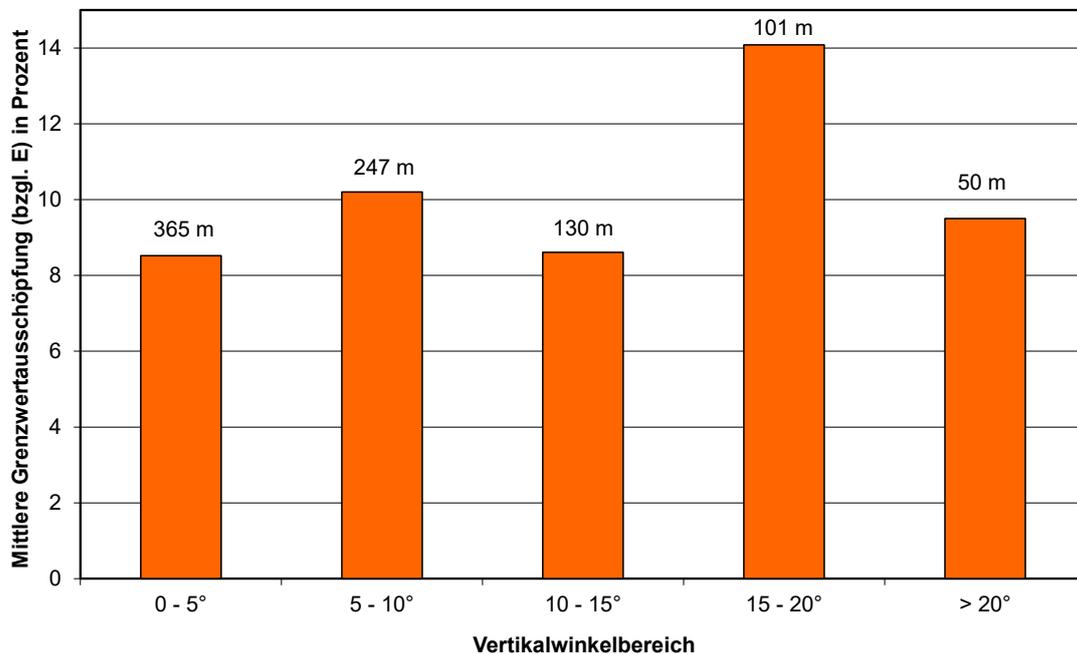


Bild 5.4.1: Mittelwerte der Maximalimmission als Funktion des Vertikalwinkels an allen Messpunkten mit Sicht. Über den Balken ist der mittlere laterale Abstand der Messpunkte zur 5G-Sendeanlage für die jeweilige Vertikalwinkelklasse angegeben.

Zum Vergleich ist in Bild 5.4.2 die in [BSW 13] für LTE-Anlagen gefundene Winkelabhängigkeit der Immission dargestellt.

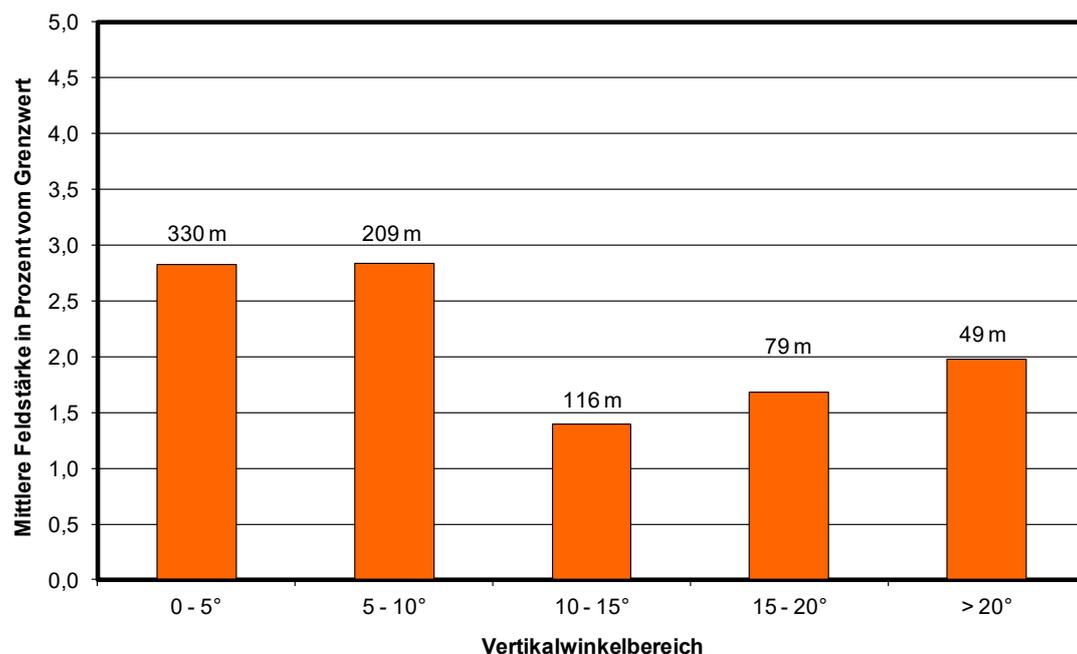


Bild 5.4.2: Mittelwerte der Maximalimmission als Funktion des Vertikalwinkels an allen Messpunkten mit Sicht aus den 2012/2013 für das BfS durchgeführten Untersuchungen an LTE-Anlagen. Über den Balken ist der mittlere laterale Abstand der Messpunkte zur LTE-Sendeanlage für die jeweilige Vertikalwinkelklasse angegeben [BSW 13].

Ein Vergleich beider Bilder zeigt zunächst, dass sich bei der aktuellen Untersuchung für gleiche Vertikalwinkelbereiche typisch größere mittlere Abstände ergeben, was bedeutet, dass im Mittel die 5G-Mobilfunkantennen höher montiert waren, als die LTE-Antennen bei den Messungen aus [BSW 13], da sich bei beiden Untersuchungen die überwiegende Mehrzahl der Messpunkte in Bodennähe befunden hat.

Weiterhin zeigt sich, dass sich bei den 5G-Anlagen die größten Immissionen in Bereiche mit größeren Vertikalwinkeln (und damit auch kleineren Abständen) verschieben, als es bei den LTE-Anlagen der Fall war. Dies ist vermutlich durch die Eigenschaft der eingesetzten Beamformingantennen bedingt, welche die Abstrahlung gezielt auch in Bereiche großer Vertikalwinkel (d.h. steiler nach unten) fokussieren können, während bei den klassischen Mobilfunkantennen immer ein fester Vertikalwinkel (typisch um 5°) eingestellt ist. Man sieht aber auch, dass bei Winkelbereichen größer 20° die 5G-Immission wieder abnimmt, da derart große Vertikalauslenkungen offensichtlich nicht realisiert werden.

Im Vergleich zu LTE verliert bei 5G-Anlagen mit mMIMO-Antennen der Vertikalwinkel als Einflussfaktor für die zu erwartende Immission an Aussagekraft. Offensichtlich kann nicht mehr ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass die Immissionen bei kleineren Vertikalwinkeln (< 10°) gegenüber denen bei großen Winkeln in der Regel dominieren.

In Tabelle 5.10 sind die Ergebnisse der Auswertung zum Einfluss des Vertikalwinkels bei den untersuchten 5G-Anlagen zusammenfassend dokumentiert.

Tabelle 5.10: Immission in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel an allen Messpunkten mit Sicht zur 5G-Antenne (Maximalimmissionswerte)

Vertikalwinkelbereich	Anzahl Messpunkte	mittlerer Abstand	minimaler Messwert	maximaler Messwert	Mittelwert (leistungsbezogen)	Median
0° - 5°	6	365 m	2,40 %	12,70 %	8,52 %	8,45 %
5° - 10°	17	247 m	1,92 %	20,61 %	10,20 %	6,15 %
10° - 15°	15	130 m	1,30 %	28,90 %	8,61 %	2,65 %
15° - 20°	9	101 m	1,77 %	25,47 %	14,08 %	13,32 %
> 20°	9	50 m	1,35 %	17,20 %	9,50 %	4,31 %

5.5 Einfluss der Sichtverhältnisse

Hindernisse im Ausbreitungsweg zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt, wie z.B. Gebäude oder auch Bäume, führen theoretisch zu einer Abschwächung der Signale und Verringerung der Immission. Die Funkverbindung ist in der Praxis jedoch nicht vollständig unterbrochen, da die Signale der Basisstation oftmals über Kantenbeugung oder Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden (Mehrwegeausbreitung) zum Messpunkt gelangen. Wie sich der abschattende Effekt bezüglich der Immission auswirkt, soll im Folgenden untersucht werden.

In Bild 5.5.1 ist die entfernungsabhängige Maximalimmission als Funktion der Entfernung zum Standort in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen zur 5G-Antenne dargestellt.

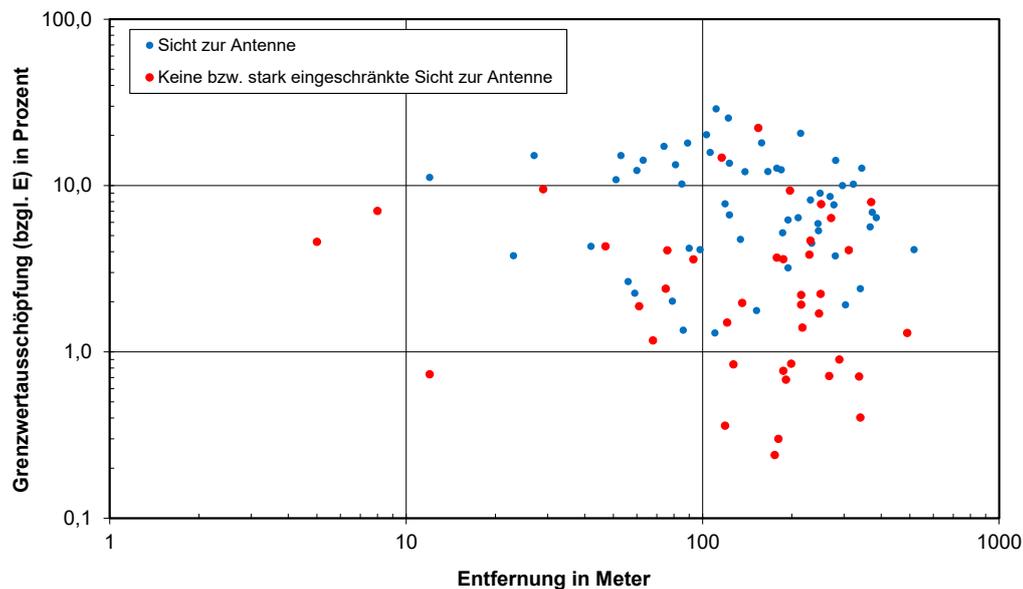


Bild 5.5.1: 5G-Maximalimmission in Abhängigkeit von Entfernung und den Sichtverhältnissen

In Bild 5.5.1 ist eine deutliche Tendenz dahingehend festzustellen, dass Messpunkte mit Sichtbedingungen im Mittel eine größere Immission aufweisen als Messpunkte, bei denen keine oder eine stark eingeschränkte Sicht zur Sendeantenne besteht. Besteht Sicht, ergibt sich ein Medianwert von 8,0 Prozent, bei fehlender Sichtverbindung beträgt der Median hingegen nur noch 2,1 Prozent. Der Unterschied beträgt also etwa 12 dB (leistungsbezogen: Faktor 16).

5.6 Vergleich mit den Immissionen durch andere Mobilfunkanlagen

Die an den Messpunkten gefundenen 5G-Mobilfunkimmissionen wurden zusätzlich auch mit denen anderer Mobilfunkanlagen verglichen ("Hintergrundimmission"). Dazu wurden an einigen Messpunkten zusätzlich noch die Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksendeanlagen ermittelt. Dies geschah an insgesamt zehn Punkten (jeweils zwei Messpunkte an fünf der zehn untersuchten Standorte). Es wurde jeweils ein Punkt näher am Standort und einer in größerer Entfernung gewählt.

Ermittelt wurde an diesen Punkten

- Die aktuelle Immission, verursacht durch einwirkende Signale anderer Mobilfunkanlagen (2G/3G/4G).
- An den Standorten der untersuchten 5G-Anlagen waren immer auch weitere Mobilfunksysteme (2G/3G/4G) des gleichen Betreibers und teilweise noch von anderen Betreibern in Betrieb. Die von diesen Anlagen ausgehenden Signale wurden zusätzlich noch auf andere Art und Weise bewertet und zwar wurden unter Zuhilfenahme von durch die Betreiber zur Verfügung gestellten technischen Anlagenparameter die auf höchste Anlagenauslastung extrapolierten Maximalwerte der Immission ermittelt.

Dadurch werden an den zehn Punkten die folgenden beiden Immissionsvergleiche möglich:

- "Aktuelle" bzw. "typische" 5G-Immission, verursacht durch die betrachtete Anlage im Vergleich zur aktuellen Immission, verursacht durch alle anderen am Messpunkt nennenswert vorhandenen Mobilfunksignale.
- Maximale von der betrachteten Anlage generierte 5G-Immission im Vergleich zur Maximalimmission, die durch die anderen am Standort befindlichen Mobilfunkanlagen generiert wird.

Die Ergebnisse dieser Vergleiche sind in Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12 dokumentiert:

Tabelle 5.11: "Aktuelle bzw. "typische" 5G-Immission im Vergleich zur aktuellen Immission, verursacht durch vorhandene 2G/3G/4G-Signale. Ein Unterschiedsfaktor von 10 dB (rechte Tabellenspalte) bedeutet, dass das 5G-Signal (leistungsbezogen) etwa 10 Prozent zur Gesamtimmission beiträgt, bei einem Unterschiedsfaktor von 20 dB sind es nur noch etwa 1 Prozent.

Messpunkt	Entfernung zum Standort	5G ("aktuell")	5G ("typisch")	Mobilfunk-Hintergrund ("aktuell")	Unterschied zw. Mobilfunk-Hintergrund ("aktuell") und 5G ("typisch")
2.2	29 m	0,31 %	0,54 %	2,0 %	11,4 dB
2.10	191 m	0,05 %	0,05 %	0,5 %	20,0 dB
4.4	122 m	0,18 %	0,54 %	1,1 %	6,2 dB
4.10	281 m	0,29 %	0,80 %	3,6 %	13,1 dB
6.6	23 m	0,05 %	0,23 %	1,6 %	16,8 dB
6.7	210 m	0,10 %	0,32 %	1,9 %	15,5 dB
8.1	81 m	0,10 %	0,20 %	1,5 %	17,5 dB
8.7	373 m	0,10 %	0,10 %	1,7 %	24,6 dB
9.1	74 m	0,20 %	1,20 %	1,7 %	3,0 dB
9.10	194 m	0,10 %	0,20 %	0,9 %	13,1 dB

An allen zehn untersuchten Punkten dominiert die aktuelle Immission durch andere Mobilfunksignale gegenüber den "typischen" 5G-Immissionen (d.h. Immissionen, die am Nutzer durch die Basisstation bei Streamen eines TV-Programmes typisch generiert werden). Der Unterschied liegt in der Größenordnung zwischen etwa 3 und 25 dB. Vergleicht man die Mobilfunkhintergrundimmission mit der "aktuellen" 5G-Immission, ist der Unterschied noch größer (zwischen etwa 16 und 30 dB). Allerdings muss hier angemerkt werden, dass aufgrund der aktuell noch sehr geringen Auslastung der 5G-Standorte die "aktuelle" 5G-Immission noch sehr gering ist. In Zukunft wird diese sich sicherlich noch vergrößern, so dass der Abstand zur Hintergrundimmission vermutlich kleiner werden wird.

Tabelle 5.12 dokumentiert den Vergleich der maximalen 5G-Immissionen mit den Maximalimmissionen, die durch am Standort sonst noch vorhandenen Mobilfunkanlagen (2G/3G/4G) erzeugt werden:

Tabelle 5.12: Maximale 5G-Immission im Vergleich zur maximalen Immission als Grenzwertausschöpfung bzgl. der Feldstärke, verursacht durch ebenfalls am Anlagenstandort befindliche 2G/3G/4G-Anlagen

Messpunkt	Entfernung zum Standort	5G (maximal)	2G/3G/4G vom gleichen Standort (maximal)	Unterschied zw. 2G/3G/4G vom gleichen Standort (maximal) und 5G (maximal)
2.2	29 m	9,5 %	10,9 %	1,2 dB
2.10	191 m	0,7 %	1,5 %	6,6 dB
4.4	122 m	25,5 %	2,9 %	-18,9 dB
4.10	281 m	14,2 %	10,0 %	-3,0 dB
6.6	23 m	3,8 %	7,3 %	5,7 dB
6.7	210 m	6,4 %	7,8 %	1,7 dB
8.1	81 m	4,5 %	6,2 %	2,8 dB
8.7	373 m	6,9 %	9,5 %	2,8 dB
9.1	74 m	17,2 %	5,3 %	-10,2 dB
9.10	194 m	3,2 %	3,1 %	-0,3 dB

Bei den Maximalimmissionen ergibt sich kein so einheitliches Bild: An sechs der zehn Punkte dominieren die Immissionen, verursacht durch die anderen am Standort befindlichen Mobilfunksysteme. Der Unterschiedsfaktor besitzt allerdings eine große Spannweite, er bewegt sich zwischen etwa -19 dB (d.h. 5G dominiert) und 7 dB (d.h. andere Mobilfunkimmissionen dominieren).

5.7 Einfluss der Beamausrichtung auf die Immission

Weiterhin sollte untersucht werden, ob die Ausrichtung des Beams einen signifikanten Einfluss auf die entstehende Immission ausübt. Dazu wurde an 58 der 100 Messpunkte die "typische" Immission nicht nur unter der Randbedingung gemessen, dass sich das Endgerät in unmittelbarer Nähe des Messpunktes befindet (Szenario 2b in Bild 4.2.1). Vielmehr wurde die Messung zusätzlich auch bei größeren Abständen zwischen Messpunkt und Endgerät wiederholt. Hierbei wurde der räumliche Versatz zwischen Messpunkt und Endgerät auf zwei unterschiedliche Arten erzeugt:

- Das Endgerät wurde relativ zum Anlagenstandort azimuthal verschoben (Szenario 2a in Bild 4.2.1)
- Das Endgerät wurde entlang der Verbindungslinie Antenne - Messpunkt (gegebenenfalls auch darüber hinaus) verschoben (Szenario 2c in Bild 4.2.1).

Mit anderen Worten: Durch die Verlagerung des Endgerätes wurde die Ausrichtung des Antennenbeams entweder in azimutaler oder in radialer Richtung verändert.

In Tabelle 5.13 sind die Ergebnisse dieser vergleichenden Messungen dokumentiert:

Tabelle 5.13: Gemessene "typische" 5G-Immission für verschiedene Positionen des Endgeräts relativ zum Messpunkt (siehe auch Bild 4.2.1)

Messpunkt	Entfernung zum Standort	Szenario 2b (UE nah)	Szenario 2a (UE fern)	Szenario 2c (UE fern)
1.5	90 m	0,27 %	0,05 %	
1.7	93 m	0,27 %		0,06 %
1.8	121 m	0,08 %	0,08 %	
1.9	93 m	0,19 %	0,14 %	
2.1	12 m	0,47 %		0,32 %
2.2	29 m	0,54 %		0,36 %
2.3	136 m	0,07 %		0,05 %
2.4	53 m	1,05 %		0,42 %
2.5	63 m	0,50 %		0,34 %
2.7	89 m	0,60 %	0,23 %	
2.9	175 m	0,05 %		0,05 %
3.1	61 m	0,07 %	0,08 %	0,08 %
3.2	98 m	0,11 %		0,10 %
3.3	8 m	0,25 %	0,21 %	
3.4	60 m	0,50 %		0,24 %
3.10	119 m	0,05 %		0,05 %
4.1	123 m	0,39 %	0,34 %	
4.2	197 m	0,30 %	0,15 %	
4.3	311 m	0,12 %	0,10 %	
4.4	122 m	0,54 %		1,37 %
4.5	106 m	0,48 %		0,70 %
4.6	178 m	0,50 %		0,55 %
4.9	337 m	0,05 %	0,05 %	

Messpunkt	Entfernung zum Standort	Szenario 2b (UE nah)	Szenario 2a (UE fern)	Szenario 2c (UE fern)
4.10	281 m	0,80 %	0,16 %	
5.2	27 m	0,64 %	0,20 %	0,38 %
5.3	85 m	0,20 %		0,25 %
5.4	76 m	0,15 %		0,07 %
5.5	116 m	0,48 %		0,16 %
6.1	59 m	0,06 %		0,05 %
6.2	134 m	0,18 %		0,22 %
6.3	246 m	0,49 %	0,08 %	
6.4	194 m	0,17 %		0,45 %
6.5	303 m	0,08 %		0,11 %
6.6	23 m	0,23 %		0,07 %
6.8	280 m	0,15 %		0,15 %
6.9	152 m	0,11 %	0,05 %	
6.10	86 m	0,10 %	0,05 %	0,07 %
7.1	51 m	0,31 %		0,11 %
7.2	79 m	0,06 %		0,05 %
7.3	119 m	0,55 %		0,10 %
7.4	166 m	0,60 %		0,26 %
7.5	231 m	0,56 %		0,22 %
7.6	516 m	0,11 %		0,18 %
7.7	367 m	0,45 %	0,08 %	
7.8	385 m	0,11 %	0,10 %	
7.9	184 m	1,01 %	0,22 %	
7.10	277 m	0,59 %		0,39 %
8.2	249 m	0,77 %		0,21 %
8.8	111 m	1,31 %		1,12 %
8.9	154 m	1,21 %	0,42 %	
9.1	74 m	1,19 %	0,47 %	

Messpunkt	Entfernung zum Standort	Szenario 2b (UE nah)	Szenario 2a (UE fern)	Szenario 2c (UE fern)
9.3	139 m	0,52 %	0,47 %	
9.8	340 m	0,16 %	0,05 %	
10.1	12 m	0,04 %	0,04 %	
10.3	42 m	0,22 %	0,10 %	
10.5	81 m	0,46 %	0,32 %	0,16 %
10.7	158 m	0,96 %		0,69 %
10.9	267 m	0,06 %	0,05 %	

An 43 der 58 untersuchten Punkte führte die Verlagerung des Endgerätes zu einer Verringerung der gemessenen "typischen" 5G-Immission. An den restlichen 15 Punkten hat sich die Immission nicht verändert oder ist sogar größer geworden (siehe rot markierte Werte in Tabelle 5.13). Bei sieben dieser 15 Punkte liegen die Messwerte jedoch absolut gesehen im Bereich der Grenzepfindlichkeit des Messgerätes ($\approx 0,05$ Prozent), so dass diese Ergebnisse nicht belastbar sind.

Für die nicht vorhandene Abnahme der Immissionen an den verbleibenden acht Punkten können zum Beispiel folgende Gründe vorliegen:

- Die Ausrichtung des Beams hat sich trotz Verlagerung des Endgerätes nicht nennenswert verändert. Dies kann beispielsweise bei vergleichsweise weit von der Anlage entfernten Messpunkten auftreten (z.B. an den Punkten Nr. 6.8 und 7.6), wenn gleichzeitig die räumliche Verlagerung des Endgerätes zu gering ausgefallen ist.
- Grundsätzlich kann man nicht generell ausschließen, dass andere Teilnehmer das Ergebnis der Messung der "typischen" Immission beeinflussen. Während der Messung "Endgerät fern" könnte beispielsweise zusätzlich zum Beam in Richtung des verlagerten Endgeräts weiterhin ein Beam in Richtung zum Messpunkt vorhanden sein.

Tabelle 5.14 liefert die Medianwerte der "typischen" 5G-Immission für die drei Szenarien (allerdings unter Weglassen der sieben Messpunkte, bei denen sich die Messwerte untypisch verhalten, diese sich jedoch absolut gesehen im Bereich der Grenzepfindlichkeit des Messgerätes bewegen).

Tabelle 5.14: Mediane der Messergebnisse aus Tabelle 5.13

Szenario	UE nah (2b)	UE fern (2a)	UE fern (2c)	UE fern (2a und 2c)
Median	0,45 %	0,15 %	0,22 %	0,19 %

Die in den Tabelle 5.13 dokumentierten Messergebnisse belegen den Einfluss der Beamausrichtung auf die an einem Punkt entstehende 5G-Immission. Der Unterschied der Medianwerte für das Szenario "UE nah" und die beiden Szenarien "UE fern" beträgt etwa 7,5 dB.

Die hier durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Beamausrichtung auf die Immission zeigen, dass bei gleicher Antenneneingangsleistung durch die Fokussierung der elektromagnetischen Energie in Richtung zum Endgerät dort die Felder im Vergleich zu einer Abstrahlung mittels einer konventionellen Mobilfunksektorantenne größer werden können. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass dafür in Bereichen der Funkzelle, die sich nicht im Einwirkungsbereich des schmalen Antennenbeams befinden, die Immissionen geringer werden. Daraus kann wiederum geschlossen werden, dass bei einer größeren Zahl von in einer Funkzelle gleichmäßig verteilten aktiven 5G-Teilnehmern durch die dadurch bedingte gleichzeitige Ausprägung von einer größeren Anzahl an Beams in unterschiedliche horizontale und vertikale Richtungen mit einer zunehmenden Gleichverteilung der abgestrahlten Energie innerhalb der Funkzelle gerechnet werden kann. Man nähert sich dann wieder der Immissionssituation an, die sich bei Verwendung einer konventionellen Antenne ohne Beamforming ergibt.

5.8 Fazit

Von den untersuchten Einflussfaktoren

- lateraler Abstand des Messpunktes von der Sendeanlage,
- Vertikalwinkel, unter dem der Messpunkt von der Sendeantenne aus erscheint und
- Sichtbedingungen zwischen Messpunkt und Sendeanlage

ist der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld einer 5G-Anlage mit mMIMO-Antennen (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und eventuell vorhandenem mechanischem Downtilt) offenbar als alleiniges Maß zur Abschätzung der entstehenden 5G-Immission wenig geeignet. Ein Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist. Durch die Fähigkeit der mMIMO-Antennen, ihre vertikale Hauptsenderichtung zu verändern, wird sich zwar der Entfernungsbereich, in dem sich Immissionsorte nur im Bereich der Nebenkeulen befinden, verkleinern, jedoch kann hierzu ohne Kenntnis der konkreten Anlagenparameter (vertikaler Schwenkbereich der mMIMO-Antenne) keine Vorhersage getroffen werden. Wie in Bild 5.3.1 zu sehen, beträgt für eine bestimmte Entfernung zum Anlagenstandort die Spannweite der gemessenen Immission teilweise bis zu etwa 30 dB.

