

SCHWERPUNKT LTE

Christian Bornkessel

MESSUNG DER ELEKTROMAGNETISCHEN IMMISSIONEN VON LTE-BASISSTATIONEN



Dieser Beitrag beschreibt ein Messverfahren für die elektromagnetischen Immissionen von LTE-Basisstationen. Das Verfahren basiert auf einer detaillierten Analyse der Signalcharakteristika des LTE-Signals bei verschiedenen Verkehrsauslastungen. Ohne Verkehr weist das LTE-Signal periodische Strukturen durch die permanenten Signalisierungen auf. Bei steigender Verkehrsauslastung verringert sich der Pulsgehalt, bis bei maximaler Verkehrsauslastung ein nahezu kontinuierlicher Signalverlauf erreicht wird. Die Signalisierungskanäle und -signale P-SS, S-SS, PBCH und RS werden unabhängig von der Verkehrsauslastung mit konstanter Sendeleistung gesendet; ihre Immission dient deshalb als Basis für die Bestimmung der Immission bei maximaler Anlagenauslastung. Die Immissionsmessung erfolgt zweckmäßigerweise mit einer Auflösungsbandbreite von 1 MHz. Der RMS-Detektor ist obligatorisch; die Sweepzeit muss in Abhängigkeit des Spektrumanalysators optimal gewählt werden, um eine Fehlbewertung der Signale zu vermeiden. Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt dann unter Berücksichtigung der Bandbreitenkorrektur und der EPRE-Einstellungen der Daten- und Signalisierungskanäle. Die Anwendung des Messverfahrens auf sieben LTE-Stationen in den Frequenzbereichen 800 MHz und 2,6 GHz zeigt Absolutwerte in ähnlicher Größenordnung wie bei GSM- und UMTS-Basisstationen sowie vergleichbare Immissionsverläufe.

LTE (Long Term Evolution) ist eine neue Mobilfunktechnologie und Nachfolger von UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Ähnlich wie bei den anderen Mobilfunkgenerationen sind zum Betrieb ein Netz aus Basisstationen, die eine bestimmte Fläche versorgen, sowie entsprechend kompatible Endgeräte notwendig.

Gegenüber UMTS und den Datenbeschleunigern HSPA/HSPA+ (High Speed Packet Access) werden für LTE wesentlich höhere Datenraten und geringere Latenzzeiten spezifiziert. Damit wird die Hauptanwendung der neuen Technologie der mobile Breitbandzugang zu Telekommunikationsdiensten sein.

Im zweiten Quartal 2010 sind von der Bundesnetzagentur (BNetzA) Frequenzen in den Bereichen 0,8 GHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz versteigert worden, die für LTE-Netze verwendet werden können. Gegenwärtig werden zahlreiche neue LTE-Basisstationen durch die Netzbetreiber installiert.

Es ist wünschenswert, belastbare Informationen über die mit der LTE-Technologie verbundenen Immissionen zu gewinnen. Dabei sollte die Immissionserfassung idealerweise bereits am Anfang der Rollout-Phase im Vorfeld einer flächendeckenden Netzstruktur beginnen. Verlässliche Informationen über die realen

Immissionen durch LTE-Sendeanlagen lagen bislang kaum vor. In [1] wurden an 30 Orten in Stockholm (Schweden) LTE-Immissionsmessungen mit einer stationären 3-achsigen Messantenne und einem Spektrumanalysator vorgenommen. Allerdings wurde hier ein Messverfahren verwendet, das lediglich die *Momentanwertimmissionen* erfasst und keine Aussage zur Immission bei maximaler Anlagenauslastung liefert. Bei geringem Datenverkehr einer LTE-Station ist deren Momentanwertimmission deutlich geringer als bei Maximalauslastung. In Deutschland ist nach 26. BImSchV (26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) eine Beurteilung der Immission bei maximaler Anlagenauslastung vorgeschrieben [2].

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Messverfahrens, das die Immissionen durch LTE-Basisstationen im FDD-Betrieb bei maximaler Anlagenauslastung trotz der gegenwärtig geringen Verkehrslast zuverlässig bestimmen kann. Das Messverfahren wird anschließend für die Immissionsmessung im Umfeld von sieben LTE-Basisstationen angewendet.

