

# A I 5 – 1.13 LTE-FDD-Mobilfunk (Long Term Evolution)

## Begriffsbestimmungen

Siehe VDB-Richtlinie A I 5 und A I 5 – 1.

Zusätzlich:

### LTE

(Long Term Evolution)

Bei LTE handelt es sich ein digitales Mobilfunksystemen der so genannten 4. Generation. LTE 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 die Sprachübertragung. Eigentlich war LTE für Sprachübertragung („Mobiltelefonieren“!) gar nicht vorgesehen. In der Praxis greift ein LTE-Smartphone für Telefonate oder SMS dann auch meist auf GSM oder UMTS als Übertragungsstandard zurück.

Im Gegensatz zu GSM und UMTS ist die Kanalbandbreite bei LTE nicht fix, sondern es können unterschiedliche Bandbreiten zum Einsatz kommen; von praktischer Bedeutung sind hier 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz.

LTE sieht zwei verschiedene Zugriffsverfahren vor, die sich in der Duplex-Technik unterscheiden:

### LTE-FDD

Für Systeme mit Frequenzduplex (**FDD**, **F**requency **D**ivision **D**uplex; gepaarte Frequenzbereiche für Up- und Downlink). Verwendet als Zugriffsverfahren im Downlink **OFDMA** (**O**rtogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess). Im Uplink wird **SC-FDMA** (**S**ingle **C**arrier **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) eingesetzt, das weniger Akkuleistung braucht als OFDMA.

Beim Aufbau der Netze setzen alle Mobilfunkbetreiber zunächst FDD ein.

VDB-Richtlinien – Band 1

Teil A  
Physikalische  
Untersuchungen

A I  
Verfahrensweisungen

A I 5  
Schnell veränderliche  
elektromagnetische Felder  
(EM-Wellen, Hochfrequenz)

herausgegeben:  
Juli 2018

letzte Änderung:  
Juli 2018

## LTE-TDD

Für Systeme mit Zeitduplex (**TDD**, **T**ime **D**ivision **D**uplex; ungepaarte Frequenzbereiche). Wegen TDD weist das Signal eine Pulsstruktur auf.

Die Einführung von LTE-TDD steht in nächster Zukunft an. Vgl. VDB-Richtlinie A I 5 – 1.14.

## Aufbau von LTE-FDD-Mobilfunkanlagen

LTE-FDD-Mobilfunkanlagen bestehen aus Sende- und Empfangseinrichtungen, einer Energieversorgungseinheit sowie einer oder mehreren LTE-Antennen, die auf einem Antennenträger montiert sind. Die Anbindung an die übergeordnete System-Infrastruktur in Richtung Festnetz erfolgt entweder über Kupfer- bzw. Glasfaserleitungen oder drahtlos über Richtfunkstrecken.

## LTE-Antennen

Als LTE-Antennen werden üblicherweise Sektorantennen mit einer ausgeprägten Richtwirkung verwendet. Bei allen LTE-Antennen wird – erstmalig in der Geschichte der Mobilfunktechnik – 2-fach MIMO (Multiple Input – Multiple Output) eingesetzt. Dabei wird das Signal parallel über zwei Antennen abgestrahlt, die innerhalb des Antennengehäuses um 90° gegeneinander versetzt sind, so dass sich zwei orthogonale Polarisations Ebenen ergeben. Zur gleichzeitigen Erfassung beider Polarisations Ebenen sind isotrope Antennen erforderlich.

Bei Messungen mit nicht-isotropen Antennen ist zu beachten, dass mit solchen Antennen bei der Ausrichtung auf das Maximum einer Polarisations Ebene die andere praktisch nicht empfangen wird (Polarisationsentkopplung). Es kommt somit zu einer Unterbewertung von 3 dB, die durch einen entsprechenden Zuschlag wieder ausgeglichen werden muss.

Die Verkehrskanäle werden immer über beide Antennen parallel abgestrahlt. Bei den Synchronisationskanälen in der Bandmitte gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten:

- Parallele Abstrahlung über beide Antennen
- Abwechselnde Abstrahlung über jeweils nur eine Antenne.

