

# 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 Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

## 1 Einleitung

Das in Aufbau befindliche 5G-Mobilfunknetz erfordert geeignete Immissionsbewertungsverfahren zur Erstellung von Standortbescheinigungen, zur Überprüfung der Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und zur Ermittlung der Immission in öffentlich zugänglichen Bereichen. Gemäß den deutschen Bestimmungen ist dabei die Immission bei maximal möglicher Anlagenauslastung maßgeblich [1]. Messverfahren für konventionelle 2G/3G/4G-Mobilfunksysteme können für 5G-Basisstationen nicht mehr angewendet werden, da das bisher abgestrahlte, zeitlich konstante Antennendiagramm bei 5G in dynamische Einzelstrahlungsrichtungen (*Beams*) für Signalisierungsdaten (*Broadcast Beams*) und Verkehrsdaten (*Traffic Beams*) aufgeteilt wird. Darüber hinaus sind zellspezifische Referenzsignale, die als Grundlage für eine Immissionsextrapolation auf die maximale Verkehrsauslastung in 4G-Systemen dienen, in 5G nicht mehr verfügbar. Insofern ergeben sich folgende Fragen im Hinblick auf die Entwicklung eines geeigneten 5G-Messverfahrens:

1. Welche Strahl-Konfiguration erzeugt die höchste Immission an einem bestimmten Messpunkt („*Worst Case*“-Konfiguration)?
2. Wie geht man mit der dynamischen Strahlschwenkung und der räumlichen Trennung von Signalisierungs- und Verkehrsdaten (*Broadcast* und *Traffic Beams*) um?
3. Welche verkehrslastunabhängigen Signale stehen für die Hochrechnung auf die maximale Auslastung der Station zur Verfügung?

Diese Fragen werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

## 2 Entwicklung eines Messkonzeptes

### 2.1 „*Worst Case*“ Konfiguration

Bei 2G/3G/4G-Basisstationen sind Signalisierung und Verkehrsdaten in einem Strahl (*Beam*) konzentriert, dessen Abstrahlverhalten sich zeitlich nicht ändert. Bei 5G *massive MIMO*-Basisstationen hingegen wird das Antennendiagramm in Signalisierungs- und Verkehrsdaten unterteilt (*Broadcast Beam* und *Traffic Beams*). Der *Broadcast Beam* sendet Steuersignale aus und wird entweder zyklisch durch mehrere Ausrichtungen geschaltet

oder ist statisch. Die *Traffic Beams* werden dynamisch auf die Endgeräte ausgerichtet, wobei je nach Anzahl der Nutzer oder Ausbreitungsbedingungen mehrere räumlich getrennte *Beams* gebildet werden können.

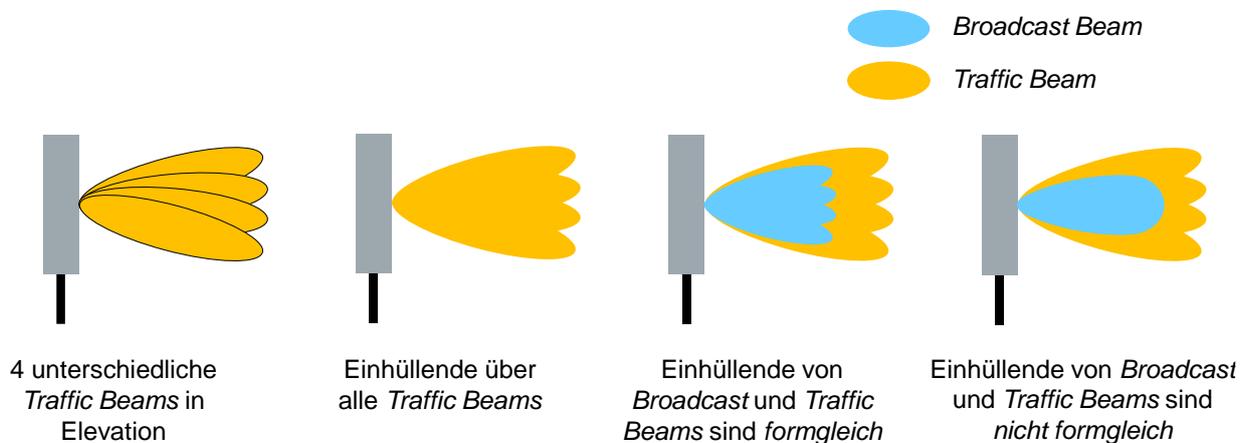
Der Gewinn und die pro *Traffic Beam* übertragene Leistung nehmen mit der Anzahl der gleichzeitig gesendeten *Beams* ab. Daher wird die maximale Immission an einem definierten Messpunkt dann erzeugt, wenn nur ein einziger *Traffic Beam* mit maximalem Gewinn und maximaler Sendeleistung ausgebildet und auf den Messpunkt ausgerichtet wird. Im Regelbetrieb kann die Basisstation jedoch nicht angewiesen werden, für den Zeitpunkt der Messung einen einzigen definierten *Traffic Beam* zum Messpunkt zu formen. Daher müssen andere Methoden entwickelt werden, die diesen Zustand nachbilden. Diese werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 2.2 Broadcast und Traffic Beams