Einen deutlichen Einfluss üben hingegen die *Sichtverhältnisse* aus: Objekte wie Gebäude, aber auch Bäume und Sträucher zwischen Messpunkt und Sendeanlage haben einen dämpfenden Einfluss, der sich erheblich in den Messergebnissen widerspiegelt (siehe Bild 5.5.1). Die Immissionsreduktion, die der Messpunkt erfährt, ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung des Objektes, aber auch von der Frage, in wie weit die Signale der Basisstation auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können. Zudem kann auch die Wellenbeugung an einer Gebäudekante wirksam werden. Einzelne Messergebnisse (z.B. an den Messpunkten 1.07 und 8.09) zeigten trotz nicht vorhandener Sicht zur Antenne eine vergleichsweise geringe Pfaddämpfung.

Der Einfluss des *Vertikalwinkels* auf die entstehende Immission hat sich gegenüber den Ergebnissen von ähnlichen Messungen an LTE-Mobilfunksystemen ohne mMIMO-Antennen verringert. Offensichtlich kann nicht mehr ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass

die Immissionen bei kleineren Vertikalwinkeln ($< 10^\circ$) gegenüber denen bei großen Winkeln in der Regel dominieren.

An zehn Messpunkten wurden die an den Messpunkten gefundenen 5G-Mobilfunkimmissionen zusätzlich mit denen anderer Mobilfunkanlagen verglichen ("Hintergrundimmission").

Zum Zeitpunkt der Messungen dominierte an allen zehn untersuchten Punkten die aktuelle Immission durch andere Mobilfunksignale gegenüber den "typischen" 5G-Immissionen (d.h. Immissionen, die am Ort des Nutzers durch die Basisstation bei Streamen eines TV-Programmes typisch generiert werden). Der Unterschied liegt in der Größenordnung zwischen etwa 3 dB und 25 dB. Vergleicht man die Mobilfunkhintergrundimmission mit der "aktuellen" 5G-Immission, ist der Unterschied größer (zwischen etwa 16 dB und 30 dB). Absolut gesehen lagen an diesen zehn Punkten die "typischen" 5G-Immissionen bei Grenzwertausschöpfungen im Bereich zwischen 0,05 und 1,2 Prozent.

Bei den Maximalimmissionen ergibt sich kein so einheitliches Bild: An sechs der zehn Punkte dominieren die Immissionen, verursacht durch die anderen am Standort befindlichen Mobilfunksysteme. Der Unterschiedsfaktor besitzt eine große Spannweite, er bewegt sich zwischen etwa -19 dB (d.h. 5G dominiert) und 7 dB (d.h. andere Mobilfunkimmissionen dominieren). Absolut gesehen lagen an diesen zehn Punkten die maximalen 5G-Immissionen bei Grenzwertausschöpfungen im Bereich zwischen 0,7 und 25,5 Prozent.

Weiterhin sollte untersucht werden, ob die Ausrichtung des Beams einen signifikanten Einfluss auf die entstehende Immission ausübt. Dazu wurde an 58 der 100 Messpunkte die "typische" Immission nicht nur unter der Randbedingung gemessen, dass sich das Endgerät in unmittelbarer Nähe des Messpunktes befindet. Vielmehr wurde die Messung zusätzlich auch bei größeren Abständen zwischen Messpunkt und Endgerät wiederholt. Die Messergebnisse belegen den Einfluss der Beamausrichtung auf die an einem Punkt entstehende 5G-Immission. Der Unterschied der Medianwerte für das Szenario "UE nah" und die beiden Szenarien "UE fern" beträgt etwa 7,5 dB.

6 Zeitlicher Verlauf der Immission

Zur Untersuchung der tageszeitabhängigen Schwankungen der Immission wurden an insgesamt fünf Messpunkten im Umfeld von zwei unterschiedlichen 5G-Massive-MIMO-Basisstationen Langzeitmessungen über jeweils 24 Stunden durchgeführt. Zur Ermittlung typischer Expositionsbeiträge wurde mithilfe eines 5G-fähigen Endgeräts (Samsung S20 Ultra 5G) jeweils für einen definierten Zeitraum folgende typische Nutzung simuliert:

1. Surfen im Internet (6 Minuten)
2. Download einer 1 GB großen Datei (6 Minuten, ggf. vor Ablauf der 6 Minuten fertig)
3. Streaming von Videos auf youtube (6 Minuten)

Die Immissionsorte wurden so ausgewählt, dass Messungen sowohl im Nah- als auch im Fernbereich der jeweils untersuchten Anlage durchgeführt wurden. Die Messungen wurden an einer Anlage mit Huawei-Technik sowie an einer Anlage mit Ericsson-Technik durchgeführt.

Die Messdaten für die Langzeitmessung von 5G-3600 wurden mit dem Narda SRM-3006 im Setup zur Bestimmung von Momentanimmissionen (siehe Teilkapitel 4.3) aufgenommen. Mithilfe eines Notebooks wurde das SRM-3006 angesteuert und dessen Messwerte ausgelesen, sodass die Messwerte mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 0,65 s vorliegen.

6.1 Standort 1: Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städt. Umfeld

Die Langzeitmessungen am Anlagenstandort „Telekom-Anlage mit Huawei-Technik, städtisches Umfeld“ wurden an der Anlage Am Weißenberg 16-18 in 52074 Aachen durchgeführt (identisch zur Anlage 2 in Teilkapitel 4.5). Auf einem Hausdach ist in zirka 20 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch LTE-800, GSM-900, LTE-900, LTE-1800, LTE-2100, 5G-2100 und LTE-2600 abgestrahlt werden. Am selben Standort werden von einem benachbarten Antennenträger LTE-800, LTE-1800, LTE-2100 sowie UMTS abgestrahlt (Betreiber: Telefónica). Es wurden insgesamt vier Messungen über jeweils 24 Stunden durchgeführt. Die Messungen starteten am 26.03.2021, 31.03.2021 und 22.04.2021 jeweils um 10:43 Uhr sowie am 09.09.2021 um 10:25 Uhr.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte und der jeweiligen Standorte des aktiven Endgeräts sind in Bild 6.1.1 dargestellt. Die Langzeitmessungen wurden an vier indoor-Messpunkten (MP1, MP2, MP3, MP4) durchgeführt, wovon sich drei im Nahbereich und ein weiterer im Fernbereich der Anlage befinden. Bei der Messung wurde für die Erzeugung typischer Immissionswerte das Endgerät outdoor in die Nähe des Messpunktes bei gleichem Horizontalwinkel wie der jeweilige Messpunkt gebracht (UE1, UE2, UE3, UE4), sodass während der typischen Nutzung hinsichtlich des Horizontalwinkels ein Beam in Richtung des jeweiligen Messpunkts ausgerichtet wurde. Zusätzlich und zeitlich davon getrennt war das Endgerät bei allen Messungen auch an einem fixen Standort in der Zelle aktiv (UE0). Dieser befand sich je nach Messpunkt in unterschiedlichen Horizontal- und Vertikalwinkeln aus Sicht der 5G-Basisstation, sodass sich die Messpunkte teilweise in den Nebenkeulen des durch UE0 provozierten Beams befanden.

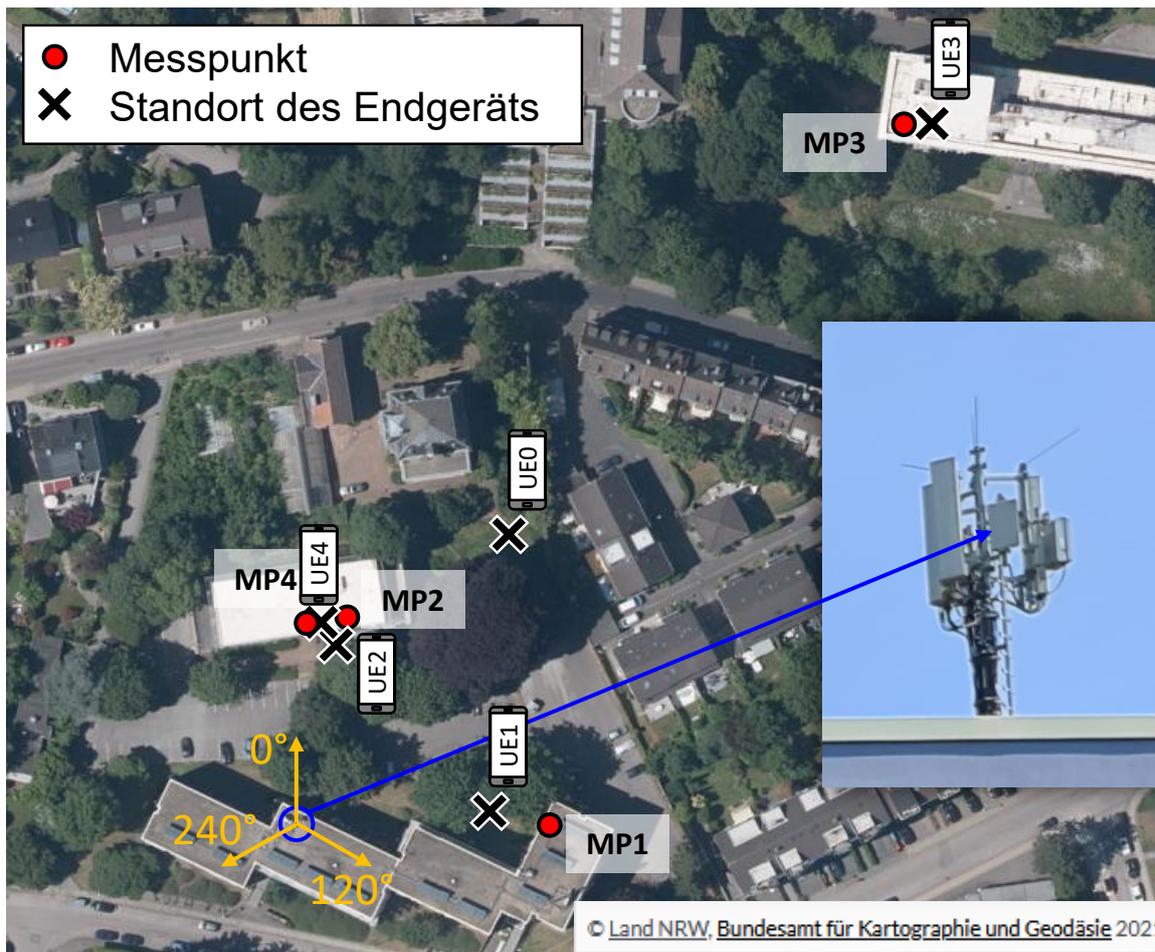


Bild 6.1.1: Standort 1: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte (indoor) sowie der jeweiligen Standorte des aktiven Endgeräts (outdoor.)

Allgemein stellte es sich an diesem Standort als schwierig heraus sicherzustellen, dass sich das Endgerät bei der typischen Nutzung im 5G-Netz befindet. Häufig war es lediglich im LTE-Netz eingebucht bzw. fiel während der typischen Nutzung bei wenigen Sekunden Inaktivität vom 5G- in das LTE-Netz zurück. Das Einbuchen ins 5G-Netz musste daher bei manchen Messungen durch einen Speed-Test getriggert werden.

In nachfolgender Tabelle sind die Lage der Messpunkte sowie des aktiven Endgeräts am Standort UE0 beschrieben.

Tabelle 6.1: Anlagenstandort 1: Beschreibung der Lage der Messpunkte sowie des Endgerätestandorts UE0

Punkt	Ort	Horizontal-entfernung	Horizon-talwinkel	Vertikal-winkel	Sicht zur 5G-Antenne
UE0	Wiese (outdoor)	71 m	35°	8°	ja
MP1	Wohngebäude, 1. OG (indoor)	49 m	85°	18°	ja
MP2	Bürogebäude, 3. OG (indoor)	44 m	8°	9°	ja
MP3	Bürogebäude, 5. OG (indoor)	181 m	38°	-1°	nein
MP4	Bürogebäude, 2. OG (indoor)	38 m	358°	14°	Ja

6.1.1 Langzeitmessung an Messpunkt 1 (Nahbereich)

In Bild 6.1.2 sind die Ergebnisse der 24-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 1 (indoor) im Nahbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht.

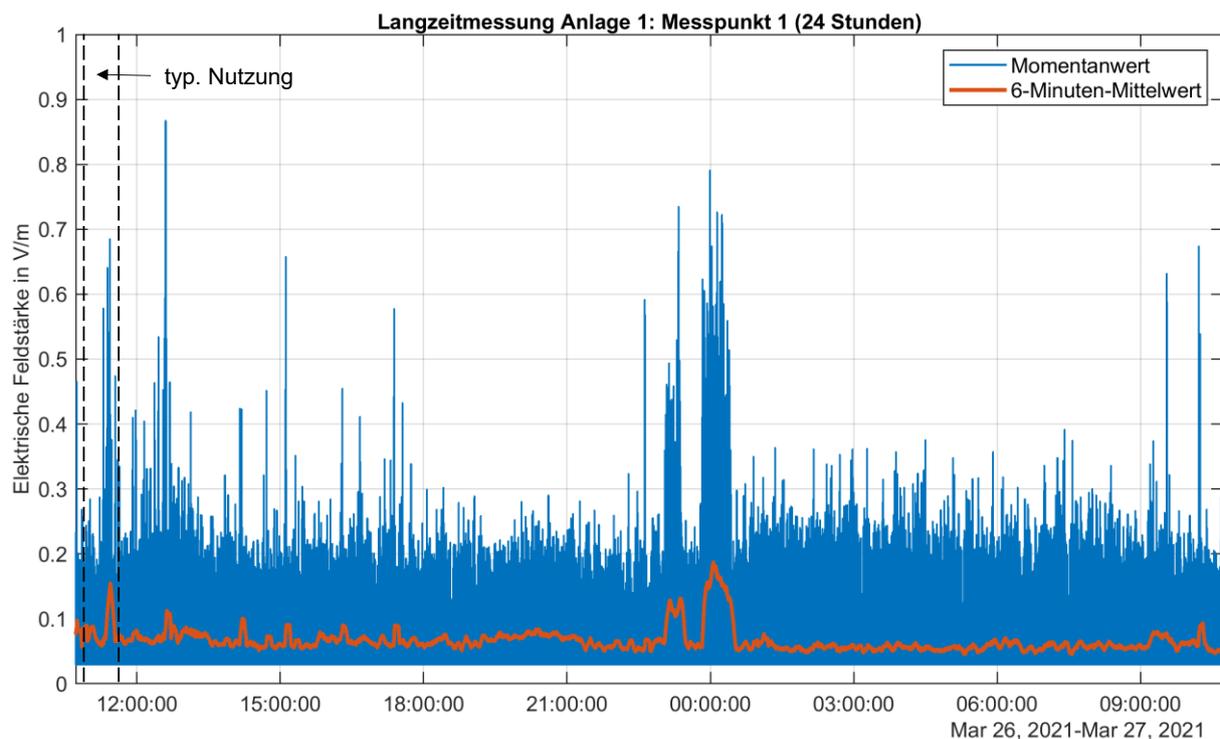


Bild 6.1.2: Anlagenstandort 1, Messpunkt 1: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanmission)

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass neben der erzwungenen Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät die 5G-Zelle während der Messdauer auch von anderen Endgeräten aktiv genutzt wurde. Im Wesentlichen liegt die *Momentanmission* zwischen 0,03 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und 0,3 V/m. Vereinzelt treten Immissionsspitzen auf, wovon die höchste eine Feldstärke von knapp 0,9 V/m aufweist. Auffällig ist, dass diese Spitzen häufig nur sehr kurz auftreten (ein einzelner Messwert). Neben den höheren Immissionen zu Beginn der Messung aufgrund der typischen Nutzung des Endgeräts sind vergleichbare bzw. sogar höhere Immissionswerte auch noch im weiteren Verlauf der Messung zu sehen. Insbesondere gegen Mitternacht gab es offensichtlich eine erhöhte Aktivität.

Die über ein 6 Minuten langes gleitendes Fenster *gemittelte Immission* weist eine geringere Dynamik auf und bewegt sich zum Großteil der Zeit in einem Bereich zwischen 0,05 V/m und 0,1 V/m. Während der erhöhten Aktivität gegen Mitternacht tritt mit 0,18 V/m die höchste über 6 Minuten gemittelte Feldstärke auf. Durch die typische Nutzung des Endgeräts tritt eine maximale mittlere Feldstärke von 0,15 V/m auf.

In Bild 6.1.3 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war.

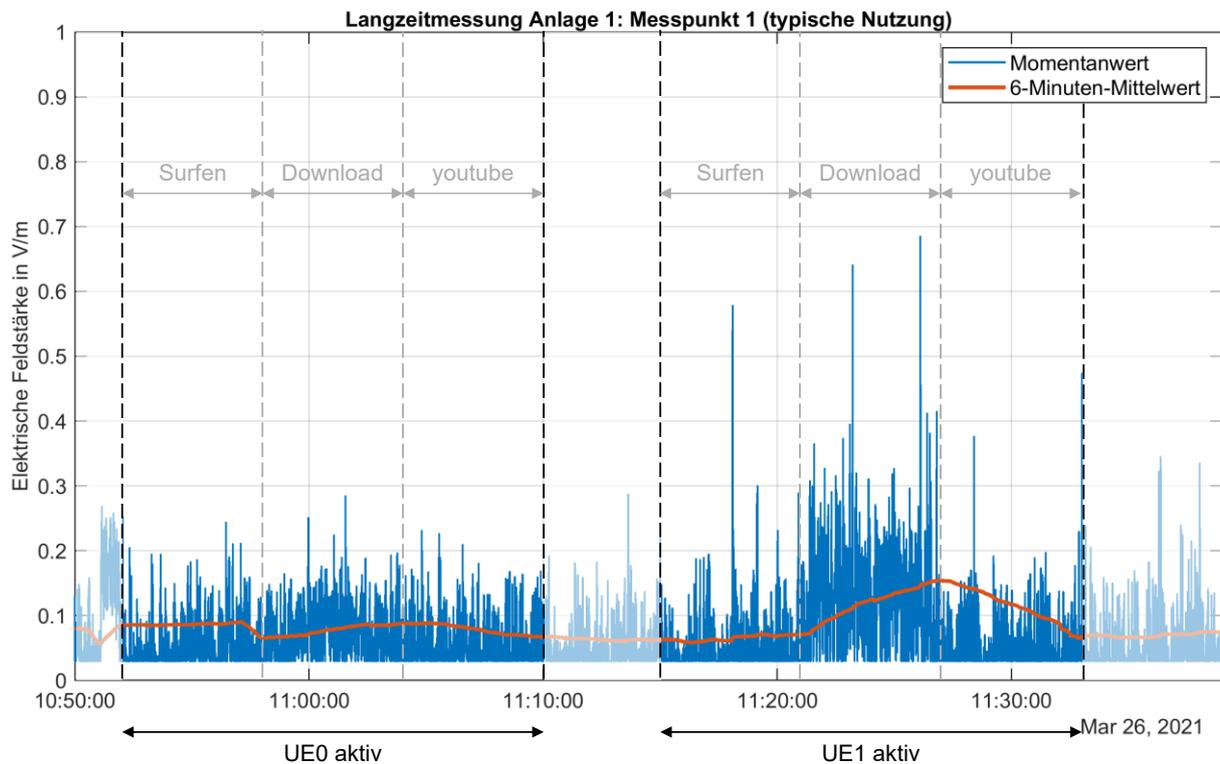


Bild 6.1.3: Anlagenstandort 1, Messpunkt 1: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts an den Standorten UE0 und UE1 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission)

Im ersten Teil der Messung von 10:52 Uhr bis 11:10 Uhr war das Endgerät am Standort UE0 aktiv. Im Gegensatz zum Messpunkt 1, der sich im 120°-Sektor der Anlage befindet, liegt UE0 im 0°-Sektor bei einem horizontalen Winkelunterschied von 50°. Während der Aktivität des Endgeräts ist allenfalls eine leicht erhöhte Momentanimmission während des Downloads (mittlerer Block) zu erkennen. Die mittlere Immission ist zu Beginn (d.h. vor 10:52 Uhr) erhöht, da kurz vor der typischen Nutzung ein Speed-Test mit dem Endgerät durchgeführt werden musste, um dafür zu sorgen, dass sich das Endgerät ins 5G-Netz einbucht. Es ist zu erkennen, dass der Download zu einer leichten Erhöhung der mittleren Immission führt, während sie beim Video-Streaming wieder abfällt.

Im zweiten Teil der Messung von 11:15 Uhr bis 11:33 Uhr befand sich das aktive Endgerät am Standort UE1, d.h. in unmittelbarer Nähe zum Messpunkt. Hier ist auch ein größerer Effekt auf die Momentanimmission zu beobachten. Während beim Surfen lediglich wenige sehr kurze Immissionsspitzen auftreten, die sich kaum auf die mittlere Immission auswirken, führt der Download zu einer Erhöhung der mittleren Immission von 0,07 V/m auf 0,15 V/m. Beim nachfolgenden Video-Streaming sind „blockweise“ höhere Momentanimmissionswerte zu beobachten, dies ist vermutlich auf das schubweise Puffern des Videos zurückzuführen. Nach dem Download ergibt sich wieder ein deutlicher Abfall der mittleren Immission auf 0,07 V/m.

6.1.2 Langzeitmessung an Messpunkt 2 (Nahbereich)

In Bild 6.1.4 sind die Ergebnisse der 24-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 2 (indoor) im Nahbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht.

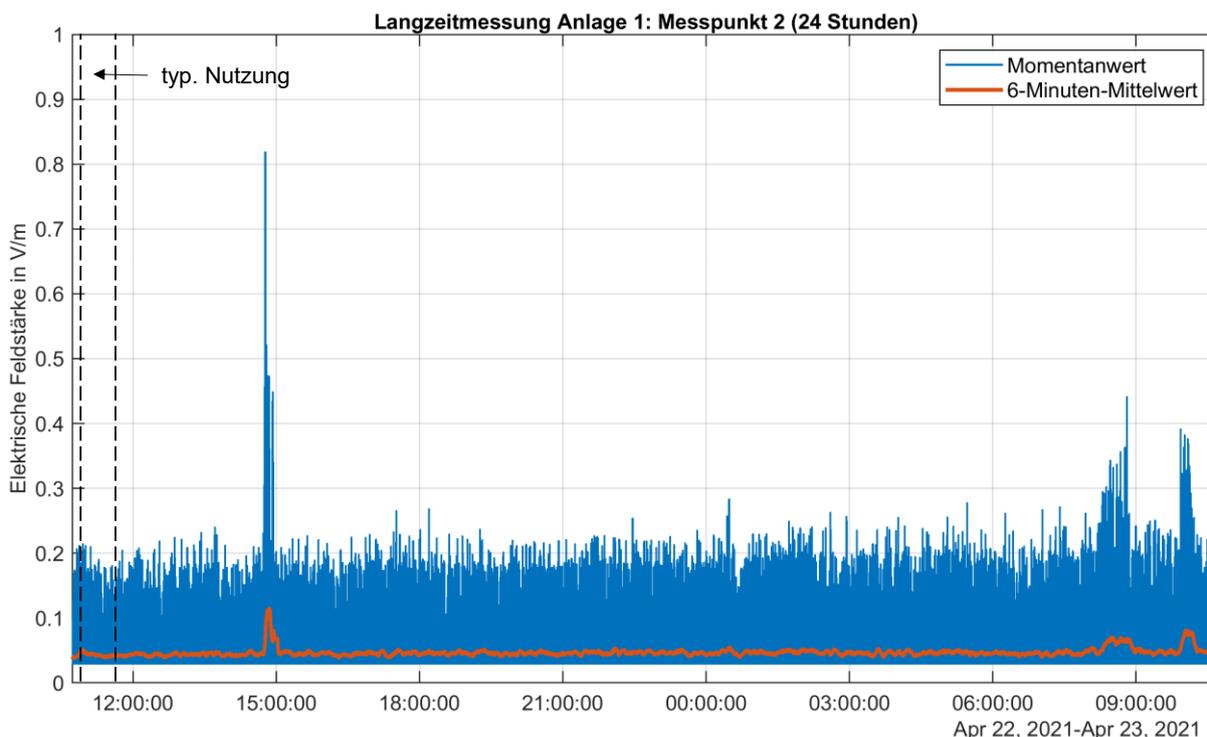


Bild 6.1.4: Anlagenstandort 1, Messpunkt 2: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission)

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass außerhalb des Zeitfensters, in dem eine definierte Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät stattfand, die 5G-Zelle sporadisch auch von anderen Endgeräten aktiv genutzt wurde. Im Wesentlichen liegt die *Momentanimmission* wie an Messpunkt 1 zwischen 0,03 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und 0,3 V/m. Zu drei Zeitpunkten treten Immissionsspitzen auf, wovon die höchste eine Feldstärke von gut 0,8 V/m aufweist, die anderen liegen bei 0,45 V/m und 0,4 V/m. Auch an diesem Messpunkt treten die Spitzen häufig nur sehr kurz auf (ein einzelner Messwert).

Die über 6 Minuten *gemittelte Immission* weist eine deutlich geringere Dynamik auf und liegt zu einem Großteil der Zeit bei 0,05 V/m. Lediglich während der erhöhten Aktivität durch andere Nutzer steigt die über 6 Minuten gemittelte Feldstärke auf 0,1 V/m (etwa um 15 Uhr) bzw. auf 0,07 V/m und 0,08 V/m (etwa um 8:30 Uhr und um 10 Uhr). Durch die typische Nutzung des eigenen Endgeräts sind keine Auswirkungen auf die Momentanimmission festzustellen.

In Bild 6.1.5 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war.

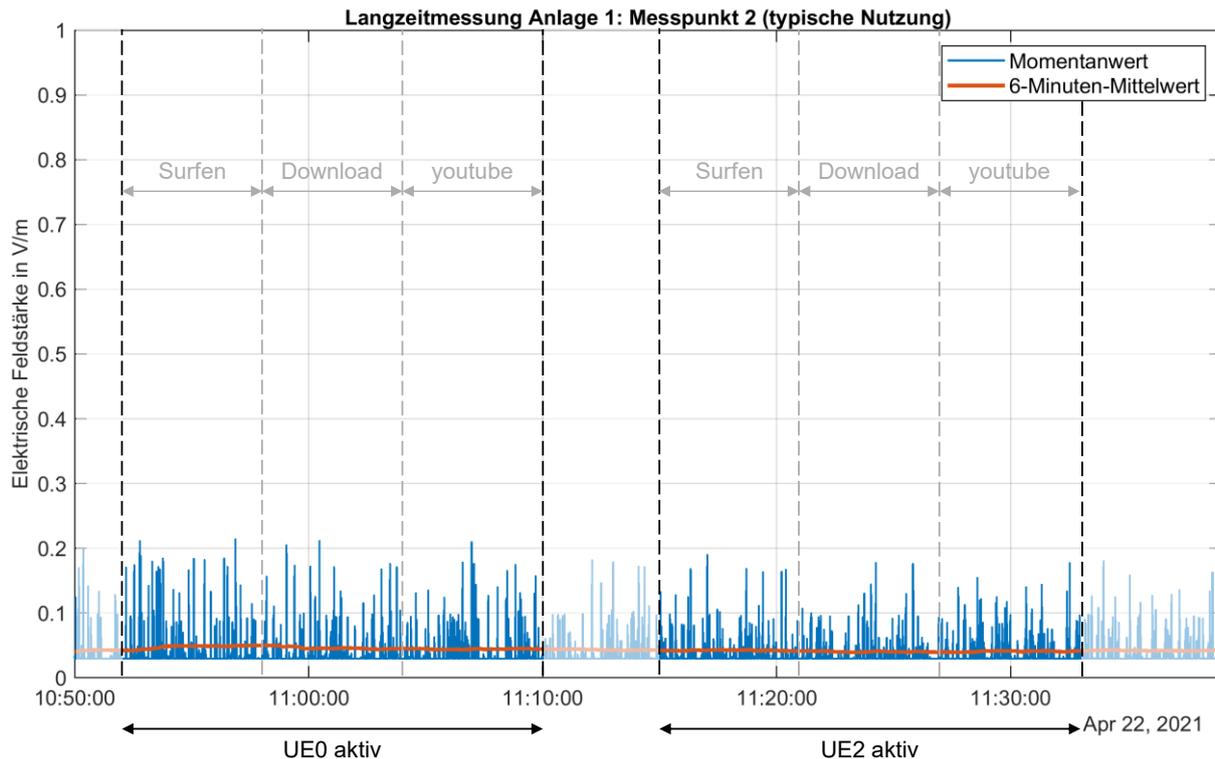


Bild 6.1.5: Anlagenstandort 1, Messpunkt 2: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts an den Standorten UE0 und UE2 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission); an beiden Standorten war das Endgerät größtenteils im LTE-Netz eingebucht.

