

Nach der Frequenzversteigerung 2010: Mit LTE in die 4. Mobilfunkgeneration

Dr.-Ing. Martin H. Virnich

1 Innerhalb von zwei Jahrzehnten: Vier Generationen von Mobilfunksystemen

1.1 Die 1. Generation – Analoge Technik

Das A- und B-Netz, die zur ersten Generation der Mobilfunksysteme zählenden Netze, die in den 70er und 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts aufgebaut und betrieben wurden, trugen damals bezeichnenderweise den Namen „Autotelefon“, und die im Kfz eingebauten Geräte waren weit davon entfernt, hinsichtlich Größe, Gewicht und Stromverbrauch mit einem modernen „Handy“ der zweiten, dritten oder gar vierten Mobilfunkgeneration mithalten zu können. Ganz zu schweigen vom Preis des Autotelefons, der auch schon einmal den Preis des Pkw übersteigen konnte und von den Kosten des Telefonierens – „flat rate“ war damals ein unbekanntes Wort. Das Autotelefon war daher im Wesentlichen der beruflichen Nutzung von besonders bedeutenden und/oder betuchten Geschäftsleuten vorbehalten und quasi das Gegenteil von einem Massenmedium wie der Mobilfunk heute. Die Technik war – den damaligen Möglichkeiten entsprechend – rein analog.

Mit der Einführung des C-Netzes erfolgte ab 1984 ein erster Schritt in Richtung Digitalisierung: Die Sprachübertragung war zwar immer noch analog, aber die Steuerungsdaten des Systems wurden in digitaler Form übertragen. Das C-Netz erreichte auch erstmals eine nahezu vollständige Versorgung in der Fläche und aufgrund einer drastischen Preissenkung eine größere Teilnehmerzahl in der Bevölkerung (etwa eine Million bei einer Infrastruktur von ca. 2.000 Basisstationen) – nicht zuletzt auch deshalb, weil man bei den Mobilteilen aufgrund fortschreitender Miniarisierung nun erstmals von einfach zu transportierenden „Handys“ reden konnte.

1.2 GSM, die 2. Generation – Ab jetzt voll digital

Inzwischen war durch die Entwicklung komplett digitaler Technik – inklusive der Sprachübertragung – ein Mobilfunksystem entstanden und wurde ab 1992 am Markt eingeführt, das hinsichtlich Komfort, Leistungsfähigkeit und Kosten das alte analoge System binnen kurzer Zeit überflügelte: GSM (Global System for Mobile Communications) war das Mobilfunksystem der 2. Generation (2 G) – in Deutschland eher bekannt als D-Netz (GSM 900) und E-Netz (GSM 1800) –, mit dem die Massennutzung des Mobilfunks den großen Durchbruch erreichte – begleitet vom Aufbau von schätzungsweise rund 45.000 Basisstationen, die für einen flächendeckenden Betrieb erforderlich sind. Die Signalcharakteristik bei GSM ist geprägt durch das Zugriffsverfahren TDMA (Time Division Multiple Access), das zu einer periodischen Pulsung des Signals führt. Details hierzu siehe [1].

1.3 UMTS, die 3. Generation – High Speed Datenübertragung

Bald schon wurde das Telefonieren zur „Nebennutzung“ des Handys: SMS, Spiele, Empfang und Versand von Bildern und Daten, Internetzugriff usw. erforderten immer höhere Übertragungsraten und Netzkapazitäten. Als Mobilfunksystem der 3. Generation (3 G) trat – nach langen Anlaufschwierigkeiten – Mitte des vorigen Jahrzehnts UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) in den heiß umkämpften und mittlerweile zu einem bedeutsamen Wirtschaftsfaktor angewachsenen Mobilfunkmarkt ein, der auch im Sozialverhalten der Bevölkerung und hier insbesondere bei den Jugendlichen deutliche Spuren hinterlassen hat [2]. Mit UMTS erreichte die Durchdringung der deutschen Bevölkerung mit Mobilfunk statistisch betrachtet erstmals mehr als 100 Prozent! Die Funkübertragung bei UMTS erfolgt mit dem Zugriffsverfahren W-CDMA (Wide-

band Code Division Multiple Access) nach völlig anderen Prinzipien als bei GSM; dementsprechend ist die Signalcharakteristik auch völlig anders. Details hierzu siehe [3].

Bald war auch schon das „normale“ UMTS zu langsam; daher wurden zur Beschleunigung der Datenraten die „High Speed“-Varianten HSPA/HSPA+ (High Speed Packet Access) entwickelt und innerhalb kurzer Zeit eingeführt.

1.4 LTE, die 4. Generation ?

Und wieder ertönt nun der Ruf nach noch schnelleren Systemen für die von der deutschen Regierung im EU-Konsens vorangetriebene Breitbandversorgung der Bevölkerung auch außerhalb der Ballungsgebiete. Die Antwort der Industrie ist LTE (Long Term Evolution), für das die Frequenzen in Deutschland im Jahr 2010 versteigert wurden und das als Mobilfunksystem der 4. Generation (4 G) vermarktet wird. Erste LTE-Basisstationen befinden sich seit dem Sommer 2010 im Test- und Pilotbetrieb, der Netzausbau wird von den Betreibern forciert.

Und wieder wird eine neue Funktechnik mit einer neuen Signalcharakteristik eingesetzt:

- Im Downlink (Verbindung Basisstation → Mobilteile):
OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- Im Uplink (Verbindung Mobilteil → Basisstation):
SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)

Bei der Zuordnung von LTE zu einer Mobilfunkgeneration gibt es jedoch scheinbare Widersprüche, da es manchmal schon der 4. und manchmal noch der 3. Mobilfunkgeneration zugeordnet wird. Dies liegt jedoch nur daran, dass Marketingstrategen gerne bereits etwas propagieren, das die Technik noch nicht wirklich erfüllen kann. LTE gehört wie UMTS und HSPA/HSPA+ aufgrund seiner technischen Leistungsmerkmale noch zur dritten Mobilfunkgeneration. Die Merkmale für die Zuordnung zu einer Mobilfunkgeneration werden von der ITU (International Telecommunication Union) festgelegt (s. Abb. 1).

Mobilfunk-Generation	Technische Anforderungen der ITU
1. Generation	Nicht spezifiziert (analoge Technologie)
2. Generation	Nicht spezifiziert (erste digitale Technologien wie GSM)
3. Generation	ITU IMT-2000: 144 kbps ¹ bei mobiler Nutzung, 384 kbps bei niedriger Geschwindigkeit; z.B. UMTS, HSPA/HSPA+, WiMAX, LTE
4. Generation	ITU IMT-Advanced: Hohe Spektraleffizienz, 40 MHz Kanalbandbreite; z.B. LTE-Advanced

Abb. 1: Technische Anforderungen der ITU an die Mobilfunkgenerationen

Im LTE-Standard reichen u.a. die Spektraleffizienz und Kanalbandbreitennutzung nicht aus, um die Anforderungen für den 4G Standard (IMT-Advanced) der ITU zu erfüllen. LTE wird unter Marketinggesichtspunkten aber trotzdem oft schon als neue „4G-Technologie“ beworben, da der potentielle Kunde hiermit höhere Datenraten und leistungsfähigere Technik verbindet.

Erst beim LTE-Nachfolger „LTE-Advanced“, an dessen Entwicklung bereits gearbeitet wird, handelt es sich um eine „echte“ 4G-Technologie, welche die Anforderungen der ITU an diese Mobilfunkgeneration voll erfüllt.

