



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

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 Vollauslastung.....	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 provozierte 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 Momentanimmersion liegt aufgrund der sehr niedrigen Auslastung größtenteils noch sehr nahe bei der theoretisch abgeschätzten Minimalimmersion (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 Hochfrequenzimmersionen generiert. Selbst eine typische Nutzung durch ein Endgerät am Immissionsort erzeugt Immersionen, die immer noch deutlich unter dem Maximalwert liegen. Ein Vergleich der Medianwerte von Maximal- und Momentanimmersion 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 Maximalimmersion 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 Gesamtimmersion durch GSM, LTE und LTE/5G-DSS höher aus, als die momentane und typische 5G-Immersion. An neun von zehn Immissionsorten ist auch die Momentanimmersion mindestens eines Frequenzbands von GSM, LTE oder LTE/5G-DSS höher als die momentane sowie die typische 5G-Immersion (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 Maximalimmersionen 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 Immersionen durch die Summe der Maximalimmersionen 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 Mobilfunkimmersionen dominieren). Absolut gesehen lagen an diesen zehn Punkten die maximalen 5G-Immersionen 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-Immisionsarten („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 Immision 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 Immision teilweise bis zu etwa 30 dB. Einen deutlichen Einfluss auf die Größe der Immision 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 azimuthalen 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

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

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



4. Neubeurteilung METAS Technische Berichte zu Messstrategien für 5G-NR Basisstationen aus den Erkenntnissen der BfS-RESFOR-208/22 Messkampagne

4.1 Keine Verfügbarkeit der Antennendiagramme für PDSCH und SS/PBCH:

Die für die BfS-RESFOR-208/22 Messkampagne geplanten code- und frequenzselektiven messtechnische Hochrechnungen konnten nicht ausgeführt werden wegen, Zitat Ref. [1] S. 147:

„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“.

METAS empfiehlt in Abs. 4.2 „Kommentar“ in Bezug auf die Antennenkorrekturfaktoren:

„Diese Faktoren müssen, beispielsweise in einer Datenbank, zur Verfügung stehen oder vom Antennenhersteller bereitgestellt werden“.

Offensichtlich ist diese Forderung unrealistisch, schon das BAFU hat im Nachtrag zu adaptiven Antennen vom 23. Feb. 2021 mit Abs. 3.3.5 lediglich verlangt, Zitat:

„Für Abnahmemessungen sind auch die Diagramme der Physical Broadcast Channels (PBCH) zur Verfügung zu stellen. Diese werden für die Berechnung des Beurteilungswertes (Hochrechnung auf den massgebenden Betriebszustand) benötigt“.

Weiter erschweren die METAS Messvorgaben hinsichtlich der Auswertung eines „SSB Summendiagramms“ die Ermittlung der Antennenkorrekturfaktoren.

"Summen-Antennendiagramm" bedeutet hierbei, dass aus den Einzeldiagrammen der in die Zelle abgestrahlten Beams nicht einfach das umhüllende Diagramm ermittelt wird, sondern die Gewinnwerte für alle Azimut- und Elevationswinkel der einzelnen Beams linear addiert werden.

60 **Diese SSB Summendiagramme sind von den Antennenherstellern umso weniger verfügbar, als - wie dies die BfS-RESFOR-208/22 Messkampagne belegt - nicht einmal umhüllende SS/PBCH Antennendiagramme von den Anlagenbetreibern verfügbar sind.**

4.2 Einschätzung des METAS Hochrechnungsverfahrens im BfS-RESFOR-208/22 Bericht:

Zitat, S. 69:

„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 (Hüllkurvendiagramm).“

61 *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.“*



4.3 Ausstehende Validierung der METAS Messstrategien

Zum Abschluss der Diskussion der METAS Messangaben stellen die Autoren des BfS-RESFOR Berichtes fest, Zitat S. 69:

- 62 „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“.

Ursprünglich war im Rahmen der BfS-RESFOR Messkampagne auch ein Methodenvergleich geplant, Ref. [1] s. S. 130:

„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“.

Dieser Plan musste wohl infolge der Nicht-Verfügbarkeit der SS/PBCH umhüllenden Antennendiagramme aufgegeben werden.

Eine Validierung der METAS Messstrategien ist, 3 Jahre nach deren Veröffentlichung, nach wie vor ausstehend.