## OFDMA

(**O**rtogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplex **A**ccess)

Bei OFDMA wird nicht nur – wie klassischerweise in der Funktechnik üblich – eine einzige Trägerfrequenz verwendet, sondern der LTE-Datenstrom wird auf viele Unterträger mit einem Trägerabstand von 15 kHz aufgeteilt. Bei der Kanalbandbreite 10 MHz ist das Signal 9 MHz breit und enthält 600 Unterträger, bei 20 MHz Kanalbandbreite ist das Signal 18 MHz breit und enthält 1.200 Unterträger. In der Darstellung auf der Frequenzachse mittels Spektrumanalysator ergeben sich hierdurch die für OFDM typischen „Tafelberge“.

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 Übertragungstrecke – mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert. Dies führt insgesamt zu einem Signal, das als „technisches Rauschen“ bezeichnet wird und einen Crest Faktor von typischerweise ca. 10 – 12 dB aufweist.

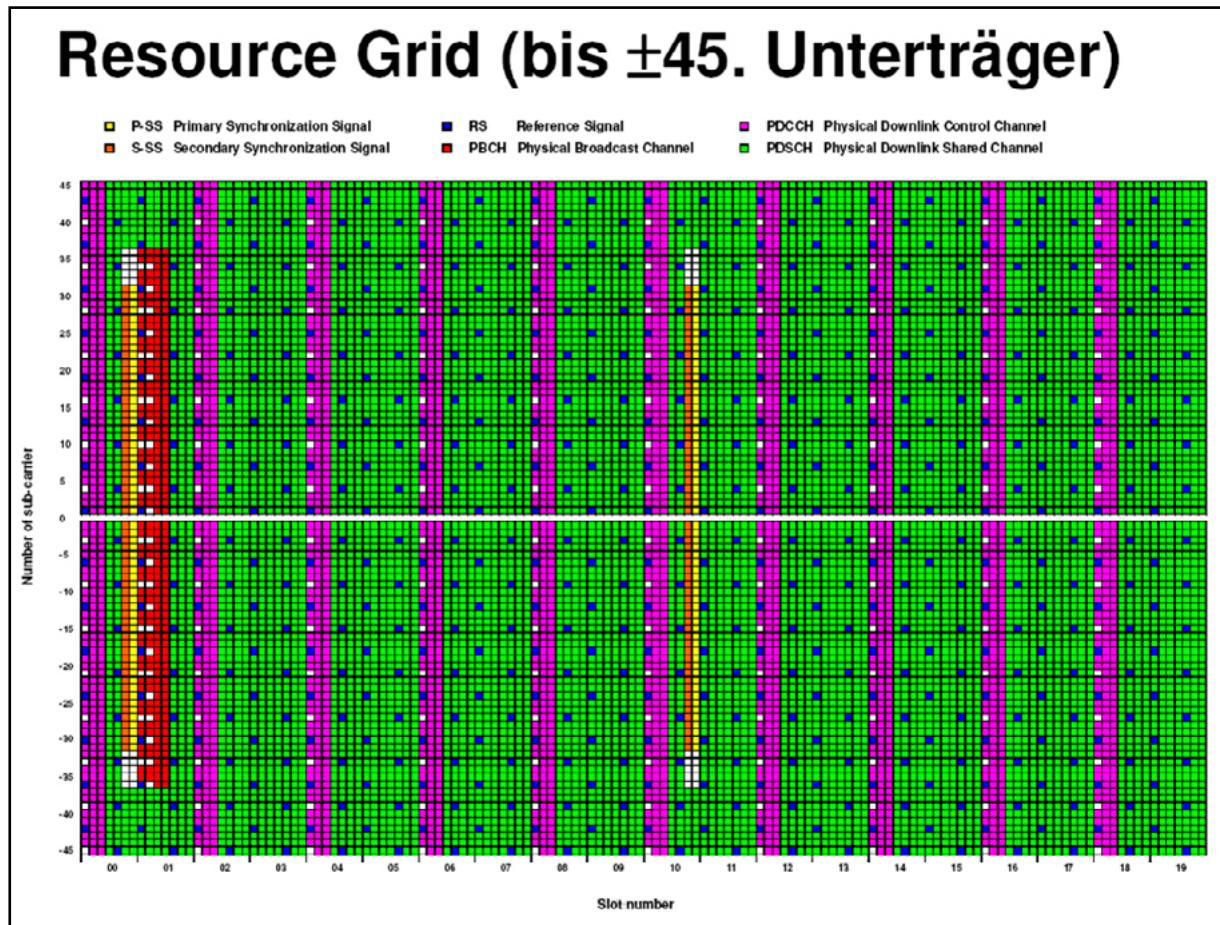
## Gleichwellenbetrieb

Bei LTE handelt es sich um ein Gleichwellensystem, bei dem die Basisstationen eines Betreibers, auch wenn die Standorte räumlich eng benachbart sind, auf den gleichen Frequenzen arbeiten.

