

Verfahren zur korrekten messtechnischen Bestimmung der Hochfrequenzexposition in der Umgebung von LTE-Basisstationen

Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf
Dr.-Ing. Christian Bornkessel, IMST GmbH Kamp-Lintfort, Prüfzentrum

1 Einleitung

Die Bestimmung der hochfrequenten Immissionen in der Umgebung von LTE-Basisstationen stellt eine neue Herausforderung an die Feldstärkemesstechnik dar.

Nach der in Deutschland relevanten Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) [1] müssen die Grenzwerte von ortsfesten Sendeanlagen bei höchster betrieblicher Auslastung der Sendeanlage eingehalten werden. Somit sind bei der Immissionsmessung Methodiken zur Hochrechnung der ermittelten Momentanimmission auf den Zustand bei maximalem Sendebetrieb anzuwenden. Diese beruhen auf einer Identifizierung und Messung derjenigen Signale und Kanäle, die unabhängig vom aktuellen Verkehrsaufkommen mit konstanter Leistung gesendet werden und keinen Leistungsregelungsmechanismen unterliegen. Aus der Immission dieser Signale kann unter Kenntnis des Verhältnisses von maximaler Sendeleistung der Anlage zur Sendeleistung dieser Signale zuverlässig auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung extrapoliert werden. Details zur grundsätzlichen Messtechnik von LTE-Immissionen können [2], [3] und [4] entnommen werden.

Für die Messung von LTE-Immissionen (FDD-Mode) kann als kostengünstige Variante auf frequenzselektive Verfahren zurückgegriffen werden, die auch mit herkömmlichen Spektrumanalysatoren durchführbar sind [5], allerdings - wie in diesem Beitrag noch gezeigt wird - bezüglich der Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung sehr leicht zu Fehlbewertungen führen können, wenn die genaue Konfiguration der vermessenen LTE-Anlagen nicht korrekt berücksichtigt wird. In [5], aber auch in der aktuellen Normung [6] wird dieser Problematik bisher wenig Beachtung geschenkt.

Mit codeselektiven Verfahren wird die Immission von LTE-Anlagen basisstations- bzw. sektorspezifisch erfasst. Diese Messung ist bezüglich der Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung deutlich unproblematischer, zudem liefert sie ein detaillierteres Bild der herrschenden Immission, da die am Messort vorhandenen Funksignale - im Gegensatz zur frequenzselektiven Messung - mittels Auswertung ihrer individuellen Codierung zellspezifisch aufgelöst werden können. Für codeselektive Messungen sind allerdings besondere Messgeräte notwendig, z.B. klassische Spektrumanalysatoren, die einen speziellen codeselektiven Erfassungsmodus für LTE-Signale besitzen.

Im Folgenden soll zum einen näher erläutert werden, wie bei den beiden möglichen Messverfahren aus den Anzeigewerten des Messgerätes auf die Immission bei höchster Anlagenauslastung hochgerechnet werden kann und welche Anlagenparameter dazu bekannt sein müssen. Außerdem werden die Ergebnisse von Erprobungsmessungen

vorgestellt, welche die erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit derartiger Messungen dokumentieren sollen.

2 Abstrahlung der für die Messung relevanten Signale durch die Basisstationsantennen

Bei LTE-Basisstationen werden die Signale P-SS (Primary Synchronization Signal), S-SS (Secondary Synchronization Signal), RS (Reference Signal) und der Kanal PBCH (Physical Broadcast Channel) permanent mit konstanter und von der derzeitigen Verkehrslast unabhängiger Leistung gesendet. Sie sind daher als Basis für eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung geeignet. P-SS, S-SS und PBCH belegen eine Bandbreite von ca. 1 MHz in der Kanalmitte unabhängig von der Bandbreite des gesamten LTE-Signals, die RS-Signale sind hingegen gleichmäßig über das gesamte Signalspektrum verteilt.

Beim frequenzselektiven Verfahren wird mit einem herkömmlichen Spektrumanalysator die Immission im Zentrum des Spektrums (verursacht durch P-SS, S-SS bzw. PBCH) mittels einer Kanalleistungsmessung (Messung eines Bandes von etwa ± 500 kHz um die Mittenfrequenz des LTE-Kanals) bestimmt. Dieser Messwert wird als Basis für die darauffolgende Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung verwendet.