4.4 Experimentelle METAS Messstrategien

Der letzte Nachtrag zu den METAS Messstrategien erfolgte mit der Veröffentlichung:

Nachtrag vom 15. Juni 2020 zum Technischen Bericht Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz [Version 2.1 20 April 2020].

Dieser formulierte für die frequenzselektive Hochrechnung experimentelle Anpassungen für den Hochrechnungsfaktor, die Halbierung der Auflösungsbandbreite auf die Hälfte der SSS-Bandbreite und eine Maximumwahl für die spektrale Extrapolation.

(Spektrale Extrapolation: die ermittelte Feldstärke ist mittels eines Faktors, der sich aus dem Quotienten der gesamten Signalbandbreite und der äquivalenten Rauschbandbreite (NBW) des gemessenen Ausschnittes ergibt, zu extrapolieren.)

Im Nachtrag wird in Abs. 4 zuerst ausgeführt:

„Diese Anpassungen sollen die Überschätzung der frequenzselektiven Methode zum Teil verhindern, sollen aber in keinem Fall zu einer Unterschätzung führen“.

- 63 **Zur Halbierung der Auflösungsbandbreite:**

Diese Vorgabe ist fachtechnisch nicht nachvollziehbar und muss als experimentell qualifiziert werden. Eine Halbierung der Messbandbreite steht auch in Widerspruch zu den Messvorgaben der BfS-RESFOR Autoren, s. Tabelle A.2 auf der Folgeseite, es ist über die ganze Bandbreite der 127 SC des SSS-Signals zu messen (127 x 30 kHz).



Messvorgaben
für die
frequenzselektive
Hochrechnung
aus dem
BfS-RESFOR
Bericht

Anhang A

Tab. A.2: Messeinstellungen für SRM-3006 bzw. einen Laborspektumanalysator 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			Laborspektumanalysator (FSW)	
	Level Recorder		Zero Span (empfohlen)	Spectrum	
Mittelfrequenz	Mittelfrequenz des SSB				
Auflösebandbreite RBW	3,2 MHz ¹	3 MHz ¹	3 MHz ¹	3 MHz ¹	
Result Type/Trace	Peak/Max	Maximum	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		

64 Kein frequenzselektiver Zugriff auf das SSS-Signal:

METAS will frequenzselektiv das SSS-Signal des SSB messen, und empfiehlt Zitat:

„Die Messungen werden im «Zero Span»-Modus vorgenommen, wobei die Sweep-Zeit so zu wählen ist, dass die Messzeit pro Wert geringer ist als die Hälfte der Dauer eines SSS-OFDM-Symbols“.

Diese Empfehlung zur Sweep-Dauer steht in Widerspruch zu der Vorgabe der BfS-RESFOR Autoren, s. obige Tabelle, die eine Sweep-Dauer für die Dauer einer OFDM-Symbolzeit vorgibt.

METAS erkennt, dass der ganze SSB Puls bestehend aus 4 OFDM-Symbolen gemessen wird und - ohne Verwendung eines externen „gated triggers“ - kein selektiver Zugriff auf das SSS-Signal besteht. Die frequenzselektive Messmethode misst den SSB Puls.

Erklärungsansatz: mit der Halbierung der Messbandbreite gemäss RZ62 wird die Überbewertung durch die zu kurze Messzeit kompensiert.

Fazit: **die frequenzselektive METAS Messstrategie ist offensichtlich fachtechnisch ungenügend.**

4.5 Überfällige Veröffentlichung eines überarbeiteten METAS Technischen Berichts zur Messung der von adaptiven Antennen abgestrahlten NIS

Aufgrund dieser Sachlage - und auch mit Verweis auf RZ62 - wird die Veröffentlichung der im zweiten Teil der „Bemerkungen“ in Abs. 4 des METAS Nachtrag vom 15. Juni 2020 angekündigten „überarbeiteten Fassung des Technischen Berichtes“ dringend, Zitat:

„Im Moment werden diese Änderungen im vorliegenden Nachtrag zum Technischen Bericht V. 2.1 (METAS-Bericht 154.1-2020-5218-1016) festgehalten. Nach erfolgreicher Erprobung in der Praxis werden sie in eine überarbeitete Fassung des Technischen Berichts des METAS einfließen“.