Im ersten Teil der Messung von 10:52 Uhr bis 11:10 Uhr war das Endgerät am Standort UE0 aktiv. Sowohl Messpunkt 2 als auch UE0 liegen im 0°-Sektor der Anlage bei einem horizontalen Winkelunterschied von 27°. Im zweiten Teil der Messung von 11:15 Uhr bis 11:33 Uhr befand sich das aktive Endgerät am Standort UE2, d.h. in unmittelbarer Nähe zum Messpunkt. Wie bereits zu Beginn von Teilkapitel 6.1 erwähnt, stellte es sich teilweise als große Herausforderung heraus sicherzustellen, dass das Endgerät während der typischen Nutzung im 5G-Netz eingebucht war. Bei dieser Messung war das Endgerät sowohl am Standort UE0 als auch am Standort UE2 lediglich ganz zum Schluss des Szenarios „Surfen“ im 5G-Netz eingebucht. Beim Video-Streaming (youtube) sprang es regelmäßig zwischen 5G und LTE hin und her. Während des Downloads befand sich das Endgerät an beiden Standorten durchgehend im LTE-Netz.

Aufgrund dessen sind keine signifikanten Auswirkungen der typischen Endgerätenutzung auf die Momentanimmission sowie die mittlere Immission festzustellen und keine Erkenntnisse daraus abzuleiten. Nichtsdestotrotz spiegelt die Verwendung des LTE-Netzes bei nur sporadischer Aktivität bzw. niedrigen Datenraten offensichtlich die derzeitige Netzkonfiguration wider.

6.1.3 Langzeitmessung an Messpunkt 3 (Fernbereich)

In Bild 6.1.6 sind die Ergebnisse der 24-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 3 (indoor) im Fernbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht.

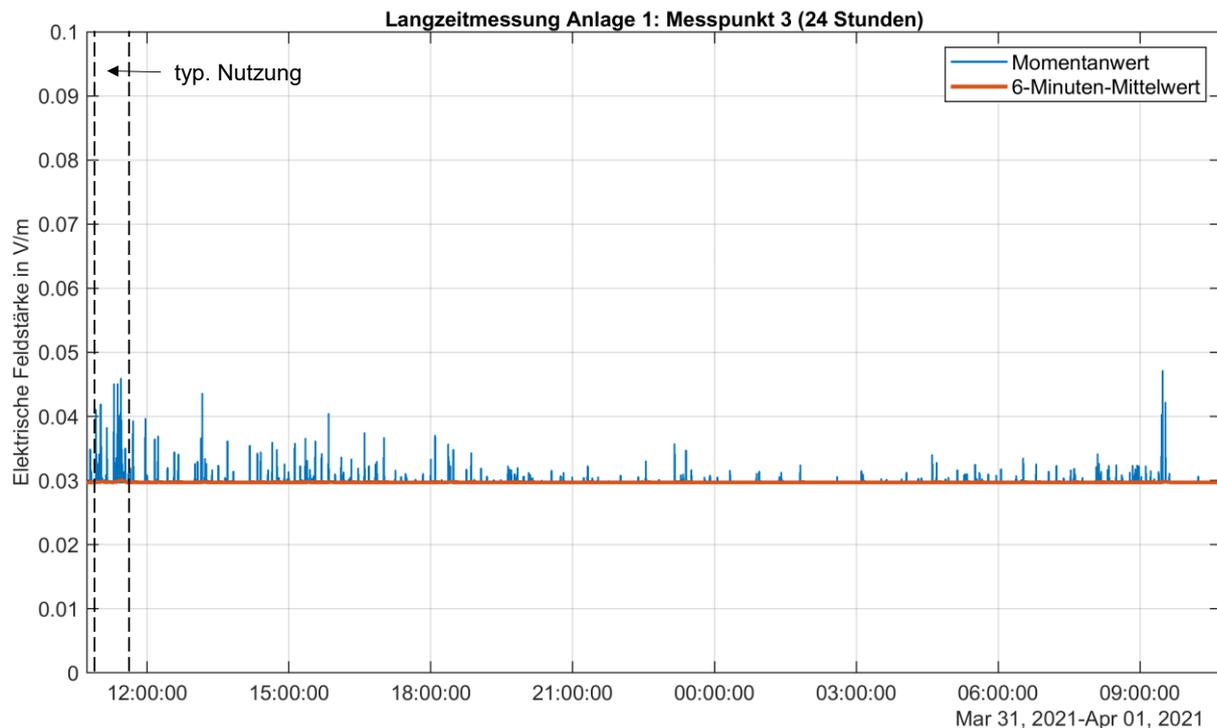


Bild 6.1.6: Anlagenstandort 1, Messpunkt 3: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission). Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Immissionen ist die y-Skala gegenüber den vorangegangenen Darstellungen für Anlage 1 auf einen deutlich kleineren Bereich (0,1 V/m) beschränkt.

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass außerhalb des Zeitfensters, in dem eine definierte Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät stattfand, andere in der Zelle eingebuchte Endgeräte keine nennenswerten Immissionsbeiträge liefern konnten. Im Wesentlichen liegt die *Momentanimmission* ähnlich zu Messpunkt 1 und Messpunkt 2 zwischen 0,03 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und 0,35 V/m. Lediglich gegen 13:30 Uhr und gegen 10 Uhr gibt es mit 0,45 V/m und knapp 0,5 V/m etwas höhere Spitzen im Zeitverlauf. Auch an diesem Messpunkt treten die Spitzen nur sehr kurz auf (ein einzelner Messwert).

Die über 6 Minuten *gemittelte Immission* weist eine deutlich geringere Dynamik auf und liegt zu einem Großteil der Zeit bei 0,03 V/m, d.h. bei der Detektionsschwelle des Messgeräts. Die kurzen Immissionsspitzen anderer Nutzer haben keinen nennenswerten Einfluss auf den Mittelwert. Auch während der Aktivität durch die typische Nutzung des eigenen Endgeräts treten die sichtbaren Immissionsspitzen zu selten auf, um den Mittelwert signifikant über die Rauschschwelle von 0,03 V/m anzuheben.

In Bild 6.1.7 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war.

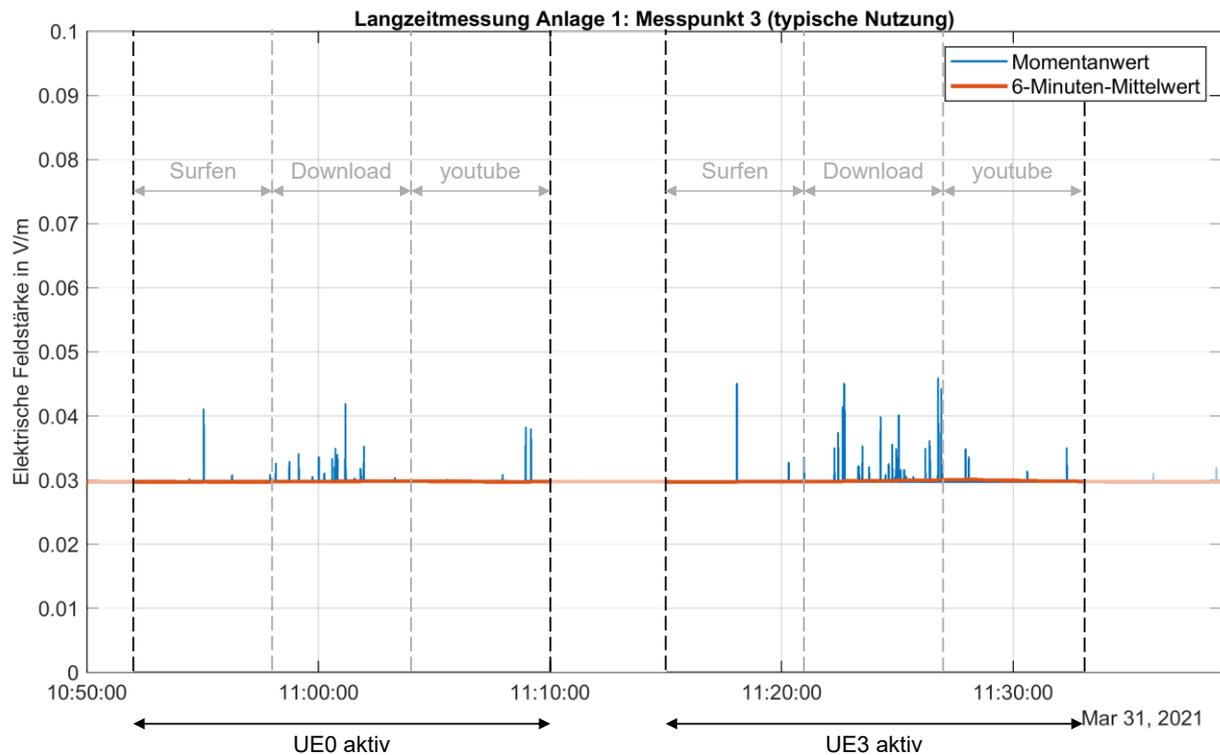


Bild 6.1.7: Anlagenstandort 1, Messpunkt 3: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts an den Standorten UE0 und UE3 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission); an Standort UE3 war das Endgerät teilweise im LTE-Netz eingebucht.

Im ersten Teil der Messung von 10:52 Uhr bis 11:10 Uhr war das Endgerät am Standort UE0 aktiv. Sowohl Messpunkt 3 als auch UE0 liegen im 0°-Sektor bei fast gleichem Horizontalwinkel zur Anlage. Während der Aktivität des Endgeräts sind zwar deutlich sichtbar wenige niedrige Immissionsspitzen insbesondere beim Download festzustellen. Diese treten allerdings so selten bzw. kurzzeitig auf, dass sich die mittlere Immission dadurch nicht signifikant erhöht.

Im zweiten Teil der Messung von 11:15 Uhr bis 11:33 Uhr befand sich das aktive Endgerät am Standort UE3, d.h. in unmittelbarer Nähe zum Messpunkt. Aufgrund des fast gleichen Horizontalwinkels zur Anlage wie am Standort UE0 sind die Auswirkungen auf die Immission vergleichbar. Auch hier sind kleinere Immissionsspitzen insbesondere beim Download deutlich sichtbar und von der Höhe vergleichbar zum Standort UE0. Jedoch treten beim Download etwas häufiger Immissionsspitzen auf. Dennoch reichen auch diese kurzzeitigen niedrigen Immissionsspitzen nicht aus, um sich signifikant auf die mittlere Immission auszuwirken.

6.1.4 Langzeitmessung an Messpunkt 4 (Nahbereich)

In Bild 6.1.8 sind die Ergebnisse der 24-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 4 (indoor) im Nahbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht.

Messpunkt 4 liegt zwar im selben Gebäude wie Messpunkt 2 und auch in dessen Nähe, dennoch liegen an beiden Messpunkten einige signifikante Unterschiede vor. Mit einer Entfernung von nur 38 m hat Messpunkt 4 die geringste Entfernung zur Basisstationsantenne und zusätzlich liegt er nahezu in Hauptstrahlrichtung der Anlage. Zwar befindet sich Messpunkt 4 eine Etage niedriger als Messpunkt 2 und weist damit einen höheren Elevationswinkel zur Antenne auf. Jedoch ist im Büro von Messpunkt 4 im Gegensatz zu Messpunkt 2 nur eines von drei Fenstern metallisch bedampft. Das Fenster in der direkten Sichtverbindung zwischen Messgerät und Basisstationsantenne ist nicht bedampft. Dadurch ist an diesem Messpunkt im Vergleich zu Messpunkt 2 mit einer deutlich geringeren Dämpfung durch die Fenster zu rechnen. Aufgrund der damit verbundenen höheren Feldstärken wurde die Skalierung der y-Achse gegenüber den vorangegangenen Messpunkten auf 6 V/m erhöht. Außerdem musste bei der

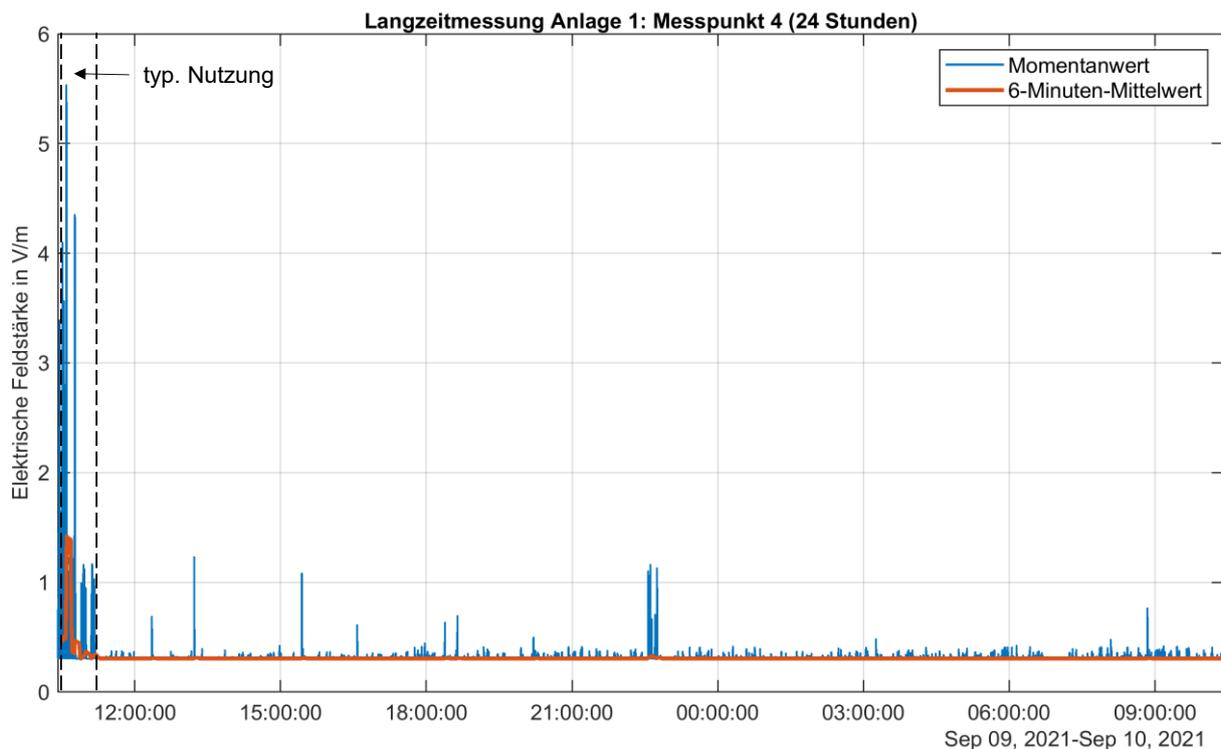


Bild 6.1.8: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission). Aufgrund der im Vergleich zu Messpunkt 3 deutlich höheren Immissionen ist die y-Skala gegenüber den vorangegangenen Darstellungen für Anlage 1 auf einen größeren Feldstärkebereich (6 V/m) erweitert.

Messung die Empfindlichkeit des Messgeräts reduziert werden. Dadurch ergibt sich im Vergleich zu den anderen Messpunkten mit einem Feldstärkewert von 0,3 V/m ein leistungsbezogen um Faktor 100 höherer Rauschpegel.

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass außerhalb des Zeitfensters, in dem eine definierte Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät stattfand, andere in der Zelle eingebuchte Endgeräte nur sporadisch nennenswerte Immissionsbeiträge über der Rauschschwelle von 0,3 V/m liefern konnten. Im Wesentlichen liegt die *Momentanimmission* meist bei 0,3 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und vereinzelt bei Werten von mehr als 1 V/m. Lediglich bei Nutzung des eigenen Endgeräts im Nachbarbüro treten Immissionsspitzen von bis zu 5,5 V/m auf.

Die über 6 Minuten gemittelte Immission weist eine deutlich geringere Dynamik auf und liegt zu einem Großteil der Zeit bei 0,3 V/m, d.h. bei der Detektionsschwelle des Messgeräts bei der am Messpunkt eingestellten Empfindlichkeit. Die kurzen Immissionsspitzen anderer Nutzer haben keinen nennenswerten Einfluss auf den Mittelwert. Während der Aktivität durch die typische Nutzung des eigenen Endgeräts steigt die mittlere Immission zeitweise auf bis zu 1,4 V/m an.

In Bild 6.1.9 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war.

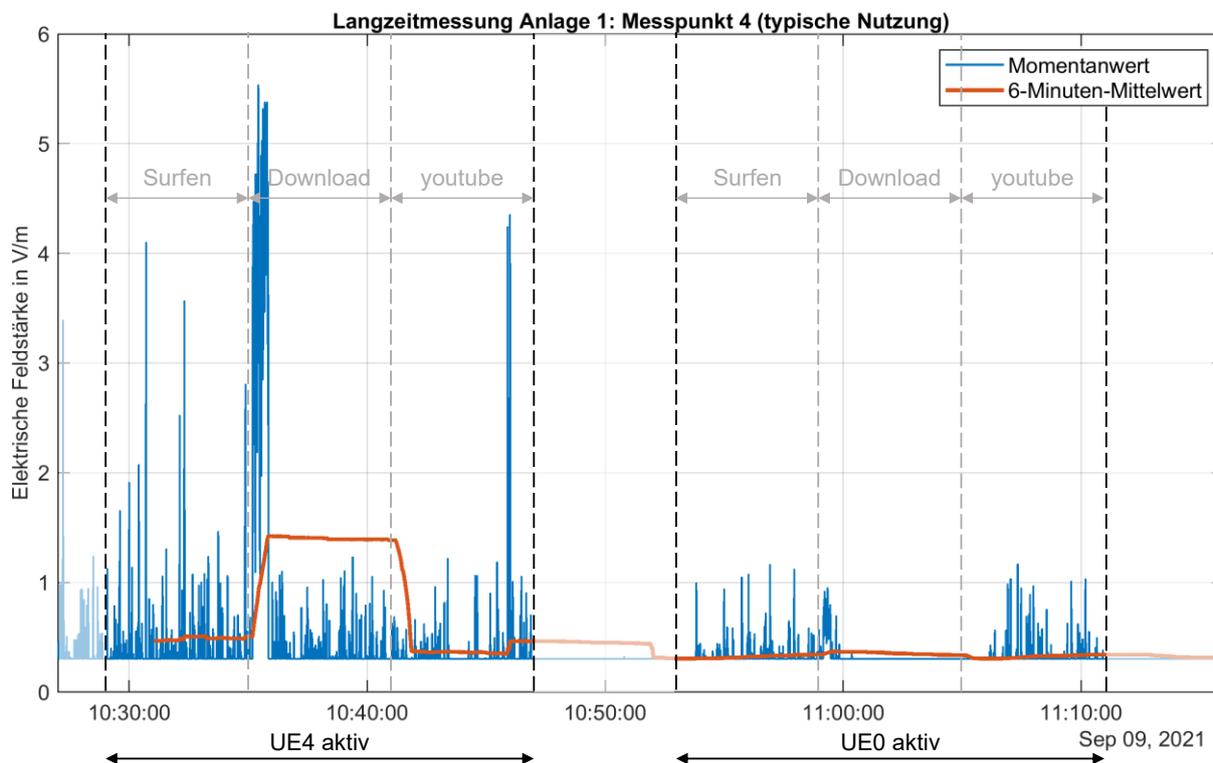


Bild 6.1.9: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts an den Standorten UE4 und UE0 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission).

Im ersten Teil der Messung von 10:29 Uhr bis 10:47 Uhr war das Endgerät am Standort UE4 aktiv. Der Standort befand sich im unmittelbar an den Messpunkt angrenzenden Nachbarbüro.

Messpunkt 4 und somit auch UE4 liegen nahezu in Hauptstrahlrichtung des 0°-Sektors bei fast gleichem Horizontalwinkel zur Anlage. Während der Aktivität des Endgeräts sind deutlich sichtbar Immissionsspitzen zwischen 1 V/m und mehr als 4 V/m festzustellen. Während des Downloads der 1 GB großen Datei kam es für eine Dauer von ca. 40 s zu Immissionen von bis zu 5,5 V/m. Während die mittlere Immission durch das Surfen auf etwa 0,5 V/m angehoben wurde, stieg sie durch den Download auf 1,4 V/m an. Durch das Video-Streaming in den letzten sechs Minuten ist die mittlere Immission wieder auf 0,4 V/m bis 0,5 V/m gesunken.

Im zweiten Teil der Messung von 10:53 Uhr bis 11:11 Uhr befand sich das aktive Endgerät am Standort UE0, d.h. zwar im selben Sektor wie der Messpunkt, hinsichtlich des Horizontalwinkels jedoch 37° entfernt. Aufgrund der unterschiedlichen Horizontalwinkel zur Anlage im Vergleich zum Standort UE4, sind die Auswirkungen auf die Immission deutlich schwächer ausgeprägt. Zwar sind sowohl beim Surfen als auch beim Video-Streaming einzelne Immissionsspitzen gut zu erkennen, jedoch erreichen sie mit maximal 1,2 V/m niedrigere Werte. Beim Download ist auch hier für eine Dauer von etwa 40 s eine konstant erhöhte Immission festzustellen, sie erreicht im Gegensatz zum Standort UE4 aber nur Werte von maximal knapp 1 V/m. Die kurzzeitigen Immissionsspitzen während des Surfens und des Downloads reichen nicht aus, um sich signifikant auf die mittlere Immission auszuwirken. Lediglich durch den Download wird die mittlere Immission von 0,3 V/m (Rauschschwelle des Messgeräts) auf knapp 0,4 V/m angehoben. Interessant ist ein Vergleich zwischen der durch den Download erzeugten mittleren Immission zwischen den beiden UE-Standorten UE4 (1,4 V/m, in der Nähe des Messpunktes) und UE0 (0,4 V/m, horizontal 37° vom Messpunkt entfernt). Das Verhältnis der mittleren Feldstärken beträgt Faktor 3,8 bzw. 11,7 dB, wodurch sehr gut die Auswirkungen von Beamforming auf die lokale Immission in der Zelle erkennbar sind.

Zur Einordnung der gezeigten Immissionen durch 5G im 3,6-GHz-Band wurde im Anschluss an die reine 5G-Messung zusätzlich eine Langzeitmessung des gesamten Mobilfunk-Downlinks inkl. des 3,6-GHz-Bandes über eine Dauer von 72 Stunden durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl von Funkbändern und der damit verbundenen hohen resultierenden Messbandbreite betrug die Dauer für einen Messdurchlauf im Schnitt 7,4 s, wodurch die zeitliche Auflösung gegenüber der reinen 5G-Langzeitmessung deutlich reduziert ist.

In Bild 6.1.10 sind die Ergebnisse der 72-Stunden-Langzeitmessung zu sehen. Der Übersichtlichkeit halber werden hier nur die über sechs Minuten leistungsbezogenen gemittelten Feldstärken dargestellt. Frequenzbänder, bei denen lediglich das Messgeräterauschen erfasst wurde, sind aus der Darstellung entfernt. Dies betrifft das 700-MHz-Band (5G, LTE), sowie das 3,6-GHz-Band (5G) von Vodafone und Telefónica. Das 3,6-GHz-Band der Telekom wurde bei den Messungen natürlich miterfasst.

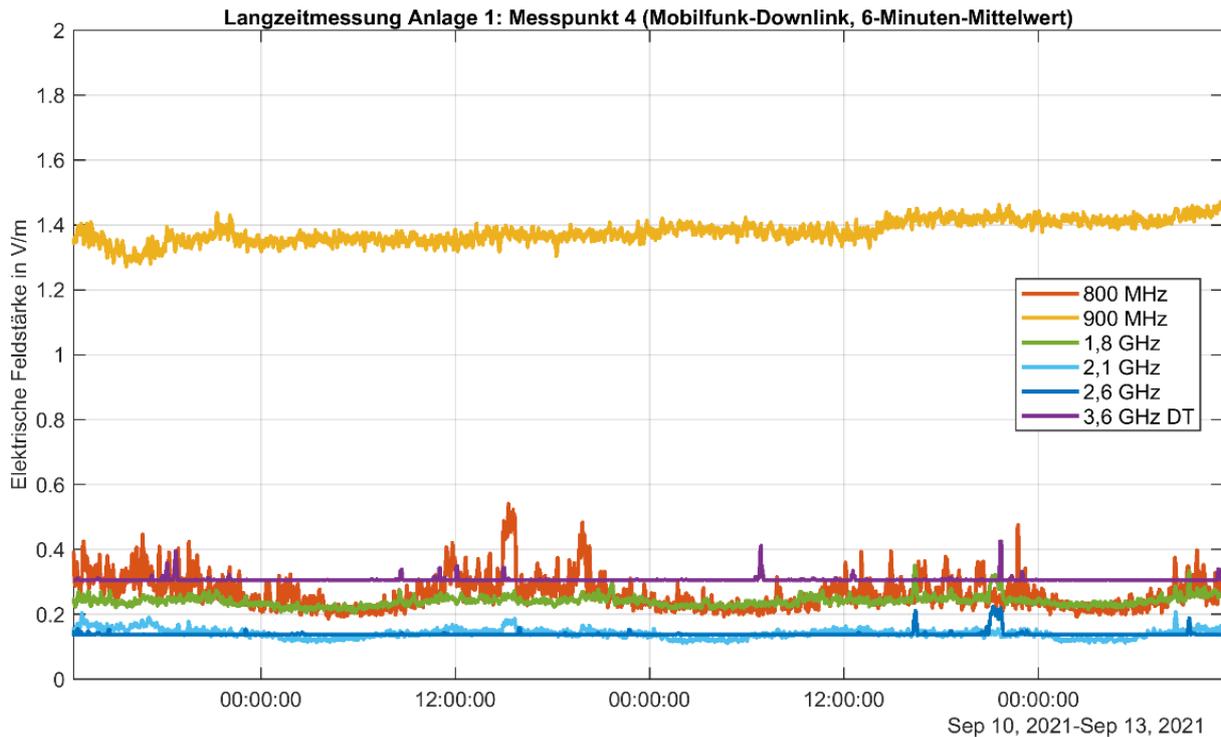


Bild 6.1.10: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Langzeitmessung der über 6 Minuten leistungsbezogen gemittelten Immission durch den gesamten Mobilfunk-Downlink (800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz) sowie dem 3,6-GHz-Band; Frequenzbänder, bei denen lediglich Messrauschen erfasst wurde, sind hier nicht dargestellt.