Signalverlauf

Am Beginn der Entwicklung eines Messverfahrens für einen neuen Funkdienst sollte immer eine ausführliche Charakterisierung des Signalverlaufs des zu messenden Signals stehen. Nur so ist es möglich, fundiert die Einstellparameter am Spektrumanalysator abzuleiten sowie aus dem gemessenen Signal diejenigen Signalanteile zu identifizieren, auf deren Basis eine spätere Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand erfolgen kann.

In LTE können flexible Kanalbandbreiten von 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz verwendet werden. Als Kodierungsverfahren im Downlink wird OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) verwendet, das ein auf OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) basierendes Mehrträgerverfahren ist. Der Datenstrom wird hierbei auf viele Unterträger mit einem Trägerabstand von 15 kHz aufgeteilt. Jeder Unterträger wird mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert.

Die Rahmenstruktur ist in der ETSI TS 136 211 [3] standardisiert. Ein so genannter Typ 1 LTE Radio Frame (d.h. für LTE FDD Systeme) hat eine Gesamtlänge von 10 ms (Bild 1). Der Frame wird in 20 einzelne Slots mit je 0,5 ms Länge unterteilt. Zwei aufeinander folgende Slots werden als LTE-Subframe bezeichnet. Beim Typ 1 Frame mit normalem zyklischem Präfix sind pro Slot 7 Symbole enthalten. Das erste der 7 Symbole hat eine Länge von 71,875 μ s, die anderen 6 Symbole sind jeweils 71,354 μ s lang. Die kleinste Zeit-Frequenz-Einheit (1 Symbol auf einem Unterträger) wird Resource Element (RE) bezeichnet. Bei der

FDD Downlink-Rahmenstruktur mit normalem zyklischem Präfix werden 12 aufeinander folgende Unterträger und 7 aufeinander folgende Symbole als Resource Block (RB) bezeichnet. Ein RB besteht somit aus 84 RE (12 Unterträger x 7 Symbole) und belegt 180 kHz im Frequenzbereich (12 x 15 kHz) bzw. 1 Slot im Zeitbereich.

Die Größe eines RB ist für alle Bandbreiten einheitlich, wohingegen die Anzahl der RB von der Kanalbandbreite abhängt. Im Frequenzbereich kann die Zahl der verfügbaren RB von 6 (bei Kanalbandbreite 1,4 MHz) bis 100 (bei Kanalbandbreite 20 MHz) reichen. Somit ist die Signalbandbreite immer etwas kleiner als die Kanalbandbreite; sie variiert von 1,08 MHz (6 RB) bis 18 MHz (100 RB).

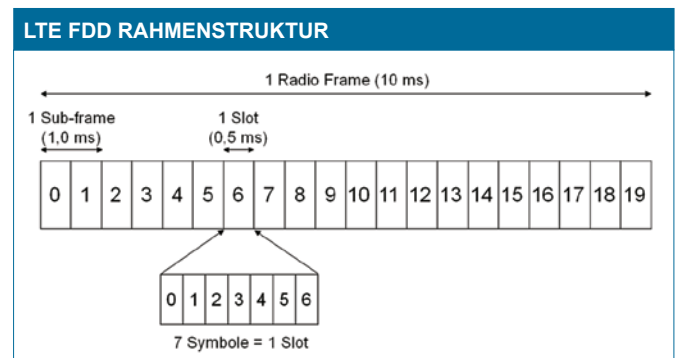


Bild 1

Die Zuordnung der physikalischen Kanäle und Signale in einem Radio Frame wird üblicherweise mit Hilfe des Resource Grids beschrieben (Bild 2). Im Resource Grid werden die Resource Elemente in ein Diagramm eingetragen, wobei die x-Achse die Zeit (bzw. Slotnummer) und die y-Achse die Frequenz (bzw. Nummer des Unterträgers) darstellt. In Bild 2 ist das Resource Grid für ein Downlink FDD Signal bis zum ± 45 . Unterträger abgebildet (nach [4]).