Zur Lösung der Problematik, dass ein *Traffic Beam* während der Messung nicht definiert zum Messpunkt ausgerichtet werden kann, wird folgendes Messkonzept vorgeschlagen:

1. In einem ersten Schritt wird die Immission durch verkehrslastunabhängige Signale im *Broadcast Beam* gemessen. Diese Steuersignale können auch ohne Anwesenheit von Endgeräten an jeder Stelle der Zelle empfangen werden, da sie zur Anmeldung neuer Endgeräte in der Zelle benötigt werden.
2. Die maximal mögliche Gesamtimmission wird aus der gemessenen Immission durch die *Broadcast Beam*-Signale extrapoliert, wobei sowohl die Differenz zwischen der gesamten Signalbandbreite und der Bandbreite der gemessenen verkehrslastunabhängigen Signale, als auch die Gewinndifferenz zwischen *Broadcast Beam* und *Traffic Beam* berücksichtigt werden. Damit wird die Ausrichtung eines *Traffic Beams* mit maximaler Sendeleistung und Gewinn auf den Messpunkt emuliert.

Dieses Hochrechnungsverfahren setzt gemäß Bild 1 jedoch voraus, dass die Einhüllenden von *Broadcast Beam* und *Traffic Beam* formgleich sind. Ob diese Bedingung immer erfüllt ist, wird weiter unten untersucht.