Die Reihenfolge der Immissionshöhen der unterschiedlichen Frequenzbänder ist im Mittel wie folgt (beginnend beim niedrigsten): 2,1 GHz (LTE und 5G), 2,6 GHz (LTE), 1,8 GHz (LTE), 800 MHz (LTE), 3,6 GHz (5G) und 900 MHz (GSM). Die absolute Schwankungsbreite ist in allen untersuchten Frequenzbändern mit 0,1 V/m bis 0,3 V/m relativ gering. Allerdings sei an dieser Stelle erwähnt, dass aufgrund der niedrigen eingestellten Empfindlichkeit des Messgeräts in der Nähe der Basisstation, die auftretenden Immissionen sowohl im 2,6-GHz-Band als auch im 3,6-GHz-Band sich größtenteils unterhalb der jeweiligen Rauschschwelle befinden, welches bei 3,6 GHz höher liegt, als die Immissionen bei 1,8 GHz und 2,1 GHz. Nur sporadisch treten bei 2,6 GHz und 3,6 GHz Immissionen auf, die das Rauschniveau leicht übersteigen. Die Messwerte variieren zwischen 0,1 V/m (2,1 GHz) und 1,5 V/m (900 MHz). Auffällig ist, dass im 900-MHz-Band zwar leichte kurzzeitige auslastungsabhängige Schwankungen zu verzeichnen sind und im Gegensatz zu den anderen Frequenzbändern kaum tageszeitabhängige Schwankungen zu verzeichnen sind und die mittlere Immission während der gesamten Messdauer zwischen 1,3 V/m und 1,5 V/m liegt und damit deutlich höher als die Immissionen der anderen Frequenzbänder.

Vor Beginn der Messung wurde mit dem eigenen Endgerät ein jeweils 30 Sekunden dauernder Speed-Test zuerst über 5G im 3,6-GHz-Band (ab 11:53 Uhr) und dann über LTE (ab 11:59 Uhr) durchgeführt (siehe Bild 6.1.11). Hierbei ist zu erkennen, dass beim Speed-Test über LTE offensichtlich Carrier Aggregation verwendet wurde, da die Bänder bei 900 MHz, 1,8 GHz sowie bei 2,6 GHz mit nur leichtem zeitlichen Versatz um 0,03 V/m bis 0,06 V/m ansteigen. Beim Speed-Test über 5G wurde lediglich das 3,6-GHz-Band verwendet, wodurch es nur dort zu einem Anstieg um ca. 0,2 V/m kommt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die

mittlere Datenrate beim Speed-Test über 5G ca. 1 Gbit/s betrug, während sie bei LTE mit 150 Mbit/s deutlich geringer war.

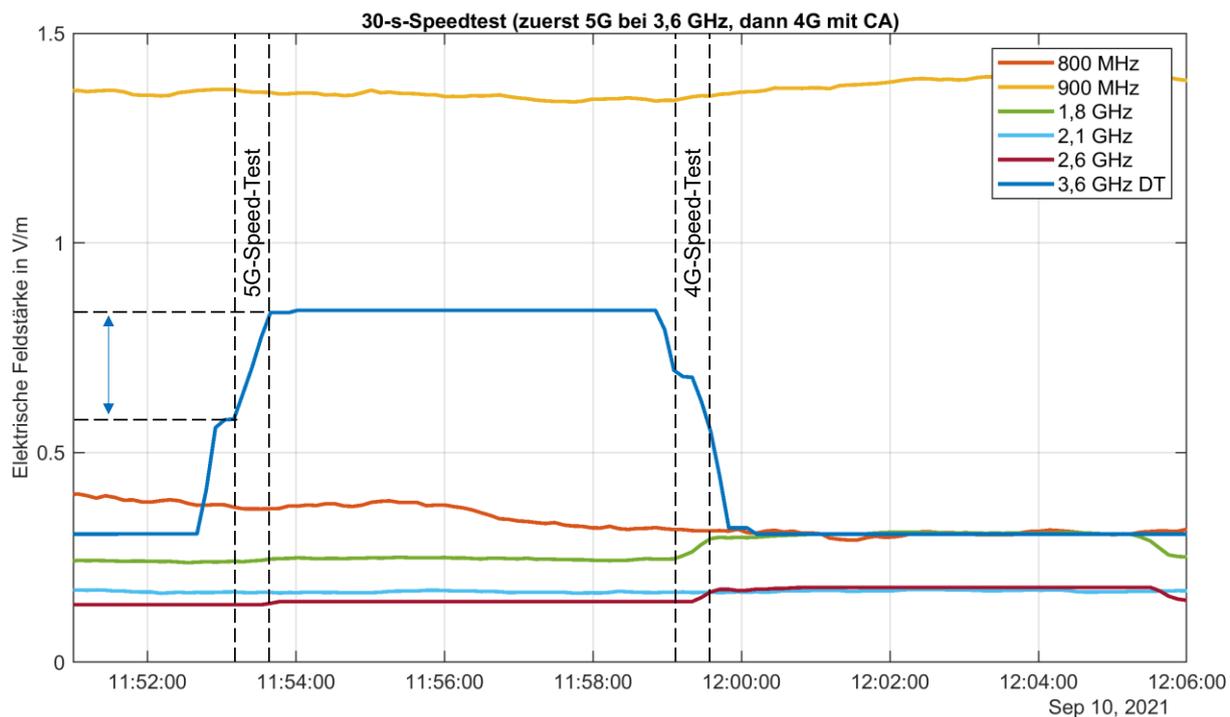


Bild 6.1.11: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Über 6 Minuten leistungsbezogen gemittelten Immission durch den gesamten Mobilfunk-Downlink (800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz) sowie dem 3,6-GHz-Band während zweier sequenzieller Speed-Tests erst über 5G (3,6 GHz) und im Anschluss über LTE (900 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz). Der Doppelpfeil beim der mittleren Immission im 3,6-GHz-Band markiert den durch den Speed-Test provozierten Anstieg.

6.1.5 Fazit

Insgesamt liegen die Messwerte deutlich unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV [26. BImSchV] (bei 3,6 GHz eine über 6 Minuten quadratisch (d.h. leistungsbezogen) gemittelte elektrische Feldstärke von 61 V/m). Die höchsten Messwerte treten im Nahbereich der Anlage an Messpunkt 4 auf. Bei der Momentanimmission treten die Immissionsspitzen größtenteils nur sehr kurzzeitig auf und betragen an Messpunkt 4 maximal 5,5 V/m, bei Messpunkt 1 knapp 0,9 V/m. Die höchste mittlere Immission liegt bei 1,4 V/m an Messpunkt 4 und bei 0,15 V/m an Messpunkt 1. An Messpunkt 2 fallen die Immissionswerte trotz der örtlichen Nähe zu Messpunkt 4 niedriger aus, was auf eine höhere Schirmdämpfung der dort eingebauten Fenster zurückzuführen ist. An Messpunkt 3 liegen die Immissionswerte größtenteils nur noch knapp über der Detektionsschwelle des Messgeräts. Aktivitäten durch das eigene und andere Endgeräte sind zwar zu erkennen, aufgrund der großen Entfernung zur Anlage von über 180 m und des Elevationswinkels (der Messpunkt befand sich etwa 1° oberhalb der Anlage) fallen die Immissionen jedoch gering aus. An dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass es nicht möglich war jederzeit sicherzustellen, dass sich das eigene Endgerät bei typischer Nutzung im 5G-Netz befand. Häufig ist es trotz des outdoor-Standorts bei zu geringer Auslastung ins LTE-Netz gewechselt. Dies betraf insbesondere die Messungen an Messpunkt 2. Da dies die derzeitige Netzkonfiguration widerspiegelt, werden die Auswirkungen auf die Immission daher auch als derzeit repräsentativ erachtet.

Insgesamt sind an allen vier Messpunkten sporadisch andere Nutzer zu erkennen. Da aber anzunehmen ist, dass nicht in jedem Messdurchlauf Nutzer in der Zelle aktiv waren, ist davon auszugehen, dass die Immissionswerte im Bereich 0,03-0,3 V/m (Messpunkt 1 und 2) durch die Signalisierung der Anlage erzeugt werden. Auf den folgenden Bildern sind die Auftrittshäufigkeiten der gemessenen Momentanimmissionen an den Messpunkten 1 bis 4 jeweils als Histogramm dargestellt.

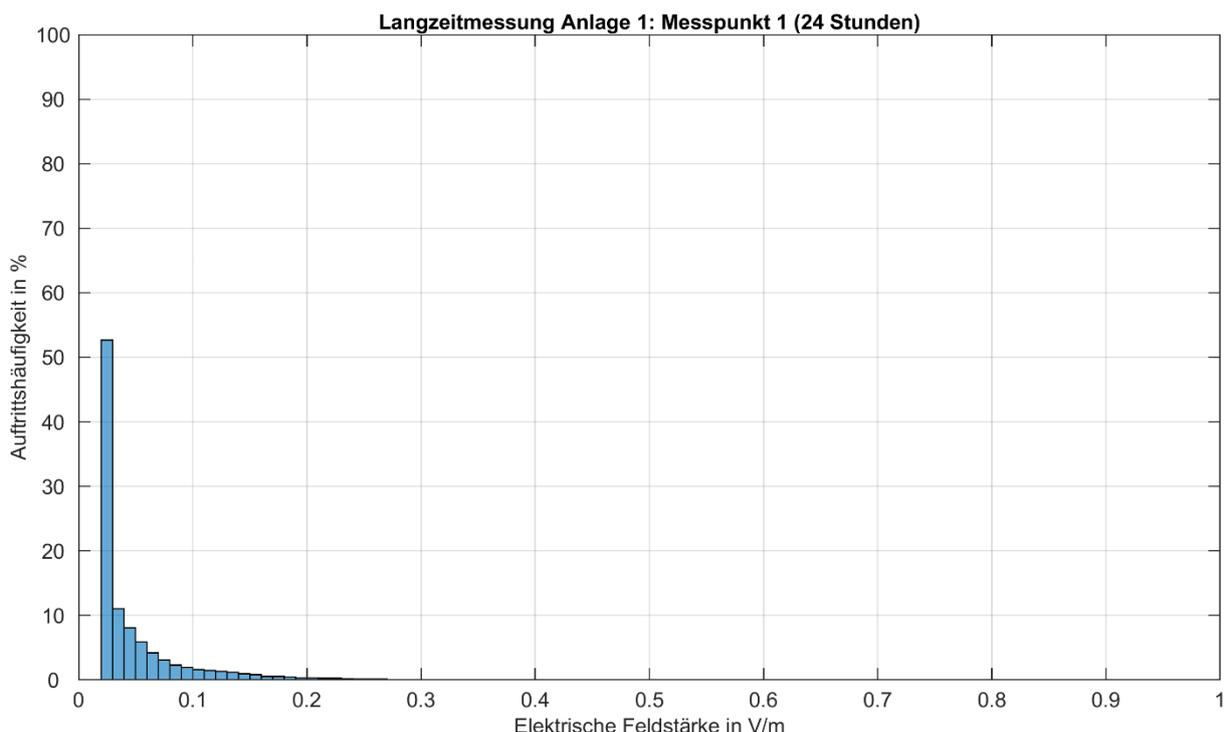


Bild 6.1.12: Anlagenstandort 1, Messpunkt 1: Auftrittshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmission

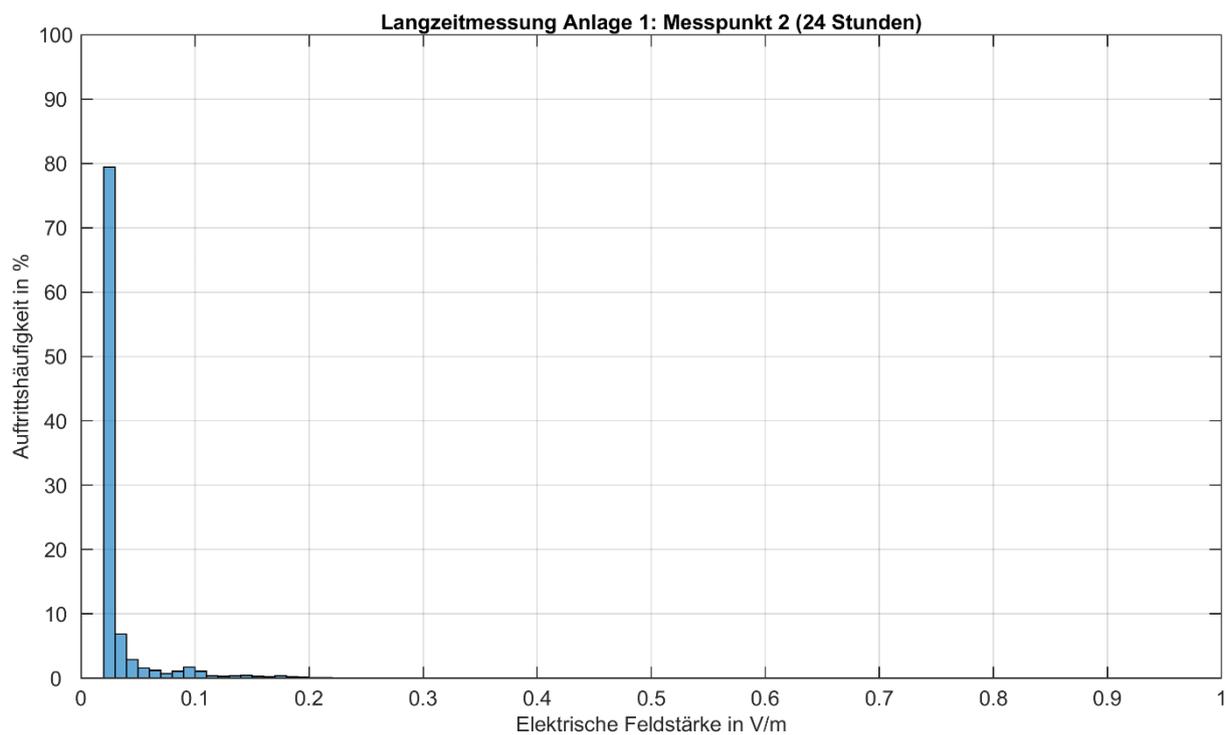


Bild 6.1.14: Anlagenstandort 1, Messpunkt 2: Auftretshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmision

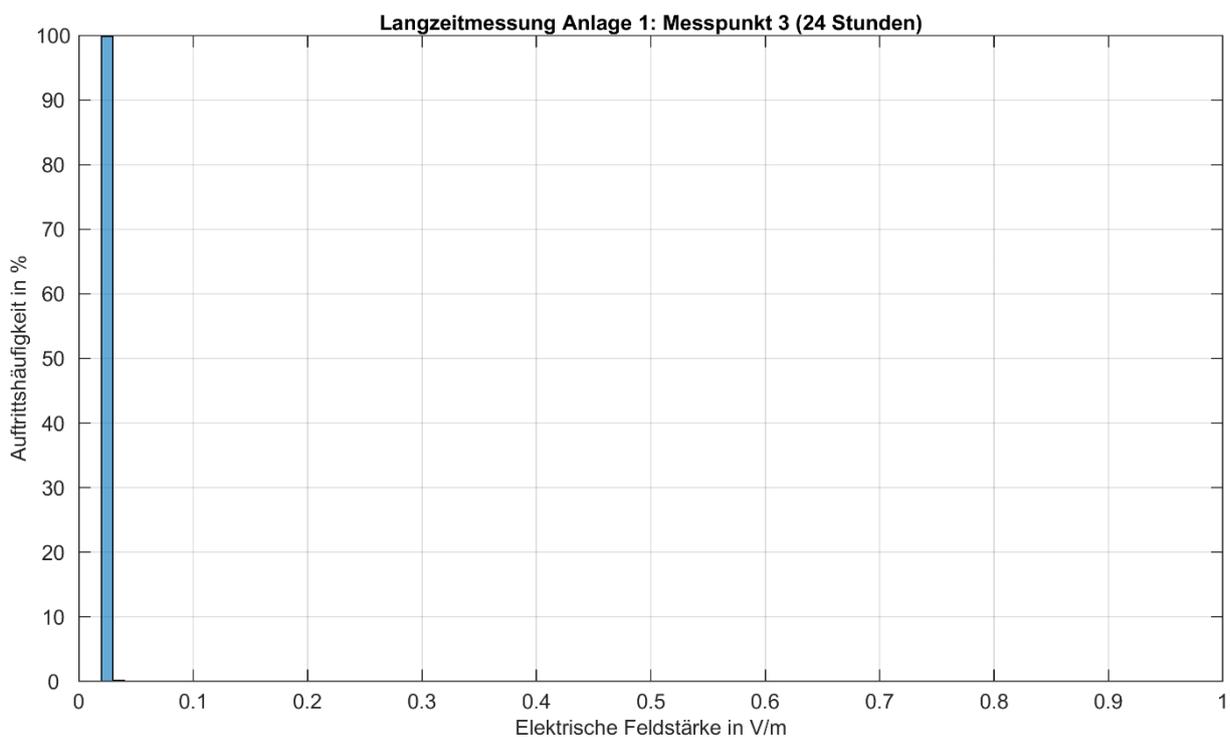


Bild 6.1.13: Anlagenstandort 1, Messpunkt 3: Auftretshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmision

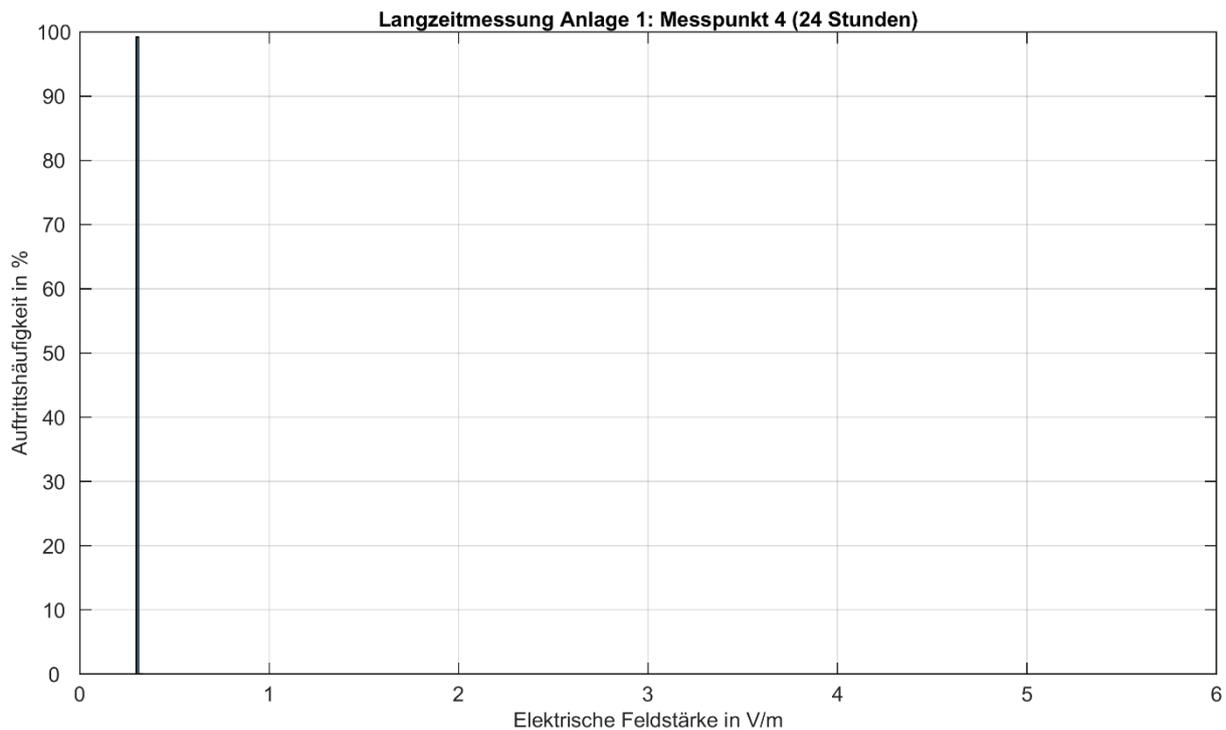


Bild 6.1.15: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Auftrittshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmission. Aufgrund der an diesem Messpunkt höheren aufgetretenen Feldstärken, wurde die Empfindlichkeit des Messgeräts reduziert. Dadurch liegt die Rauschschwelle des Messgeräts hier bei 0,3 V/m. Die x-Achse wurde auf die höchste aufgetretene Immission von aufgerundet 6 V/m erweitert.

In den Histogrammen der ersten drei Messpunkte treten Feldstärken zwischen 0,02 V/m und 0,03 V/m am häufigsten auf, wobei es im Wesentlichen das Messrauschen des Messgeräts darstellt, d.h. die Immissionen waren am häufigsten vermutlich niedriger als die Detektionsschwelle des Messgeräts. Die Häufigkeiten unterschieden sich zwischen den Messpunkten jedoch stark. Während die niedrigen Messwerte (0,02 V/m bis 0,03 V/m) an Messpunkt 1 einen Anteil von weniger als 55 % aufweisen, nehmen sie an Messpunkt 2 bereits knapp 80 % der Messwerte und an Messpunkt 3 sogar 99,8 % der Messwerte ein. An Messpunkt 1 nehmen die Auftrittshäufigkeiten zu höheren Feldstärken hin stetig ab. Feldstärken von 0,1 V/m oder mehr treten nur noch in ca. 11 % der Fälle auf, Feldstärken von 0,2 V/m oder mehr nur noch in 1,8 % der Fälle. An Messpunkt 2 nehmen die Auftrittshäufigkeiten abgesehen von einem kleinen Häufungspunkt um 0,1 V/m zu höheren Feldstärken hin stetig ab. Feldstärken von 0,1 V/m oder mehr treten nur noch in ca. 4,5 % der Fälle auf, Feldstärken von 0,2 V/m oder mehr nur noch in 0,4 % der Fälle. An Messpunkt 3 nehmen die Auftrittshäufigkeiten zu höheren Feldstärken hin sehr stark ab. Feldstärken, die höher als die Rauschschwelle des Messgeräts von 0,03 V/m sind, treten nur in 0,2 % der Fälle auf.

Das Histogramm für Messpunkt 4 ist gesondert zu betrachten, da aufgrund der Nähe zwischen Basisstationsantenne und Messgerät höhere Feldstärken aufgetreten sind, weswegen die Empfindlichkeit des Messgeräts reduziert werden musste. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg des Messrauschens auf 0,3 V/m. Die Skalierung der x-Achse wurde auf die höchste aufgetretene Feldstärke von aufgerundet 6 V/m erweitert. Dem Histogramm ist zu entnehmen, dass 99,2 % der aufgetretenen Feldstärkewerte kleiner oder gleich dem Messrauschen waren. Feldstärken über 1 V/m treten in weniger als 0,1 % der Fälle auf.

Bei der Langzeitmessung der mittleren Immission des gesamten Mobilfunk-Downlinks sowie des 3,6-GHz-Bands der Telekom an Messpunkt 4 über eine Dauer von 72 Stunden konnte beobachtet werden, dass es bei 5G im 3,6-GHz-Band sowie bei LTE im 2,6 GHz-Band nur sporadisch Aktivitäten gibt, die kaum zu einer signifikanten Erhöhung der mittleren Immission beitragen. In den anderen u.a. am Standort betriebenen Frequenzbändern (800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz) war hingegen durchgehend eine gewisse Aktivität in der Zelle vorhanden. Die größte Schwankungsbreite liegt im 800-MHz-Band vor. Im 3,6-GHz-Band ist diese deutlich geringer, was allerdings auch auf das hohe Messrauschen zurückzuführen ist, was nur selten überstiegen wird. Die mit Abstand höchsten mittleren Immissionen treten im 900-MHz-Band auf und weisen mit Werten zwischen 1,3 V/m und 1,5 V/m zusätzlich eine geringe Schwankung auf.

Im folgenden Bild sind für Messpunkt 4 jeweils die Histogramme für die aufgetretenen und mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 0,65 s vorliegenden *Momentanimmissionen* in den an der Anlage in Betrieb befindlichen Frequenzbändern dargestellt. Aufgrund der deutlichen Unterschiede bei den Immissionswerten zwischen den einzelnen Frequenzbändern, sind die x-Achsen hier zur besseren Ablesbarkeit nicht einheitlich skaliert

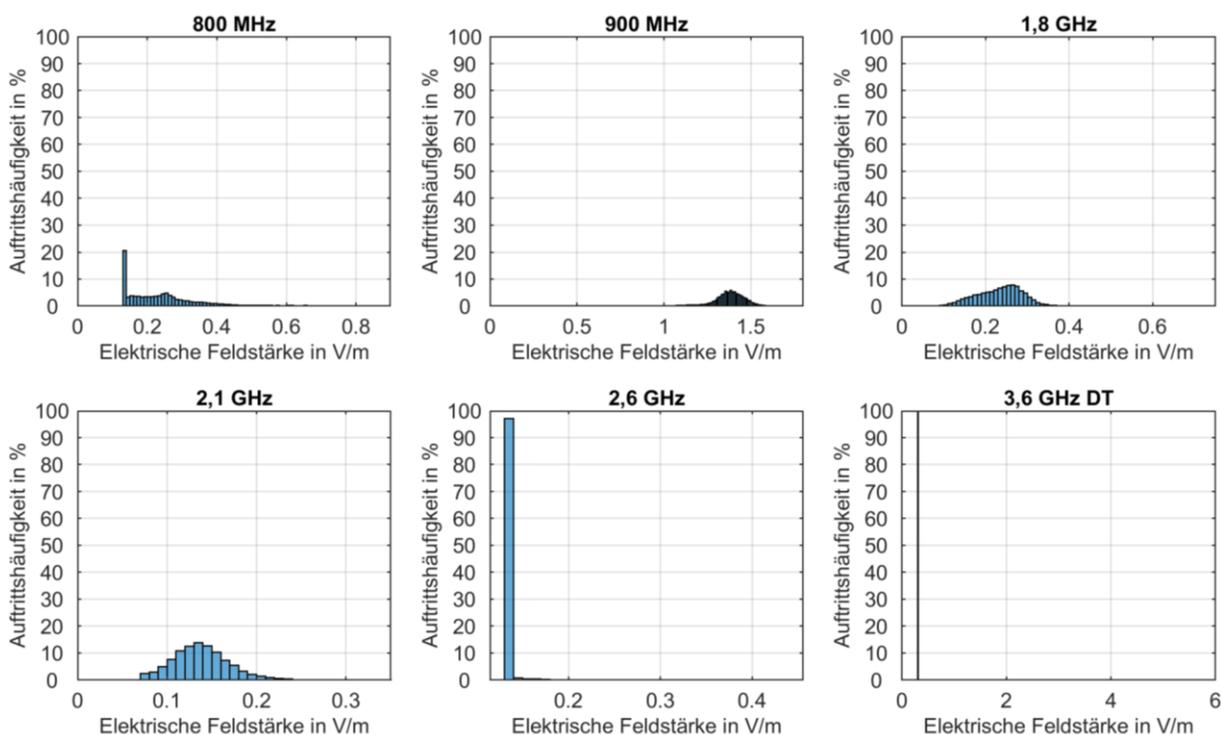


Bild 6.1.16: Anlagenstandort 1, Messpunkt 4: Auftrittshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmissionen des Mobilfunk-Downlinks

An den Histogrammen lässt sich gut ablesen, in welchen Frequenzbändern höhere oder niedrigere Immissionen auftreten und wie groß jeweils die Streuung der Immissionshöhen ausfällt. Des Weiteren ist an den Häufungspunkten in den jeweils unteren Bins der Histogramme gut zu erkennen, dass die Momentanimmission in den Frequenzbändern bei 800 MHz, 2,6 GHz sowie 3,6 GHz teilweise (800 MHz) bzw. zu einem Großteil (2,6 GHz und 3,6 GHz) kleiner als das Messrauschen des Messgeräts war. Im 3,6-GHz-Band liegen mehr als 99,1 % der Messwerte im Bereich der Rauschschwelle des Messgeräts (0,3 V/m) oder darunter.