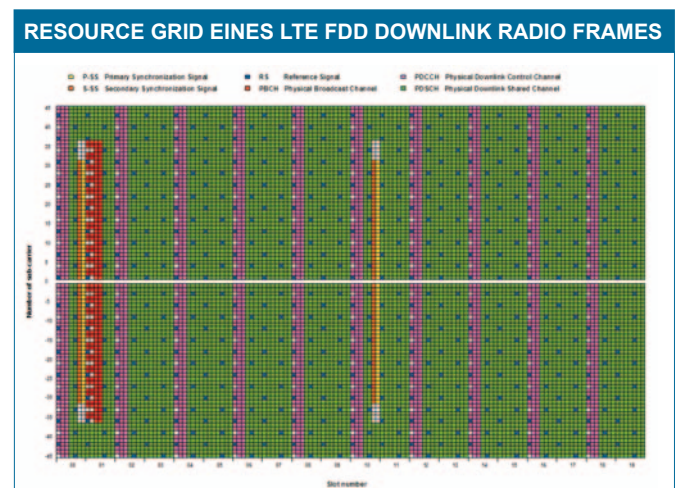


Bild 2

Die Bezeichnung der wichtigsten physikalischen Kanäle und Signale geht aus der folgenden Tabelle hervor:

PDSCH	Physical Downlink Shared Channel: in jedem Subframe, sofern Nutzerdaten übertragen werden
PBCH	Physical Broadcast Channel: 6 RB um Bandmitte, 4 Symbole im Slot 1, alle 40 ms
PDCCH	Physical Downlink Control Channel: in jedem Subframe, geht über alle RB; belegt 1-3 Symbole im ersten Slot jeden Subframes
RS	Reference Signal: in jedem sechsten Unterträger, Symbol 0 und 4 in jedem Slot
P-SS	Primary Synchronization Signal: auf 62 Unterträgern um die Bandmitte auf Symbol 6 in Slot 0 und 10
S-SS	Secondary Synchronization Signal: auf 62 Unterträgern um die Bandmitte auf Symbol 5 in Slot 0 und 10

Tabelle 1: Bezeichnung der wichtigsten physikalischen Kanäle und Signale

Das in Bild 2 dargestellte Resource Grid repräsentiert ein Szenario mit maximalem Verkehr, bei dem alle Resource Elemente gefüllt sind. Sofern keine aktive Verkehrslast im Netz läuft, sind die in Bild 2 grün dargestellten Resource Elemente des PDSCH entweder nicht belegt (weiß) oder teilweise mit Dummy-Daten gefüllt.

Bild 3 zeigt den Signalverlauf eines LTE FDD Downlinksignals im Zeitbereich ohne Verkehr. Das Signal wurde mit einem Spektrumanalysator und einer Empfangsantenne im Umfeld einer realen LTE Basisstation im Testbetrieb gemessen. Die Zeitauflösung betrug 10 ms; dies entspricht der Länge eines Radio Frames. Das Signal weist eine periodische, pulsartige Struktur auf, die durch die Signalisierungskanäle und -signale bedingt ist. Mit Hilfe des Resource Grids (Bild 2) ist es möglich, die gemessenen Immissionen den entsprechenden Signalen bzw. Kanälen zuzuordnen. Dies erfolgt in Bild 4, das eine Vergrößerung des mit einem roten Kreis in Bild 3 markierten Bildausschnitts darstellt. Bei der Interpretation von Bild 4 ist zu beachten, dass bei der vorliegenden Messung offensichtlich der PDCCH nur ein Symbol am Beginn jeden Subframes belegt (und nicht drei, wie in Bild 2 dargestellt). Der PDCCH kann ein bis drei Symbole belegen; der Wert wird durch den PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) festgelegt.

Wenn eine LTE Basisstation Nutzerdaten überträgt, werden die Lücken zwischen den Signalisierungsimpulsen zunehmend mit Verkehrsdaten aufgefüllt. Die Veränderung in der Zeitstruktur ist in Bild 5 dargestellt; hier wurde die Basisstation durch einen Download eines angeschlossenen Endgeräts zum Senden von