Beim codeselektiven Verfahren wird der Pegel des RS-Signals jeder Zelle getrennt erfasst, da dieses Signal zellspezifisch codiert ist. Die Hochrechnung erfolgt dann mit Hilfe des Verhältnisses aus eingestellter Leistung (ERPE-Wert) des RS-Signals und maximal möglichen Sendeleistung der LTE-Zelle.

Zur Steigerung der Datenrate und der spektralen Effizienz werden bei LTE meist MIMO-Antennentechniken eingesetzt. Derzeit wird standardmäßig für den Downlink eine Konfiguration aus zwei Sendantennen als Basis verwendet (2-Antennen-MIMO). Als Sendantennen werden dabei gewöhnlich konventionelle, bereits von GSM und UMTS her bekannte Sektorantennen mit zwei um 90 Grad verdrehten Dipolgruppen ($\pm 45^\circ$) eingesetzt. Jede der beiden Antennenpolarisationen ist an einen eigenen Sender angeschlossen, so dass die gesamte abgestrahlte Leistung (z.B. 2 x 20 W) doppelt so groß ist, wie bei Verwendung eines einkanaligen Systems mit nur einer Antennenpolarisation. Es ist also sicherzustellen, dass die Immissionen beider Kanäle erfasst werden (RS 0 bzw. RS 1; siehe Bild 1) bzw. bei Messung nur eines der beiden Kanäle mittels eines geeigneten Faktors die Immission des zweiten Kanals geeignet berücksichtigt wird, ansonsten wird die reale Immission unterbewertet.

Die Synchronisationssignale P-SS und S-SS können hingegen auf verschiedene Weise von den beiden MIMO-Antennensystemen abgestrahlt werden. Je nach Konfiguration der vom Betreiber eingesetzten Systemtechnik wurden bisher sowohl die alternierende als auch die gleichzeitige Abstrahlung der Synchronisationssignale über die beiden Antennenpolarisationen beobachtet. Bei gleichzeitiger Abstrahlung über beide Antennensysteme und Verwendung der heute sehr häufig eingesetzten isotropen Messantennen wird sowohl bei der codeselektiven, als auch bei der frequenzselektiven Messung automatisch die Summenfeldstärke und somit auch die Summenleistung beider Kanäle ermittelt. Werden die Synchronisationssignale hingegen alternierend über beide Anten-

nensysteme abgestrahlt, kann auch eine isotrope Antenne immer nur die Feldstärke von einem der beiden Kanäle erfassen. Das Messergebnis unterschlägt somit den zweiten Kanal. Dies ist dann mit einem geeigneten Korrekturfaktor (+3 dB) zu berücksichtigen.

Battery: 14.12.12		GPS: 14:11:54		51°28'51.7" N Ant: 6°32'40.0" E Cable:		3AX 0.4-6G SrvTbt: SRM 1.5 m Stnd:		Mofu-Betr ICNIRP GP	
Table View									
Index	Cell ID	No. Ant	Max (PSS)	Max (SSS)	Max (RS 0)	Max (RS 1)			
1	262	2	89.86 dBµV/m	89.24 dBµV/m	89.74 dBµV/m	90.13 dBµV/m			
2	263	2	90.12 dBµV/m	89.59 dBµV/m	90.33 dBµV/m	90.98 dBµV/m			
Total			92.60 dBµV/m	91.94 dBµV/m	93.06 dBµV/m	92.47 dBµV/m			
Analog			103.35 dBµV/m						
Isotropic									
LTE									
Fcent:	806 MHz	CBW:	1.4 MHz	Sweep Time:	677 ms	Progress:			
MR:	141 dBµV/m	Extr. Fact.:	Off Noise Suppr.:	Off No. of Runs:	58				
Cell Sync.:		Sync. CP Length:	Normal AVG:	4					

Bild 1: Ergebnis der codeselektiven Messung eines LTE-800-Signals (2 Funkzellen wurden erfasst)

Die Information, ob die Synch-Abstrahlung alternierend oder gleichzeitig über beide Antennensysteme erfolgt, muss beim Betreiber erfragt werden. Alternativ kann auch eine Messung der Synchronisationssignale im Zeitbereich ("Zero Span"), unter Verwendung einer einachsigen Messantenne (z.B. LogPer) erfolgen. Je nach Art der Abstrahlung ergibt sich ein unterschiedliches Amplitudenmuster für die alle 5 ms vom Antennensystem abgestrahlten Synchronisationssignale (Bild 2)