¹ kbps: Kilobit pro Sekunde (Datenrate)

2 Frequenzversteigerung 2010 Deutschland: Frequenzen für den drahtlosen Netzzugang / LTE

2.1 Die versteigerten Frequenzen

Wesentlich unspektakulärer – und auch mit einem deutlich niedrigeren Erlös (4,4 Milliarden Euro) – als im Jahr 2000 bei der Versteigerung der UMTS-Frequenzen (ca. 50 Milliarden Euro²) fand im April 2010 in Deutschland eine Versteigerung von Frequenzen mit einem wesentlich größeren Umfang des angebotenen Frequenzspektrums (insgesamt ca. 360 MHz) statt. Das Motto der Versteigerung lautete: „Drahtloser Netzzugang“ – es ging um Frequenzen für schnelle drahtlose Breitbanddienste mit dem Focus auf Internet und Email und dabei insbesondere um Frequenzen für den neuen Mobilfunkdienst LTE.

Vergleich Frequenzversteigerung 2010 - UMTS-Versteigerung		
	Drahtloser Netzzugang 2010	UMTS IMT-2000
Frequenzbereiche	800 MHz, 1,8 GHz, 2,0 GHz, 2,6 GHz	2,0 GHz
Umfang des Frequenzspektrums	ca. 360 MHz	145 MHz
Anzahl der Frequenzblöcke	41 Frequenzblöcke in 6 Frequenzkategorien, davon 29 gepaart (je 2x5 MHz) 12 ungepaart (11x (1x5 MHz) sowie 1 x 14,2 MHz)	12 Frequenzblöcke gepaart (je 2x5 MHz) in einer Frequenzkategorie; 5 Frequenzblöcke ungepaart (je 1x5 MHz) in einer Frequenzkategorie
Auktionsverfahren	einstufig (alle Frequenzblöcke werden gleichzeitig angeboten) ggf. zweiter Auktionsabschnitt für sog. gestrandete Blöcke	1. Abschnitt nur für gepaarte Frequenzblöcke 2. Abschnitt für ungepaartes Spektrum und ggf. zusätzlich für gestrandete Blöcke aus dem 1. Abschnitt
Aktivitätsphasen	vier aufeinanderfolgende Aktivitätsphasen (50%, 65%, 80% 100%)	immer 100 % Aktivität
Mindestgebot	1 x 5 MHz = 1,25 Mio € 2 x 5 MHz = 2,5 Mio €	1 x 5 MHz = 25,565 Mio € 2 x 5 MHz = 51,129 Mio €
Rundenzeit (grundsätzlich)	90 Minuten	40 Minuten
Anzahl der Runden		173 Runden (1. Abschnitt) 9 Runden (2. Abschnitt)
Beginn der Versteigerung	12.04.2010	31.07.2000
Dauer der Versteigerung		ca. 3 Wochen (bis 18.08.2000)

© Bundesnetzagentur 2010 Frequenzversteigerung 2010 9

Abb. 2: Vergleich der Frequenzversteigerungen 2010 „Drahtloser Netzzugang“ und 2000 „UMTS“ (Quelle: Bundesnetzagentur [4], S. 9)

Zur Versteigerung standen 41 Frequenzblöcke (überwiegend zu je 5 MHz) in 6 Frequenzkategorien, davon 29 gepaart für das Duplexverfahren FDD (Frequency Division Duplex) und 12 ungepaart für das Duplexverfahren TDD (Time Division Duplex).

Die 41 Frequenzblöcke teilen sich auf 6 Frequenzkategorien auf, von denen aber – wie ansonsten bei bisherigen Versteigerungen üblich – nur einige neu waren. Denn zusätzlich wurden „Frequenzlücken“ in bereits etablierten Mobilfunkbändern (GSM 1800 und UMTS) geschlossen und außerdem wurde der obere Teilbereich des bestehenden Frequenzspektrums des Digitalen Terrestrischen Fernsehens DVB-T (um 800 MHz) für LTE umgewidmet.

² Kommentar des damaligen Bundesfinanzministers Hans Eichel ob des unerwarteten Geldsegens für den Staat: „UMTS steht für ‚Unerwartete Mehreinnahme zur Tilgung von Staatsschulden‘“.

Die Frequenzen um 800 MHz waren aufgrund des guten Ausbreitungsverhaltens und der guten Eindringfähigkeit in Gebäude die begehrtesten. Dieser Frequenzbereich wird politisch auch unter dem Slogan „Digitale Dividende“ gehandelt, da er aufgrund der höheren spektralen Effizienz des digitalen Fernsehens gegenüber dem analogen frei gemacht werden konnte. Beim digitalen Fernsehen im UHF-Bereich beträgt die Bandbreite eines Kanals zwar ebenso 8 MHz wie beim ehemaligen analogen Fernsehen, aber in einem 8MHz-Kanal können mit der DVB-T-Technik nun vier digitale Programme statt nur einem analogen untergebracht werden.

Die erwähnten sechs Frequenzkategorien sind in der folgenden Kurzübersicht zusammengestellt:

1. Frequenzbereich bei 800 MHz (FDD 2 x 30 MHz), vorgesehen insbesondere für LTE (LTE 800 MHz), so genannte „Digitale Dividende“
2. Frequenzbereich bei 1,8 GHz (FDD 2 x 25 MHz): Füllung von Lücken im E-Netz / GSM 1800
3. Frequenzbereich bei 2 GHz (FDD 2 x 19,8 MHz): Füllung von Lücken im UMTS-Netz (UMTS FDD); diese waren zwar bei der UMTS-Frequenzauktion 2000 versteigert worden, wurden aber nie genutzt, da die Erwerber der Frequenzen (Group3G/Quam und Mobilcom) auf einen Ausbau ihrer UMTS-Netze verzichteten und gar nicht am Mobilfunkmarkt antraten
4. Frequenzbereich bei 2 GHz (TDD 19,2 MHz): 5 MHz-Block bei 1.900,1 MHz (im Jahr 2000 als Frequenz für UMTS TDD von Quam ersteigert, aber nicht genutzt) und 14,2 MHz-Block bei 2.010,5 MHz (seit 2000 für lizenzfreie UMTS TDD-Anwendungen und E-Plus vorgesehen, aber nicht genutzt)
5. Frequenzbereich bei 2,6 GHz (FDD 2 x 70 MHz), vorgesehen insbesondere für LTE (LTE 2,6 GHz)
6. Frequenzbereich bei 2,6 GHz (TDD 50 MHz)