Zum Abschluss sei noch auf die Auswirkungen von Beamforming auf die Immission eingegangen. Diese sind anhand der Messungen bei aktivem Endgerät an UE0 und in Messpunktnähe gut zu beobachten. Waren Endgerät an UE0 bzw. am jeweiligen Messpunkt hinsichtlich der Horizontalwinkels stark voneinander getrennt wie z.B. an Messpunkt 1 (Winkelunterschied von 50°), kam es bei typischer Nutzung des Endgeräts an UE0 zu mittleren Immissionen von 0,9 V/m bzw. bei Nutzung des Endgeräts an UE1 zu mittleren Immissionen von 1,5 V/m, was einem Unterschiedsfaktor von 1,7 bzw. 4,4 dB entspricht. An Messpunkt 4 (horizontaler Winkelunterschied von 37°) betrug der Unterschied sogar Faktor 3,8 bzw. 11,7 dB.

Die dokumentierten Langzeitmessungen spiegeln die durch den derzeitigen Ausbauzustand des 5G-Netzes im 3,6-GHz-Band sowie die derzeitige Nutzersituation bedingte Immissionssituation wider. Infolge des Netzausbaus und einer zu erwartenden höheren Nutzerzahl und -dichte muss diese nicht zwingend mit der Immissionssituation in der Zukunft übereinstimmen. Dennoch lassen sich bereits an dieser Stelle interessante Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen von Beamforming auf die Immission ziehen.

6.2 Standort 2: Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld

Die Langzeitmessungen am Anlagenstandort „Vodafone-Anlage mit Ericsson-Technik, ländliches Umfeld“ wurden an der Anlage Am Kleinfurst in 40627 Düsseldorf durchgeführt. Die Anlage befindet sich unmittelbar neben dem Parkplatz eines Sees. Auf einem Mast ist in einem Höhenbereich von 32 bis 34 Meter ein dreisektoriges Mobilfunksystem installiert, von dem neben 5G-3600 auch 5G-700, LTE-800, GSM-900, LTE-1800, 5G-1800 und LTE-2100 abgestrahlt werden. Die Messungen starteten am 12.08.2021 um 11:40 Uhr (24 Stunden) sowie am 23.08.2021 um 14:30 Uhr (7,5 Stunden). Die kürzere Dauer der zweiten Messung ist durch die Nichtverfügbarkeit eines Stromanschlusses für das Messequipment begründet.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte und der jeweiligen Standorte des aktiven Endgeräts sind in Bild 6.2.1 dargestellt.

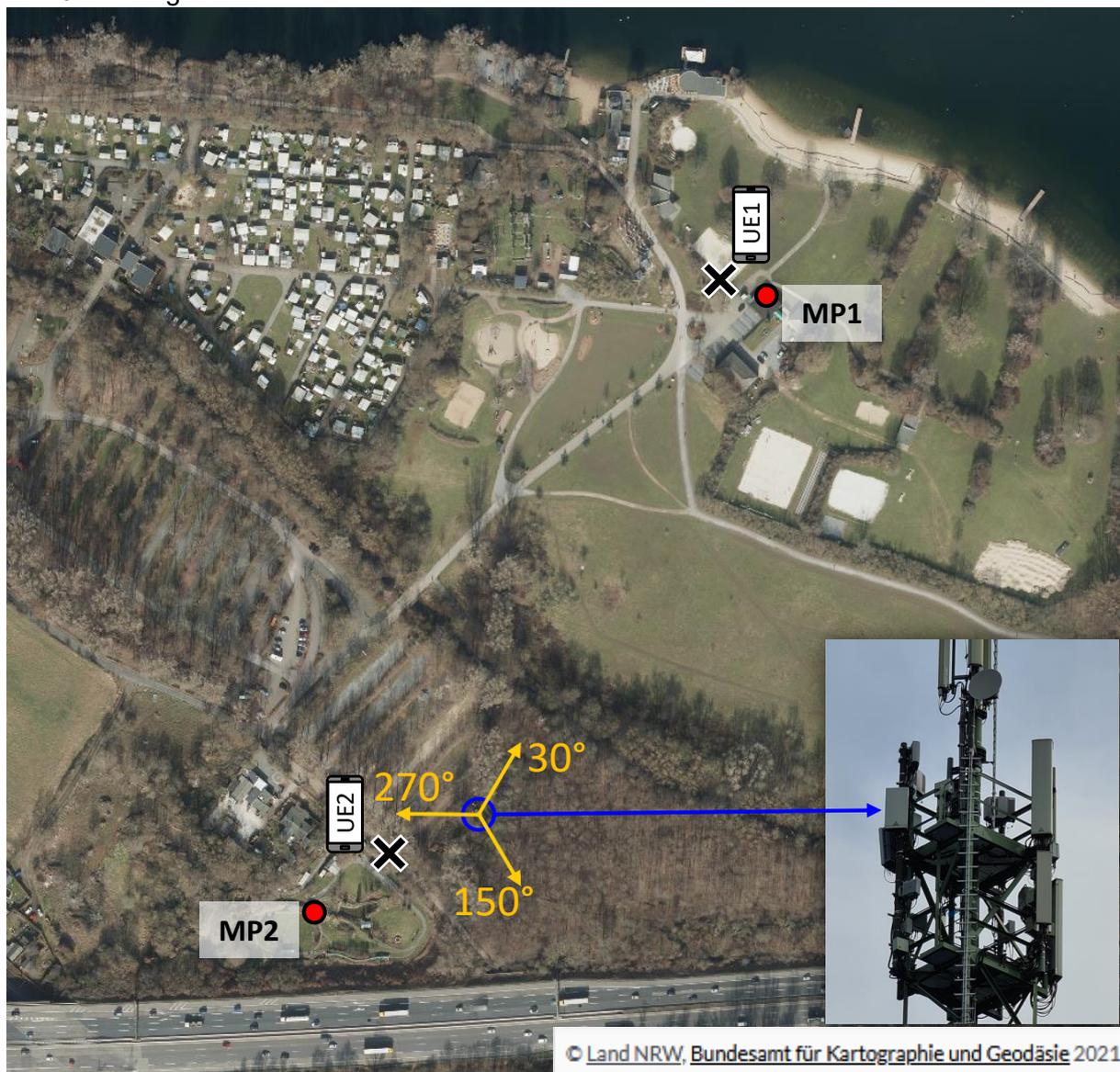


Bild 6.2.1: Standort 2: Lageplan mit Anlagenstandort, horizontale Ausrichtung der 5G-Sendeantennen und Verteilung der Messpunkte sowie der jeweiligen Standorte des aktiven Endgeräts

Die Langzeitmessungen wurden an zwei Punkten (MP1, MP2) durchgeführt, wobei sich MP1 im Nahbereich und MP2 im Fernbereich der Anlage befindet. Bei der Messung wurde für die Erzeugung typischer Immissionswerte das Endgerät in die Nähe des Messpunktes bei ähnlichem Horizontalwinkel wie der jeweilige Messpunkt gebracht (UE1, UE2), sodass während der typischen Nutzung ein Beam im Hinblick auf den Horizontalwinkel in Richtung des jeweiligen Messpunktes ausgerichtet wurde.

In nachfolgender Tabelle ist die Lage der Messpunkte im Versorgungsgebiet von Standort 2 beschrieben.

Tabelle 6.2: Anlagenstandort 2: Beschreibung der Lage der Messpunkte

Punkt	Ort	Horizontal-entfernung	Horizon-talwinkel	Vertikal-winkel	Sicht zur 5G-Antenne
MP1	Modellbahnclub Düsseldorf (outdoor)	110 m	237°	20°	ja
MP2	Kassenhaus Strandbad Süd (indoor)	340 m	27°	7°	nein

Hinsichtlich der Verwendung des eigenen Endgeräts zur typischen Nutzung gab es im Gegensatz zu Standort 1 keine Schwierigkeiten sicherzustellen, dass sich das Endgerät auch im 5G-Netz im 3,6-GHz-Band eingebucht war. Lediglich bei einigen Sekunden Inaktivität fiel es zurück ins LTE-Netz, konnte sich aber durch aktive Nutzung auch mit niedrigen Datenraten direkt wieder ins 5G-Netz einbuchen.

Zusätzlich zu den 5G-Langzeitmessungen wurde an Messpunkt 2 (Strandbad Süd) unmittelbar im Anschluss noch eine Langzeitmessung des gesamten Mobilfunk-Downlinks (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz und 2,6 GHz) sowie des 3,6-GHz-Bands über eine Dauer von etwas mehr als sechs Stunden durchgeführt. Die Messung erfolgte an einem Freitagnachmittag bei sommerlichem Wetter während der Sommerferien (Start der Messung: 13.08.2021, 12:03 Uhr). Das Strandbad war sehr gut besucht.

6.2.1 Langzeitmessung an Messpunkt 1 (Nahbereich)

In Bild 6.2.2 sind die Ergebnisse der 7,5-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 1 im Nahbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht

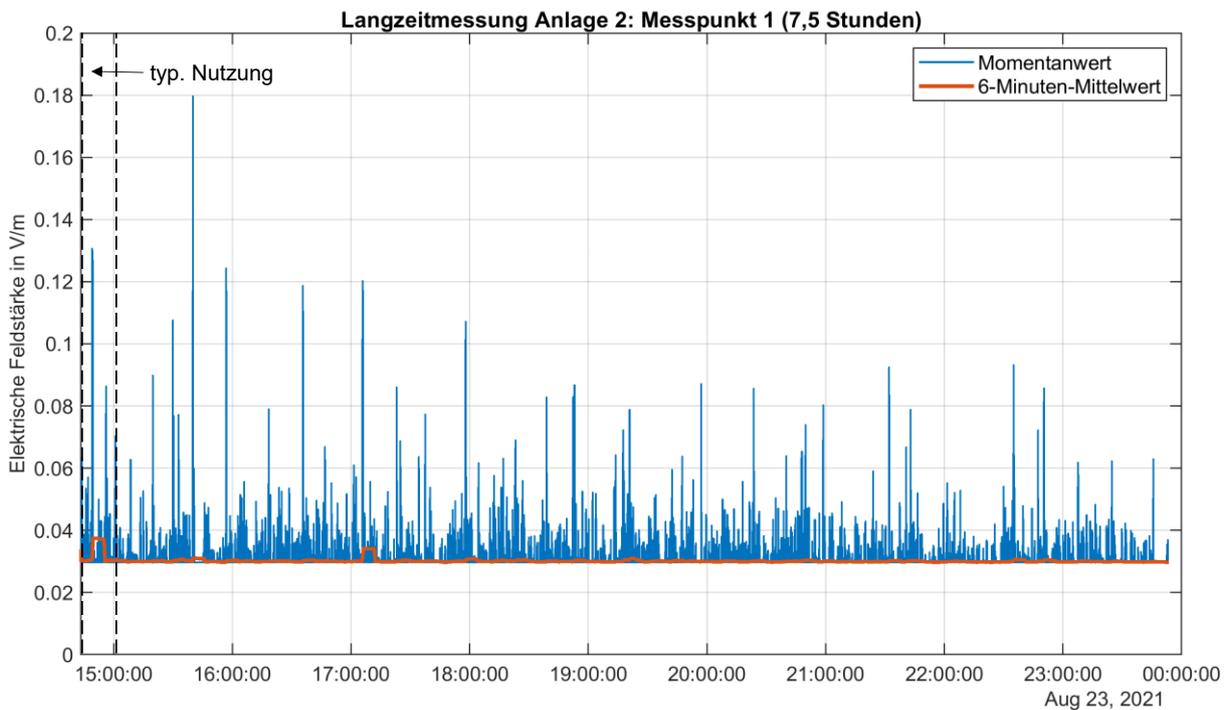


Bild 6.2.2: Anlagenstandort 2, Messpunkt 1: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission)

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass - neben der erzwungenen Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät - auch während der restlichen Messdauer vereinzelt ähnlich hohe Momentanimmissionen erfasst wurden, während das eigene Endgerät ausgeschaltet war. Im Wesentlichen liegt die *Momentanimmission* zwischen 0,03 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und 0,1 V/m. Ganz vereinzelt treten Immissionsspitzen auf, die höher ausfallen, wovon die höchste eine Feldstärke von 0,18 V/m aufweist. Wie an Standort 1 treten diese Spitzen auch hier häufig nur sehr kurz auf (ein einzelner Messwert). Da hier der Zeitbereich im Vergleich zu den anderen 5G-Langzeitmessungen um den Faktor 3 gestreckt ist, erscheint die Dichte der Immissionsspitzen etwas geringer. Bei gleicher Skalierung wie bei den anderen Messungen ist allerdings eine ähnliche Dichte von Immissionsspitzen festzustellen.

Die über ein sechs Minuten langes gleitendes Fenster *gemittelte Immission* weist eine deutlich geringere Dynamik auf und bleibt zum Großteil der Zeit in einem sehr begrenzten Bereich um die Detektionsschwelle des Messgeräts (0,03 V/m). Gegen 17:10 Uhr kommt es zu einer erhöhten Aktivität und die über 6 Minuten gemittelte Feldstärke steigt auf 0,034 V/m an (Anstieg von 1,1 dB). Durch die typische Nutzung des Endgeräts zu Beginn der Messung tritt eine maximale mittlere Feldstärke von 0,037 V/m auf, was einem Anstieg von 1,9 dB entspricht.

In Bild 6.2.3 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war.

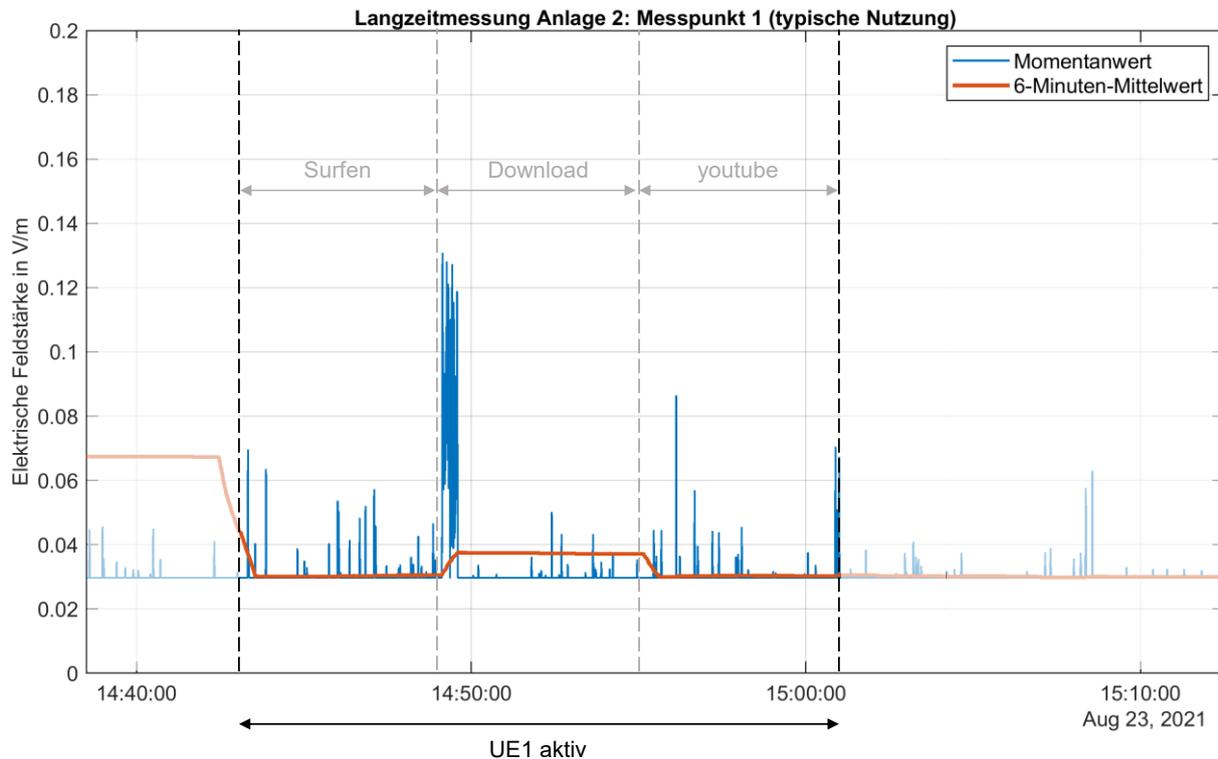


Bild 6.2.3: Anlagenstandort 2, Messpunkt 1: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts am Standort UE1 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission). Der 6-Minuten-Mittelwert ist zu Beginn der typischen Nutzungsszenarien erhöht, da zuvor ein Speed-Test durchgeführt werden musste, um ein Einbuchen des Endgeräts in das 5G-Netz zu provozieren.

In der Zeit von 14:43 Uhr bis 15:01 Uhr war das Endgerät am Standort UE1 in der Nähe des Messpunktes 1 aktiv. Während der Aktivität des Endgeräts sind je nach Szenario unterschiedlich viele und unterschiedlich hohe Immissionsspitzen zu sehen. Beim Surfen treten nur vereinzelt Spitzen auf, die bei maximal 0,07 V/m liegen. Daher zeigt sich in diesem Szenario auch keine signifikante Auswirkung auf die mittlere Immission. Zu Beginn des Surfens ist die mittlere Immission noch erhöht, weil in den vorangegangenen sechs Minuten ein Speed-Test durchgeführt wurde, um zu provozieren, dass sich das Endgerät in 5G-Netz einbucht.

Während des Downloads kommt es zu Beginn zu einer kontinuierlichen Auslastung der Zelle, wobei Immissionsspitzen von maximal 0,13 V/m auftreten. Dies wirkt sich auch unmittelbar auf die mittlere Immission aus, die von 0,03 V/m auf 0,037 V/m steigt. Dadurch, dass die 1 GB große Datei nach ca. 26 Sekunden vollständig heruntergeladen wurde, sind in den verbleibenden 5,5 Minuten nur vereinzelt kleinere Immissionsspitzen zu erkennen.

Beim Video-Streaming sind die auftretenden Immissionsspitzen vergleichbar zum Szenario „Surfen“. Durch die damit einhergehende niedrige Auslastung fällt die durch den Download angestiegene mittlere Immission auch hier wieder auf die Rauschschwelle von 0,03 V/m zurück.

6.2.2 Langzeitmessung an Messpunkt 2 (Fernbereich)

In Bild 6.2.4 sind die Ergebnisse der 24-Stunden-Langzeitmessung an Messpunkt 2 im Fernbereich der Anlage zu sehen. Der Momentanwert mit einer zeitlichen Auflösung von 0,65 s ist dünn in blau und der über ein gleitendes 6-Minuten-Fenster leistungsbezogen gemittelte Wert fett in orange dargestellt. Der Zeitraum, währenddessen mit dem Endgerät eine typische Nutzung simuliert wurde, ist durch die gestrichelten Linien zu Beginn der Messung kenntlich gemacht.

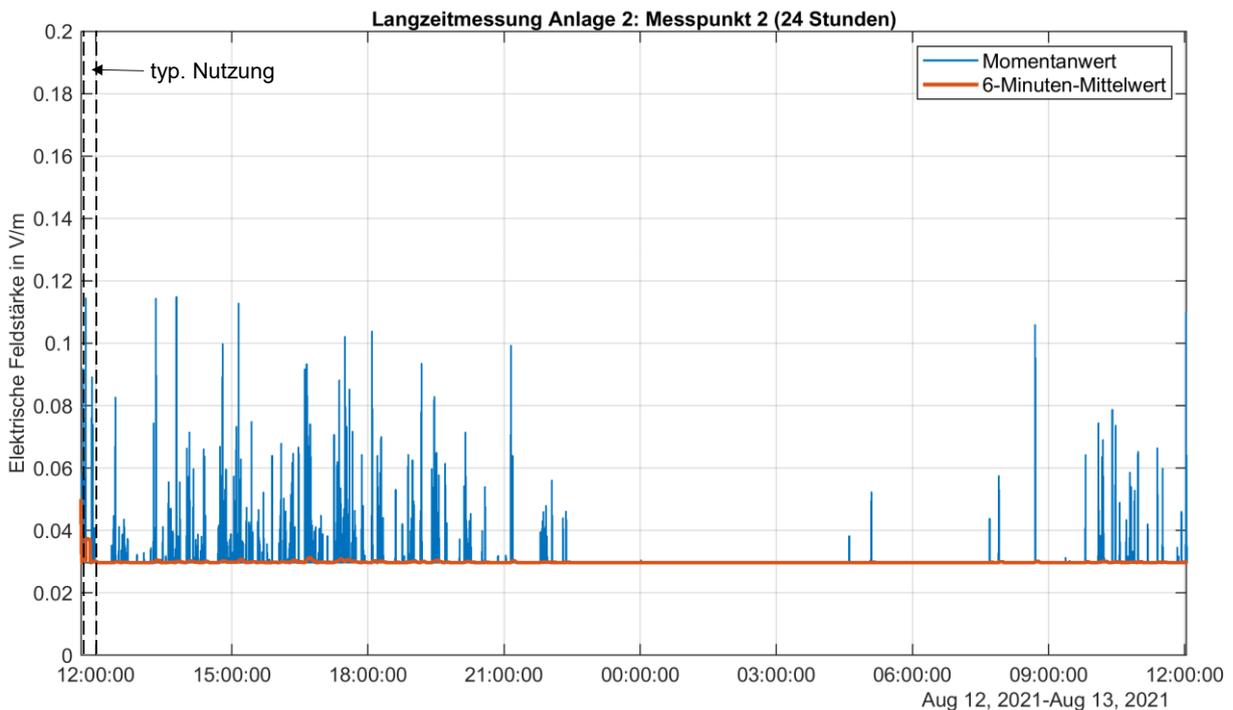


Bild 6.2.4: Anlagenstandort 2, Messpunkt 2: Langzeitmessung der Immission durch 5G-3600 (blau/dünn: Momentanmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanmission)

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass - neben der erzwungenen Auslastung der Zelle durch das eigene Endgerät - während der Messdauer auch andere Endgeräte zeitweise aktiv waren. Deren Aktivität nimmt zum Abend hin ab und von ca. 22:30 Uhr bis ca. 4:30 Uhr ist keinerlei Aktivität zu verzeichnen. Im den Messpunkt versorgenden 30°-Sektor der Anlage liegt lediglich ein Naherholungsgebiet, sodass sich dort keine Wohngebäude befinden. Insofern ist während der Nacht auch mit keinen 5G-Nutzern zu rechnen. Im Wesentlichen liegt die *Momentanmission* zwischen 0,03 V/m (Detektionsschwelle des SRM-3006) und 0,08 V/m. Vereinzelt treten höhere Immissionsspitzen auf mit einem Maximum bei knapp 0,12 V/m. Wie bei allen anderen 5G-Langzeitmessungen treten diese Spitzen auch hier häufig nur sehr kurz auf (ein einzelner Messwert).

Die über ein sechs Minuten langes gleitendes Fenster *gemittelte Immission* weist eine äußerst geringe Dynamik auf und bleibt nahezu die ganze Zeit bei der Detektionsschwelle des Messgeräts (0,03 V/m). Teilweise führt die Aktivität anderer Endgeräte zur Nachmittagszeit zu einer marginalen Erhöhung der mittleren Immission. Durch die typische Nutzung des Endgeräts tritt - wie an Messpunkt 1 - im Nahbereich der Anlage eine maximale mittlere Feldstärke von 0,037 V/m auf, was einem Anstieg von 1,9 dB entspricht.

