

Ein Überblick zu Long Term Evolution

Daniel Frank
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Digitale Kommunikationssysteme

Zusammenfassung—Diese Ausarbeitung gibt einen Überblick zum neuen Mobilfunkstandard LTE (*Long Term Evolution*). Dabei liegt der Schwerpunkt auf der physikalischen Schicht bzw. der Luftschnittstelle. Im ersten Abschnitt wird kurz die Entwicklung von LTE erläutert. In Abschnitt II werden die in LTE verwendeten Zugriffsverfahren beschrieben. Hier werden insbesondere die in LTE verwendeten Parameter vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt III auf die in LTE eingesetzten Mehrantennenkonzepte eingegangen. Im darauf folgenden Abschnitt werden typische Eigenschaften der LTE-Luftschnittstelle erläutert. Zuletzt wird noch auf die für LTE verwendeten Frequenzbänder in Deutschland eingegangen. Außerdem werden Daten aus der Praxis präsentiert.

I. DIE ENTWICKLUNG VON LTE

Im Jahre 2005 stellte IEEE 802 LMSC (LAN/MAN Standard Committee) den Standard IEEE 802.16e als mobilen, kabellosen Breitbandzugang vor, der auch als WiMAX bezeichnet wird. In diesem Standard wurden erstmals das Zugriffsverfahren OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) und Mehrantennensysteme eingesetzt, sodass noch bessere Datenraten erreicht wurden als im von 3GPP (Third Generation Partnership Project) spezifizierten Standard HSPA (High Speed Packet Access), welcher eine Erweiterung von UMTS (UTRAN-Standard) ist. 3GPP ist eine weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk.

Die Entwicklung von WiMAX und die Tatsache, dass man mit UMTS bzw. HSPA für noch höhere Datenraten an seine Grenzen gestoßen ist, veranlasste 3GPP dazu, ihren eigenen auf OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) basierenden Standard für den Mobilfunk zu entwickeln. Die Luftschnittstelle wird als E-UTRAN (extended universal terrestrial radio access network) bezeichnet. Der Standard ist weitläufig unter dem Namen *Long Term Evolution* (LTE) bekannt und gilt als Mobilfunkstandard 3.9G. Sowohl WiMAX als auch LTE genügen, wie auch schon UMTS, den Anforderungen der IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000). IMT-2000 ist eine weltweite gültige Sammlung von Standards für das Mobilfunknetz der dritten Generation.

II. LTE ZUGRIFFSVERFAHREN

Der Mobilfunkstandard LTE setzt erstmals auf das Mehrträger-Zugriffsverfahren OFDMA im Downlink und SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) im Uplink. Beide Verfahren basieren auf OFDM. Das auf Mehrträger basierende OFDM ist zwar schon seit längerer Zeit bekannt, wurde aber wegen der hohen Rechenkomplexität und den damit verbundenen Kosten bisher nicht eingesetzt. Heute

ist die digitale Signalverarbeitung für OFDM aber ausreichend kostengünstig.

Die Kernidee von OFDM ist, das vorhandene Spektrum auf Senderseite in viele zueinander orthogonale schmalbandige Spektren, sog. Subträger, aufzuteilen, auf die dann Symbole, welche zuvor mittels einer QPSK, 16 QAM oder 64 QAM aus den Sendebits erzeugt wurden, aufgeprägt werden. Die Aufmodulation auf die Subträger lässt sich mit Hilfe einer entsprechend skalierten Inversen Diskreten Fouriertransformation (IDFT) erreichen. Mit heutiger Technik kann die IDFT relativ günstig und dank der IFFT effizient auf einem digitalen Signalprozessor implementiert werden. Aus dem vorher frequenzselektiven Kanal, wie er im Mobilfunk vorkommt, werden nun sehr viele näherungsweise nicht-frequenzselektive Kanäle. Dadurch wird die Entzerrung erheblich erleichtert. Außerdem vergrößert sich wegen der vielen schmalbandigen Kanäle die Symboldauer T_s , sodass *Intersymbolinterferenzen* (ISI) reduziert werden. OFDM erreicht außerdem einen minimalen Abstand der Subträger. Zum einen wird durch diesen minimalen Abstand die Bandbreite effizient ausgenutzt und zum anderen werden aufgrund der Orthogonalität *Inter-carrierinterferenzen* (Nebensprecheffekte, ACI) unterdrückt. Abbildung 1 zeigt das OFDM Spektrum. Das Spektrum hat