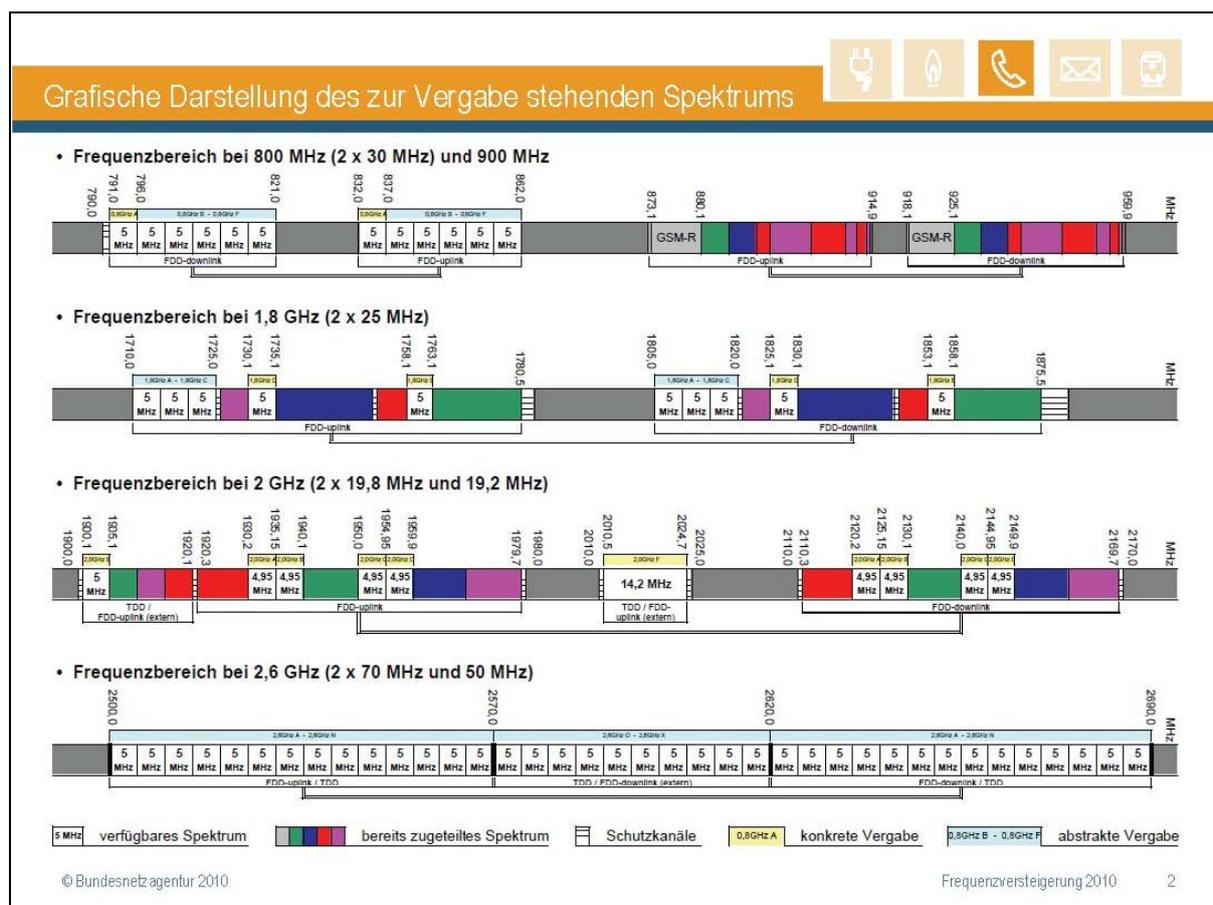


Abb. 3: Das 2010 zur Vergabe stehende Spektrum (Quelle: Bundesnetzagentur: [4], S. 2)

Im Gegensatz zu allen vorausgegangenen Versteigerungen wurden 2010 zum ersten Mal die Frequenzen „technologieneutral“ angeboten. D.h. die für die Versteigerung zuständige Bundesnetzagentur (BNetzA) machte nicht wie bisher die Vorgabe, dass in einem bestimmten Fre-

quenzband eine bestimmte Mobilfunktechnologie eingesetzt werden muss, sondern der Netzbetreiber kann selbst entscheiden, ob er in seinem neu erworbenen Frequenzspektrum die Mobilfunktechnologie GSM, UMTS oder LTE einsetzen möchte. Waren die Mobilfunkbänder bisher, was die Funktechnologie betrifft, „sortenrein“, so besteht hiermit erstmals die Möglichkeit zum „Technologiemix“ innerhalb eines Mobilfunkbandes.

2.2 Die ersteigerten Frequenzen

An der Versteigerung beteiligten sich die etablierten Mobilfunkbetreiber T-Mobile, Vodafone, E-Plus und O2. Die ausgeschriebenen Frequenzen wurden wie folgt verteilt:

1. Frequenzbereich bei 800 MHz (FDD 2 x 30 MHz, Digitale Dividende / LTE 800 MHz)
O2, T-Mobile und Vodafone je 2 x 10 MHz; E-Plus ging bei der Ersteigerung dieser begehrten Frequenzen leer aus
2. Frequenzbereich bei 1,8 GHz (FDD 2 x 25 MHz, Lücken im E-Netz / GSM 1800)
T-Mobile 2 x 15 MHz, E-Plus 2 x 10 MHz
3. Frequenzbereich bei 2 GHz (FDD 2 x 19,8 MHz): Lücken im UMTS-Netz
Vodafone 2 x 4,95 MHz, E-Plus 2 x 9,9 MHz, O2 2 x 4,95 MHz
4. Frequenzbereich bei 2 GHz (TDD 19,2 MHz): 5 MHz-Block bei 1.900,1 MHz und 14,2 MHz-Block bei 2.010,5 MHz
O2 5 MHz + 14,2 MHz
5. Frequenzbereich bei 2,6 GHz (FDD 2 x 70 MHz, LTE 2,6 GHz)
T-Mobile 2 x 20 MHz, Vodafone 2 x 20 MHz, E-Plus 2 x 10 MHz, O2 2 x 20 MHz; überwiegend in Doppelblöcken zu je 10 MHz
6. Frequenzbereich bei 2,6 GHz (TDD 50 MHz)
T-Mobile 5 MHz, Vodafone 25 MHz, E-Plus 10 MHz, O2 10 MHz

Bei den besonders begehrten Frequenzen im Bereich um 800 MHz war E-Plus leer ausgegangen. Da die Frequenzen dieser Auktion technologieneutral ausgeschrieben waren, unternahm E-Plus daraufhin einen bisher nie da gewesenen, aber eigentlich logischen und konsequenten Schritt:

E-Plus verfügt im D-Netz, das ähnlich gute Ausbreitungseigenschaften aufweist wie die LTE-Frequenzen der „Digitalen Dividende“ um 800 MHz, aber für die Mobilfunktechnologie GSM 900 genutzt wird, über einen 5 MHz breiten Frequenzblock. Man beantragte bei der Bundesnetzagentur, an 25 Standorten im D-Netz als breitbandige Technologie auch UMTS bzw. HSPA/HSPA+ betreiben zu dürfen. Diesem Antrag wurde von der Bundesnetzagentur stattgegeben, worüber sich die übrigen Betreiber, die erfolgreich LTE800-Frequenzen ersteigert hatten, zum Teil „irritiert“ zeigten.

Nach Angabe der Bundesnetzagentur gibt es zwar keine generelle Freigabe der GSM-Frequenzen für den Einsatz anderer Technologien, die BNetzA weist aber darauf hin, dass es auch den anderen Netzbetreibern freisteht, entsprechende Anträge zu stellen.

Der Anfang ist mit dem Vorstoß von E-Plus nun aber gemacht, und es ist zu erwarten, dass es international längerfristig zu einem umfangreichen „Refarming“, d.h. einer Neuverwendung der GSM-Frequenzen kommen wird. Ein Beispiel hierfür gibt es bereits in Polen. Dort hat ein Netzbetreiber ungenutzte GSM-Frequenzen im E-Netz (GSM 1800) verwendet, um ein LTE-Netz aufzubauen.

Nach der Versteigerung der LTE-Frequenzen machte E-Plus noch mit einer weiteren Besonderheit auf sich aufmerksam. Während die übrigen Netzbetreiber bei der LTE-Einführung mit der FDD-Version beginnen (Frequenzduplex mit gepaarten Frequenzblöcken, getrennt für Up- und Downlink), legt E-Plus gleich zu Beginn der Einführung auch einen Schwerpunkt auf die TDD-Version im 2,6 GHz-Bereich (Zeitduplex, mit ungepaarten Frequenzblöcken; Up- und Downlink arbeiten auf der gleichen Frequenz, abwechselnd in verschiedenen Zeitfenstern, was unvermeidlich zu einem An-/Aus-Pulseffekt bei Basisstationen und Mobilteilen führt.