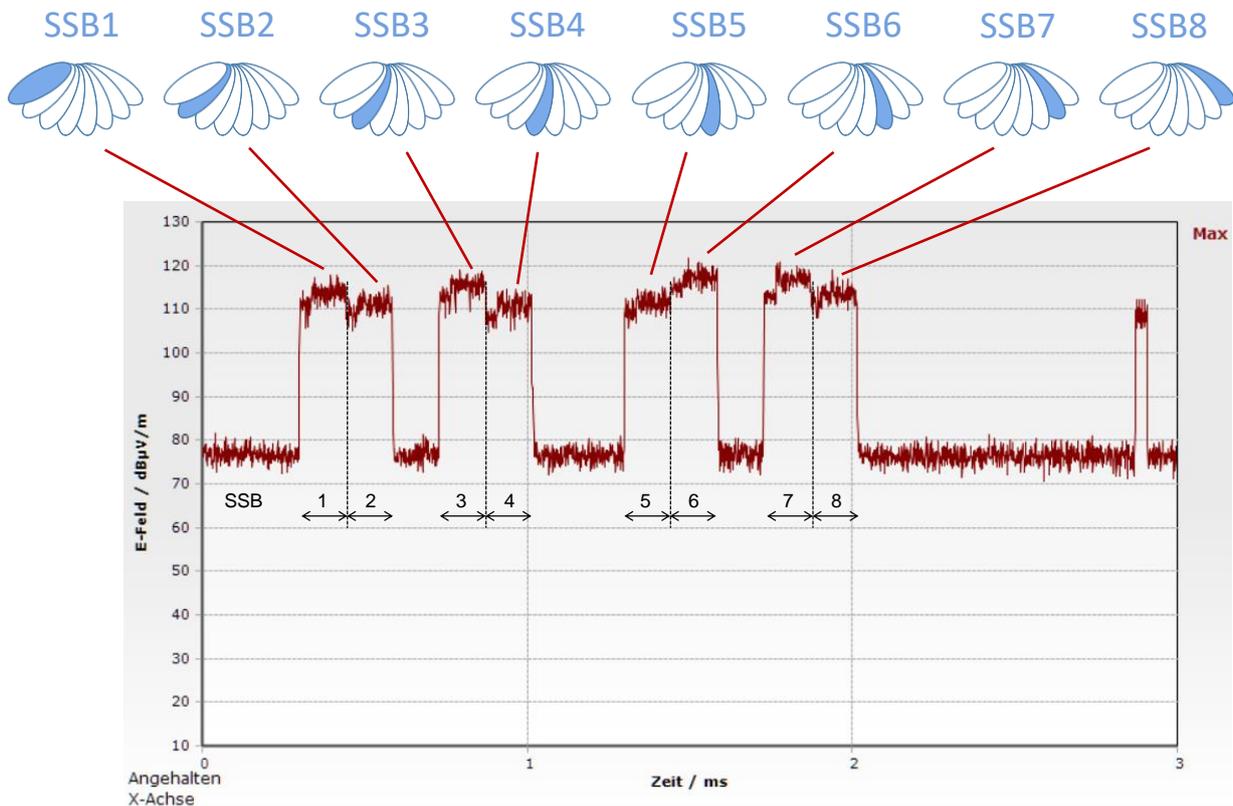


**Bild 1:** Formgleichheit bzw. Nicht-Formgleichheit der Einhüllenden von *Broadcast Beam* und *Traffic Beams*

## 2.3 Verkehrsunabhängige Signale in 5G

Da 5G keine zellspezifischen Referenzsignale mehr verwendet, könnte der zell- und beam-spezifische SS/PBCH-Block (synchronization signal and physical broadcast channel block, SSB [2]) alternativ als verkehrslastunabhängiges Signal für Immissionsmessungen verwendet werden. Der SSB umfasst 240 Unterträger, die bei 30 kHz Trägerabstand einer Bandbreite von 7,2 MHz entsprechen und im Fall mehrerer SSB bzw. SSB-Ausrichtungen als Teil des SSB-Bursts übertragen werden. Hierbei entspricht jeder SSB einer anderen Strahlrichtung, wie Bild 2 am Beispiel eines aus acht SSB bestehenden SSB-Bursts illustriert.

Erste Messungen an realen MIMO 5G-Systemen zeigen, dass der SSB durch Spektralmessungen leicht identifiziert werden kann, wenn die Verkehrsauslastung der Basisstation gering ist. Bei Verkehrslast auf der 5G-Anlage können die SSB-Emissionen jedoch durch den Verkehr überdeckt werden, was zum Teil auf die Gewinndifferenz zwischen *Traffic Beam* und *Broadcast Beam* zurückzuführen ist. Eine Lösung können hier code-selektive Messverfahren darstellen, die aber derzeit für einschlägige Immissionsmessgeräte noch nicht verfügbar sind.



**Bild 2:** Zeitbereichsmessungen eines aus acht SSB bestehenden SSB-Bursts

### 3 Verifikation des Konzeptes durch Messungen

Um das entwickelte Mess- und Extrapolationskonzept zu testen, wurden Untersuchungen sowohl an einem 4G-System mit *massive MIMO*-Funktionalität, als auch an 5G-Anlagen durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