## Struktur der Steuer- und Nutzkanäle / Resource Grid

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 Kontrollkanälen“ 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. Das Muster dieser „Platzzuweisungen“ wird als „Resource Grid“ bezeichnet (s. nachfolgende Abbildung). Das kleinste Element des Resource Grid besteht aus einem Unterträger mit der Bandbreite 15 kHz und einem Slot von 0,5 ms Dauer; es wird als „Resource Element“ bezeichnet.



Resource Grid der ersten ± 45 Unterträger um die Signalmittle (Bandbreite  $2 \cdot 45 \cdot 15 \text{ kHz} = 1,35 \text{ MHz}$ )  
 (Quelle: Bornkessel [1])

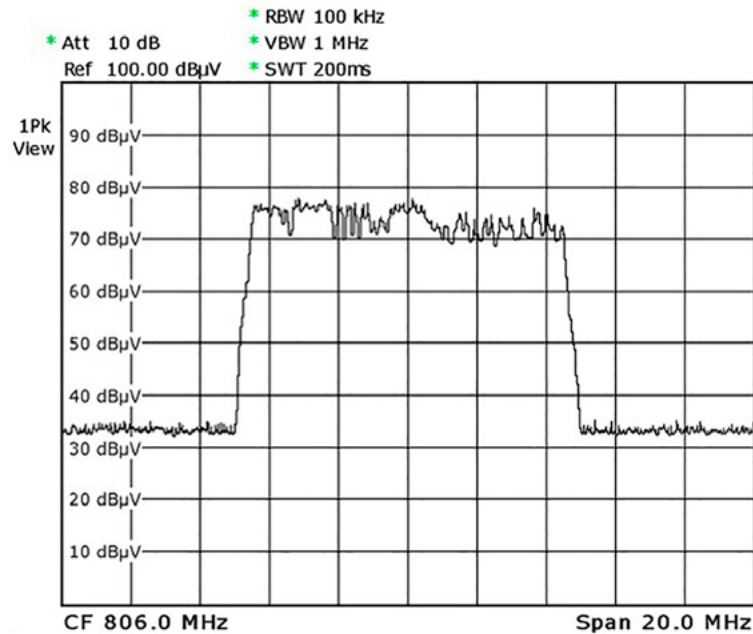
Die wichtigsten Signalisierungs- und Kontrollkanäle mit ihrer Zuordnung auf Frequenz- und Zeitachse sind im Folgenden aufgeführt:

- PDCCH:** **Physical Downlink Control Channel**,  
geht über alle Unterträger; in jedem Subframe, belegt 1 bis 3 Symbole im ersten Slot eines jeden Subframes
- 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.
- RS:** **Reference Signal**,  
in jedem sechsten Unterträger; Symbol 0 und 4 in jedem Slot

Die ersten fünf dieser Kanäle sind nur in einer Breite von 1,080 MHz um die Mittenfrequenz angeordnet, während die RS-Kanäle über die gesamte Signalbandbreite verteilt sind. Da i.d.R. die Synchronisationskanäle mit höherer Sendeleistung als die RS-Kanäle ausgestrahlt werden, ragen im Leerlauf der Basisstation (ohne Verkehrslast) und bei nur geringer Auslastung die Synchronisationskanäle in der Mitte des „Tafelberges“ als ca. 1 MHz breite Erhebung heraus (s. nachfolgende Abbildung).