3 Technische Funktionsweise von LTE

Im Gegensatz zu GSM und UMTS ist die Kanalbandbreite bei LTE nicht fix, sondern es können – je nach geplanter Kapazität und Anforderungen an die Datenrate – unterschiedliche Bandbreiten zum Einsatz kommen: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz.

Auf der „Luftschnittstelle“ wird als Funkübertragungsverfahren im Uplink (Verbindung Mobilteil → Basisstation) SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) eingesetzt, das weniger Akkuleistung braucht als das im Folgenden näher beschriebene OFDMA im Downlink.

Für den Downlink (Verbindung Basisstation → Mobilteile) wird OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) verwendet, bei dem nicht nur – wie klassischerweise in der Funktechnik üblich – eine einzige Trägerfrequenz verwendet wird, sondern der Datenstrom wird hierbei auf viele Unterträger mit einem Trägerabstand von 15 kHz aufgeteilt (bei Kanalbandbreite 1,4 MHz 72 Unterträger, 3 MHz 180 Unterträger, 5 MHz 300 Unterträger, 10 MHz 600 Unterträger, 20 MHz 1.200 Unterträger). In der spektralen Darstellung auf der Frequenzachse mittels Spektrumanalysator ergibt sich hierdurch der typische „Tafelberg“ gemäß Abb. 4.

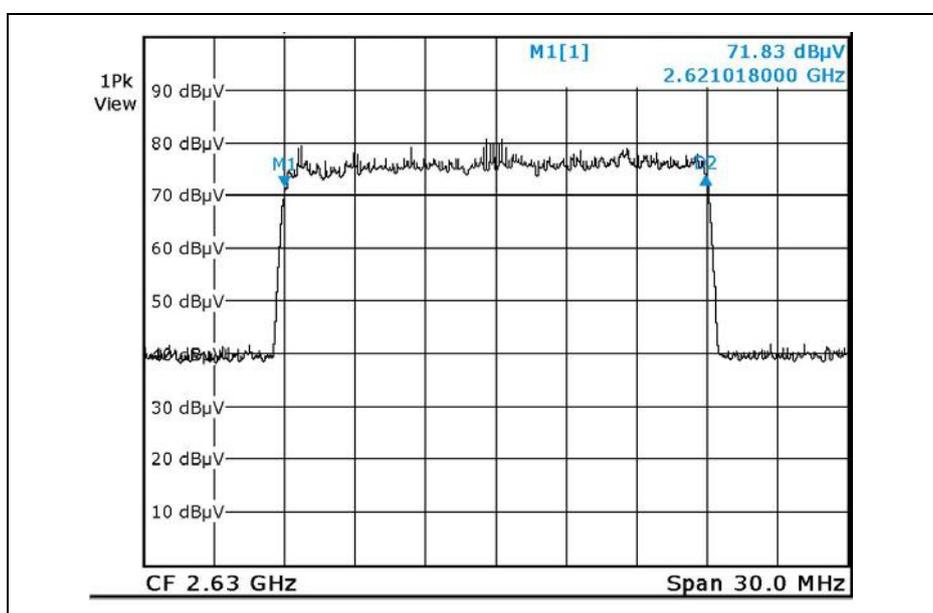


Abb. 4: Spektrum eines LTE FDD-Signals (Testbetrieb), angezeigter Spektrumausschnitt (Span) 30 MHz, Kanalbandbreite 20 MHz

Durch die „Parallelisierung“ des Datenstroms können die einzelnen Datensymbole mit einer niedrigeren Datenrate gesendet werden, was die Anfälligkeit gegen Störungen deutlich reduziert. Die Unterträger werden – je nach Qualität und Robustheit der Übertragungsstrecke – mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert. Dies führt insgesamt zu einem Signal, das als „technisches Rauschen“ bezeichnet wird und einen Crestfaktor (Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert) von ca. 9 - 12 dB aufweist.

Bei LTE handelt es sich um ein so genanntes Gleichwellensystem, bei dem – anders als bei GSM und sonstigen herkömmlichen Funkdiensten – die Basisstationen eines Betreibers, auch wenn die Standorte räumlich eng benachbart sind, auf den gleichen Frequenzen arbeiten.

Auf der logischen Ebene (Datenebene) wird das LTE-Signal nach bestimmten Regeln strukturiert und hierzu in so genannte „Radio Frames“ unterteilt. Ein LTE Radio Frame vom Typ 1, wie er bei LTE FDD Verwendung findet, hat eine Länge von 10 ms. Dieser Radio Frame wird in 20 so genannte Slots unterteilt, von denen jeder dementsprechend 0,5 ms lang ist. Zwei aufeinander folgende Slots werden als LTE Subframe bezeichnet und haben eine Länge von 1 ms. Ein Slot umfasst beim Typ 1 Radio Frame 7 Symbole, in denen die eigentliche Information enthalten ist. Informationen sind zum einen die zu übertragenden Benutzerdaten (Payload), zum anderen sind aber auch technische Daten zur Steuerung und Organisation des LTE-Systems erforderlich, die in „Signalisierungs- und Kontroll-

kanälen“ übertragen werden. Diese Kanäle werden bei LTE im Frequenzbereich durch Zuordnung zu bestimmten Unterträgern und im Zeitbereich durch bestimmte Positionen im Radio Frame bzw. im Slot definiert – sie erhalten sozusagen „feste Plätze“ auf der Frequenz- und der Zeitachse zugewiesen.

Die wichtigsten Signalisierungs- und Kontrollkanäle mit ihrer Zuordnung auf Frequenz- und Zeitachse sind im Folgenden aufgeführt (fett hervorgehobene vgl. Abb. 6).

PDCCH: Physical Downlink Control Channel

geht über alle Unterträger; in jedem Subframe, belegt 1 bis 3 Symbole im ersten Slot eines 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

PBCH: Physical Broadcast Channel

auf 72 Unterträgern um die Bandmitte; 4 Symbole im Slot 1, alle 40 ms

PDSCH: Physical Downlink Shared Channel

in jedem Subframe, aber nur, wenn Benutzerdaten übertragen werden.