4.6 Forderung nach einer Messvorschrift für die direkte Immissionsmessung bei provozierter Maximalauslastung durch ein Endgerät/Lastsimulator

Die BfS-RESFOR Autoren schreiben zur Einführung der Messvorschrift, s. Anhang A.3:

*„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**“.*

Und zu den Benötigte Anlagendaten, s. A.3.2.1:

Zur Durchführung der Messungen werden vom Netzbetreiber keine Angaben zu den zu untersuchenden Basisstationen benötigt.

Die Validierung der Messmethode erfolgt in Abs. 3.5.3 und 3.5.5 des BfS Berichtes mit dem Ergebnis, s. S. 144 und Abs. 3.5.6 „Fazit“:

- 65 **„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“.**

„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“.

Anwendbarkeit des Messverfahrens beschränkt auf „ungestörte Ausbreitungsbedingungen“:
*„(...), dass das verwendete Verfahren in der Lage ist, **die bei ungestörten Ausbreitungsbedingungen theoretisch zu erwartende Maximalimmission nicht zu unterschreiten**“.*

- 66 Hinsichtlich der zukünftigen Verwendbarkeit der Messmethode wird darauf hingewiesen, dass:
„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“.

- 67 **Angesichts der unlösbaren Messaufgaben bezüglich der Verfügbarkeit und Auswertung von Antennendiagrammen auf der einen und der einfachen Anwendbarkeit verbunden mit dem Vorteil der Unabhängigkeit von den Angaben der Anlagenbetreiber auf der anderen Seite, ist die direkte Immissionsmessung vermittels provozierter Maximalauslastung das: **Abnahmemessverfahren der Wahl.****



Referenzen:

- [1] Bericht: **Bfs-RESFOR-208/22**, Zitierung: urn:nbn:de:0221-2022112435660
Projektleitung: Thomas Kopacz, M.Sc., Institut für Hochfrequenztechnik,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,
Dr. Christian Bornkessel, Technische Universität Ilmenau
Prof. Dr. Matthias Wuschek, EM-Institut GmbH, Nov. 2022.

Vorhergehende Grundlagenarbeiten zu dieser Messkampagne, Messberichte und Abklärungen
Ref. [2] bis [4]:

- [2] **Massive MIMO Antennas – Impact on Compliance Distances and Challenges for Human Exposure Assessment**, Fourth International Conference “Electromagnetic field and the future of telecommunications“, December 4th, 2019, Thomas Kopacz, M.Sc, RWTH Aachen.
- [3] **Untersuchungen zur korrekten Immissionserfassung von gepulsten Signalen mit dem SRM-3006 am Beispiel von 5G**, M. Sc. Thomas Kopacz, RWTH Aachen, Deutschland, Dr.-Ing. Christian Bornkessel, TU Ilmenau, Deutschland, Dipl.-Ing. Sascha Schießl, RWTH Aachen, Deutschland, Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling, RWTH Aachen, Deutschland, 2020.
- [4] **Konzepte für zuverlässige Immissionsmessungen an 5G massive MIMO-Basisstationen;**
Dr.- Ing. Christian Bornkessel, TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik
M. Sc. Thomas Kopacz, RWTH Aachen, Institut für Hochfrequenztechnik
Dipl.-Ing. Sascha Schießl, RWTH Aachen, Institut für Hochfrequenztechnik
Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling, RWTH Aachen / FHR Wachtberg, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil.
Matthias A. Hein, TU Ilmenau, FG HF und Mikrowellentechnik, 2020.
- [5] Ericsson massiv MIMO Handbook (EHB), 1st edition, extended version,
Teil 1: Massiv MIMO Handbook, im vorliegenden Text referenziert als: EHB-T1-xxx,
Teil 2: Massiv MIMO Handbook – Technology Primer,
Im vorliegenden Text referenziert als EHB T1-xxx oder EHB T2-xxx; xxx: steht für die
Seitennummer, EN/LZT 4/28701-FGB1010987 Uen Rev A © Ericsson AB 2022.
- [6] "On the assessment of human exposure to electromagnetic fields transmitted by 5G- NR base stations", Helmut Keller, Narda Pfullingen, Health Physics, 10. Feb. 2019
- [7] «Rethinking the Wireless Channel for OTA testing and Network Optimization by Including User Statistics: RIMP, pure-LOS, Throughput and Detection Probability»,
Per-Simon Kildal, Distinguished Lecturer of IEEE Antennas and Propagation Society.
https://www.ieice.org/publications/proceedings/summary.php?iconf=ISAP&session_number=KS&number=KS-3&year=2013