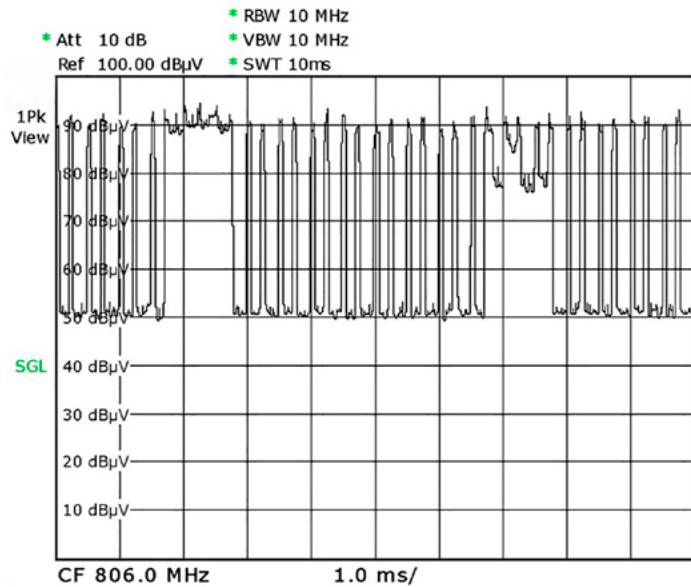
Bei Volllast ist sind zwei mögliche Zustände zu unterscheiden:

1. Das gesamte Niveau des „Tafelberges“ ist vom Pegel der RS-Kanäle auf den Pegel der Synchronisationskanäle in der Mitte angehoben, die Synchronisationskanäle ragen nicht mehr heraus;
2. Das gesamte Niveau des „Tafelberges“ ist vom Pegel der RS-Kanäle auf den Pegel der Verkehrskanäle angehoben, die Synchronisationskanäle ragen aber immer noch heraus, i.d.R. um ca. 3 dB; in diesem Fall liegt ein „Boost“ der Synchronisationskanäle über die Verkehrskanäle hinaus vor.

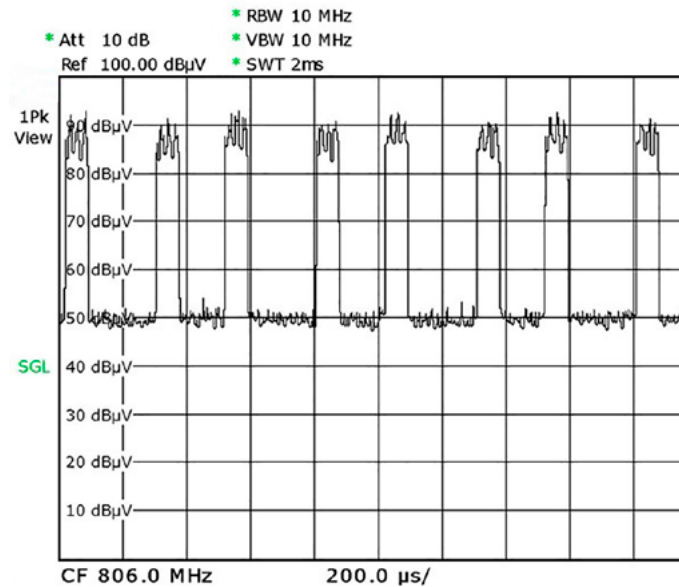


Spektrum eines 9 MHz breiten LTE-FDD-Signals. In diesem Beispiel sind drei Bereiche deutlich zu unterscheiden: Die Erhebung der Synchronisationskanäle in der Mitte, die Verkehrslast in gleicher Höhe bei den niedrigeren Frequenzen links von der Mitte und der Bereich ohne nennenswerte Verkehrslast rechts von der Mitte; der rechte Bereich ist überwiegend durch die RS-Kanäle bedingt.

Im zeitlichen Verlauf des LTE-Signals ohne Verkehrslast finden sich Signalisierungs- und Kontrollkanäle als Pulsstrukturen wieder (siehe nachfolgende Abbildungen). Die zu den verschiedenen Signalisierungs- und Kontrollkanälen gehörenden Pulsfrequenzen liegen bei 25 Hz (PBCH), 200 Hz (P-SS und S-SS), 1 kHz (PDCCH) und 4 kHz (RS). Man beachte, dass alle diese Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen und es dadurch schwierig bis unmöglich ist, im Spektrum zwischen Grundschwingungen und Oberschwingungen zu unterscheiden.



Sweeptime 10 ms



Sweeptime 2 ms

Exemplarischer Zeitverlauf der Signalisierungs- und Kontrollkanäle bei LTE-FDD (Zero Span) mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung

Mit zunehmender Verkehrslast werden die Lücken zwischen den Signalisierungskanälen immer mehr gefüllt, bis schließlich bei Volllast keine Einzelimpulse mehr erkennbar sind.