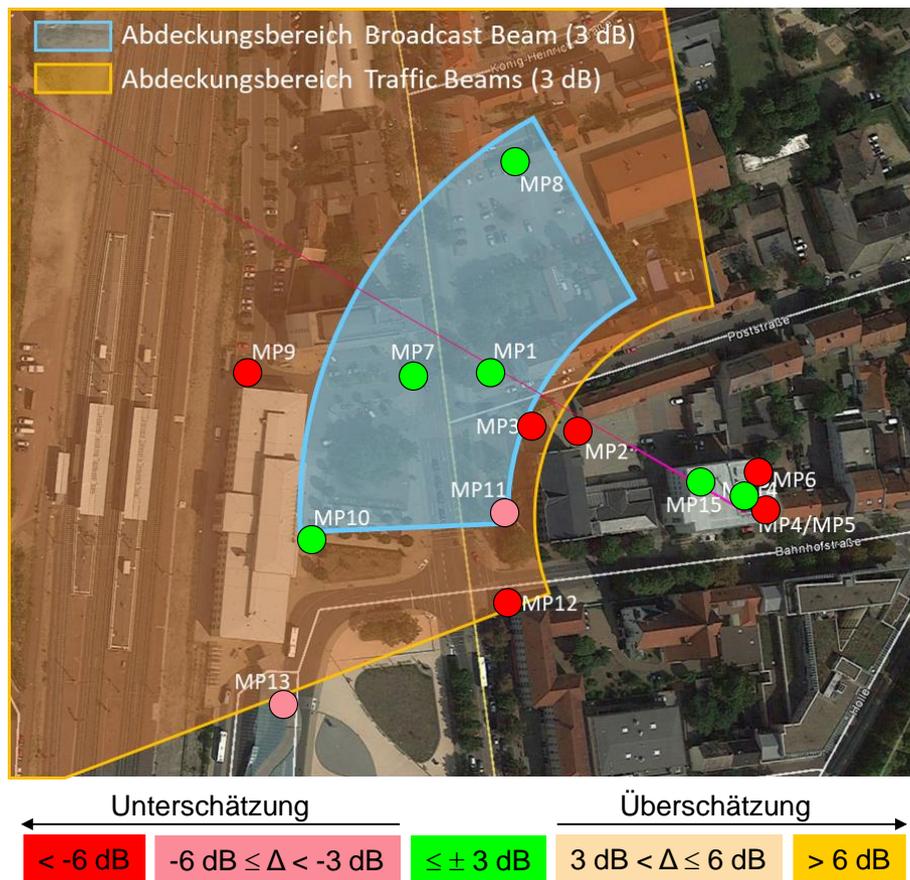
#### 3.1 4G-Anlage

Für die ersten Messungen wurde eine 4G-Anlage ausgewählt, um die Komplexität der Strahlformung (*Broadcast* und *Traffic Beams*) von der einer noch nicht verfügbaren code-selektiven Messtechnik für die Steuersignale (5G-Signalstruktur) zu trennen. Für 4G existiert ein etabliertes code-selektives Messverfahren, das die Immission anhand von zell-spezifischen Referenzsignalen (CRS) bestimmt [3]. Die untersuchte Anlage befindet sich in Merseburg und war zum Zeitpunkt der Messungen (Juli und August 2018) mit einem 4G-System der Firma Huawei ausgerüstet. Das System verfügte über eine *massive MIMO*-Antenne mit 64 TRX und wurde bei einer Frequenz von 3,56 GHz und einer Kanalbandbreite von 20 MHz (d.h. Signalbandbreite 18 MHz) im Duplexmode TDD betrieben.

Als Messgerät wurde der tragbare Spektrumanalysator Narda SRM-3006 mit code-selektiver Messoption zusammen mit der isotropen E-Feld Sonde 3502/01 420 MHz – 6 GHz eingesetzt.

Im Rahmen der Messungen wurde an 15 verschiedenen Messpunkten im Umfeld der Anlage einerseits die Immission code-selektiv gemessen und mit dem vorgeschlagenen Verfahren auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet. Der Hochrechnungsfaktor bezieht sowohl die Extrapolation von *einem* code-selektiv gemessenen Resource Element des Referenzsignals (CRS) auf die Gesamtträgeranzahl ein, als auch den Unterschied zwischen den Maximalgewinnen von *Traffic* und *Broadcast Beam* sowie den *Duty Cycle* des TDD-Verfahrens und ist für jeden Messpunkt identisch. Andererseits wurde zur Verifikation parallel an allen Messpunkten mit mehreren Endgeräten durch Initiierung eines FTP-Downloads zielgerichtet die Ausrichtung eines einzelnen *Traffic Beams* erzwungen (maximal mögliche Immission durch die Ausbildung lediglich eines *Traffic Beams*) und dessen Immission spektral gemessen. Durch Vergleich der code-selektiv gemessenen und hochgerechneten Immission mit der spektral bei provozierte *Beam*-Ausrichtung gemessenen Immission konnte das vorgeschlagene *massive MIMO*-Mess- und Hochrechnungsverfahren überprüft werden.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse als Abweichung zwischen hochgerechneter und gemessener Maximalimmission. Überschätzungen werden an den farbkodierten Messpunkten orange dargestellt, Unterschätzungen rosa bzw. rot. Zusätzlich sind die Abdeckungsbereiche von *Traffic Beam* und *Broadcast Beam*, definiert durch die Halbwertsbreiten der jeweiligen Einhüllenden, als orangene bzw. blaue Flächen dargestellt.