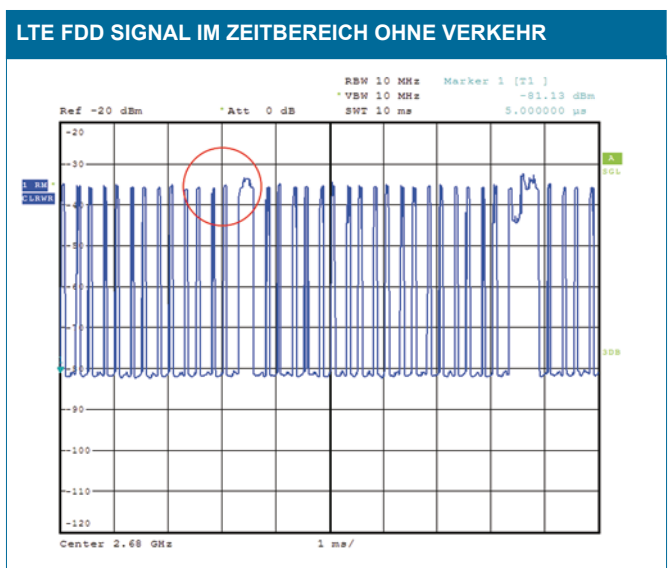


Bild 3

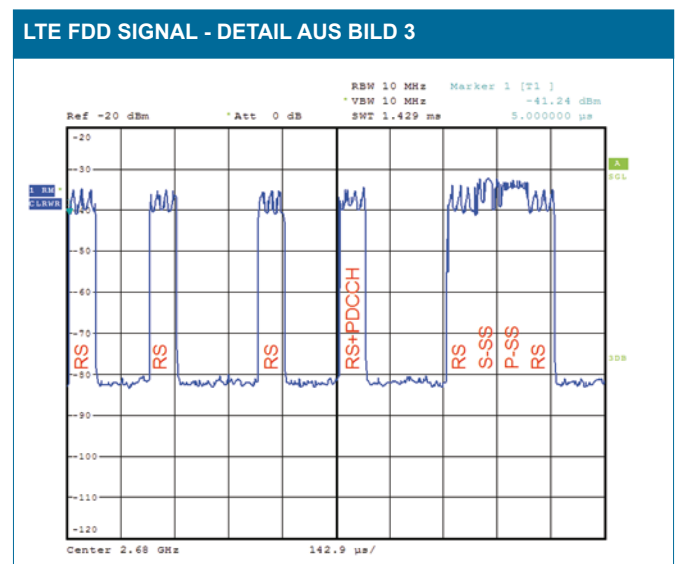


Bild 4

Verkehrsdaten veranlasst. Es ist nun abhängig von der Anzahl der Nutzer, ihrer Kapazitätsanforderung und der Konfiguration des Schedulers (verteilt die Ressourcen sowohl für die Empfangs- als auch für die Senderichtung) der Basisstation, wie die Ressourcen auf die unterschiedlichen Nutzer aufgeteilt werden. Im Fall maximalen Datenverkehrs sind die Pulse von Bild 3 nicht mehr sichtbar und es ergibt sich quasi eine einheitliche Linie. In Abhängigkeit der Leistungskonfiguration der einzelnen Resource Elemente (EPRE, Energy per Resource Element) können einzelne Signalisierungsimpulse (z.B. P-SS und S-SS in einem 5 ms Raster, oder auch die RS) entweder aus dem Signal herausragen (Bild 5) oder durch die Verkehrskanäle überdeckt werden.

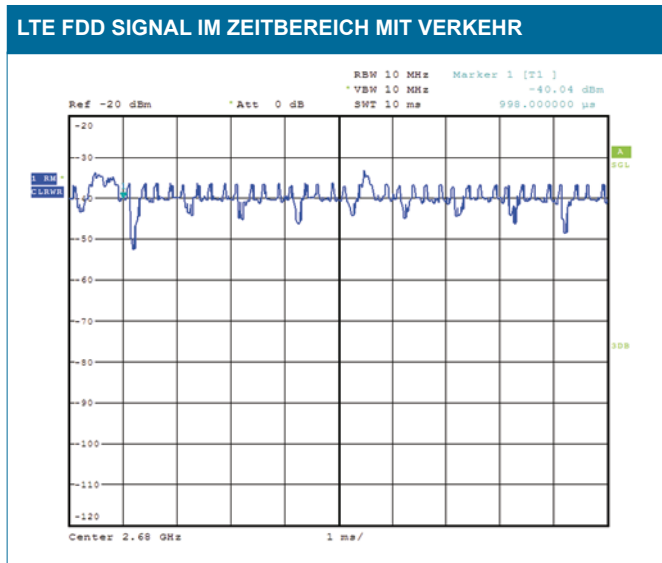


Bild 5

Definition eines Messverfahrens

Grundidee des Messverfahrens unter Berücksichtigung der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ist es, ähnlich wie bei der Expositionserfassung von anderen auslastungsabhängigen Funkdiensten wie GSM, UMTS, WLAN oder WiMAX