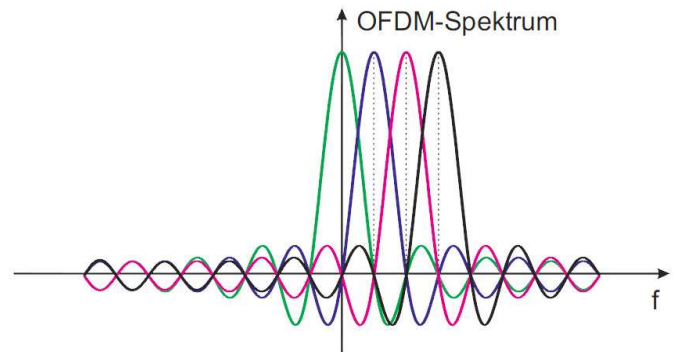


Abbildung 1. Spektrum eines OFDM-Signals. Das Spektrum jedes Subträgers hat Nullstellen an den Frequenzen benachbarter Subträger, aus [Kunz10]

die Form eines Dirichlet-Kerns. Somit hat ein Subträger immer dort Nullstellen, wo sich die Maxima der anderen Subträger befinden. Die Subträger sind also orthogonal zueinander und ICI wird unterdrückt. Dennoch treten bei Mehrwegeausbreitung im Mobilfunkkanal Intersymbolinterferenzen auf, da sich zwei aufeinanderfolgende OFDM Symbole überlappen. Um dies zu vermeiden, fügt man eine Kopie des Endes eines OFDM-Symbols an den Anfang des Symbols, was als *Guardintervall* oder *zyklisches Präfix* (*Cyclic Prefix*, CP) bezeichnet

wird. Des Weiteren sorgt das zyklische Präfix dafür, dass die Subträger auch nach der Übertragung über den Mobilfunkkanal orthogonal zueinander bleiben, somit also kein ICI auftritt und eine einfache Entzerrung möglich ist. Auf der Empfängerseite werden diese Schritte rückgängig gemacht, d.h. zunächst wird das zyklische Präfix entfernt und anschließend eine FFT angewendet. Es ist anzumerken, dass hier ebenfalls eine Synchronisation, Kanalschätzung und Entzerrung nötig ist. Darauf wird im Rahmen des Seminars nicht eingegangen.

Das Mehrnutzer-Zugriffsverfahren OFDMA ordnet den Benutzern ihren Anforderungen entsprechend flexibel Bandbreite zu. Somit wird die Bandbreite unter den Nutzern optimal aufgeteilt und es entsteht ein hohes Maß an Effizienz. Bandbreite wird in Form von *Resource Blöcken* (RB) vergeben. Abbildung 2 zeigt solch einen RB. Der RB besteht aus 84

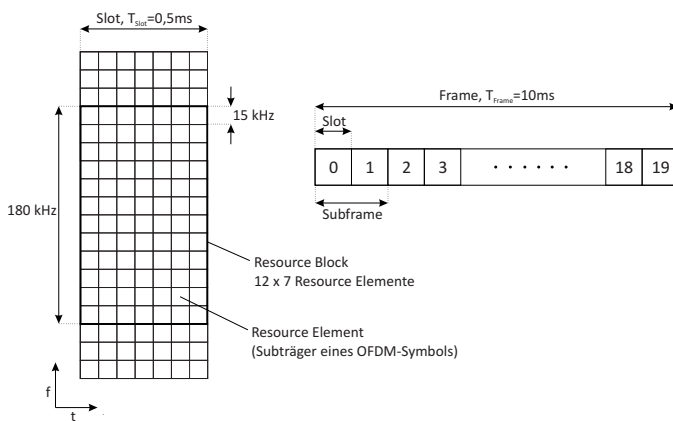


Abbildung 2. Resource Block und Frame im LTE-Downlink, nach [Kunz10]