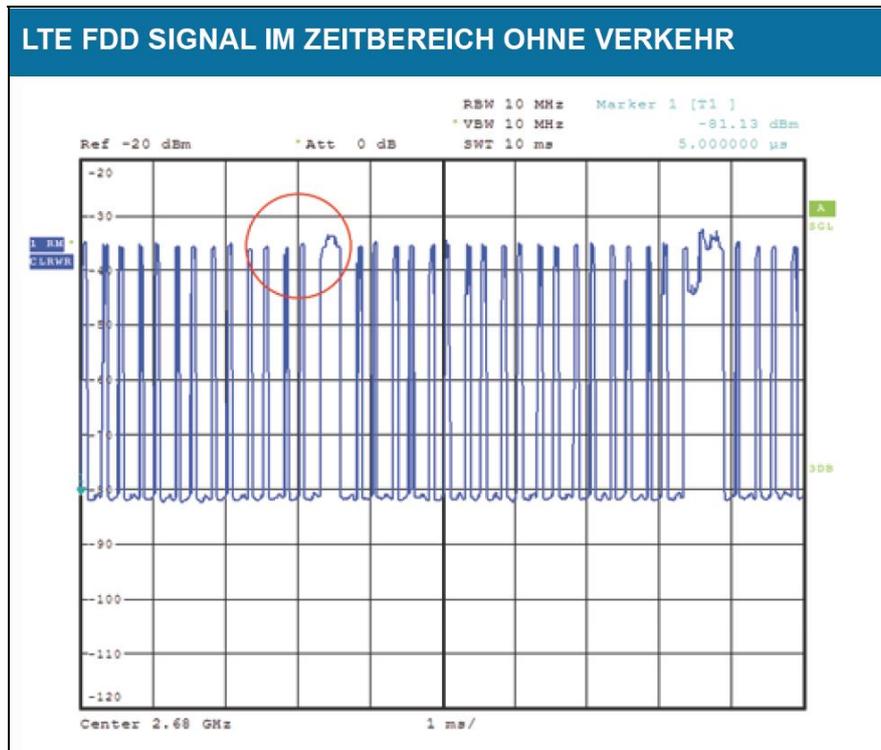


Abb. 5: LTE FDD-Signal im Zeitbereich, ohne Verkehr (Benutzerdaten), auf der horizontalen Zeitachse 1 ms pro Teilung, Gesamtzeit der Achse 10 ms, entsprechend einem Typ 1 LTE Radio Frame (20 Slots) (Quelle: [5], S. 12)

Im zeitlichen Verlauf des LTE-Signals ohne Verkehrslast (Standby) finden sich die oben fett hervorgehobenen Signalisierungs- und Kontrollkanäle deutlich als Pulsstruktur wieder. Abb. 5 zeigt den Zeitverlauf über einen gesamten Typ 1 Radio Frame mit 20 Slots, Abb. 6 zeigt einen detaillierteren Auszug daraus (Kreis in Abb. 5) über knapp 3 Slots. Hier sind die von RS, PDCCH, P-SS und S-SS hervorgerufenen Pulse gekennzeichnet. Mit zunehmender Verkehrslast werden die Lücken zwischen den Signalisierungskanälen immer mehr gefüllt, bis schließlich bei Volllast keine Einzelpulse mehr erkennbar sind (Abb. 7).

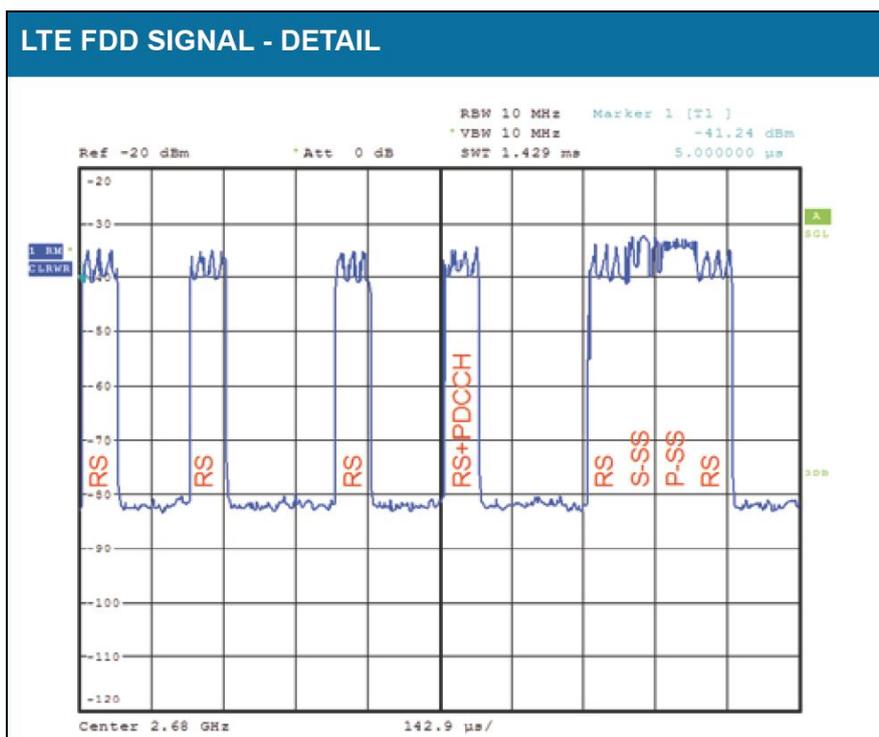


Abb. 6: LTE FDD-Signal im Zeitbereich, ohne Verkehr (Benutzerdaten), Detail aus Abb. 5, auf der horizontalen Zeitachse 142,9 μ s pro Teilung, Gesamtzeit der Achse 1,429 ms, entsprechend 20 Symbolen (knapp 3 Slots) (Quelle: [5], S. 12)

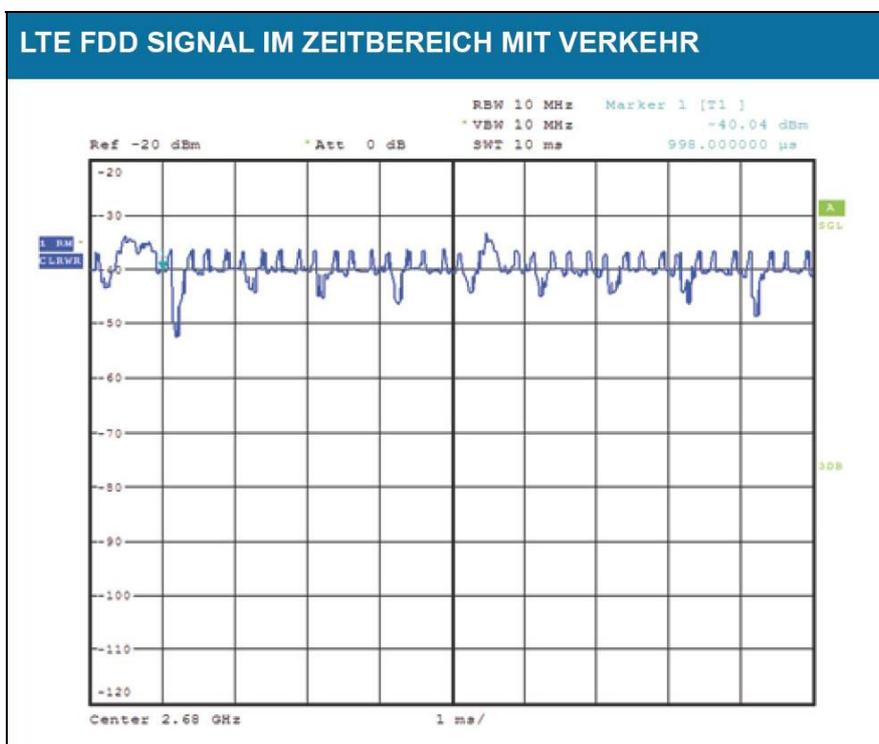


Abb. 7: LTE FDD-Signal im Zeitbereich mit Verkehr, auf der horizontalen Zeitachse 1 ms pro Teilung, Gesamtzeit der Achse 10 ms, entsprechend einem Typ 1 LTE Radio Frame (20 Slots) (Quelle: [5], S. 13)

Mit der Füllung der Lücken zwischen den Signalisierungskanälen im Zeitbereich bei zunehmender Verkehrslast geht auch eine Auffüllung der Subträger im Frequenzbereich einher. Je mehr Teilnehmer über eine LTE-Basisstation arbeiten und je höhere Datenraten sie von der Basisstation abfordern, um so mehr Subträger werden aktiviert. Durch diese Möglichkeit der flexiblen Zuordnung von Bandbreite zu den einzelnen Nutzern kann die vorhandene Bandbreite optimal aufgeteilt werden, was die spektrale Effizienz wesentlich erhöht.