1. Signale oder Kanäle zu identifizieren, die unabhängig von der aktuellen Verkehrsauslastung mit konstanter Leistung gesendet werden,
2. deren Immission messtechnisch zu erfassen und
3. mit Hilfe von Angaben zum Verhältnis von maximaler Sendeleistung der Station und Sendeleistung der gemessenen Signale/Kanäle von der gemessenen Exposition auf die maximal mögliche Exposition der Station zu extrapolieren.

Identifizierung von Signalen oder Kanälen, die mit konstanter Leistung gesendet werden

Bei LTE werden sowohl die Signalisierungen P-SS, S-SS und RS, als auch der Kontrollkanal PBCH mit konstanter, verkehrsunabhängiger Leistung gesendet und können daher als Basis für die Hochrechnung dienen. Im Rahmen einer Signalanalyse vor Beginn der Messungen ist zu überprüfen, welches der vorliegenden Signale am Spektrumanalysator die höchste Amplitude erzeugt. Bei den Anlagen, die für die Untersuchungen zur Verfügung standen, waren das jeweils P-SS, S-SS und PBCH. Es ist hierbei von besonderer Bedeutung, dass in Übereinstimmung mit Bild 2 P-SS, S-SS und PBCH in einem etwa 1 MHz breiten Streifen um die Mittenfrequenz unabhängig von der Kanalbandbreite und der aktuellen Verkehrsauslastung konzentriert sind. In der Voranalyse ist ebenfalls die Signalbandbreite des LTE-Signals zu bestimmen, da diese ein wichtiger Faktor für die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung ist.

Immissionsmessung

Der zweite Schritt ist die Messung der Immission desjenigen Kanals bzw. Signals, der/das die höchste Amplitude am Spektrumanalysator hervorruft. Um mit der Messung die Maximalimmission innerhalb des zu untersuchenden Volumens zu erfassen, wird als Messmethode üblicherweise die Schwenkmethode verwendet [5]. Sofern P-SS, S-SS oder PBCH als leistungsstärkste Signale identifiziert wurden, ist es aufgrund ihrer Bandbreite sinnvoll, eine Auflösungsbandbreite (RBW) von 1 MHz am Spektrumanalysator zu verwenden.

Während der Messungen kann der Spektrumanalysator in den Betriebsarten Zero Span (Zeitbereich), spektrale Messung (Frequenzbereich) oder Kanalleistungsmessung betrieben werden. Obligatorisch ist die Verwendung des RMS-Detektors: LTE Signale sind digital modulierte Signale mit zeitlich stark schwankender Hüllkurve. Nach dem den Grenzwertempfehlungen von ICNIRP [6] zugrunde liegenden thermischen Wirkungsmodell muss bei zeitlich schwankender Exposition (aufgrund der schnellen zeitlichen Leistungsschwankungen des Signals durch das Modulationsverfahren) eine zeitliche Mittelung der Exposition durchgeführt werden. Wird die Messung stattdessen mit einem Peak-Detektor durchgeführt, so würde die richtlinienkonform zu bestimmende Exposition um den Crestfaktor überbewertet, der bei LTE Basisstationen etwa 9-12 dB beträgt.