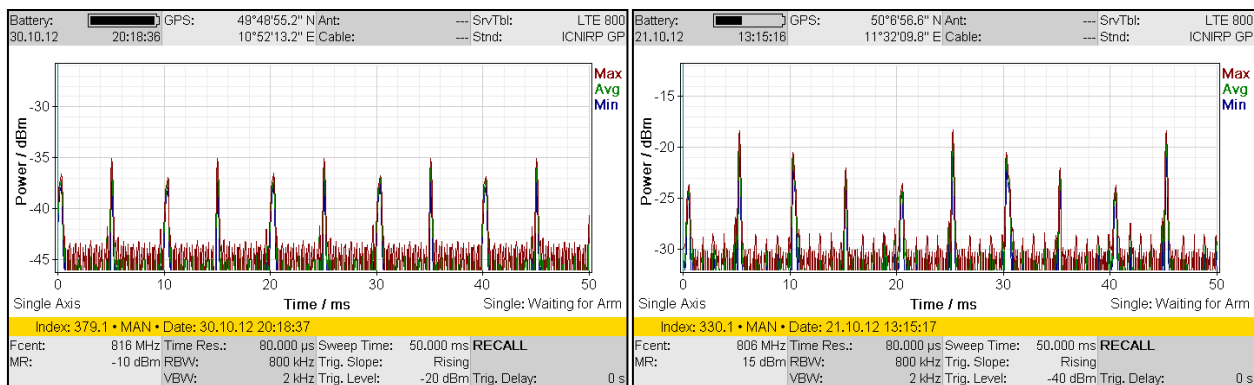


Bild 2: Messung der Synchronisationssignale eines LTE-800-Signals im Zeitbereich (links: Synch-Abstrahlung alternierend; rechts: Synch-Abstrahlung gleichzeitig über beide Antennensysteme)

Bei einer Abstrahlung der Synchronisationssignale alternierend über beide räumlich orthogonalen Antennensysteme ergeben sich je nach Polarisationsausrichtung der einachsigen Messantenne Impulsfolgen, die abwechselnd unterschiedliche Größe besitzen (Nur bei optimaler Ausrichtung der Messantenne kann der Pegelunterschied zwischen zwei aufeinander folgenden Impulsen verschwinden).

Werden die Synchronisationssignale hingegen gleichzeitig über beide Antennen abgestrahlt, so beobachtet man bei den derzeit betriebenen Systemen eine Folge von Synchronisationsimpulsen, die typisch mehr als zwei verschiedene Pegelwerte aufweisen. Dies rührt daher, weil die Pegel (und auch die Phasenlagen) der über die beiden Antennen abgestrahlten Synchronisationsimpulse sich je nach Parametereinstellung in der Anlage in einer gewissen Regelmäßigkeit verändern.

Ein zweites Problem, das sich aus der Abstrahlung der Synchronisationssignale ergeben kann, rührt von der Tatsache her, dass die Subträger, welche die Synchronisationssignale tragen, im Vergleich zur durchschnittlichen Leistung aller Subträger pegelmäßig angehoben ("geboostet") sein können. Wird diese Tatsache bei der Extrapolation der Messergebnisse auf maximale Anlagenauslastung nicht berücksichtigt, d.h. wird angenommen, dass die Synchronisationssignale pegelmäßig nicht angehoben sind, ergibt sich eine Überbewertung der maximalen Immission um den Faktor, um den die Synchronisationssignale in Wahrheit angehoben sind. Will man diesen Fehler korrigieren, ist der zunächst für den Fall von ungeboosteten Synchronisationssignalen gewählte Extrapolationsfaktor entsprechend zu verringern.

3 Korrekte Extrapolation der Ergebnisse einer frequenzselektiven Messung auf maximale Anlagenauslastung

Berücksichtigt man nicht nur die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Immissionsbestimmung von LTE-Signalen, sondern auch die oben erläuterten besonderen Eigenschaften der für die Hochrechnung relevanten Signale, so ist eine vollständige Hochrechnung des Ergebnisses einer frequenzselektiven Messung wie in Tabelle 1 dargestellt durchzuführen.