In Bild 6.2.3 ist nur der Zeitbereich der Langzeitmessung vergrößert dargestellt, in dem das Endgerät für typische Nutzungsszenarien aktiv war

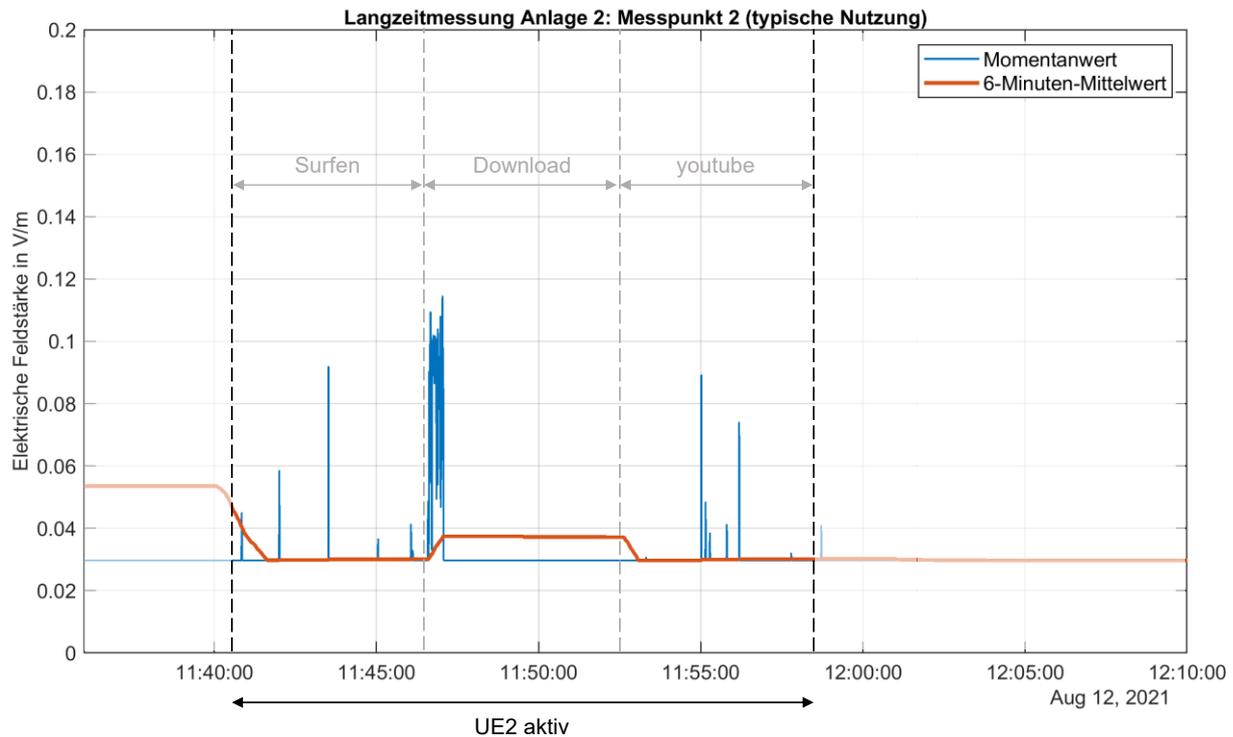


Bild 6.2.5: Anlagenstandort 2, Messpunkt 2: Immission durch 5G-3600 während der typischen Nutzung des Endgeräts am Standort UE2 (blau/dünn: Momentanimmission, orange/fett: über 6 Minuten gleitend (leistungsbezogen) gemittelte Momentanimmission). Der 6-Minuten-Mittelwert ist zu Beginn der typischen Nutzungsszenarien erhöht, da zuvor ein Speed-Test durchgeführt werden musste, um ein Einbuchen des Endgeräts in das 5G-Netz zu provozieren.

In der Zeit von 14:40:30 Uhr bis 14:58:30 Uhr war das Endgerät am Standort UE2 in der Nähe des Messpunktes 2 aktiv. Während der Aktivität des Endgeräts sind je nach Szenario unterschiedlich viele und unterschiedlich hohe Immissionsspitzen zu sehen. Wie an Messpunkt 1 treten beim Surfen nur vereinzelt Spitzen auf, die hier bei maximal 0,09 V/m liegen. Daher zeigt sich in diesem Szenario auch keine signifikante Auswirkung auf die mittlere Immission. Zu Beginn des Surfens ist die mittlere Immission noch erhöht, weil in den vorangegangenen sechs Minuten ein Speed-Test durchgeführt wurde, um zu provozieren, dass sich das Endgeräts in 5G-Netz einbucht.

Während des Downloads kommt es zu Beginn zu einer kontinuierlichen Auslastung der Zelle, wobei Immissionsspitzen von maximal 0,11 V/m auftreten. Dies wirkt sich auch unmittelbar auf die mittlere Immission aus, die analog zu Messpunkt 1 von 0,03 V/m auf 0,037 V/m steigt. Dadurch, dass die 1 GB große Datei nach ca. 30 Sekunden vollständig heruntergeladen wurde, sind in den verbleibenden 5,5 Minuten keine weiteren Immissionsspitzen zu erkennen.

Beim Video-Streaming sind die auftretenden Immissionsspitzen vergleichbar zum Szenario „Surfen“. Durch die damit einhergehende niedrige Auslastung fällt die durch den Download angestiegene mittlere Immission auch hier wieder auf die Rauschschwelle von 0,03 V/m zurück.

Zur Einordnung der gezeigten Immissionen durch 5G im 3,6-GHz-Band wurde im Anschluss an die reine 5G-Messung zusätzlich eine Langzeitmessung des gesamten Mobilfunk-Downlinks inkl. des 3,6-GHz-Bandes über eine Dauer von gut sechs Stunden durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl von Funkbändern und der damit verbundenen hohen resultierenden Messbandbreite betrug die Dauer für einen Messdurchlauf im Schnitt 7,4 s, wodurch die zeitliche Auflösung gegenüber der reinen 5G-Langzeitmessung deutlich reduziert ist.

In Bild 6.2.6 sind die Ergebnisse der 6-Stunden-Langzeitmessung zu sehen. Der Übersichtlichkeit halber werden hier nur die über sechs Minuten leistungsbezogenen gemittelten Feldstärken dargestellt. Frequenzbänder, bei denen lediglich das Messgeräterauschen erfasst wurde, sind aus der Darstellung entfernt. Dies betrifft das 2,6-GHz-Band (LTE) sowie das 3,6-GHz-Band (5G) der Telekom sowie von Telefónica. Das 3,6-GHz-Band von Vodafone wurde bei den Messungen natürlich miterfasst.

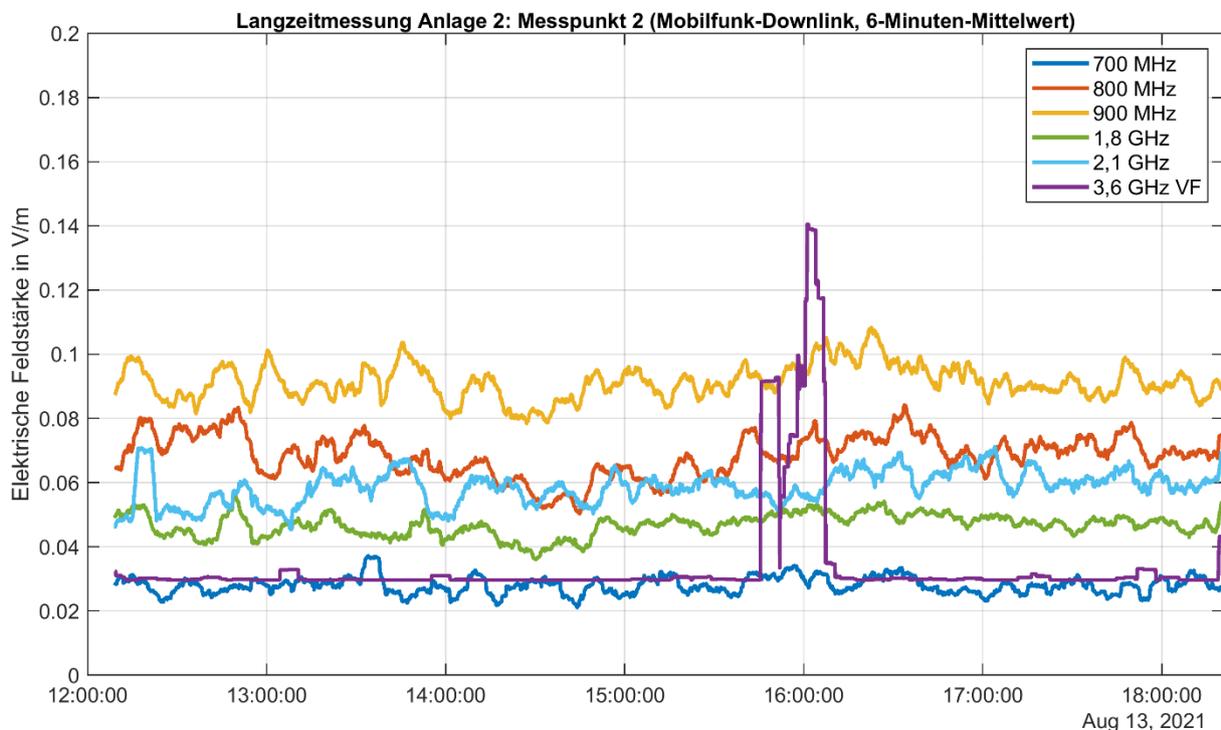


Bild 6.2.6: Anlagenstandort 2, Messpunkt 2: Langzeitmessung der über 6 Minuten leistungsbezogenen gemittelten Immission durch den gesamten Mobilfunk-Downlink (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz) sowie dem 3,6-GHz-Band; Frequenzbänder, bei denen lediglich Messrauschen erfasst wurde, sind hier nicht dargestellt.

Über die gesamte Messdauer hinweg ist die Reihenfolge der Immissionshöhen der unterschiedlichen Frequenzbänder wie folgt (beginnend beim niedrigsten): 700 MHz (LTE und 5G), 1,8 GHz (LTE und 5G), 2,1 GHz (LTE), 800 MHz (LTE) und 900 MHz (GSM). Die Immission durch 5G im 3,6-GHz-Band zeigt die höchste Dynamik und liegt zu einem Großteil der Zeit im Messrauschen (0,03 V/m), das in etwa der Immission bei 700 MHz entspricht. Bei Aktivität liegt sie mit einem Spitzenwert von 0,14 V/m höher als die Immission bei 900 MHz. Die absolute Schwankungsbreite bei den anderen Frequenzbändern ist deutlich geringer und reicht von ca. 0,01 V/m bei 700 MHz, 0,02 V/m bei 1,8 GHz bis 0,03 V/m bei 800 MHz, 900 MHz und 2,1 GHz.

Während in den anderen Bändern durchgängig eine permanent schwankende Zellauslastung und zusätzlich ein deutlicher, durch die permanent abgestrahlten Signalisierungssignale verursachter "Feldstärkegrundpegel" zu sehen ist, sind im 3,6-GHz-Band z.B. gegen 13:10 Uhr sowie um kurz vor 18 Uhr kleinere Anstiege der mittleren Immission festzustellen. Lediglich gegen 16 Uhr kommt es zu einer ca. 22 Minuten dauernden stärkeren Auslastung der Zelle, wodurch die größte mittlere Immission während der gesamten Messung erreicht wird.

Ganz zum Ende der Messung wurde mit dem eigenen Endgerät ein jeweils 30 Sekunden dauernder Speed-Test zuerst über LTE und dann über 5G im 3,6-GHz-Band durchgeführt. Hierbei ist zu erkennen, dass beim Speed-Test über LTE offensichtlich Carrier Aggregation verwendet wurde, da die Bänder bei 800 MHz, 1,8 GHz sowie bei 2,1 GHz gleichzeitig um 0,05 V/m bis 0,1 V/m ansteigen. Beim Speed-Test über 5G wurde lediglich das 3,6-GHz-Band verwendet, wodurch es nur dort zu einem Anstieg von ca. 0,15 V/m kommt.

6.2.3 Fazit

Insgesamt liegen die Messwerte der 5G-Langzeitmessungen deutlich unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV (bei 3,6 GHz eine über 6 Minuten quadratisch (d.h. leistungsbezogen) gemittelte elektrische Feldstärke von 61 V/m). Die höchsten Messwerte treten im Nahbereich der Anlage an Messpunkt 1 auf. Bei der Momentanimmission treten die Immissionsspitzen größtenteils nur sehr kurzzeitig auf (ein einzelner Messwert) und betragen maximal knapp 0,18 V/m. Die höchste mittlere Immission liegt an beiden Messpunkten bei knapp 0,04 V/m. Aktivitäten durch das eigene und andere Endgeräte sind zwar zu erkennen, die daraus resultierenden Immissionen fallen jedoch gering aus und treten nur sporadisch auf. Lediglich durch das eigene Endgerät bei den typischen Nutzungsszenarien konnte die mittlere Immission signifikant über die Detektionsschwelle des Messgeräts von 0,03 V/m angehoben werden. Da bei der Messung an Messpunkt 2 während der Nacht über einen Zeitraum von etwa 6 Stunden keinerlei Immissionen oberhalb der Rauschschwelle gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass sich in diesem Zeitraum auch keine Nutzer in der Zelle befanden und die damit einhergehende Leerlaufimmission niedriger als die Rauschschwelle des Messgeräts ist.

Im Gegensatz zu den Messungen an Anlage 1 ist es an dieser Anlage bei allen Messungen gelungen, spätestens mithilfe eines Speed-Tests ein Einbuchen des Endgeräts ins 5G-Netz (3,6-GHz-Band) zu provozieren. Bei längerer Inaktivität ist das Endgerät zwar immer in das LTE-Netz zurückgefallen, aber dann haben selbst Anwendungen mit niedriger Datenrate ausgereicht, um das Endgerät wieder vom LTE- ins 5G-Netz wechseln zu lassen.

In beiden 5G-Langzeitmessungen traten Immissionswerte oberhalb der Detektionsschwelle des Messgerätes nur sporadisch und meist einzeln auf. Auf den folgenden Bildern sind die Auftrittshäufigkeiten der gemessenen Momentanimmissionen an beiden Messpunkten jeweils als Histogramm dargestellt. In beiden Histogrammen treten Feldstärken zwischen 0,02 V/m und 0,03 V/m am häufigsten auf, wobei diese im Wesentlichen dem Rauschen des Messgeräts entsprechen, d.h. die Immissionen waren in überwiegender Anzahl niedriger als die Detektionsschwelle des Messgeräts. Während die niedrigen Messwerte (0,02 V/m bis 0,03 V/m) an Messpunkt 1 einen Anteil von 96,9 % aufweisen, nehmen sie an Messpunkt 2 einen Anteil von 99,5 % ein. An Messpunkt 1 treten Feldstärken von mehr als 0,03 V/m entsprechend nur noch in ca. 3,1 % der Fälle auf, an Messpunkt 2 ist dies nur in ca. 0,5 % der Fälle der Fall.

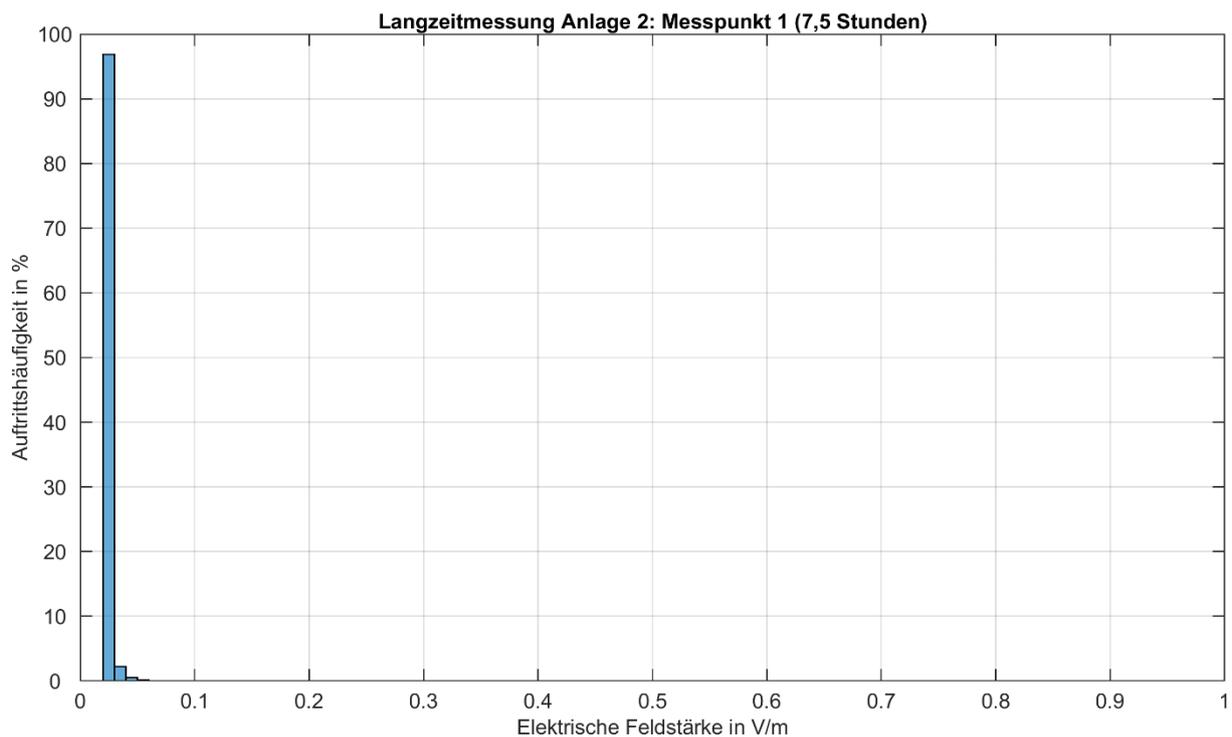


Bild 6.2.8: Anlagenstandort 2, Messpunkt 1: Auftretshäufigkeit der Messwerte der 5G-Momentanmission

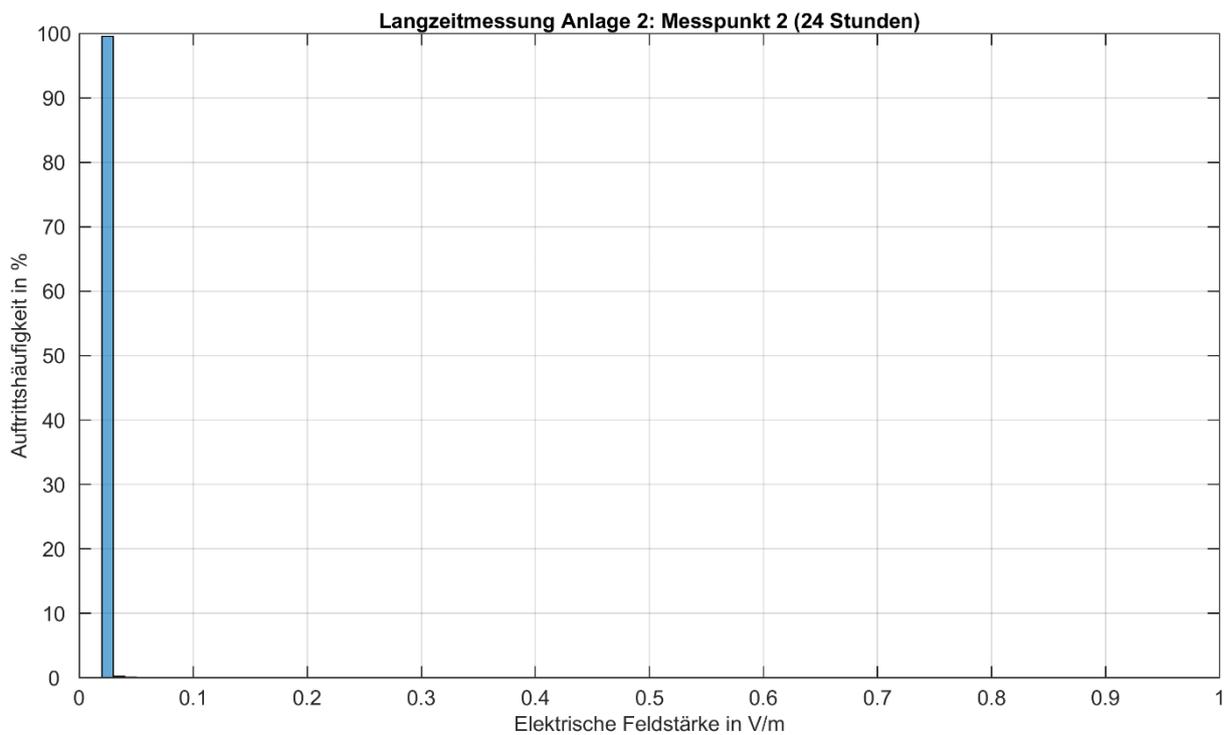


Bild 6.2.7: Anlagenstandort 2, Messpunkt 2: Auftretshäufigkeit der Messwerte der 5G-Momentanmission

Bei der Langzeitmessung des gesamten Mobilfunk-Downlinks sowie des 3,6-GHz-Bands von Vodafone an Messpunkt 2 über eine Dauer von sechs Stunden konnte beobachtet werden, dass es bei 5G im 3,6-GHz-Band nur sporadisch Aktivitäten gibt, die zu einer signifikanten Erhöhung der über sechs Minuten gemittelten Immission beitragen. In den anderen an der Anlage installierten Frequenzbändern (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz) ist hingegen durchgehend ein Grundpegel überlagert durch eine gewisse Aktivität in der Zelle vorhanden. Es zeigt sich, dass die Schwankungsbreite der mittleren Immission bei den anderen Frequenzbändern verhältnismäßig gering ist (etwa 0,02 V/m bei 700 MHz und 1,8 GHz sowie etwa 0,03 V/m bei 800 MHz, 900 MHz und 2,1 GHz), während diese beim 3,6-GHz-Band mit 0,11 V/m deutlich höher ausfällt. So tritt im 3,6-GHz-Band mit 0,14 V/m auch die höchste über sechs Minuten gemittelte Immission auf und ist damit höher, als die höchste beobachtete Momentanimmission bei der 24-h-Langzeitmessung. Offenbar wurde während der Immissionsmessung des gesamten Mobilfunk-Downlinks durch einen oder mehrere Nutzer eine höhere Auslastung generiert (höchste Momentanimmission: 0,56 V/m), als dies durch die typischen Nutzungsszenarien mit dem eigenen Endgerät der Fall war (knapp 0,12 V/m).

Im folgenden Bild sind jeweils die Histogramme für die aufgetretenen und mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 0,65 s vorliegenden *Momentanimmissionen* in den an der Anlage in Betrieb befindlichen Frequenzbändern dargestellt.

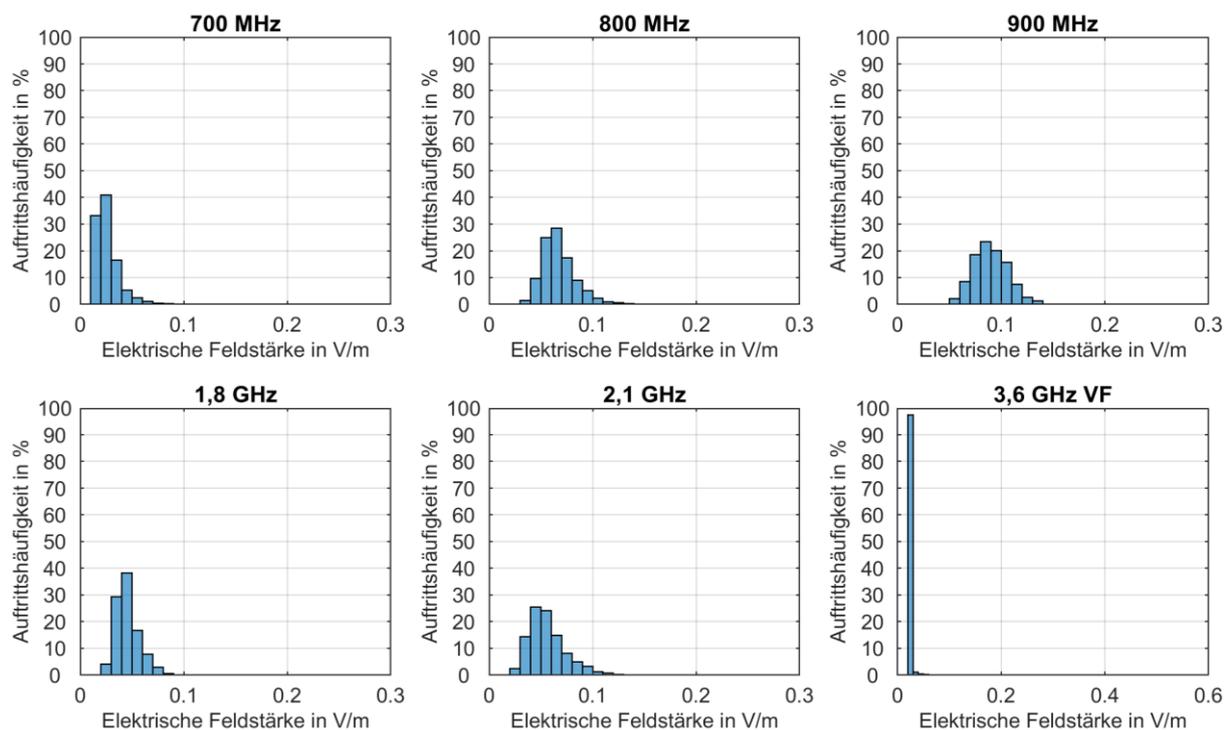


Bild 6.2.9: Anlagenstandort 2, Messpunkt 2: Auftretshäufigkeit der Messwerte der Momentanimmissionen des Mobilfunk-Downlinks

An den Histogrammen lässt sich gut ablesen, in welchen Frequenzbändern höhere oder niedrigere Immissionen auftreten. Des Weiteren ist in den Mobilfunkbändern zwischen 700 MHz und 2,1 GHz eine verhältnismäßig große Breite an Immissionshöhen zu beobachten. Während bei 700 MHz die Immissionsspanne größtenteils zwischen 0,01 V/m und 0,05 V/m liegt, spielt sie sich bei 1,8 GHz und 2,1 GHz eher im Bereich zwischen 0,03 V/m und 0,07 V/m und bei

800 MHz und 900 MHz im Bereich zwischen 0,04 V/m und 0,1 V/m ab. Im 3,6-GHz-Band hingegen liegen mehr als 97 % der Messwerte im Bereich der Rauschschwelle des Messgeräts (0,03 V/m) oder darunter.

Die dokumentierten Langzeitmessungen spiegeln die durch den derzeitigen Ausbauzustand des 5G-Netzes im 3,6-GHz-Band sowie die derzeitige Nutzersituation bedingte Immissionssituation wider. Infolge des Netzausbaus und einer zu erwartenden höheren Nutzerzahl und -dichte muss diese nicht zwingend mit der Immissionssituation in der Zukunft übereinstimmen.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen Personen und Organisationen gedankt, die einen Anteil am Gelingen des vorliegenden Vorhabens hatten. Dieser Dank gilt vor allem

- dem Bundesamt für Strahlenschutz für die Finanzierung vorliegenden Vorhabens,
- Herrn Geschwentner vom Bundesamt für Strahlenschutz für die kompetente und konstruktiv kritische Betreuung des Projektes,
- den Verantwortlichen der Firmen VIAVI, Keysight sowie Rohde & Schwarz für die kostenlose Zurverfügungstellung der codeselektiven Messgeräte,
- Herrn Walther von Rohde & Schwarz für die kostenlose Zurverfügungstellung und Inbetriebnahme des Messequipments und der Räumlichkeiten zur Durchführung der codeselektiven Labormessungen,
- Frau Hollnsteiner, Herrn Reese, Herrn Unger, Frau Pohl sowie Herrn Harksel von der Deutschen Telekom Technik GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der 5G-Immissionsmessungen an Telekom-Basisstationen,
- Herrn Lumma, Herrn Schilling und Herrn Brämer von der Vodafone GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der 5G-Immissionsmessungen an Vodafone-Basisstationen,
- Herrn Schönborn, Herrn Heideck und Herrn Lichtenberger von der Telefónica Germany GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der 5G-Immissionsmessungen an Telefónica-Basisstationen,
- Herrn Bartaschewitsch, den Betreibern des Strandbads Süd des Unterbacher Sees, den Betreibern des Modellbahnclubs Düsseldorf und insbesondere dem Institut für Kommunikationssysteme (IKS) der RWTH Aachen University für die Bereitstellung der Räumlichkeiten zur Durchführung der Langzeitimmissionsmessungen und die sonstige Unterstützung zur Umsetzung des Vorhabens.