Ein sehr wichtiger Aspekt und eine potenzielle Fehlerquelle ist die Wahl einer geeigneten Sweepzeit:

Einerseits darf keine *zu große Sweepzeit* eingestellt werden, da dann eine *zu große Verweilzeit* pro Pixel entstünde [5]. Zu groß ist die Verweilzeit dann, wenn sie länger ist als die Dauer des zu messenden Pulses. In diesem Fall würden bei einer LTE-Basisstation ohne Verkehr für die rechnerische Bestimmung des RMS-Werts pro Pixel auch Abtastwerte aus Zeiten, in denen kein Signal vorhanden ist, herangezogen, d.h. durch ein „Hineinmitteln in die Pausen“ zwischen zwei Pulsen wird das Signal unterbewertet. Ist hingegen die Verweilzeit kleiner (oder maximal gleich) der Dauer des zu messenden Pulses, ergeben sich auf jeden Fall auch RMS-Werte, die ausschließlich aus Abtastwerten zum Zeitpunkt des Vorhandenseins des Pulses errechnet wurden, so dass bei Nutzung von „Maxhold“ wirklich der RMS-Wert des Signalpulses bestimmt wird. Für die im Anschluss beschriebenen Messungen wurden Spektrumanalysatoren mit einer Horizontalaufösung von 501 Pixeln verwendet. Da die Länge eines LTE-Symbols bei etwa 70 μ s liegt (d.h. 70 μ s sind die maximal erlaubte Verweilzeit pro Pixel), darf die Sweepzeit nicht größer als 35 ms gewählt werden. Für andere Spektrumanalysatoren mit anderen Horizontalaufösungen ergeben sich entsprechend andere Werte. Als Konsequenz einer fehlerhaften Wahl der Sweepzeit zeigten sich bei Messungen an realen LTE Stationen Unterbewertungen von mehreren dB bei Verwendung von Sweepzeiten von 2 s in Vergleich zu 35 ms.

Auf der anderen Seite darf die Sweeptime aber auch nicht *zu klein* gewählt werden. Der RMS-Detektor zeigt nur dann die mittlere Leistung an, wenn er den RMS-Wert aus einer genügend großen Anzahl an Abtastwerten (Samples) errechnen kann. Die Frage, wie viele Samples für einen „stabilen“ RMS-Wert notwendig sind bzw. wie groß der mögliche Fehler wird, wenn weniger Samples zur Verfügung stehen, ist generell geräteabhängig. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Samples aus dem AD-Konverter des Spektrumanalysators unabhängig voneinander sind und für die RMS-Berechnung herangezogen werden dürfen. Die effektive Samplerate wird vielmehr maßgeblich von der Filterbandbreite bzw. der Filtereinschwingzeit bestimmt. Für Gaußfilter ist die Einschwingzeit etwa gleich dem Reziproken der Filterbandbreite. Sofern im obigen Fall mit einem Gauß-Auflösefilter der Bandbreite 1 MHz gemessen wird, hat das Filter eine Einschwingzeit von 1 μ s und es laufen bei einer Verweilzeit von 70 μ s pro Pixel insgesamt 70 unabhängige Samples ein, die für eine RMS-Berechnung zur Verfügung stehen. Aus der Gerätebeschreibung des Spektrumanalysators ist dann die Information zu entnehmen, wie groß die Messgenauigkeit bei der solcherart bestimmten Sampleanzahl ist; diese muss im Gesamtmessunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung

Im letzten Schritt wird die Immission durch den Kanal bzw. das Signal mit der höchsten Amplitude auf die maximal mögliche Immission der Basisstation extrapoliert. Hierbei sind folgende Beiträge zu berücksichtigen:

Zuerst muss eine Bandbreitenkorrektur zwischen Messbandbreite und der Signalbandbreite B_{sig} nach der Formel $10 \cdot \log(B_{\text{sig}}/B_N)$ erfolgen. B_N ist hierbei die äquivalente Rauschbandbreite; diese entspricht bei Gaußfiltern näherungsweise der Auflösungsbandbreite. Wurde z.B. ein LTE-800 Signal (Kanalbandbreite üblicherweise 10 MHz, d.h. Signalbandbreite 9 MHz) mit einer Auflösungsbandbreite von 1 MHz gemessen, beträgt der Hochrechnungsfaktor 9,5 dB.