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.

## Sweep Time bei RMS-Detector

Aufgrund der Pulsstruktur des LTE-Signals, insbesondere bei Betrieb der Basisstation ohne Last oder nur mit schwacher Last, sind Restriktionen bei der Sweep Time in Verbindung mit dem RMS-Detector zu beachten. Die maximal zulässige Sweep Time beim Einsatz des RMS-Detectors hängt vom Analysator-Typ ab bzw. von der Auflösung des Displays.

Die Sweep Time soll so gewählt werden, dass die auf ein Pixel der Messkurve entfallende Zeit der Dauer von einem Symbol entspricht (Symboldauer = 70  $\mu$ s).

Daraus folgt: Max. Sweep Time = 70  $\mu$ s · Anzahl Sweep Points (vgl. nachfolgende Tabelle für einige gebräuchliche Spektrumanalysatoren).

Hersteller	Analysator-Typ	Anzahl horizontale Pixel des Displays	Anzahl Sweep Points	Maximale Sweep Time RMS-Detector
Rohde & Schwarz	FSH 3/6	320	301	21 ms
Rohde & Schwarz	FSH 4/8/12	640	631	44 ms
Rohde & Schwarz	FSP	501	501	35 ms
Rohde & Schwarz	FSL	640	501	35 ms
Anritsu	MT 8220A	661	551	38 ms

Wird die Sweep Time größer gewählt, kommt es zu einer Unterbewertung, da dann die Pausen zwischen den Impulsen in den RMS-Wert mit eingerechnet werden.

Wird die Sweep Time zu klein gewählt, so steigt die Messunsicherheit (höhere Streuung der Messergebnisse), und es kann in Verbindung mit Max Hold zu einer Überbewertung kommen.

## Maximaler und minimaler Beurteilungswert der LTE-Immissionen

Die Messungen können codeselektiv oder mittels Filter Sweep erfolgen. In beiden Fällen ist aus den Messwerten die maximale und minimale Immission zu berechnen.

### Codeselektive Messung

Gemessen wird üblicherweise die Intensität der RS-Kanäle. Hiervon ausgehend wird auf Volllast hochgerechnet; dazu sind die entsprechenden anlagenspezifischen Angaben vom Netzbetreiber erforderlich.



Von der Volllast wird auf die Minimale Immission heruntergerechnet; hierfür wird i.d.R. ein Anteil von 25 % der Volllast zugrunde gelegt.

### Filter Sweep mit RBW 1 MHz

Von der gemessenen 1MHz-Bandbreite wird auf die gesamte Signalbandbreite linear hochgerechnet. Wenn der Messwert von den Signalisierungs- und Kontrollkanälen in der Mitte des Frequenzblocks stammt, so muss für die Hochrechnung der Pegel ohne einen eventuellen Boost zugrunde gelegt werden.

Zur Ermittlung des Hochrechnungsfaktors wird der Quotient aus Signalbandbreite und Rauschbandbreite des bei der Messung verwendeten Filters gebildet. Hierzu gibt es zwei leicht unterschiedliche Verfahren: Zum einen wird die Rauschbandbreite einfach gleich der RBW gesetzt, im anderen Fall wird als Rauschbandbreite  $1,1 \cdot RBW$  angenommen.

Damit ergeben sich für die beiden Varianten die Hochrechnungsfaktoren in Anhängigkeit von der Signalbandbreite laut nachfolgender Tabelle.

Hochrechnung von 1 MHz RBW auf Signalbandbreite					
LTE		Faktor		Dezibel	
Kanalbandbreite	Signalbandbreite	Rauschbandbreite		Rauschbandbreite	
		RBW	$1,1 \cdot RBW$	RBW	$1,1 \cdot RBW$
1,4 MHz	1,08 MHz	1,08	0,98	0,33 dB	-0,08 dB
5 MHz	4,5 MHz	4,5	4,09	6,53 dB	6,12 dB
10 MHz	9,0 MHz	9,0	8,18	9,54 dB	9,13 dB
15 MHz	13,5 MHz	13,5	12,27	11,30 dB	10,89 dB
20 MHz	18,0 MHz	18,0	16,36	12,55 dB	12,14 dB

Tabelle der LTE-Hochrechnungsfaktoren von 1 MHz RBW auf Volllast

Zusätzlich sind für Antennen-MIMO 3 dB hinzuzurechnen.