Anzeige Messgerät (Beispiel)	130 dB μ V/m	Kanalleistungsmessung ("Level Recorder") des zentralen Teils des Signalspektrums (RBW = 800 kHz, VBW = 2 kHz; [3])
Extrapolation auf volle Signalbandbreite (B = 9 MHz)	+10,7 dB	Signalbandbreite / äquivalente Rauschbandbreite des für die Messung verwendeten ZF-Filters (768 kHz; [3])
Abstrahlung der Synchronisationssignale über die MIMO-Antennen	+3 dB	Hier: Synchronisationssignale alternierend abgestrahlt: +3 dB; sonst: +0 dB
Synchronisationssignale geboostet?	-3 dB	Subtrahiere den Faktor, um den die Synchronisationssignale geboostet sind (Hier: Synchronisationssignale um 3 dB geboostet)
Auf maximale Leistung extrapoliertes Messwert	140,7 dBμV/m	

Tabelle 1: Hochrechnung des Ergebnisses einer frequenzselektiven Messung auf maximale Anlagenauslastung

In Tabelle 1 wird beispielhaft die Messung und Hochrechnung eines LTE-Signals mit einer Bandbreite von 9 MHz (die Synchronisationssignale sind um 3 dB geboostet und werden alternierend von den beiden MIMO-Antennen abgestrahlt) bei Verwendung des Feldanalysators SRM-3006 von Narda beschrieben. Bei Verwendung anderer Messgeräte (z.B. herkömmliche Spektrumanalysatoren) ändert sich die Tabelle prinzipiell nicht, allerdings kann sich ein etwas anderer Extrapolationsfaktor auf die volle Signalbandbreite ergeben [3].

Der Extrapolationsfaktor auf volle Signalbandbreite lässt sich ohne zusätzliche Mithilfe der Anlagenbetreiber ermitteln, da die Signalbandbreite auch durch eine spektrale Messung vor Ort bestimmt werden kann. Die Art der Abstrahlung der Synchronisationssignale durch die MIMO-Antennen hingegen ist bereits deutlich schwieriger durch Messung zu bestimmen (siehe Bild 2). Insbesondere bei Anlagen mit starker Verkehrsauslastung sind die Synchronisationsimpulse nicht mehr so deutlich sichtbar, wie es in Bild 2 der Fall ist.

Die Information, ob und um wie viel die Synchronisationssignale gegenüber der durchschnittlichen Leistung der Subträger geboostet sind, kann hingegen nur vom Betreiber geliefert werden.

Wird das Abstrahlverhalten der Synchronisationssignale bei der Hochrechnung einer spektralen Messung falsch bewertet, so kann sich in obigem (realistischen) Beispiel im schlimmsten Fall eine Fehlbewertung der Immission um bis zu 6 dB ergeben.

4 Korrekte Extrapolation der Ergebnisse einer codeselektiven Messung auf maximale Anlagenauslastung

Wie bereits erwähnt, können als Basis für die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung auch Ergebnisse einer codeselektiven Erfassung verwendet werden. Prinzipiell stehen hierzu die Resultate der Messung der Synchronisationssignale (P-SS und S-SS), sowie die Ergebnisse der Messung der von jeder der MIMO-Antennen abgestrahlten Referenzsignale (RS 0, RS 1) zur Verfügung. Zweckmäßigerweise wird man jedoch die RS-Signale als Basis für die Extrapolation den Synchronisationssignalen bevorzugen, denn dadurch kann man der im vorherigen Kapitel bereits erläuterten Unsicherheit bezüglich der Frage aus dem Weg gehen, ob die Synchronisationssignale alternierend oder gleichzeitig von den MIMO-Antennen abgestrahlt werden. Bei den RS-Signalen liefern die codeselektiven Messsysteme automatisch für jeden MIMO-Pfad einen eigenen Messwert für das korrespondierende RS-Signal (siehe Bild 1). Somit ist eine Unterbewertung der Immission aufgrund der Vernachlässigung eines MIMO-Kanals bei einer Auswertung der RS-Signale ausgeschlossen.

Die vollständige Hochrechnung des Ergebnisses einer codeselektiven Messung ist in Tabelle 2 dargestellt. Dabei wird hier wieder beispielhaft die Messung und Hochrechnung eines 9-MHz-LTE-Signals beschrieben. Der Extrapolationsfaktor entspricht bei gleichmäßiger Verteilung der gesamten Signalleistung auf alle Subträger der Gesamtzahl der Subträger im Signal (600 bei $B = 9$ MHz bzw. 1.200 bei $B = 18$ MHz). Sind die RS-Signale jedoch geboostet (üblich ist aktuell ein Boostfaktor von 3 dB), verringert sich der Extrapolationsfaktor auf die Hälfte (-3 dB).