Weiterhin muss der Leistungsunterschied zwischen dem gemessenen Peakwert des Signals/Kanals mit der größten Amplitude und der mittleren Leistung des LTE-Signals bei Volllast berücksichtigt werden. Dies lässt sich an Bild 5 veranschaulichen: Mittels „Maxhold“-Einstellung am Spektrumanalysator ist der ermittelte Messwert identisch mit dem maximalen, aus dem Signalzug herausragenden Signalanteil (Bildanfang und Bildmitte), wohingegen die nach ICNIRP [6] zu bestimmende zeitgemittelte Immission einige dB niedriger liegt. Zur Ermittlung dieses Korrekturfaktors müssen beim Netzbetreiber die EPRE-Einstellungen der Station abgefragt werden. Diese beinhalten die Information, ob die Resource Elemente aller Kanäle und Signalisierungen mit gleicher Leistung (dann wäre keine Korrektur notwendig) oder mit unterschiedlicher Leistung gesendet werden. Üblicherweise werden die EPRE-Daten einer LTE-Basisstation als relative Werte in Bezug zur EPRE des Referenzsignals RS angegeben.

Mit dem so beschriebenen Verfahren steht ein taugliches Werkzeug zur Verfügung, das mit handelsüblichen Spektrumanalysatoren, wie sich auch zur Immissionsbestimmung z.B. an GSM-, UMTS- oder DVB-T Stationen eingesetzt werden, im gegenwärtigen Aufbauzustand der LTE-Netze eine zuverlässige Immissionsbestimmung bei maximaler Anlagenauslastung ermöglicht. Bei zunehmender Senderdichte ist es jedoch nicht mehr möglich, die Immissionen einer LTE Basisstation eines Betreibers von den Immissionen einer benachbarten Station desselben Betreibers im selben Frequenzband zu separieren, da beide auf derselben Frequenz arbeiten. Obwohl dies aus Strahlenschutzsicht aufgrund einer notwendigen Ermittlung der Gesamtmission eher weniger relevant ist, kann es jedoch aus Risikokommunikationsaspekten notwendig sein, die Immission einer Station getrennt auszuweisen. Außerdem ist für den Fall, dass beide Stationen mit unterschiedlichen EPRE-Einstellungen betrieben werden, mit einer Überschätzung der tatsächlichen Immission zu rechnen, sofern für die Hochrechnung der größere Extrapolationsfaktor der beiden Stationen angewendet wird. Abhilfe schaffen hier Scannermessverfahren, die die Immissionsbeiträge einzelner Stationen desselben Betreibers korrekt ermitteln und von denen anderer Stationen separieren können. Für diese Aufgabenstellung gibt es auf dem Messtechnikmarkt erste Lösungen, die aus dem Gesamtsignal u.a. den Beitrag von P-SS und S-SS dekodieren und, da in diesen Signalisierungssignalen die Cell-ID der Basisstation bzw. der einzelnen Sektoren enthalten ist, für jede Basisstation bzw. Sektor separat darstellen können.

Anwendung des Messverfahrens

Im Rahmen der Pilotstudie „Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen“ im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. (IZMF) wurde das oben beschriebene Verfahren auf die Immissionserfassung im Umfeld realer LTE-Basisstationen angewendet [7]. Hierzu wurden im Sommer und Herbst 2010 die Immissionen an 77 Messpunkten im Umfeld von sieben LTE-Basisstationen im Test- und Pilotbetrieb in den Frequenzbereichen 800 MHz und 2,6 GHz gemessen und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Kurzform als Verteilungsdiagramm in Bild 6 dargestellt. Wie bereits bei Immissionsuntersuchungen an GSM- und UMTS-Basisstationen festgestellt wurde [8], fallen auch bei LTE die meisten Messpunkte in die niedrigste Grenzwertausschöpfungsklasse. Auch die Untersuchungen zur Verteilung der Immission bei verschiedenen Abständen zur Basisstation, in verschiedenen Stockwerken unter der Basisstation und in einem Gebäude gegenüber der Basisstation ergaben analoge Ergebnisse wie bei GSM und UMTS. Bei direktem Vergleich der LTE-Immissionen zu den Immissionen durch am selben Standort installierte GSM- und UMTS-Sender zeigt sich an der überwiegenden Zahl der Messpunkte eine geringere Immission durch die LTE-Anlage. Dabei bleibt natürlich anzumerken, dass die LTE-Netze zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht

flächendeckend aufgebaut waren. Allerdings lässt sich aus den Ergebnissen der Studie bereits jetzt abschätzen, dass sich auch nach einem flächendeckenden Ausbau die Immissionen durch LTE-Sendeanlagen nicht gravierend von den Immissionen der etablierten GSM- und UMTS-Sendeanlagen unterscheiden werden. Die Konzeption der Pilotstudie, die Ergebnisse sowie deren ausführliche Bewertung sind in einer Broschüre beschrieben [7].