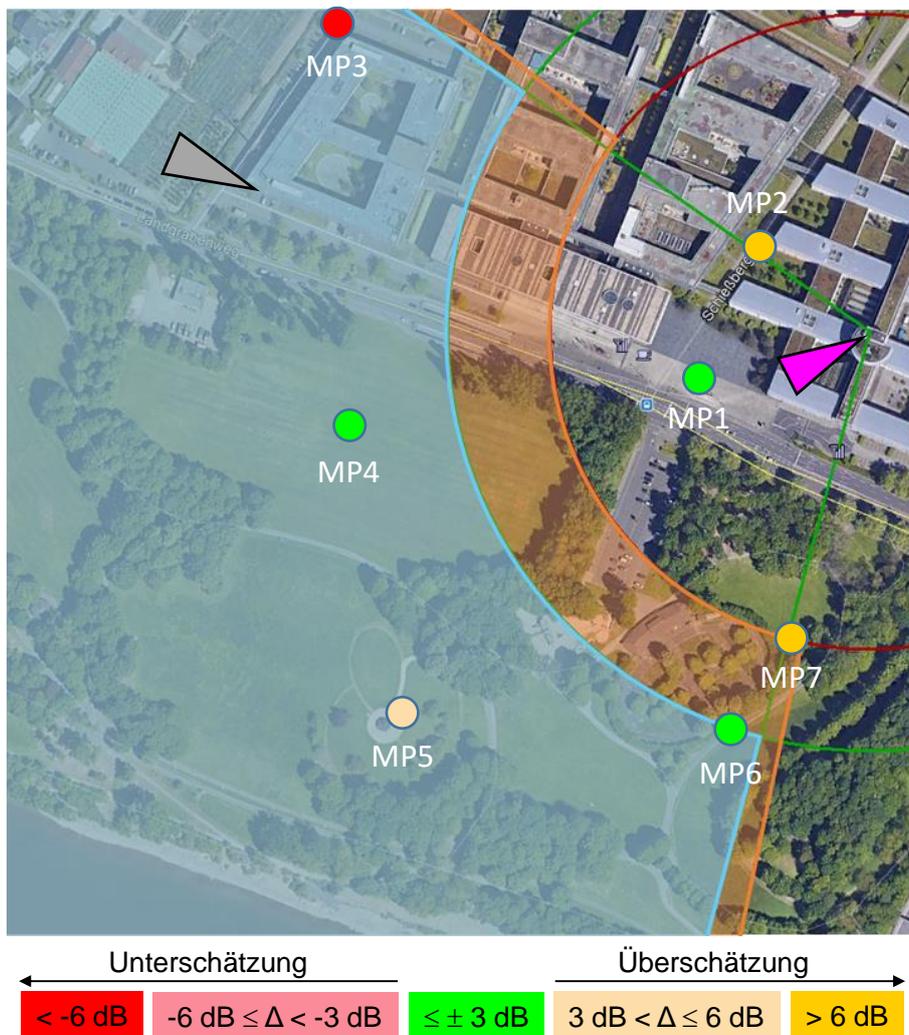
**Bild 3:** Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen hochgerechneter und gemessener Immission im Umfeld der untersuchten 4G-Anlage in Merseburg. Die 3-dB-Abdeckungsbereiche der Einhüllenden der *Traffic* und *Broadcast Beams* sind als orangene bzw. blaue Flächen dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen Differenzen zwischen der code-selektiven Messung mit Hochrechnung und der spektralen Verifikationsmessung zwischen +1,0 und -33,2 dB. An sechs von 15 Messpunkten liegt die Differenz in einem Bereich von  $\leq \pm 3$  dB (Bereich der typischen Messunsicherheit bei Immissionsmessungen an konventionellen Mobilfunksystemen) und an weiteren zwei Messpunkten in einem Bereich von  $\leq -6$  dB. Damit wird die Immission an sieben Messpunkten um mehr als 6 dB unterschätzt, was aus Sicht des Strahlenschutzes nicht akzeptabel ist. Wie Bild 3 zeigt, wird die beste Übereinstimmung beider Messmethoden an den Messpunkten innerhalb der Abdeckungsbereiche von sowohl *Broadcast Beam* als auch *Traffic Beam* erreicht. Messpunkte außerhalb des *Broadcast Beams* aber innerhalb des *Traffic Beams* zeigen hingegen große Abweichungen in Form einer Unterschätzung. Dies ist mit großer Sicherheit auf die Nicht-Formgleichheit der Einhüllenden beider *Beams* zurückzuführen.

### 3.2 5G-Anlage

Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse von 4G auf 5G zu überprüfen, wurden Messungen an verschiedenen 5G-Anlagen durchgeführt. Die im Folgenden präsentierten Messungen beziehen sich auf eine 5G-Anlage in Bonn. Diese war zum Zeitpunkt der Messungen (Oktober 2019) mit Systemtechnik der Firma Huawei ausgerüstet und verfügt über eine *massive MIMO*-Antenne mit 32 TRX. Diese Anlage arbeitet bei 3,65 GHz und einer Kanalbandbreite von 80 MHz im TDD-Mode.