Die Sendeleistung der Signalisierungs- und Kontrollkanäle ist pro Basisstation individuell einstellbar, bleibt aber während des Betriebs unabhängig von der Auslastung der Basisstation konstant.

Das LTE-Netz ist – dem verfolgten Hauptziel der schnellen Breitbandversorgung entsprechend – vollständig IP basiert und damit an den technischen Gegebenheiten des Internets (IP = Internet Protocol) orientiert. Damit ergeben sich – als Kehrseite der Medaille – Probleme bei denjenigen Diensten, die bei den etablierten Mobilfunksystemen GSM und UMTS nicht IP-basiert funktionieren, und dies ist als zentraler Dienst ausgerechnet die Sprachübertragung. Kurz und knapp gesagt ist LTE eigentlich für Sprachübertragung („Mobiltelefonieren“) gar nicht vorgesehen. Die ersten LTE-Netze in Skandinavien wurden denn auch tatsächlich ohne die Möglichkeit der Sprachübertragung in Betrieb genommen. Um Telefonie in LTE dennoch zu realisieren, muss man einen nicht unerheblichen technischen Zusatzaufwand betreiben, um VoIP (Voice over IP, Sprache über Internet Protocol) in Echtzeit zu ermöglichen.

4 LTE-Immissionen im Vergleich zu GSM und UMTS (IMST-Messbericht)

Bereits relativ früh, deutlich vor der Breitereinführung von LTE, wurden erste Immissionsmessungen in der Nähe von LTE-Basisstationen zur Expositionsabschätzung unter Praxisbedingungen durchgeführt. Wenn am Standort der LTE-Anlage auch Anlagen der etablierten Mobilfunksysteme GSM (D-Netz, E-Netz) und UMTS installiert waren, so wurden deren Immissionen zum Vergleich mit erfasst.

Die Ergebnisse sind im „Messbericht zum Projekt ‚Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen‘ [6] zusammengefasst.

Die Messungen wurden von der IMST GmbH Kamp Lintfort (Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik) im Auftrag des Informationszentrum Mobilfunk e.V. (IZMF) durchgeführt. Gemessen wurde im Zeitraum Juli bis Oktober 2010 an insgesamt 77 Messpunkten in der Umgebung von fünf LTE-Basisstationen im Testbetrieb und zwei Basisstationen im Pilotbetrieb in den Städten Düsseldorf, Kyritz, Mönchengladbach, München und Stuttgart. Die Messungen erfolgten sowohl im Frequenzbereich LTE 800 (Frequenzbereich der „Digitalen Dividende“) als auch im Frequenzbereich 2,6 GHz.

Die Zusammenfassung der Messergebnisse ist aus der folgenden Abbildung ersichtlich. Wie bei solchen Untersuchungen üblich, erfolgt die Bewertung der gemessenen Immissionen auf Basis der Grenzwerte der 26. BImSchV (26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 16.12.1996 [7]). Angegeben sind nicht absolute Werte der Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte, sondern die Ausschöpfung des Grenzwertes in Prozent.

Angegeben ist jeweils die auf Basis der Messungen hochgerechnete Maximalimmission bei Vollausbau und maximaler Sendeleistung der Anlagen. Im Realbetrieb liegen die Immissionen unter den hier dargestellten Maximalwerten.

Zu Beachten ist bei der Betrachtung der Grenzwertausschöpfung, dass der Grenzwert der 26. BImSchV frequenzabhängig und für die verschiedenen LTE-Frequenzbänder unterschiedlich ist. So liegt der Grenzwert für LTE 800 MHz bei 40 V/m resp. 4.000 mW/m² und für LTE 2,6 GHz bei 61 V/m resp. 10.000 mW/m².

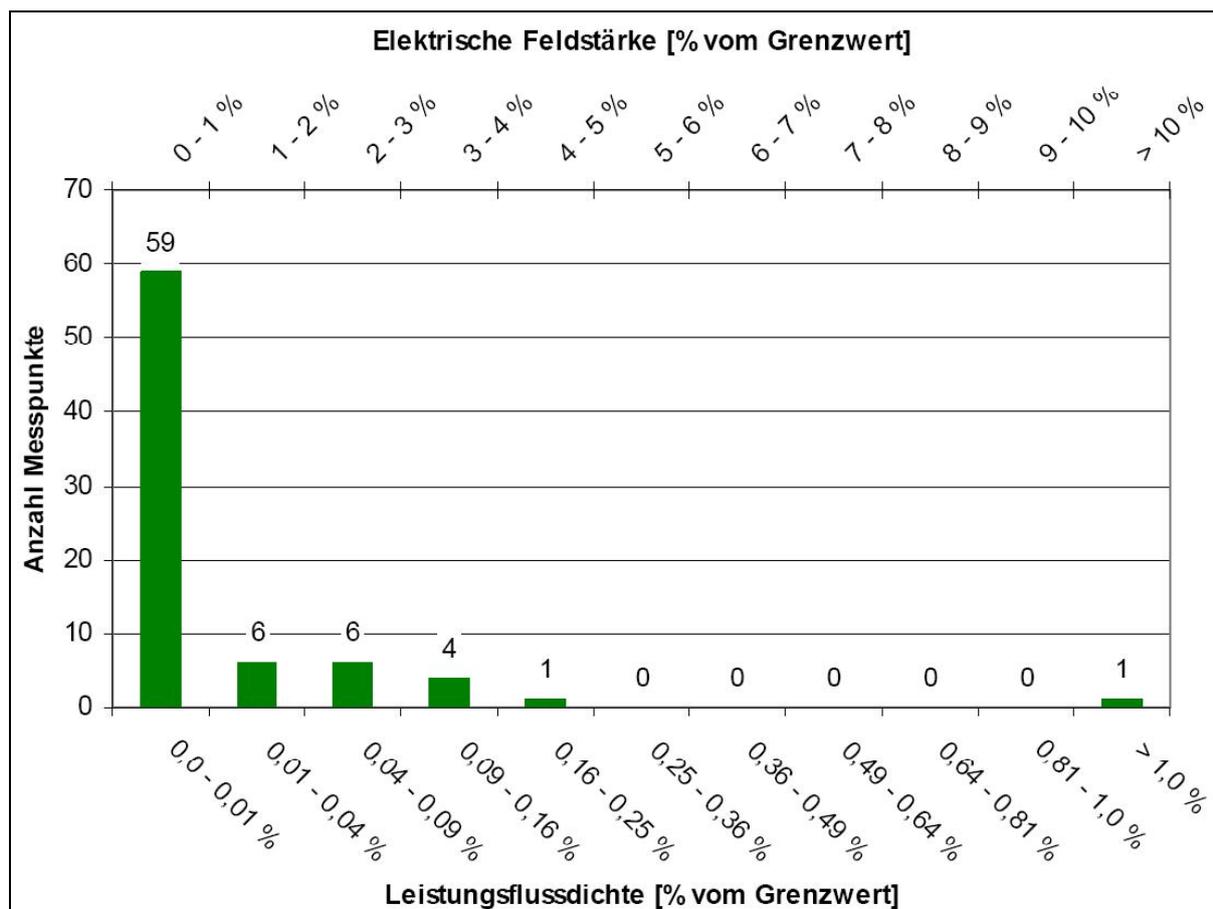


Abb. 8: Zusammenfassung der Messergebnisse (Quelle: [6], S. 4)

Wie nicht anders zu erwarten, werden die Grenzwerte der 26. BImSchV überall deutlich unterschritten. Dies ist nicht verwunderlich und deckt sich mit anderen Untersuchungen von GSM-, UMTS- und WiMAX-Immissionen, da alle Messpunkte weit außerhalb der von der Bundesnetzagentur in den Standortbescheinigungen ausgewiesenen Sicherheitsabstände³ liegen.