Anzeige Messgerät	110 dB μ V/m (RS 0) 110 dB μ V/m (RS 1)	Messwerte für RS 0 und RS 1 müssen nicht genau gleich sein!
Hochrechnung auf volle Sendeleistung	+27,8 dB	B = 9 MHz: Extrapolationsfaktor = 600 (27,8 dB); (typisch für beide RS-Signale gleich)
Auf maximale Leistung extrapoliertes Messwert	140,8 dBμV/m	

Tabelle 2: Hochrechnung des Ergebnisses einer codeselektiven Messung auf maximale Anlagen- auslastung

Für eine absolut zuverlässige Immissionsbewertung ist also auch bei der codeselektiven Messung die Mithilfe des Betreibers notwendig. Allerdings muss er nur den Leistungs- wert nennen, auf den die RS-Signale eingestellt sind. Eine Auskunft bezüglich der Ab- strahlungsart der Synchronisationssignale hingegen ist nicht erforderlich.

Auch wenn bei der codeselektiven Messung der RS-Signale die relative Messdynamik oft nicht an die der codeselektiven Messung von UMTS-Signalen heranreicht [2], kann man zusammenfassend festhalten, dass bezüglich des Aufwandes und der möglichen Fehlerquellen eine Hochrechnung, basierend auf den Ergebnissen einer codeselektiven Messung die eindeutig zuverlässigere und unkritischere Alternative darstellt und daher die codeselektive Erfassung als das bevorzugte Verfahren im Bereich der Immissions- bestimmung bei LTE-Basisstationssignalen angesehen werden kann.

5 Messbeispiele

5.1 Szenario 1: Standort mit zwei LTE-800-Betreibern

In der Umgebung eines LTE-Basisstationsstandortes, an dem zwei Netzbetreiber jeweils aus drei Sektorantennen LTE-800-Signale abstrahlen, wurden an Punkten mit direkter Sichtverbindung zu den Antennen vergleichende Immissionsmessungen (codeselektive Messung der RS-Signale bzw. frequenzselektive Erfassung) durchgeführt. Die Immissi- onen wurden sowohl mit einer isotropen als auch mit einer einachsigen (LogPer) Anten- ne erfasst. Abgestrahlt wurden die Synchronisationssignale bei Anlage 1 alternierend, bei Anlage 2 gleichzeitig über beide MIMO-Antennen.

Tabelle 3 zeigt den mittleren Unterschied der hochgerechneten Ergebnisse für die bei- den Messverfahren bei Verwendung der beiden Antennentypen. Dabei wird auch zwi- schen den Anlagen der beiden Betreiber unterschieden.

Erfassungsart	Anlage 1: Isotrop / einachsig	Anlage 2: Isotrop / einachsig
Frequenzselektiv	1,4 dB	3,0 dB
Codeselektiv	-0,2 dB	1,1 dB

Tabelle 3: Mittlerer Unterschied der hochgerechneten Immissionswerte bei Messung mit isotroper bzw. einachsiger Antenne in dB

Die codeselektive Erfassung der RS-Signale liefert bei beiden Anlagen Unterschiede für die beiden Antennentypen in der Größenordnung von maximal etwa 1 dB. Bei frequenzselektiver Messung der Synchronisationssignale ergeben sich hingegen deutlichere Unterschiede zwischen den beiden Antennen, insbesondere bei Anlage 2. Bei dieser werden die Synchronisationssignale gleichzeitig über beide Antennen abgestrahlt, so dass die isotrope Antenne eine echte Komponenten-Summation der beiden gleichzeitig abgestrahlten Signale durchführen kann, die einachsige Antenne hingegen erfasst je nach Ausrichtung immer nur das Feldstärkemaximum einer der beiden Kanäle. Diese Tatsache wurde in der Auswertung nicht mit einem Korrekturfaktor kompensiert, daher ist ein Unterschied in den Ergebnissen beider Antennen nicht verwunderlich.

Vergleicht man die an den Messpunkten ermittelten absoluten Ergebnisse, so ergibt sich ein mittlerer Unterschiedsfaktor der Ergebnisse beider Messverfahren (frequenzselektiv / codeselektiv) von 1,0 dB (Varianz: 0,7 dB). Bei korrekter Hochrechnung liefern also beide Messverfahren hier eine gute Übereinstimmung bei den extrapolierten Immissionswerten.