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)
AVG	Average (Mittelwert)
BPSK	Binary Phase Shift Keying (binäre Phasenumtastung)
BWP	Bandwidth Part
CA	Carrier Aggregation (Bündelung von Frequenzträgern)
CoMP	Coordinated Multi-Point (Versorgung durch mehrere Basisstationen)
CP	Cyclic Prefix (zyklischer Präfix)
CRS	Cell-specific Reference Signal (Zellspezifisches Referenzsignal)
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DM-RS	Demodulation Reference Signal
DSS	Dynamic Shared Spectrum (Koexistenz von 4G (LTE) und 5G) auf einem Frequenzkanal mit dynamischer Ressourcenaufteilung)
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power (äquivalente isotrope Strahlungsleistung)
EPRE	Energy per Resource Element
FDD	Frequency Division Duplex (Frequenzduplexverfahren)
FR	Frequency Range
FTP	File Transfer Protocol (Dateiübertragungsprotokoll)

HF	Hochfrequenz
HF-EMF	Hochfrequente elektromagnetische Felder
ISI	Intersymbolinterferenz
IQ	Inphase- und Quadraturkomponenten eines komplexen Signals
LOS	Line-of-sight (Sichtverbindung)
LTE	Long Term Evolution (4G)
MATLAB	MATrix LABoratory
MAX	Maximum
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMIMO	Massive MIMO
MP	Messpunkt
NLOS	Non-line-of-sight (keine Sichtverbindung)
NR	New Radio (Synonym für die 5G-Funkschnittstelle)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTA	Over-the-Air
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCI	Physical Cell ID
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PMI	Precoding Matrix Indicator
PRB	Physical Resource Block
PSS	Primary Synchronization Channel
PT-RS	Phase-Tracking Reference Signal

PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Quadraturamplitudenmodulation)
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Quadraturphasenumtastung)
RB	Resource Block
RBW	Resolution Bandwidth (Auflösebandbreite bei der Spektrumanalyse)
RE	Resource Element
RIB	Radiated Interface Boundary
RMS	Root Mean Square (quadratischer Mittelwert/Effektivwert)
RSRP	Reference Signal Received Power
SCS	Subcarrier Spacing (Trägerabstand bei OFDM)
SRS	Sounding Reference Signal
SS	Synchronization Signal
SSB	Synchronization Signal Block (abgekürzte Form von SS/PBCH)
SSS	Secondary Synchronization Signal
TAB	Transceiver Array Boundary
TDD	Time Division Duplex
TRXUA	Transceiver Unit Array
TXU	Transmitter Unit
UE	User Equipment
VBW	Video Bandwidth (Videobandbreite)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [Anr 20a] **Anritsu**, *“Field Master Pro™ MS2090A”*, Product Brochure, 11410-01103, Rev. H, 2020-01.
- [Anr 20b] **Anritsu**, *“Field Master Pro™ MS2090A”*, User Guide, 10580-00444, Rev. D, Januar 2020.
- [AT 19] **Agentschap Telecom**, *„Veldsterktemetingen op 5G-testlocaties“*, Agentschap Telecom, 23. September 2019 (in Niederländisch).
- [AVB+ 19] **Sam Aerts, Leen Verloock, Matthias van den Bossche, Davide Colombi, Luc Martens, Christer Törnevik und Wout Joseph**, *“In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies”*, in IEEE Access, vol. 7, S. 184658-184667, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961225
- [BAF+ 18] **Peter von Butovitsch, David Astely, Anders Furuskär, Bo Göransson, Billy Hogan, Jonas Karlsson, Erik Larsson**, *Ericsson white paper “Advanced antenna system for 5G networks”*, Ericsson, November 2018.
- [Bal 05] **Constantine A. Balanis**, *“Antenna Theory – Analysis and Design”*, Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [Bau 21] **Janette Baumann**, *„INSIDE VODAFONE : NETZ – Vodafone übertrifft Ausbauziele: 5G-Netz für mehr als 20 Millionen Menschen verfügbar“*, 17.02.2021, Internetauftritt von Vodafone Germany, <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/vodafone-uebertrifft-ausbauziele-5g-netz-fuer-mehr-als-20-millionen-menschen-verfuegbar/#/>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021
- [BKS+ 19] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Sascha Schießl, Dirk Heberling und Matthias Hein**, *“Challenges to assess Human Exposure to 5G massive MIMO Base Stations”*, The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM) , Seite 244-248, Montpellier (Frankreich), 2019.
- [BKH+ 20] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Dirk Heberling und Matthias Hein**, *“A Follow-Up: Challenges for Human Exposure Assessment to 5G Massive MIMO Base Stations”*, eingereicht für: The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM), Oxford (UK), 2020.

- [BKS+ 20] **Christian Bornkessel, Thomas Kopacz, Sascha Schießl, Dirk Heberling und Matthias Hein**, „*Konzepte für zuverlässige Immissionsmessungen an 5G massive MIMO-Basisstationen*“, Elektromagnetische Verträglichkeit emv, 2020.
- [BNetzA 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**, *Übersicht Mobilfunkspektrum nach der Auktion, „Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz“*, Stand: 20.01.2020, [online verfügbar](#), zuletzt aufgerufen am 12.03.2020.
- [BS 05] **Chr. Bornkessel, M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren, Kamp-Lintfort, (2005).
- [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).
- [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, Teilbericht III: Analyse der Immissionsverteilung, Kamp-Lintfort, (2006).
- [BSW 09] **Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek**, „*Bestimmung der Exposition durch WiMAX - Entwicklung geeigneter Verfahren*“, Zwischenbericht erstellt für das Bundesamt für Strahlenschutz, 2009.

- [BSW 12] **Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek**, „Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken“, Zwischenbericht „Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik“, Studie für das Bundesamt für Strahlenschutz, IMST GmbH, 23.01.2012.
- [BSW 13] **Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek**, "Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken", Abschlussbericht, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, IMST GmbH, 09.01.2013.
- [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 19] **Telekom Netz**, „Eine Frage: Was ist eine 5G Antenne?“, <https://youtu.be/neSNVBiPloY>, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [DT 20] **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.
- [EN 50492] **EN 50492 (DIN VDE 0848-492)**, "Basic Standard for the In-Situ Measurement of Electromagnetic Field Strength related to Human Exposure in the Vicinity of Base Stations". CENELEC Standard, (09/2013).
- [Eri 18] **Ericsson**, „5G och EMF“, Präsentation vom 12.12.2018 von Ericsson, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/e146672d4c0e4d06bba137946d87ba14/ericssons-presentation.pdf>, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.
- [Eri 20] **Ericsson**, „Ericsson Radio System reaches new heights“, Internetauftritt von Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/networks/videos/ericsson-radio-system-reaches-new-heights>, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [FCG+ 20] **Daniele Franci, Stefano Coltellacci, Enrico Grillo, Settimio Pavoncello, Tommaso Aureli, Rossana Cintoli und Marco Donald Migliore**, "An Experimental Investigation on the Impact of Duplexing and Beamforming Techniques in Field Measurements of 5G Signals", Electronics 2020, 9, 223, 2020. doi.org/10.3390/electronics9020223
- [Han 20] **Handelsblatt**, „5G-Technologie von Huawei: Netzbetreiber schaffen Fakten“, Artikel aus dem Technologieressort des Handelsblatts vom 06.02.2020, <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/mobilfunk-5g-technologie-von-huawei-netzbetreiber-schaffen-fakten/25509824.html?ticket=ST-3438980-Skqob6PfxCpdFXqYc51h-ap4>, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.

- [Hua 18] **Huawei**, “*Huawei Launches Full Range of 5G End-to-End Product Solutions*”, Pressemitteilung zum Mobile World Congress (MWC), Huawei Technologies Co., Ltd., 26.02.2018, <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2018/2/Huawei-Launches-Full-Range-of-5G-End-to-End-Product-Solutions>, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [Hua 19] **Huawei**, “*5G Antenna White Paper: New 5G, New Antenna*”, Huawei Technologies Co., Ltd., 2019.
- [Hua 20] **Huawei**, “*Massive MIMO Application Scenarios*”, Huawei Enterprise Support Community, Huawei Technologies Co., Ltd., <https://forum.huawei.com/enterprise/en/massive-mimo-application-scenarios/thread/602698-100305?page=1&authorid=3532891>, 21.02.2020, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [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.
- [Ign 19] **Ignes**, “*Les matinales du Smart Home*”, Präsentation zum Runden Tisch, ignes – Industries du Génie Numérique, Energétique et Sécuritaire, http://www.ignes.fr/iso_album/281119_matinale_ignes.pdf, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [JLU+ 19] **Sangbong Jeon, Ae-kyoung Lee, Jungsun Um und Hyung-Do Choi**, “*Estimation of EMF for base stations using signal decoding technique*”, 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), New Delhi, India, S. 1-2, 2019. doi: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738326
- [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+ 21] **Th. Kopacz, Chr. Bornkessel, M. Wuschek, S. Schießl, A.-M. Schiffarth und Dirk Heberling**, „*Influence of Beamforming on Local Exposure to Massive MIMO 5G Base Stations*“, The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM), Seite 9-13, Gent (Belgien), 2021.
- [Kel 09] **Helmut Keller**, „Principles of the Selective Radiation Meter SRM-3006“, Application Note, Narda Safety Test Solutions GmbH, 22.12.2009.
- [Kel 11] **Helmut Keller**, „*Bewertung rauschartiger Impulse moderner Kommunikationssysteme*“, NIR 2011, 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., S. 209-223, 2011.
- [Kel 19] **Helmut Keller**, „*On The Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations*“, Health Physics, vol. 117, no. 5, S. 541-545, 2019. doi: 10.1097/HP.0000000000001089.
- [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.
- [Key 19] **Keysight Technologies**, „*FieldFox Handheld Analyzers*“, Data Sheet, 5992-3702EN, and Technical Overview, 5992-3703EN, 2019.
- [LAI 14] **Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz**, „*Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder*“, mit Beschluss der 54. Amtschefkonferenz: in der Fassung des Beschlusses der 128. Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz am 17. und 18. September 2014 in Landshut, 2014.
- [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 12] **Technical Report**, „*Measurement Method for LTE Base Stations*“, METAS-Report Nr. 2012-218-808, Eidgenössisches Institut für Metrologie (METAS), Bern, 05/2012.
- [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.

- [Nok 19] **Nokia**, „*Mobile Network Evolution to 5G*“, Präsentation zur Veranstaltung „Vaasa goes 5G“ am 17.05.2019, Nokia Mobile Networks, https://www.uni-vaasa.fi/fi/sites/vaasa5g/mobile_network_evolution_to_5g_17052019_nokia_keskinen.pdf, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [Pyt 20] **F. Pythoud (METAS)**, Schriftliche Antwort auf Rückfragen zur Verwendung von Summen-Antennendiagrammen, 26.03.2020.
- [R1-163885] **TDoc R1-163885**, „*WF on antenna modelling and related parameters for NR evaluations*“, Agenda Item 8.1.3, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84bis, Busan, Korea, 11th – 15th April 2016.
- [R1-165179] **TDoc R1-165179**, „*Multi-Antenna Technology for NR Interface*“, Agenda Item 7.1.6, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #85, Nanjing, China, 23rd – 27th May 2016.
- [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.
- [Rau 00] **Christoph Rauscher**, „*Grundlagen der Spektrumanalyse*“, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [Rew 19] **Rewheel**, „*Rolling out 5G fibre-through-the-air under the exceptionally strict Swiss EMF radiation limits*“, Rewheel public research note, Rewheel, Dezember 2019, http://research.rewheel.fi/downloads/Rewheel_Sunrise_5G_fiber_through_the_air_EMF_20122019%20PUBLIC.pdf, zuletzt aufgerufen am 05.03.2020.
- [RS 19] **Rohde & Schwarz**, „*R&S®TSME6 Ultracompact Drive Test Scanner*“, Data Sheet, PD 3607 6873.12, Version 07.00, Juli 2019.
- [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*“, The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM) , Oxford (UK), 2020.
- [Str 21] **Florian Streicher**, „*5G für 30 Prozent der Bevölkerung 2021 – 5G-Standalone in Vorbereitung: Telefónica Deutschland / O₂ startet 5G-Ausbauturbo*“, Internetauftritt von Telefónica Deutschland, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/03/5g-fuer-30-prozent-der-bevoelkerung-2021-5g-standalone-in-vorbereitung-telefonica-deutschland-o2-startet-5g-ausbauturbo.html>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2021.

- [Str 21a] **Florian Streicher**, „*Meilenstein im 5G-Netzausbau: Telefónica/O2 nimmt 1.500. 5G-Antenne auf 3,6 GHz ins Netz*“, 11.06.2021, Internetauftritt von Telefónica Deutschland, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/06/meilenstein-im-5g-netzausbau-telefonica-o2-nimmt-1500-5g-antenne-auf-36-ghz-ins-netz.html>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2021.
- [Tel 19] **TelecomGuru**, „*Ericsson & Vodafone Bring 5G to Germany*“, Artikel von TelecomGuru vom 06.08.2019, <https://telecomguru.co.in/4-generation-lte/ericsson-vodafone-bring-5g-to-germany/5705#>, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.
- [TF 17] **Telefónica Germany**, „*TechCity Munich erreicht nächsten Meilenstein auf dem Weg zu 5G: Telefónica Germany startet weltweit ersten 3,5 GHz Massive MIMO Feldtest*“, Artikel auf dem Internetauftritt von Telefónica Germany vom 27.02.2017, https://www.telefonica.de/news/corporate/2017/02/techcity-munich-erreicht-naechsten-meilenstein-auf-dem-weg-zu-5g-telefonica-germany-startet-weltweit-ersten-35-ghz-massive-mimo-feldtest.html?tree_id=6615, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.
- [TF 18] **Telefónica Germany**, „*Nokia und Telefónica Deutschland starten gemeinsames „Early 5G Innovation Cluster“ in Berlin: Neue Funkzellen ermöglichen die Entwicklung und Erprobung neuer 5G-Dienste*“, Artikel auf dem Internetauftritt von Telefónica Germany vom 19.12.2018, https://www.telefonica.de/news/corporate/2018/12/nokia-und-telefonica-deutschland-starten-gemeinsames-early-5g-innovation-cluster-in-berlin-neue-funkzellen-ermoen-lichen-die-entwicklung-und-erprobung-neuer-5g-dienste.html?pk_campaign=related_news, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.
- [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.
- [TR 21.915] **ETSI TR 121 915**, „*Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G; Release description; Release 15 (3GPP TR 21.915 version 15.0.0 Release 15)*“, 2019.
- [TR 25.951] **3GPP TS 25.951**, „*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; FDD Base Station Classification (Release 2000)*“, V0.0.1, 2000.
- [TR 36.873] **3GPP TR 36.873**, „*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on 3D channel model for LTE (Release 12)*“, V12.6.0, 2017.

- [TR 36.897] **3GPP TR 36.897**, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on elevation beamforming / Full-Dimension (FD) Multiple Input Multiple Output (MIMO) for LTE (Release 13)”, V13.0.0, 2015.
- [TR 38.802] **3GPP TR 38.802**, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio (NR) Access Technology; Physical Layer Aspects (Release 14)”, 2017.
- [TS 38.101-1] **ETSI TS 138 101-1**, “5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.8.2 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.104] **ETSI TS 138 104**, “5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.8.0 Release 15)”, 2020.
- [TS 38.141-1] **3GPP TS 38.141-1**, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing (Release 16)”, V16.1.0, 2019.
- [TS 38.141-2] **ETSI TS 138 141-2**, “5G; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing (3GPP TS 38.141-2 version 15.4.0 Release 15)”, 2020.
- [TS 38.211] **ETSI TS 138 211**, “5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.3.0 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.212] **ETSI TS 138 212**, “5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.3.0 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.213] **ETSI TS 138 213**, “5G; NR; Physical layer procedures for control, Version 15.7.0 Release 15”, 2019.
- [TS 38.214] **ETSI TS 138 214**, “5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.3.0 Release 15)”, 2018.
- [TS 38.300] **ETSI TS 138 300**, “5G; NR; Overall description; Stage-2 (3GPP TS 38.300 version 15.8.0 Release 15)”, 2020,
- [TS 38.331] **ETSI TS 138 331**, “5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (3GPP TS 38.331 version 15.8.0 Release 15)”, 2020.
- [VF 20] **Vodafone**, „Vodafone Netzabdeckung“, Internetauftritt von Vodafone, <https://www.vodafone.de/hilfe/netzabdeckung.html>, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.

- [VF 20a] **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.
- [VF 21] **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.
- [Via 18a] **VIAVI Solutions**, „*VIAVI CellAdvisor 5G*“, Product Brief, ca5g-pb-nsd-nse-ae 30187559 900 1118, 2018.
- [Via 18b] **VIAVI Solutions**, „*VIAVI CellAdvisor 5G*“, 5G analyzer CA5000 Specifications, Data Sheet, ca5g-ds-nsd-nse-ae 30187558 900 1118, 2018.
- [Wel 19] **WELT**, „*Telekom und Vodafone schaffen Tatsachen. Mit Huawei*“, Artikel des Wirtschaftsressorts der WELT vom 14.11.2019, <https://www.welt.de/wirtschaft/article203473184/Vodafone-und-Telekom-starten-5G-Ausbau-mit-Huawei-Technik.html>, zuletzt aufgerufen am 06.03.2020.
- [WKI 19] **Rob Werner, Phill Knipe und Steve Iskra**, „*A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna*“, in IEEE Access, vol. 7, S. 170682-170689, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2955715
- [Wus 19] **Matthias Wuschek**, „*Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Stations and Broadcast Transmitter Sites*“, Practical Guide, Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, 2019.
- [WW 19] **M. Wood und D. Wills**, „*Telstra’s EME assessment and preparation for 5G in Australia*“, The Joint Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM 2019), 2019.

Anhang

A Beschreibung der Verfahren zu Kapitel 3

Vorliegender Anhang stellt eine Beschreibung der in Kapitel 3 vorgeschlagenen und weiterentwickelten Mess- und Hochrechnungsverfahren zur Immissionsbestimmung an 5G-Basisstationen dar. Der Anwendungsbereich der vorgestellten Verfahren liegt schwerpunktmäßig auf 5G-Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen im 3,6-GHz-Band (TDD). Auf Unterschiede zu Anlagen ohne Massive-MIMO-Antennen bzw. im FDD-Betrieb wird am Ende des Anhangs eingegangen.

Im Folgenden werden Verfahren zur Bestimmung der Momentanimmission (Teilkapitel A.1) sowie der Maximalimmission (Teilkapitel A.2 und A.3) beschrieben. Dabei wird jeweils zwischen der Messvorbereitung, der Messdurchführung und der Auswertung differenziert. Die jeweils vom Netzbetreiber zu liefernden bzw. die vom Messenden selbst zu bestimmenden Parameter und Daten werden aufgelistet sowie das Vorgehen bei Messung und Auswertung erläutert.

Geeignete Einstellparameter zur Bestimmung der Momentanimmission werden nur für ein Messgerät (SRM-3006 von Narda) vorgeschlagen. Auf die Betrachtung von Laboranalysatoren wird hier verzichtet, da bei vielen derartigen Produkten nur einachsige Antennen verwendet werden können, die Immission am Messpunkt aber isotrop zu erfassen ist, was nur mit automatisch umschaltbaren dreiachsigen Antennensystemen sinnvoll durchführbar ist.

Bei der Bestimmung der Maximalimmission kann bei Anwendung der "Schwenkmethode" durchaus auch eine einachsige Antenne eingesetzt werden. Daher werden Messeinstellungen sowohl für das SRM-3006 als auch für Laborspektrumanalysatoren (am Beispiel des FSW von Rohde & Schwarz) vorgeschlagen. Möchte man die Maximalimmission durch Messung an einer größeren Anzahl an Punkten bestimmen ("Punktrastermethode"), sind hingegen Messgeräte mit dreiachsigen Antennen deutlich besser geeignet.

A.1 Bestimmung der Momentanimmission

Mithilfe der Momentanimmission können Aussagen über typischerweise auftretende Immissionen getroffen werden. Aufgrund der sich schnell ändernden Immissionshöhen durch Lastschwankungen und insbesondere durch Beamforming wird die Momentanimmission gemittelt über ein verhältnismäßig kurzes Zeitintervall bestimmt und entspricht somit nicht dem 6-Minuten-Mittelwert. Momentanimmissionen können beispielsweise an einem Punkt über längere Zeiträume wiederholt gemessen und abgespeichert werden (z.B. alle 10 s), wodurch eine Dokumentation der zeitlichen Schwankung der Hochfrequenzimmission möglich wird.

A.1.1 Vorbereitung der Messungen

Sofern Messungen mit zufälliger Auswahl der Messpunkte durchgeführt oder wenn die Punkte unabhängig von Ihrer Lage bezüglich der Sendeantennen festgelegt werden, sind vorbereitend für die Messungen keine speziellen Daten notwendig.

Für den Fall, dass die Messpunkte systematisch ausgewählt werden sollen, d.h. dass sie explizit in bestimmten Bereichen des Antennendiagramms (z.B. in der Hauptkeule oder in Nebenkeulen) der Basisstationsantenne liegen sollen, werden vom Netzbetreiber vorbereitend folgende Angaben zur zu untersuchenden Basisstationsantenne benötigt:

- Geokoordinaten des Antennenstandortes (evtl. individuell für jeden Antennenträger)
- Montagehöhe der Antennen über Grund (Unterkante)
- Horizontale Ausrichtung (Hauptstrahlrichtung) der zu untersuchenden Sektorantennen
- Antennendiagramm für den jeweils eingestellten elektrischen Downtilt (Einhüllende der Traffic Beams)
- Eventuell zusätzlich vorhandener mechanischer Downtilt der Antennen

A.1.2 Messdurchführung

A.1.2.1 Benötigte Anlagendaten

Zur Durchführung der Messungen werden vom Netzbetreiber folgende Angaben für die zu untersuchenden Basisstationen benötigt:

- Mittenfrequenz- und Bandbreite des 5G-Kanals (kann prinzipiell auch vor Ort messtechnisch bestimmt werden)
- Eingestelltes Subcarrier Spacing SCS für SSB und PDSCH (für den Fall, dass mehrere Bandwidth Parts verwendet werden, in denen unterschiedliche SCS eingestellt sind, ist für die Messeinstellungen im Sinne einer konservativen Abschätzung eine Verwendung des größten SCS anzunehmen)

A.1.2.2 Messeinstellungen

Nachfolgende Tabelle zeigt die empfohlenen Messeinstellungen für das SRM-3006 zur Messung der Momentanimmission eines 5G-Kanals. Die Messungen sind in der Betriebsart „Safety Evaluation“ durchzuführen. Für die hier angegebenen Werte wurde ein Subcarrier Spacing (SCS) von 30 kHz angenommen. Für den Fall, dass das SCS kleiner ist, wird aufgrund der längeren Symboldauer auch die einzustellende RBW im gleichen Maß kleiner. Für den Fall, dass das SCS größer ist, wird die RBW um den entsprechenden Faktor größer. Die Mittelung des rauschartigen Pulsdachs zur Ermittlung eines RMS-Werts erfolgt automatisch durch die eingestellte kleine Bandbreite des Analysefilters (Auflösebandbreite RBW).

Tab. A.1: Messeinstellungen für das Narda SRM-3006 zur Messung der 5G-Momentanimmission.
¹ Diese Angabe bezieht sich auf ein Subcarrier Spacing (SCS) von 30 kHz.

Parameter	SRM-3006
Betriebsart	Safety Evaluation
Frequenzbereich	Anfangs- und Endfrequenz des 5G-Kanals (einstellbar über eine „Service Table“)
Auflösebandbreite RBW	20 kHz ¹
Result Type	<u>Act</u> (aktueller Wert des letzten Messdurchlaufs), falls nur ein Messwert benötigt wird, z.B. bei Stativmessungen

	<p>oder</p> <p><u>Avg</u> (Mittelwert über alle Messdurchläufe), falls eine räumliche Mittelung durch z.B. Schwenken der Messantenne erfolgen soll.</p>
--	---

A.1.2.3 Messantenne und räumliche Mittelung

Zur messtechnischen Bestimmung der Momentanimmission ist eine dreiaxige Antenne mit automatischer Umschaltung zwischen den Antennenachsen zu verwenden. Da die Messung mit einer schmalen Auflösungsbreite erfolgt, ist jeder Messwert bereits korrekt zeitlich gemittelt. Sofern die Messung an einem fixen Punkt (Stativmessung) erfolgt, kann daher die Anzeige „Act“ verwendet werden.

Mithilfe eines halbautomatischen Modus ("Spatial Averaging, discrete") können jeweils dreiaxige Einzelmessungen an einem Punktraster durchgeführt und am Ende automatisch das leistungsbezogene Mittel über alle Messpunkte bestimmt werden. Hierfür geeignet ist beispielsweise die Rastergeometrie nach [EN 50492] bzw. [IEC 62232] auf drei unterschiedlichen Höhen (1,1 m, 1,5 m und 1,7 m über dem Boden). Die Messung an den drei Punkten sollte innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit (z.B. 10 Sekunden) durchgeführt werden, damit zeitliche Schwankungen der Auslastung einen möglichst geringen Einfluss auf die Messergebnisse ausüben.

Eine Alternative zur diskreten Messung an mehreren vordefinierten Punkten stellt die Messung während einer kontinuierlichen Bewegung der Messantenne im Messvolumen wie bereits in [BSW 06] vorgestellt oder in Anlehnung an [EN 50492] bzw. [IEC 62232] entlang einer vertikalen Linie (von 1,1 bis 1,7 Meter über dem Boden) dar. Das SRM-3006 unterstützt eine derartige Strategie mit einem halbautomatischen Modus ("Spatial Averaging, continuous"). Die Messung im Raumvolumen sollte dabei wiederum innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit (z.B. 10 Sekunden) durchgeführt werden, damit zeitliche Schwankungen der Auslastung einen möglichst geringen Einfluss auf die Messergebnisse ausüben.

A.1.3 Auswertung

Zur Auswertung der Messung werden keine weiteren Angaben benötigt.

A.2 Bestimmung der Maximalimmission durch Hochrechnung

Ziel ist es, mithilfe des Messverfahrens ohne Eingriff in den Wirkbetrieb der Basisstation eine Aussage über die am Messpunkt vorhandene Maximalimmission treffen zu können. Dies erfolgt durch Extrapolation auf Basis der Immission der in den Broadcast Beams ausgesendeten SSB-Signalen. Diese kann 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) bestimmt. Bei Beamforming-Antennen im 3,6-GHz-Band können ein bis acht Broadcast Beams pro SSB-Periode abgestrahlt werden. Bei mehr als einem Beam muss somit die höchste Immission, d.h. die des am Immissionsort dominierenden Broadcast Beams für die Hochrechnung herangezogen werden.