Resource Elementen. Ein Resource Element repräsentiert den Subträger eines OFDM-Symbols im Frequenzbereich mit einer Bandbreite von 15 kHz und die Länge eines OFDM-Symbols von $T_s = 66,67\mu s$ im Zeitbereich. Einem OFDM-Symbol können pro Resource Block 12 Subträger, also insgesamt 180 kHz Bandbreite zugeordnet werden. Ein RB umfasst 7 OFDM-Symbole. Für die Dauer eines RB ergibt sich die Länge eines Slots von $T_{Slot} = 0,5ms$. Innerhalb eines Slots wird das zyklische Präfix des ersten Symbols zu $T_{cp} = 5,21\mu s$ gesetzt, die 6 weiteren jeweils zu $T_{cp} = 4,69\mu s$. Mit 7 Symbolen pro Slot erhält man die Länge eines Slots von $T_{Slot} = 0,5ms$ (siehe Abbildung 3). Zwei Slots bilden einen

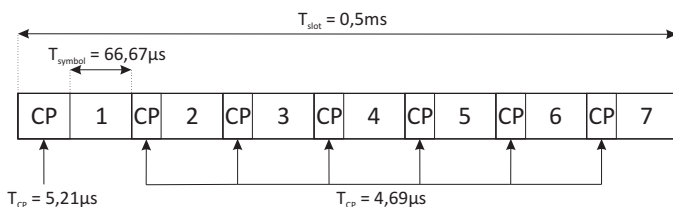


Abbildung 3. OFDM Symbole mit zyklischer Erweiterung innerhalb eines Slots, nach [Kunz10]

Subframe von $T_{Sub} = 1ms$, welcher in LTE die kleinste Zuweisungseinheit bildet. Die Basisstation entscheidet also jede Millisekunde, welche Endgeräte in einem Slot Daten senden bzw. empfangen. Die verfügbare Anzahl von RB hängt

von der zur Verfügung stehenden Kanalbandbreite ab. Jede Bandbreite besitzt ihre zugehörige (I)FFT-Größe und Abtastfrequenz für die Digital-Analog-Umsetzung. Als Beispiel sei eine Kanalbandbreite von 5 MHz angenommen. Für diese Bandbreite wird eine IFFT der Größe 512 benutzt, d.h. es gibt 512 verschiedene Subträger. Von diesen Subträgern werden die Ränder allerdings nicht belegt, sodass die effektive Bandbreite geringer ist als die FFT-Bandbreite. Zur Bandbegrenzung muss man eine entsprechende Filterung des Signals durchführen. Durch diese Filterung wird an den Rändern des OFDM-Signals die Orthogonalität zerstört. Aus diesem Grund belegt man die äußeren Subträger nicht. Von den 512 Subträgern werden nur 301 benutzt. Somit ergibt sich eine effektive Bandbreite von $B = 15kHz * 301 = 4,515MHz$. Die Anzahl der Resource Blöcke errechnet sich zu $k_{Res} = 301/12 = 25$. Diese Resource Blöcke können je nach Bedarf einem oder mehreren Benutzern zugewiesen werden. Außerdem können die verwendeten Modulationsverfahren für jeden Benutzer unterschiedlich sein. Diese werden anhand der Kanalbedingung ausgewählt. Tabelle I verschafft einen Überblick über die verwendeten OFDM-Parameter im LTE-Downlink. In Umge-

Tabelle I
OFDM-PARAMETER IM LTE-DOWNLINK IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BANDBREITE

Bandbreite [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Effektive Bandbreite [MHz]	1,08	2,7	4,5	9,0	13,5	18,0
Subträgerabstand [kHz]	15					
Abtastfrequenz [MHz]	1,92	3,84	7,68	15,36	30,72	30,72
(I)FFT-Größe	128	256	512	1024	2048	2048
Verwendete Subträger	74	181	301	601	901	1201
Anzahl der RB	6	15	25	50	75	100
Länge des CP [µs]	5,21 und 4,69					

bungen mit sehr schlechten Kanaleigenschaften kann auch ein längeres zyklisches Präfix von $16,67\mu s$ verwendet werden. Dadurch wird zwar ISI vermieden, aber der Durchsatz wird schlechter, da die Symbollänge weiterhin $T_s = 66,67\mu s$ beträgt und somit weniger Symbole pro Slot übertragen werden können.