5.2 Szenario 2: Dachstandort mit einer LTE-1800-Anlage

In der Umgebung eines Dachstandortes, an dem ein Netzbetreiber drei Sektorantennen für LTE-1800-Signale betreibt, wurden an Punkten mit direkter Sichtverbindung zu den Antennen vergleichende Immissionsmessungen (isotrope Antenne) durchgeführt. Um die Wiederholbarkeit der Messungen näher zu studieren, wurden die Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit vergleichbaren Wetterbedingungen (sonnig, trocken) insgesamt viermal vom selben Personal mit identischem Messgerät und unveränderten Geräteeinstellungen durchgeführt (jeweils vormittags und nachmittags). Tabelle 4 zeigt die Resultate der vier Messungen als auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnete prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke

Messung Nr.	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 4
1	2,77 %	0,88 %	1,33 %	3,30 %
2	2,55 %	0,96 %	1,19 %	2,64 %
3	2,84 %	0,86 %	1,27 %	3,22 %
4	2,68 %	0,78 %	1,32 %	3,19 %
Mittelwert (leistungsbezogen)	2,71 %	0,87 %	1,28 %	3,10 %
Spannweite (Max / Min in dB)	0,94 dB	1,80 dB	0,97 dB	1,94 dB

Tabelle 4: Hochgerechnete Immissionswerte (prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke nach 26. BImSchV) bei viermaliger codeselektiver Messung mit isotroper Antenne

Die Spannweite der vier Messungen liegt also an den vier untersuchten Punkten in der Größenordnung von etwa 1 bis 2 dB, die Wiederholbarkeit der Messungen ist somit unter vergleichbaren Wetterbedingungen als gut zu bezeichnen.

Zusätzlich wurden die Immissionen auch mit der frequenzselektiven Methode erfasst und auf maximale Sendeleistung hochgerechnet. Der mittlere Unterschiedsfaktor der

Ergebnisse beider Messverfahren (frequenzselektiv / codeselektiv) ergab sich zu 1,5 dB (Varianz: 0,64 dB). Bei korrekter Hochrechnung liefern also auch hier beide Messverfahren eine gute Übereinstimmung bei den extrapolierten Immissionswerten.

6 Zusammenfassung

Der Beitrag fasst die Ergebnisse von Untersuchungen zur Messung der Exposition, verursacht durch LTE-Basisstationen, sowie zur Hochrechnung der Messergebnisse auf maximale Anlagenauslastung zusammen. Die durchgeführten Untersuchungen führten zu folgenden wichtigen Ergebnissen:

- Code- und frequenzselektive Verfahren liefern bei gleichen Randbedingungen gut übereinstimmende und reproduzierbare Messergebnisse und sind daher für Immissionsmessungen an LTE-Basisstationen grundsätzlich geeignet.
- Das codeselektive Verfahren ist in Bezug auf die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung sehr unkompliziert. Daher kann dieses Verfahren als das zu präferierende Referenzverfahren bezeichnet werden.
- Das frequenzselektive Verfahren benötigt zur korrekten Durchführung - insbesondere bei der Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung - deutlich mehr Kenntnis über wichtige Anlagenparameter, die teilweise nur vom Betreiber geliefert werden können. Bei Nichtberücksichtigung dieser Parameter kann es zu einer deutlichen Fehlbewertung der hochgerechneten Immission kommen.

7 Literaturhinweise

- [1] **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.
- [2] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek**, "Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken". Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; http://www.emf-forschungsprogramm.de/akt_emf_forschung.html/dosi_HF_004.html
- [3] **M. Wuschek, Chr. Bornkessel**, "Bestimmung der Immissionen von LTE-Basisstationen", Leitfaden zur praktischen Durchführung von Immissionsmessungen; <https://www.th-deg.de/de/fakultaeten/etmt/kontakt-und-personal/professoren/200-fakultaet-et-mt/allgemein6/3311-download-aktueller-publikationen>
- [4] **F. Pythoud, B. Mühlemann**, "Measurement Method for LTE Base Stations", Swiss Federal Office of Metrology METAS, Bern, 05/2012; www.metas.ch/2012-218-808.
- [5] **L. Verloock et al.**, "Low-Cost Extrapolation Method for Maximal LTE Radio Base Station Exposure Estimation: Test and Validation", Rad. Prot. Dosimetry 155(1); pp 11-15 (2012).
- [6] **EN 50492**, Basic Standard for the in-situ Measurement of Electromagnetic Field Strength related to Human Exposure in the Vicinity of Base Stations, Final Draft for Annex L (FDD LTE measurements), 09/2013.