Hochrechnung von 1 MHz RBW auf Signalbandbreite plus Antennen-MIMO					
LTE		Faktor		Dezibel	
Kanalbandbreite	Signalbandbreite	Rauschbandbreite		Rauschbandbreite	
		RBW	1,1 · RBW	RBW	1,1 · RBW
1,4 MHz	1,08 MHz	2,16	1,96	3,35 dB	2,93 dB
5 MHz	4,5 MHz	9,0	8,18	9,54 dB	9,13 dB
10 MHz	9,0 MHz	18,0	16,36	12,55 dB	12,14 dB
15 MHz	13,5 MHz	27,0	24,54	14,31 dB	13,90 dB
20 MHz	18,0 MHz	36,0	32,72	15,56 dB	15,15 dB

Tabelle der LTE-Hochrechnungsfaktoren von 1 MHz RBW auf Volllast plus Antennen-MIMO

Von der Volllast wird auf die Minimale Immission heruntergerechnet; hierfür wird i.d.R. ein Anteil von 25 % der Volllast zugrunde gelegt (gilt nicht für die Kanalbandbreite 1,4 MHz).

## Einflussgrößen

Siehe VDB-Richtlinie A I 5.

Zusätzlich:

- Signalbandbreite
- 2-fach Antennen-MIMO
- Ggf. Boost der Synchronisationskanäle
- Ggf. gleichzeitiger Betrieb von Inband-NB-IoT.

## Vorgehensweise

Siehe VDB-Richtlinie A I 5 und A I 5 – 1.

### Codeselektive Messung

Die codeselektive Messung erfolgt gemäß den Angaben des Geräteherstellers in der Bedienungsanleitung.

### Filter Sweep-Messung

Die Signalisierungs- und Kontrollkanäle in der Mitte des LTE-Frequenzblocks liegen – unabhängig von der Bandbreite des kompletten Signals – immer innerhalb einer Bandbreite 1,080 MHz. Es wird daher mittels Filter Sweep und RBW 1 MHz gemessen und vom 1MHz-Messwert auf die Signalbandbreite hochgerechnet (wie oben im Abschnitt „Maximaler und minimaler Beurteilungswert der LTE-Immissionen“ beschrieben).

Als Messwert für die Hochrechnung kann ausgewählt werden:

1. Der höchste Wert der Signalisierungs- und Kontrollkanäle in der Mitte des LTE-Frequenzblocks, der unabhängig von der Auslastung immer vorhanden ist. Allerdings muss dann auch festgestellt werden, ob diese Kanäle mit Boost gesendet werden – falls ja, wie hoch dieser Boost ist – oder nicht.
2. Der höchste Wert der Verkehrskanäle außerhalb der Mitte des LTE-Frequenzblocks; hier spielt die Frage nach einem eventuellen Boost der zentralen Signalisierungs- und Kontrollkanäle keine Rolle; dafür muss eine gewisse Mindestlast vorhanden sein, die sich deutlich vom Pegel der RS-Kanäle abhebt.

Hierbei ist außerdem darauf zu achten, dass bei eventuellem Inband-NB-IoT nicht versehentlich der Pegel dieses Signals für die Hochrechnung zugrunde gelegt wird.

Aus der Display-Anzeige ist außerdem die Signalbandbreite als Grundlage für die Hochrechnung zu ermitteln.

## Messverfahren

Die Messungen erfolgen mit einem Spektrumanalysator, der idealerweise auch über die Option der codeselektiven Messung verfügt und für die LTE-FDD-Frequenzbereiche vom Hersteller spezifizierten Messantennen.

Der Spitzenwert des UMTS-FDD-Signals ist größer als der Effektivwert; der Crest-Faktor beträgt mindestens 10 dB; je nach eingestellten Systemparametern der Basisstation kann er auch höher liegen. Spitzenwert und Effektivwert sind daher bei der Spektrumanalyse getrennt zu messen.

Bei codeselektiver Messung wird generell der Effektivwert ermittelt.

## Einstellungen am Spektrumanalysator

### Codeselektive Messung

Die codeselektive Messung erfolgt gemäß den Angaben des Geräteherstellers in der Bedienungsanleitung. Gemessen wird üblicherweise der Pegel der RS-Kanäle.