Im Level-Recorder Mode des SRM-3006 wurde die Immission durch den SSB gemessen und auf die maximale Signalbandbreite hochgerechnet. Im Unterschied zu den 4G-Messungen wurde darüber hinaus nicht der *pauschale* Unterschied in den Maximalgewinnen von *Traffic* und *Broadcast Beam* berücksichtigt, sondern ein *messpunktabhängiger* Gewinnunterschied entsprechend der horizontalen und vertikalen Ausrichtung der *Beams* einbezogen. Die Verifikation erfolgte dann wieder durch spektrale Messung der Immission bei Nutzung eines realen Endgerätes, das mittels einer Applikation einen maximal möglichen Downlink-Verkehr bei der Station abrief und einen bzw. mehrere *Traffic Beams* auf den Messpunkt ausbildete. Die Ergebnisse sind farbkodiert in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4:** Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen hochgerechneter und gemessener Immission im Umfeld der untersuchten 5G-Anlage in Bonn. Die 3-dB-Abdeckungsbereiche der Einhüllenden der *Traffic* und *Broadcast Beams* sind als orangene bzw. blaue Flächen dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine deutlich bessere Übereinstimmung der hochgerechneten Immission mit der gemessenen Maximalimmission im Vergleich zur 4G-Anlage. Die beste Übereinstimmung ergibt sich hierbei an Messpunkten, die direkte Sicht zur Anlage haben und die nicht am Zellrand liegen (MP1, MP4 und MP6). MP5 befindet sich zwar innerhalb der Abdeckungsbereiche von *Traffic* und *Broadcast Beams*, hat aber wegen Bäumen im Ausbreitungsweg keine freie Sicht auf die Anlage. MP2 und MP7 liegen

beide am horizontalen Zellrand und weisen Überschätzungen um mehr als 6 dB auf. Außer an MP3 wurde an keinem der Messpunkte eine Unterschätzung der Immission festgestellt. Die Unterschätzung von MP3 ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass dieser nahe oder im Versorgungsbereich einer benachbarten 5G-Station (grau dargestellt in Bild 4) liegt, was bei der Berechnung des messpunktspezifischen Hochrechnungsfaktors nicht berücksichtigt wurde. Insgesamt zeigt sich somit eine wesentlich bessere Passfähigkeit des Hochrechnungsverfahrens als bei der untersuchten 4G-Anlage, wobei die Hauptverbesserungen offenbar aus der Anwendung des *messpunktspezifischen* Hochrechnungsfaktors resultieren.

#### 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bisherige Berechnungs- und Messansätze zur Bestimmung der hochfrequenten Immission gegenüber 2G/3G/4G-Basisstationen sind für 5G nicht mehr ohne weiteres anwendbar. Da die Erweiterung vieler Standorte mit 5G hinsichtlich der Immissionsvorschriften an ihre Grenzen stößt, sind solche akzeptierten Verfahren jedoch dringend erforderlich. Geeignete Messverfahren können beispielsweise auf der Erfassung der Immission des im *Broadcast Beam* übertragenen SSB und der anschließenden Extrapolation auf den *Traffic Beam* basieren. Die Grundlage der Extrapolation, d.h. die Gewinndifferenz zwischen beiden *Beams*, hängt jedoch von der Position des Messpunktes in Bezug auf beide *Beams* ab. Wird dieser nicht adäquat, d.h. messpunktspezifisch, berücksichtigt, liefert das Messverfahren nur für Messpunkte im Abdeckungsbereich beider *Beams* zuverlässige Ergebnisse.

Trotz des vielversprechenden Konzeptes bleiben noch einige Fragen zu beantworten, bevor ein reproduzierbares und akzeptiertes Messverfahren definiert werden kann. Bei der Entwicklung neuer Funktechnologien sollte darauf hingewirkt werden, bereits in der Standardisierungsphase Möglichkeiten zur Bewertung der Immission zu implementieren, z.B. durch geeignete Testmodi.

#### Literatur

- [1] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV). Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266).
- [2] 3GPP TS 38.211, 5G; NR; Physical channels and modulation, 3GPP TS 38.211, version 15.2.0, Release 15, (2018).
- [3] C. Bornkessel, M. Hein and M. Wuschek: Measurement of human exposure to LTE base stations present status and future challenges in measurement methodology. In 2015 European Microwave Conference (EuMC), Paris (2015) S. 881-884, doi: 10.1109/EuMC.2015.7345905.