Mit einer derartigen Messung und anschließender Hochrechnung kann beispielsweise die Einhaltung von vorgegebenen Grenzwerten an einem Messort überprüft werden.

A.2.1 Vorbereitung der Messungen

Sofern Messungen mit zufälliger Auswahl der Messpunkte durchgeführt oder wenn die Punkte unabhängig von Ihrer Lage bezüglich der Sendeantennen festgelegt werden, sind vorbereitend für die Messungen keine speziellen Daten nötig.

Für den Fall, dass die Messpunkte systematisch ausgewählt werden sollen, d.h. dass sie explizit in bestimmten Bereichen der abgestrahlten Broadcast Beams und/oder Traffic Beams liegen sollen (z.B. in der Hauptkeule oder in Nebenkeulen), werden vom Netzbetreiber vorbereitend folgende Angaben zur zu untersuchenden Basisstationsantenne benötigt:

- Geokoordinaten des Antennenstandortes (evtl. individuell für jeden Antennenträger)
- Montagehöhe der Antennen über Grund (Unterkante)
- Horizontale Ausrichtung (Hauptstrahlrichtung) des zu untersuchenden Sektors
- Antennendiagramme für den eingestellten elektrischen Downtilt (je nach Bedarf die Einhüllende von Broadcast und/oder Traffic Beams)
- Mechanischer Downtilt

A.2.2 Messdurchführung

A.2.2.1 Benötigte Anlagendaten

Zur Durchführung der Messungen werden vom Netzbetreiber folgende Angaben zu den zu untersuchenden Basisstationen benötigt:

- Mittenfrequenz des SSB (für frequenzselektive Messungen und für codeselektive Messgeräte ohne automatische SSB-Suche)
- Eingestelltes Subcarrier Spacing für den SSB

A.2.2.2 Vom Messpersonal zu bestimmende Informationen

Bei der Durchführung der Messungen sollten idealerweise die Geokoordinaten jedes Messpunktes bestimmt werden, da diese zur Bestimmung des Antennenkorrekturfaktors nötig sind. Zusätzlich bzw. alternativ können bei Messpunkten mit Sicht zur Basisstationsantenne Horizontal- und Vertikalwinkel zwischen Antenne und Messpunkt ermittelt werden.

A.2.2.3 Messeinstellungen

Generell ist bei isotropen Feldstärkemessungen, bei denen die drei Achsen des Feldes nacheinander gemessen werden, sicherzustellen, dass die Sweep-Dauer mindestens so hoch ist, dass während der Messzeit einer Achse sicher ein SSB Burst Set (d.h. bis zu acht SSB-Beams) komplett erfasst wird, um eine Unterschätzung der Immission zu vermeiden.

Eine *frequenzselektive Messung* der SSB-Immission ist nur dann verlässlich anwendbar, wenn ausgeschlossen werden kann, dass das vom SSB verwendete Spektrum zeitweise von anderen Signalen (z.B. Traffic im Downlink oder Uplink) überdeckt wird. Zur Durchführung ist am

Narda SRM-3006 die Betriebsart „Level-Recorder“ zu verwenden, welche sich am besten zur Messung pulsartiger Signale wie den SSB eignet. Nachfolgende Tabelle zeigt die empfohlenen Messeinstellungen für das SRM-3006 sowie einen Laborspektrumanalysator (am Beispiel des Rohde & Schwarz FSW) zur frequenzselektiven Messung der SSB-Immission. Hierbei wird im SSB ein Subcarrier Spacing von 30 kHz angenommen. Während die zeitliche RMS-Glättung des rauschartigen SSB-Pulsdaches beim SRM-3006 durch die kleine Bandbreite des Videofilters (VBW) erfolgt, wird die Glättung beim Laborspektrumanalysator mittels des eingeschalteten RMS-Detektors und einer angepassten Verweildauer pro Sweep-Point (Horizontalpixel) sichergestellt. Somit ergeben sich beim Laborspektrumanalysator zwei Freiheitsgrade (Sweep-Dauer und Anzahl der Sweep-Points). Daher sind die nachfolgenden Werte für den Laborspektrumanalysator beispielhaft als mögliche Einstellparameter zu verstehen. Bei anderen Analysatoren können sich andere optimale Einstellwerte ergeben.

Tab. A.2: Messeinstellungen für SRM-3006 bzw. einen Laborspektrumanalysator zur frequenzselektiven Messung der SSB-Immission, welche als Basis für eine Hochrechnung auf Maximalimmission verwendet werden kann.

¹ Diese Angaben beziehen sich auf ein Subcarrier Spacing (SCS) von 30 kHz im SSB.

Parameter	SRM-3006	Laborspektrumanalysator (FSW)	
Betriebsart	Level Recorder	Zero Span (empfohlen)	Spectrum
Mittenfrequenz	Mittenfrequenz des SSB		
Auflösebandbreite RBW	3,2 MHz ¹	3 MHz ¹	3 MHz ¹
Result Type/Trace	Peak/Max	Maximum	Maximum
Mittelwertbildung ¹	Videofilter mit der Bandbreite VBW = 4 kHz ¹	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 35,8 ms ¹ Sweep-Points: 501 ¹	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 71,5 ms ¹ Sweep-Points: 1001 ¹

Die mit der jeweiligen Auflösebandbreite RBW gemessene SSB-Immission $E_{SSB,RBW}$ wird auf die spektrale Breite eines Resource Elements (RE) bezogen, die zum Subcarrier Spacing im SSB korrespondiert. Da das Auflösefilter keinem idealen Rechteckfilter entspricht muss der Messwert nicht auf die Bandbreite des Auflösefilters (RBW), sondern auf dessen äquivalente Rauschbandbreite (NBW) bezogen werden:

$$E_{SSB,RE} = E_{SSB,RBW} \cdot \sqrt{\frac{SCS}{NBW}}$$

Aufgrund des beim SRM-3006 verwendeten raised-cosine Filters, ist die äquivalente Rauschbandbreite des Auflösefilters lediglich um etwa 4 % (0,18 dB) kleiner als dessen Bandbreite [Kel 11]. Daher kann die Extrapolation in guter Näherung basierend auf der Auflösebandbreite (RBW) erfolgen. Bei Laborspektrumanalysatoren kann der Unterschiedsfaktor je nach verwendetem Filter deutlich größer ausfallen. Bei Verwendung von z.B. digitalen Gaußfiltern ist die Rauschbandbreite um etwa 25 % (1,23 dB) kleiner als die Auflösebandbreite [Rau 00].

Für *codeselektive Messungen* wird die Messung automatisch korrekt durchgeführt. Es sind lediglich die Mittenfrequenz des SSB sowie das Subcarrier Spacing SCS einzustellen bzw. sofern vorhanden eine automatische Suche nach der SSB-Mittenfrequenz durchzuführen. Des Weiteren ist bei Verwendung der Schwenkmethode der Max-Hold zu aktivieren, um die jeweils maximalen Immissionen im untersuchten Volumen zu erfassen. Im Falle einer abgestrahlten Sequenz von mehreren SSB ist das SS-Signal mit dem größten gemessenen Feldstärkewert als Basis für die Hochrechnung zu verwenden. Die gemessene Immission des SSS ($E_{SSS,RE}$) ist in der Regel bereits auf die spektrale Breite eines RE bezogen.

A.2.3 Auswertung

A.2.3.1 Vom Netzbetreiber benötigte Informationen

Zur Auswertung der Messung werden vom Netzbetreiber folgende Angaben zur zu untersuchenden Basisstation sowie ggf. für Basisstationen von Nachbarzellen benötigt:

- Geokoordinaten der Antennenstandorte (evtl. individuell für jeden Antennenträger)
- Montagehöhe der Antennen über Grund (Unterkante)
- Horizontale Ausrichtung (Hauptstrahlrichtung) der zu untersuchenden Sektorantenne sowie ggf. für relevante Sektorantennen von Nachbarzellen
- Antennendiagramme für die eingestellten elektrischen Downtilts (jeweils die Einhüllende von Broadcast und Traffic Beams)
- Mechanische Downtilts der Antennen
- Das Verhältnis zwischen maximal möglicher bzw. genehmigter Signalleistung bei Vollauslastung und der Signalleistung von SSB bzw. SSS.
- TDD-Verhältnis (kann prinzipiell auch vor Ort messtechnisch bestimmt werden)

A.2.3.2 Vom Auswertenden zu bestimmende Informationen

Zur Berechnung des vollständigen Extrapolationsfaktors (siehe Abschnitt A.2.3.3) muss für jeden Messpunkt individuell der Beamforming-Korrekturfaktor bestimmt werden. Dafür ist es notwendig, basierend auf den Geokoordinaten der Basisstationsantenne und des Messpunktes sowie ggf. mithilfe von Höheninformationen des Messpunktes folgende Informationen zu ermitteln:

- Relativer Horizontalwinkel φ zwischen Hauptsenderichtung der Basisstationsantenne und Messpunkt
- Relativer Vertikalwinkel θ zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt

Bei direkter Sichtverbindung zwischen Messpunkt und Basisstationsantenne ist es auch möglich, θ und φ durch direkte Messung (Vertikalwinkelmesser, Fernglas mit integrierter Kompassanzeige) zu ermitteln. Sollte der Messpunkt am Zellrand an der Grenze zwischen zwei oder mehreren Zellen liegen, ist davon auszugehen, dass es zu gleichwertigen Immissionsbeiträ-

gen des versorgenden Sektors sowie von Nachbarsektoren kommt. Für diesen Fall wird empfohlen die relativen Horizontal- und Vertikalwinkel zusätzlich auch für die Antennen der relevanten Nachbarsektoren zu bestimmen.

A.2.3.3 Durchführung der Extrapolation

Die Extrapolation zur Bestimmung der Maximalimmission E_{\max} lässt sich wie folgt beschreiben:

$$E_{\max} = \begin{cases} E_{\text{SSB,RE}} \cdot \text{HRF}, & \text{bei frequenzselektiver Messung} \\ E_{\text{SSS,RE}} \cdot \text{HRF}, & \text{bei codeselektiver Messung} \end{cases}$$

Der Hochrechnungsfaktor HRF besteht aus mehreren Korrekturfaktoren, die sich basierend auf den zur Verfügung gestellten bzw. selbst ermittelten Parametern wie folgt berechnen lassen:

1. Leistungskorrekturfaktor K_P zur Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen maximal möglicher bzw. genehmigter Signalleistung bei Volllastung und der Signalleistung von SSB bzw. SSS (per RE). Dieser Faktor beinhaltet somit sowohl mögliche unterschiedliche spektrale Sendeleistungen von SSB/SSS und PDSCH sowie die unterschiedlichen Signalbandbreiten beider Signale. Es wird angenommen, dass eine zusammenfassende Angabe die Datenabfrage beim Netzbetreiber erleichtert.

$$K_P = \begin{cases} \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\text{SSB,RE}}}}, & \text{bei frequenzselektiver Messung} \\ \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\text{SSS,RE}}}}, & \text{bei codeselektiver Messung} \end{cases}$$

2. TDD-Verhältnis $K_{\text{TDD}} = \sqrt{\frac{t_{\text{DL}}}{10 \text{ ms}}}$ (kleiner 1): Dies berücksichtigt den Umstand, dass der Downlink im TDD-Modus nicht zu 100% der Zeit aktiv ist. Sofern das TDD-Verhältnis in den Antragsdaten für die zugrundeliegende Standortbescheinigung nicht enthalten ist oder die Anlage ein sich adaptiv änderndes TDD-Verhältnis verwendet, sollte zur Sicherheit ein Verhältnis von TDD = 1 angenommen werden, um eine Unterbewertung der Immission zu vermeiden.

3. Beamforming-Korrekturfaktor $K_{\text{Ant}} = \sqrt{\frac{G_{\text{PDSCH}}(\varphi, \theta)}{G_{\text{SSB}}(\varphi, \theta)}}$ zur Berücksichtigung des Antennengewinnunterschieds zwischen Traffic Beams (PDSCH) und Broadcast Beams (SSB) am Messpunkt, der zur Antenne einen relativen Horizontalwinkel φ und einen relativen Elevationswinkel θ aufweist.

Nur für frequenzselektive Messungen: Für den Fall, dass die Immission des zu untersuchenden Zellsektors nicht dominierend (z.B. durch Lage am Zellrand an der Grenze zwischen zwei oder mehreren Zellen), wird empfohlen den Beamforming-Korrekturfaktor zusätzlich für alle relevanten Nachbarsektoren i zu bestimmen und für eine konservative Abschätzung das Maximum der jeweiligen Beamforming-Korrekturfaktoren zu verwenden, da bei einer frequenzselektiven Messung in der Praxis in der Regel nicht bekannt ist, aus welcher Richtung der immissionsstärkste SSB-Beitrag am Messpunkt eintrifft:

$$K_{\text{Ant}} = \max_i [K_{\text{Ant}}^i(\varphi_i, \theta_i)] = \max_i \left[\sqrt{\frac{G_{\text{PDSC}}(\varphi_i, \theta_i)}{G_{\text{SSB}}(\varphi_i, \theta_i)}} \right]$$

Der Hochrechnungsfaktor HRF ergibt sich somit zu: $HRF = K_P \cdot K_{TDD} \cdot K_{\text{Ant}}$

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass

- bei Verwendung von konventionellen passiven Basisstationsantennen ohne Beamforming (z.B. bei DSS im 1,8- bzw. 2,1-GHz-Band) der Beamforming-Korrekturfaktor K_{Ant} zu 1 wird und
- bei Anlagen, die im FDD-Modus arbeiten (ebenfalls bei DSS), das TDD-Verhältnis K_{TDD} zu 1 wird.

Damit ist das beschriebene Verfahren für alle Arten von 5G-Basisstationen anwendbar.

A.3 Bestimmung der Maximalimmission durch direkte Messung bei provozierter Maximalauslastung durch ein Endgerät

Alternativ zum Hochrechnungsverfahren, das auf der Immission des SSB basiert und ohne Eingriff in den regulären Wirkbetrieb der Basisstation auskommt, aber eine hohe Komplexität bezüglich der benötigten Anlagendaten sowie bezüglich der Messauswertung aufweist, lässt sich die Maximalimmission auch direkt messtechnisch bestimmen. Hierzu wird am Immissionsort während der Dauer der Messung der Zustand der Maximalimmission mithilfe eines in der Nähe befindlichen Endgeräts provoziert.

A.3.1 Vorbereitung der Messungen

Sofern Messungen mit zufälliger Auswahl der Messpunkte durchgeführt oder wenn die Punkte unabhängig von Ihrer Lage bezüglich der Sendeantennen festgelegt werden, sind vorbereitend für die Messungen keine speziellen Daten nötig.

Für den Fall, dass die Messpunkte systematisch ausgewählt werden sollen, d.h. dass sie explizit in bestimmten Bereichen der abgestrahlten Broadcast Beams und/oder Traffic Beams liegen sollen (z.B. in der Hauptkeule oder in Nebenkeulen), werden vom Netzbetreiber vorbereitend folgende Angaben zur zu untersuchenden Basisstationsantenne benötigt:

- Geokoordinaten des Antennenstandortes (evtl. individuell für jeden Antennenträger)
- Montagehöhe der Antennen über Grund (Unterkante)
- Horizontale Ausrichtung (Hauptstrahlrichtung) des zu untersuchenden Sektors
- Antennendiagramme für den eingestellten elektrischen Downtilt (je nach Bedarf die Einhüllende von Broadcast und/oder Traffic Beams)
- Mechanischer Downtilt

A.3.2 Messdurchführung

A.3.2.1 Benötigte Anlagendaten

Zur Durchführung der Messungen werden vom Netzbetreiber keine Angaben zu den zu untersuchenden Basisstationen benötigt.

A.3.2.2 Vom Messpersonal zu bestimmende Informationen

Bei der Durchführung der Messungen muss die maximale Signalbandbreite bestimmt werden, um eine spektrale Extrapolation durchführen zu können. Sofern das TDD-Verhältnis bei der Maximalimmission berücksichtigt werden soll, kann auch dieses vor Ort messtechnisch bestimmt werden.

A.3.2.3 Messeinstellungen

Die zeitlichen Pegelfluktuationen des 5G-Signals, die durch die digitale Modulation entstehen und einen rauschartigen Verlauf im Zeitbereich erzeugen, müssen adäquat geglättet werden, um den leistungsbezogenen (thermischen) Mittelwert der Immission zu ermitteln. Da es während der Messung zu zeitlichen Schwankungen der Immission durch eine sich ändernde Zellauslastung und einen zeitveränderlichen Übertragungskanal kommen kann, ist es wichtig die Immission höchstens über die Dauer des kürzest möglichen Pulses zu mitteln. Die Mittelungszeit darf nicht länger ausfallen, da im Falle einer Übertragung nur eines Pulses die Pause in die Mittelung einfließt, was zu einer Unterschätzung der Immission führt. Auf der anderen Seite darf die Mittelungszeit auch nicht wesentlich kürzer ausfallen, da ansonsten nur Teile des Pulses in die Mittelung einfließen, was zu einer Fehlbewertung der Immission führen kann.

Bei 5G wird die Maximalimmission im Wesentlichen durch den über die Traffic Beams abgestrahlten PDSCH dominiert. Dessen kürzeste Einheit im Zeitbereich ist *ein* OFDM-Symbol, was bei einem Subcarrier Spacing SCS von 30 kHz einer Dauer von 35,7 μ s entspricht. Die Untersuchungen im vorliegenden Projekt haben gezeigt, dass die Mittelung derart ausgelegt sein muss, dass bei Verwendung des SRM-3006 über die Dauer eines halben OFDM-Symbols gemittelt wird.

In Tab. A.3 sind die vorgeschlagenen Messeinstellungen zur Durchführung von frequenzselektiven Messungen und der spektrale Extrapolationsfaktor zur direkten Bestimmung der Maximalimmission für das SRM-3006 (Betriebsmodus „Level Recorder“) sowie für den Laborspektrumanalysator FSW (Betriebsmodi „Spectrum“ und „Zero Span“) dokumentiert. Das Verfahren ist für die Schwenkmethode zur Bestimmung des räumlichen Immissionsmaximums geeignet.

Tab. A.3: Einstellparameter zur Durchführung frequenzselektiver Messungen und spektraler Extrapolationsfaktor zur direkten Bestimmung der Maximalimmission mit dem SRM-3006 bzw. mit dem FSW.

¹ Diese Angaben beziehen sich auf ein Subcarrier Spacing (SCS) von 30 kHz.

	SRM-3006	FSW	
Betriebsart	Level Recorder	Zero Span (empfohlen)	Spectrum
Mittelfrequenz	Mittelfrequenz des Kanals		
Auflösebandbreite (RBW)	3,2 MHz ¹	3 MHz ¹	3 MHz ¹
Anzeige/Trace	Peak Max	Maximum	Maximum
Mittelwertbildung	Videofilter mit der Bandbreite VBW = 16 kHz ¹	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 17,9 ms ¹ Sweep-Points: 1001 ¹	RMS-Detektor Sweep-Dauer: 35,8 ms ¹ Sweep-Points: 2001 ¹
Spektraler Extrapolationsfaktor	$\frac{B_{Signal}}{NBW}$	$\frac{B_{Signal}}{NBW}$	

Während der Messung ist mit einem geeigneten 5G-Endgerät in der Nähe des Messpunktes ein Download durchzuführen, der eine Abstrahlung mit nahezu maximaler EIRP auf den Messpunkt provoziert. Hierzu reichen einfache Video-Streaming-Applikationen jedoch nicht aus, stattdessen sind Speed-Test über breitbandige Server zu verwenden (z.B. FAST). Durch vorherige Überprüfung der Downlink- und Uplink-Feldstärken im Zeitbereich ist sicherzustellen, dass die Uplink-Immissionen durch das Endgerät während der Messung nicht höher sind, als die Downlink-Immissionen durch die Basisstation.

Die mit der jeweiligen Auflösebandbreite RBW direkt gemessene Immission des Traffic-Signals wird auf die maximale Signalbandbreite B_{Signal} extrapoliert. Da das Auflösefilter keinem idealen Rechteckfilter entspricht, erfolgt die Extrapolation nicht auf Basis der Bandbreite des Auflösefilters (RBW), sondern auf dessen äquivalenter Rauschbandbreite (NBW). Aufgrund des beim SRM-3006 verwendeten raised-cosine Filters, ist die äquivalente Rauschbandbreite des Auflösefilters lediglich um etwa 4 % (0,18 dB) kleiner als dessen Bandbreite [Kel 11]. Daher kann die Extrapolation in guter Näherung basierend auf der Auflösebandbreite erfolgen. Bei Laborspektrumanalysatoren kann der Unterschiedsfaktor je nach verwendetem Filter deutlich größer ausfallen. Bei Verwendung von z.B. digitalen Gaußfiltern ist die Rauschbandbreite um etwa 25 % (1,23 dB) kleiner als die Auflösebandbreite [Rau 00].

A.3.3 Auswertung

A.3.3.1 Vom Netzbetreiber benötigte Informationen

Zur Auswertung der Messung werden vom Netzbetreiber je nach Extrapolation folgende Angaben zur zu untersuchenden Basisstation benötigt:

- Das Verhältnis zwischen genehmigter maximaler Signalleistung bei Volllastung und der eingestellten maximalen Signalleistung bei Volllastung

- Das TDD-Verhältnis (sofern es nicht vor Ort messtechnisch bestimmt wurde)

A.3.3.2 Vom Auswertenden zu bestimmende Informationen

Vom Auswertenden sind keine weiteren Informationen zu bestimmen.

A.3.3.3 Durchführung der Extrapolation

Die Extrapolation auf Maximalimmission E_{\max} lässt sich wie folgt beschreiben:

$$E_{\max} = E_{\text{RBW}} \cdot \text{HRF}$$

Der für die Extrapolation verwendete Hochrechnungsfaktor HRF setzt sich aus zwei Korrekturfaktoren zusammen, die sich basierend auf den zur Verfügung gestellten bzw. selbst ermittelten Parametern wie folgt berechnen lassen:

1. Bandbreitenkorrekturfaktor K_B : Die je nach Messgerät mit Auflösebandbreiten RBW von 3,2 MHz oder 3,0 MHz ermittelten Messwerte E_{RBW} werden mithilfe des Bandbreitenkorrekturfaktors auf die maximale Signalbandbreite B_{Signal} extrapoliert:

$$K_B = \sqrt{\frac{B_{\text{Signal}}}{\text{RBW}}}$$

2. Beim zweiten Korrekturfaktor wird zwischen den beiden Fällen unterscheiden, ob die Extrapolation auf die *genehmigte maximale Sendeleistung* oder auf die *zur Messzeit eingestellte maximale Sendeleistung* erfolgen soll.

- 2.1. TDD-Korrekturfaktor K_{TDD} : Sofern auf die eingestellte maximale Sendeleistung hochgerechnet werden soll, ist das TDD-Verhältnis (≤ 1) durch folgenden Korrekturfaktor zu berücksichtigen:

$$K_{\text{TDD}} = \sqrt{\text{TDD}}$$

- 2.2. Leistungskorrekturfaktor K_P : Sofern nicht auf die eingestellte, sondern auf die genehmigte maximale Sendeleistung hochgerechnet werden soll, ist folgender Korrekturfaktor anzuwenden:

$$K_P = \sqrt{\frac{P_{\text{max, genehmigt}}}{P_{\text{max, eingestellt}}}}$$

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein TDD-Verhältnis ggf. bereits in der genehmigten Sendeleistung enthalten ist.

B Abschätzung des Unterschieds zwischen der Immission bei alleiniger Aussendung des SSB im Vergleich zur Maximalauslastung

Annahmen:

- Frequenzbereich um 3,6 GHz
- Signalbandbreite $B = 88,2$ MHz, d.h. 2.940 Subcarrier
- SCS = 30 kHz
- SSB-Periode = 20 ms
- Non-Standalone-Anlage
- Es werden Immissionsorte betrachtet, die im gemeinsamen Abdeckungsbereich der Broadcast- und Traffic-Beams liegen

Daraus folgt:

14 Symbole pro Slot und 20 Slots pro 10 ms

Innerhalb von 20 ms (d.h. innerhalb der aktuell üblicherweise verwendeten SSB-Periode) ergeben sich somit $14 \cdot 20 \cdot 2 = \mathbf{560}$ Symbole

Innerhalb von 20 ms ergeben sich bei $B = 88,2$ MHz: $560 \cdot 2.940 = \mathbf{1.646.400}$ Subcarrier

Fall 1: Abstrahlung nur eines SSB pro 20 ms und Verwendung einer konventionellen Antenne

Ein SSB enthält $1 \cdot 127 + 1 \cdot 223 + 2 \cdot 240 = \mathbf{830}$ Subcarrier und wird einmal pro 20 ms abgestrahlt.

Daraus ergibt sich ein Unterschiedsfaktor zwischen Maximalleistung und SSB-Leistung von

$$\mathbf{1.646.400 / 830 = 1.984 (33 \text{ dB})}$$

Fall 2: Abstrahlung nur eines SSB pro 20 ms und Verwendung einer mMIMO-Antenne

Dies ist derzeit bei Ericsson-Anlagen der Fall. Hier muss zusätzlich eingerechnet werden, dass der Antennengewinn der Traffic-Beams etwa 7 dB größer ist, als der des (breiten) Broadcast-Beams.

Somit vergrößert sich der Unterschiedsfaktor zwischen der am Immissionsort ankommenden Maximalleistung und der SSB-Leistung gegenüber Fall 1 um 7 dB auf **40 dB**.

Fall 3: Abstrahlung einer Sequenz von acht SSB alle 20 ms und Verwendung einer mMIMO-Antenne

In diesem Fall (d.h. maximal mögliche Zahl an SSBs pro Sequenz) zeigen die Diagramme von Broadcast- und Traffic-Beam keinen nennenswerten Gewinnunterschied.

Fall 3a: Alle acht SSB erzeugen am Immissionsort die gleiche Feldstärke (unwahrscheinlicher Extremfall)

Die SSB-Leistung vergrößert sich am Immissionsort gegenüber Fall 2 um den Faktor 8. Somit ergibt sich als Unterschiedsfaktor zwischen maximaler und SSB-Immission:

$$(1.646.400) / (830 \times 8) = 248 \text{ (24 dB)}$$

Fall 3b: Nur einer der acht SSB erzeugt am Immissionsort eine nennenswerte Feldstärke, die anderen sieben SSB sind deutlich schwächer (umgekehrtes Extrem, ebenfalls unwahrscheinlich)

Dadurch verringert sich die SSB-Leistung gegenüber Fall 3a um den Faktor 8 und es ergibt sich als Unterschiedsfaktor zwischen maximaler und SSB-Immission:

$$(1.646.400) / 830 = 1.984 \text{ (33 dB)}$$

Fazit

Bei Verwendung einer konventionellen Antenne beträgt der theoretische Unterschied zwischen minimaler und maximaler Immission etwa 33 dB. Bei Verwendung einer mMIMO-Antenne kann er (je nach Konfiguration und Ausprägung der SSB-Abstrahlung) zwischen etwa 24 dB und 40 dB liegen.