Die höchsten LTE-Immissionen (aber auch die höchsten sonstigen Mobilfunk-Immissionen) wurden an einem Messpunkt in ca. 30 m Entfernung bei direkter Sichtverbindung und geringer Höhendifferenz auf dem obersten Parkdeck eines Kaufhauses festgestellt (Abb. 9 und Abb. 10). Die Ausschöpfung des Leistungsfussdichte-Grenzwertes der 26. BImSchV beträgt hier 1,5 % (Absolutwert 148,68 mW/m²) und die Ausschöpfung des Feldstärke-Grenzwertes⁴ 12,3 % (Absolutwert 7,49 V/m).

In der höchsten Immissionsklasse dieser Untersuchung (> 10 %) liegt dieser eine Wert. Die Messwerte an allen 77 Messpunkten teilen sich gemäß Abb. 11 auf die bei der Untersuchung gewählten Immissionsklassen auf.

³ In der Entfernung des Sicherheitsabstandes von der Sendeantenne, der bei Mobilfunkanlagen meist zwischen ca. 3 m und 10 m liegt, wird der Grenzwert der 26. BImSchV gerade erreicht.

⁴ Der Prozentsatz der Grenzwertausschöpfung ist bei der Leistungsfussdichte und der Feldstärke unterschiedlich, da die Leistungsfussdichte sich quadratisch zur Feldstärke verhält. Bei einer Grenzwertausschöpfung der Feldstärke von beispielsweise 10 % (entsprechend dem Faktor 0,1) beträgt die Grenzwertausschöpfung der Leistungsfussdichte demnach $0,1^2 = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01$; entsprechend 1 %.



Abb. 9: Messpunkt mit den höchsten LTE- und GSM/UMTS-Immissionen auf dem obersten Parkdeck eines Kaufhauses (Messpunkt 4.3, [6], S. 29)

Messpunkt	Immission durch LTE				Immission durch GSM und UMTS-Mobilfunk am selben Standort			
	Elektrische Feldstärke		Leistungsflussdichte		Elektrische Feldstärke		Leistungsflussdichte	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in mW/m ²	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in mW/m ²	in % vom Grenzwert
4.1	0,07	0,11	0,01	0,0001	0,71	1,25	1,34	0,016
4.2	1,76	2,88	8,17	0,082	3,67	6,90	35,75	0,476
4.3	7,49	12,27	148,68	1,487	10,39	21,80	286,24	4,753
4.4	0,06	0,10	0,01	0,0001	0,21	0,39	0,12	0,002
4.5	0,02	0,04	0,001	0,00001	0,08	0,17	0,02	0,0003
4.6	0,01	0,02	0,0005	0,000005	0,06	0,14	0,01	0,0002
4.7	0,01	0,01	0,0001	0,000001	0,06	0,12	0,01	0,00016
4.8	0,002	0,004	0,00002	0,0000002	0,04	0,08	0,004	0,0001
4.9	1,66	2,72	7,28	0,073	3,22	5,94	27,48	0,353
4.10	0,32	0,52	0,27	0,003	1,84	3,47	8,95	0,120
4.11	0,19	0,31	0,09	0,001	1,29	2,51	4,40	0,063

Abb. 10: Festgestellte LTE- und GSM/UMTS-Immissionen an der Anlage mit den höchsten Immissionen – höchste Messwerte an Messpunkt 4.3 (Quelle: [6], S. 19)

Anzahl Messpunkte	Grenzwertausschöpfung		Absolute Messwerte LTE 800 MHz / LTE 2,6 GHz	
	Feldstärke	Leistungsflussdichte	Feldstärke in V/m	Leistungsflussdichte in mW/m ²
59	0 – 1 %	0,0 – 0,01 %	< 0,4 / 0,61	< 0,4 / 1
6	1 – 2 %	0,01 – 0,04 %	0,4 / 0,61 – 0,8 / 1,22	0,4 / 1 – 1,6 / 4
6	2 – 3 %	0,04 – 0,09 %	0,8 / 1,22 – 1,2 / 1,83	1,6 / 4 – 3,6 / 9
4	3 – 4 %	0,09 – 0,16 %	1,2 / 1,83 – 1,6 / 2,44	3,6 / 9 – 6,4 / 16
1	4 – 5 %	0,16 – 0,25 %	1,6 / 2,44 – 2,0 / 3,05	6,4 / 16 – 10 / 25
1	> 10 %	> 1,0 %	> 4,0 / 6,1	> 40 / 100

Abb. 11: Unterteilung der verschiedenen Immissionsklassen in [6]

Dabei liegen 59 der 77 Messpunkte (entsprechend 77 %) in der niedrigsten Kategorie mit Leistungsflussdichten < 0,4 mW/m² bei LTE 800 MHz bzw. < 1 mW/m² bei LTE 2,6 GHz – dies entspricht 400 µW/m² (LTE 800 MHz) bzw. 1.000 µW/m² (LTE 2,6 GHz).

Der kleinste Wert liegt bei 0,001 V/m, entsprechend 0,000003 mW/m² (= 0,003 µW/m²), der Median⁵ bei 0,2 V/m, entsprechend 0,1 mW/m² (= 100 µW/m²).

Messpunkt	Immission durch LTE				Immission durch GSM und UMTS-Mobilfunk am selben Standort			
	Elektrische Feldstärke		Leistungsflussdichte		Elektrische Feldstärke		Leistungsflussdichte	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in mW/m ²	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in mW/m ²	in % vom Grenzwert
3.1	0,12	0,32	0,04	0,001	1,49	3,15	5,89	0,099
3.2	0,28	0,73	0,21	0,005	1,62	3,17	6,95	0,100
3.3	0,71	1,85	1,35	0,034	2,63	6,04	18,29	0,365
3.4	0,82	2,12	1,79	0,045	2,70	6,37	19,35	0,406
3.5	1,38	3,56	5,03	0,127	2,75	6,46	20,03	0,417
3.6	1,07	2,76	3,03	0,077	2,85	6,50	21,57	0,422
3.7	1,39	3,60	5,15	0,130	3,08	6,95	25,15	0,483
3.8	1,17	3,03	3,65	0,092	3,66	8,11	35,59	0,658
3.9	0,58	1,50	0,90	0,023	3,08	6,78	25,23	0,460
3.10	0,10	0,26	0,03	0,001	0,55	0,99	0,79	0,010

Abb. 12: Festgestellte LTE- und GSM/UMTS-Immissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 3 (Quelle: [6], S. 18)

⁵ Median (auch Zentralwert genannt): Mittlerer Wert einer Zahlenmenge; nicht zu verwechseln mit dem Mittelwert. In einer Zahlenmenge liegen 50 % der Werte unter dem Median und 50 % darüber.

Der Vergleich mit GSM-/UMTS-Immissionen vom gleichen Standort zeigt, dass die LTE-Immissionen vergleichbar mit denen der etablierten Mobilfunkdienste GSM und UMTS sind. Abb. 12 veranschaulicht dies noch einmal für einen anderen Standort der Untersuchung. Für einen flächendeckenden Ausbau von LTE kann daher davon ausgegangen werden, dass die zusätzliche Belastung der Bevölkerung durch LTE sich in der gleichen Größenordnung wie bei den etablierten Mobilfunksystemen GSM und UMTS bewegen wird.