Für diese Messung muss von der Spektrumanalyse in einen eigenen Messmodus gewechselt werden (Mode). Die Messungen erfolgen dann für jede relevante LTE-Frequenz einzeln nacheinander. Es ist daher vorteilhaft, sich zuvor durch eine Filter Sweep-Messung über das gesamte jeweilige LTE-Band zu vergewissern, bei welchen Frequenzblöcken überhaupt relevante Immissionen vorliegen.

### Filter Sweep-Messung

Für die Filter Sweep-Messungen werden folgende Geräteeinstellungen empfohlen:

RBW / VBW: 1 MHz / 10 MHz (min. 1 MHz)

#### a) Spitzenwertmessung

Detector: Pos Peak

Trace: Max Hold

Sweep Time: Klein\*, typ. 10 – 50 ms

#### b) Effektivwertmessung

Detector: RMS

Trace: Max Hold

Sweep Time: Analysatorspezifisch, je nach Anzahl Sweep Points, siehe obige Tabelle.

\* Mindestens so groß, dass nicht „UNCAL“ o. ä. ausgegeben wird.

## Zugrunde liegende Literatur

- [1] 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

## Mitgeltende VDB-Richtlinien

- VDB-Richtlinie A I 5:  
Schnell veränderliche elektromagnetische Felder (Hochfrequenz)
- VDB-Richtlinie A I 5 – 1:  
HF-Spektrumanalyse
- VDB-Richtlinie A I 5 – 13:  
HF-Spektrumanalyse / NB IoT (Narrowband/Schmalband-LTE für IoT – Internet of Things)
- VDB-Richtlinie A III 1:  
Vorgehensweise beim Ortstermin: Begehung und Bestandsaufnahme
- VDB-Richtlinie A III 2:  
Form von Dokumenten: Aufbau des Gutachtens
- VDB-Richtlinie A V 2 – 2.1:  
Mobilfunk-Frequenzspektren und Zuordnung zu Mobilfunkbetreibern nach den Frequenzversteigerungen 2010 und 2015 in D
- VDB-Richtlinie A V 2 – 2.2:  
Mobilfunk-Frequenzspektren und Zuordnung zu Mobilfunkbetreibern nach der Multiband-Auktion 2013 in A
- VDB-Richtlinie A V 2 – 2.3:  
Mobilfunk-Frequenzspektren und Zuordnung zu Mobilfunkbetreibern nach der Frequenzversteigerung 2012 in CH
- VDB-Richtlinie A V 2 – 3.6:  
Frequenz- und Kanaltabellen LTE

VDB-Richtlinien – Band 1

Teil A  
Physikalische  
Untersuchungen

A I  
Verfahrensanweisungen

A I 5  
Schnell veränderliche  
elektromagnetische Felder  
(EM-Wellen, Hochfrequenz)

herausgegeben:  
Juli 2018

letzte Änderung:  
Juli 2018

## Weiterführende Literatur

- Wuschek, Matthias: Mobilfunk LTE – Long Term Evolution – Technologie, Messtechnik, Immissionen; in: Tagungsband der 7. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e. V. „Energieversorgung und Mobilfunk“ am 12. – 13. April 2013 in München; Im Verlag des AnBUS e. V. Fürth 2013; ISBN 978-3-9814025-3-7; S. 205 – 221; Inhaltsverzeichnis unter <https://www.baubiologie.net/publikationen/tagungsbaende-emv-tagungen-des-vdb.html>
- 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
- Bornkessel, Christian; Schubert, Markus; Wuschek, Matthias (IMST und em-institut): Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken, Abschlussbericht vom 9. Januar 2013, erstellt für das Bundesamt für Strahlenschutz; Reihe: Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz-Vorhaben 3611S80002; Kamp-Lintfort und Salzgitter 2013; [http://www.emf-forschungsprogramm.de/akt\\_emf\\_forschung.html/dosi\\_HF\\_004.html](http://www.emf-forschungsprogramm.de/akt_emf_forschung.html/dosi_HF_004.html)

VDB-Richtlinien – Band 1

Teil A  
Physikalische  
Untersuchungen

A I  
Verfahrensanweisungen

A I 5  
Schnell veränderliche  
elektromagnetische Felder  
(EM-Wellen, Hochfrequenz)

herausgegeben:  
Juli 2018

letzte Änderung:  
Juli 2018