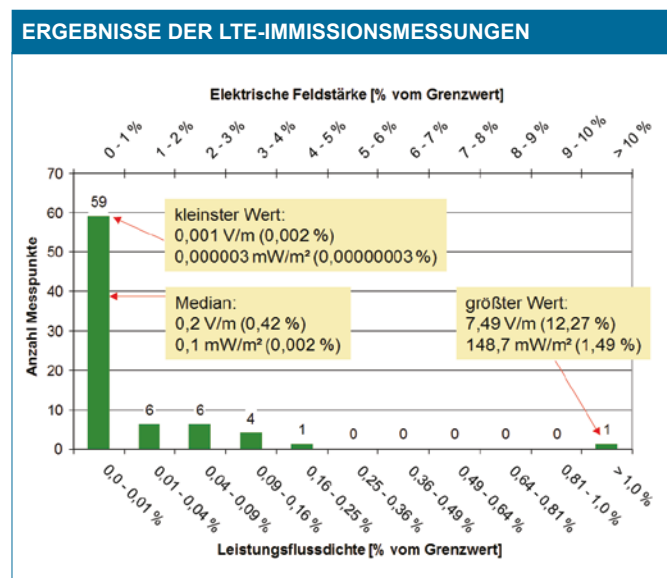


Bild 6

Danksagung

Die Pilotstudie zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen wurde vom Informationszentrum Mobilfunk e.V. (IZMF) initiiert und gefördert. Der Firma Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG München wird für die Bereitstellung von LTE-Signalgeneratoren zur Charakterisierung des Signalverlaufs gedankt.

Literaturverzeichnis

[1] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren and L. Martens. Assessment of general public exposure to LTE and RF sources present in an urban environment. Bioelectromagnetics: DOI 10.1002/bem.20594.

[2] 26. BImSchV. Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.

[3] ETSI TS 136 211. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.8.0 Release 8).

[4] R. Booher, Modulation Fundamentals; Introduction to 3GPP LTE, RF Lecture Series, Verigy.

[5] Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek. Bestimmung der Exposition durch WiMAX, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2009).

[6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 74, 494-522 (1998).

[7] Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen. Pilotstudie im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. Verfügbar unter: http://www.izmf.de/download/downloads/IZMF_LTE-Studie.pdf

[8] Auswertung der FEE-Immissions-Datenbank. Eine Initiative des IZMF unter Schirmherrschaft des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Verfügbar unter: http://www.izmf.de/download/downloads/IZMF_Broschuere_Wissenschaft_Vertrauen_screen.pdf

Autor



Dr. Ing. Christian Bornkessel ist seit 1995 bei der IMST GmbH beschäftigt, wo er seit 2010 die Abteilung „Prüfzentrum“ leitet. Er war verantwortlich für die Planung, Errichtung, Akkreditierung und Inbetriebnahme des EMV-Prüflabors. Seine gegenwärtigen Aktivitäten umfassen die Akquisition und Leitung von EMV-Projekten mit einem Schwerpunkt in der Elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMVU). Im Bereich EMVU liegen seine Kompetenzen in der Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren für hochfrequente Immissionen mit einem Fokus auf Mobilfunk-Sendeanlagen sowie in der Durchführung von umfangreichen Messprojekten. Hierbei sind unter anderem Arbeiten für das Umweltministerium NRW, das Bundesamt für Strahlenschutz und das Informationszentrum Mobilfunk zu nennen. Er ist Mitglied im Fachausschuss 7.1 „Antennen“ der ITG sowie im Ausschuss „Nichtionisierende Strahlung“ der Deutschen Strahlenschutzkommission.

Kontakt:

Dr. Ing. Christian Bornkessel
IMST GmbH - Abteilung Prüfzentrum
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2-4

47475 Kamp-Lintfort

Telefon: 02842 / 981-100

E-Mail: bornkessel@imst.de