5 Konsequenzen der Frequenzversteigerung 2010 für die in der baubiologischen Messtechnik gebräuchlichen Breitband-Messgeräte

5.1 Die LTE-Frequenzbänder ☺

Die gute Nachricht: Die von den Mobilfunkbetreibern für LTE nutzbaren Frequenzbänder liegen allesamt unterhalb von 3 GHz und somit unterhalb der oberen Grenzfrequenz der meisten, in der baubiologischen Messtechnik verwendeten Breitbandmessgeräte (und auch Spektrumanalysatoren).

Die niedrigste LTE-Frequenz (790 MHz) liegt im Band LTE 800 und damit im Bereich der unteren Grenzfrequenz dieser Breitbandmessgeräte von zumeist ca. 800 MHz, die hauptsächlich durch die verwendete Antenne bestimmt wird.

Die schlechte Nachricht: Die beiden folgenden Aspekte erschweren in Zukunft die Messungen mit Breitbandmessgeräten, aber zum Teil auch mit Spektrumanalysatoren.

5.2 Funkdienst-spezifische Bandfilter ☹

Einige Breitbandmessgeräte verfügen über interne oder vorschaltbare funkdienstspezifische Filter (Bandpässe), die es ermöglichen, den erfassten Frequenzbereich auf einen bestimmten, am Filter einstellbaren Funkdienst einzugrenzen (z.B. GSM 900, GSM 1800, UMTS, DECT, WLAN 2,4 GHz, TETRA, DVB-T). Bei den Mobilfunkdiensten wird dabei nur derjenige Frequenzbereich gemessen, der von den Basisstationen benutzt wird (Downlink).

Der bisherige Frequenzbereich des digitalen terrestrischen Fernsehens DVB-T erstreckt sich von 470 bis 862 MHz. Durch Ausnutzung der so genannten „Digitalen Dividende“ sind nun die Frequenzen von 791 bis 862 MHz für LTE freigegeben worden. Dabei wird der Bereich von 791 bis 821 MHz durch die Basisstationen (Downlink) genutzt, der Bereich von 832 bis 862 MHz durch die Mobilteile (Uplink). Die „alten“ DVB-T-Filter erfassen nun also sowohl die Signale des digitalen terrestrischen Fernsehens DVB-T im UHF-Bereich, als auch LTE Signale im Bereich LTE 800 – und zwar sowohl von Basisstationen als auch von Mobilteilen.

Für den Frequenzbereich LTE 2,6 GHz sind bisher noch gar keine Filter verfügbar.

Da die im Jahr 2010 versteigerten „Frequenzlücken“ in den Mobilfunkbändern GSM 1800 und UMTS technologieneutral versteigert wurden, ist es möglich, dass innerhalb eines – bisher „sortenreinen“ – Mobilfunkbandes in Zukunft mehrere unterschiedliche Funktechnologien betrieben werden – im Extremfall sowohl GSM als auch UMTS und LTE.

Dies erschwert nicht nur die Messungen mit Breitbandmessgeräten und Funkdienst-spezifischen Filtern, sondern gestaltet auch die Spektrumanalyse aufwändiger und zeitintensiver, da für jede Funktechnologie spezifische Einstellungen vorzunehmen sind.

Erschwerend kommt noch hinzu, dass offensichtlich seitens der Bundesnetzagentur die Bereitschaft besteht, auch schon länger vergebene, bisher Technologie-gebundene Frequenzen in technologieneutrale umzuwidmen (vgl. Kapitel 2.2).

5.3 Breitbandige LTE-Signale ☹

LTE-Signale sind sehr breitbandig, um die angestrebten hohen Datenübertragungsraten realisieren zu können. Übliche Bandbreiten sind 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz, in Zukunft (LTE-Advanced) auch bis zu 40 MHz.

Die Demodulationsbandbreite der Breitbandmessgeräte, wie sie für die baubiologische Messtechnik entwickelt wurden, liegt aber üblicherweise maximal in der Größenordnung von etwa 2 MHz. Dies bedeutet, dass breitbandige Signale gar nicht komplett erfasst werden und eine deutliche Unterbewertung stattfindet. Diese Unterbewertung liegt in erster Näherung in der Größenordnung des Quotienten Signalbandbreite/Demodulationsbandbreite. Bei einer realistischen Demodulationsbandbreite von z.B. 2 MHz bedeutet dies für ein 5 MHz breites LTE-Signal eine Unterbewertung der Strahlungsdichte etwa um den Faktor 2,5, für ein 10 MHz breites Signal um den Faktor 5 und für ein 20 MHz breites Signal um den Faktor 10.

Um ggf. das Messergebnis mit einem Korrekturfaktor „hochrechnen“ zu können, müsste die Signalbandbreite bekannt sein. Diese lässt sich aber mit einem Breitbandmessgerät nicht feststellen; hierzu wäre die frequenzselektive Spektrumanalyse vonnöten.

Andererseits.: Man misst dann eben etwa nur den Anteil, der der Mindestimmission durch die permanent aktiven Signalisierungs- und Kontrollkanäle entspricht.

6 Literatur und Links

- [1] Virnich, Martin: EDGE – Eine neue Variante des GSM-Mobilfunks; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 6. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V., 23.-24. März 2007 in Fürth; Im Verlag des AnBUS e.V. Fürth, 2007, ISBN 978-3-9810359-4-0; S. 115-140
Bezugsquelle: www.baubiologie.net, Tel. 04183 - 77 35 301
- [2] Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V. (Hrsg): Schulkinder – Handykinder / „Handy-Unterricht“ für Schulen; In Zusammenarbeit mit Bund Naturschutz in Bayern e.V. sowie Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland BUND e.V.; Im Verlag des AnBUS e.V. Fürth, 2010, ISBN 978-3-9810359-7-1
Bezugsquelle: www.baubiologie.net, Tel. 04183 - 77 35 301
- [3] Virnich, Martin: Charakteristika von UMTS-Signalen; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 3. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V., 1.-2. April 2004 in Würzburg; Im Verlag des AnBUS e.V. Fürth, 2004, ISBN 3-9808428-4-3; S. 43-59
Bezugsquelle: www.baubiologie.net, Tel. 04183 - 77 35 301
- [4] Bundesnetzagentur: Frequenzversteigerung 2010; Pressebriefing 8. April 2010
- [5] Bornkessel, Christian: Messung der elektromagnetischen Immissionen von LTE-Basisstationen; in: EMF Spectrum, Vierteljährliche Information der Arbeitsgruppe EMF & Umwelt; wik – Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste; Ausgabe 1/2011, April 2011; 2. Jg.; ISSN 2190-9393; S. 10-15
- [6] Bornkessel, Christian; Schubert, Markus (IMST GmbH): Messbericht zum Projekt „Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen“, erstellt für das Informationszentrum Mobilfunk e.V., Berlin, 8. November 2010, Messbericht Nr.: 6100/6611_74
- [7] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) vom 16.12.1996; Bundesgesetzblatt Jahrgang 1996 Teil I Nr. 66, ausgegeben zu Bonn am 20. Dezember 1996

© Dr.-Ing Martin H. Virnich, Mönchengladbach 2011
ibu – Ingenieurbüro für Baubiologie und Umweltmesstechnik
Dürerstraße 36, 41063 Mönchengladbach
www.baubiologie-virnich.de

Veröffentlicht in: Tagungsband zum 10. Rheinland-Pfälzisch-Hessischen Mobilfunksymposium des BUND Landesverband Rheinland-Pfalz am 21. Mai 2011 in Mainz