Das Zugriffsverfahren OFDMA wird bei LTE nur im Downlink eingesetzt. OFDM weist ein großes Verhältnis von maximaler Übertragungsleistung zu mittlerer Übertragungsleistung (*Peak-to-Average Power Ratio*, PAPR) auf. In der Praxis müssen die eingesetzten Sendeverstärker auch die maximale Leistungsaufnahme verbunden, die man in Endgeräten, wie Mobiltelefonen, möglichst gering halten möchte. Daher wird im Uplink das Zugriffsverfahren SC-FDMA eingesetzt. Dieses Verfahren unterscheidet sich lediglich durch die Tatsache, dass im ersten Schritt eine DFT der zu sendenden Symbole durchgeführt wird. Anschließend verläuft die Übertragung wie bei OFDMA. Durch die DFT wird jedoch erreicht, dass die Symbole jetzt nicht auf jeweils 15kHz schmalbandigen Subträgern parallel, sondern auf jeweils $N * 15kHz$ breitbandigen Subträgern innerhalb einer Symboldauer seriell übertragen werden,

wobei beide Verfahren eine Symboldauer von $T_s = 66,67 \mu\text{s}$ aufweisen und N die Anzahl der verwendeten Subträger darstellt. Die einzelnen Symbole innerhalb einer Symboldauer sind jetzt also breitbandiger und ähneln mehr einem Einträger - daher *Single Carrier* - FDMA. Jeder Subträger enthält also Informationen über alle Symbole. Abbildung 4 veranschaulicht dies anhand von vier Subträgern. Es kann gezeigt werden, dass so das Verhältnis der maximalen zur mittleren Leistung reduziert wird und daher die Linearitätsanforderungen an einen Verstärker nicht mehr so groß sind. Allerdings steigt zugleich der Entzerrungsaufwand. Aus diesem Grund wird das Verfahren nur im Uplink eingesetzt. Da die Leistungsaufnahme in einer Basisstation nur eine untergeordnete Rolle spielt, kann im Downlink OFDMA eingesetzt werden. Die Zuordnung der Bandbreite funktioniert im Uplink so wie bei OFDMA.

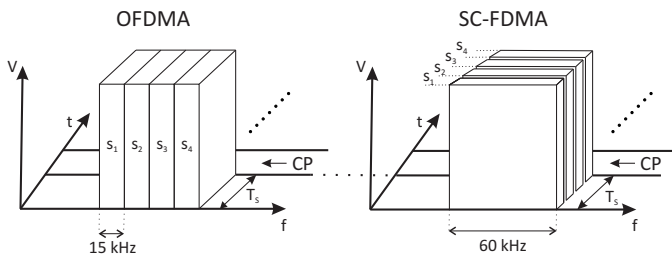


Abbildung 4. Zu sendende Symbolsequenzen bei OFDMA und SC-FDMA bei Verwendung von vier Subträgern.

III. LTE MEHRANTENNENKONZEPTE

Die zweite nennenswerte Erneuerung bei LTE ist der Einsatz von Mehrantennensystemen. Diese werden eingesetzt, um entweder die Datenrate weiter zu steigern oder die Übertragungsqualität, die stark unter dem Mehrwegeempfang leiden kann, zu verbessern. Long Term Evolution macht Gebrauch von folgenden Mehrantennensystemen:

- *SISO* (Single Input Single Output): eine Send- und eine Empfangsantenne.
- *SIMO* (Single Input Multiple Output): eine Send- und mehrere Empfangsantennen.
- *MISO* (Multiple Input Single Output): mehrere Send- und eine Empfangsantenne.
- *MIMO* (Multiple Input Multiple Output): n Send- und m Empfangsantennen.

Zur Verbesserung der Signalqualität wird mit der Empfangsdiversität bzw. der Sendediversität das SNR erhöht. Bei der Empfangsdiversität werden auf der Mobilteilseite die folgenden Konzepte eingesetzt:

- *Selection Combining (SC)*: Auswahl der Empfangsantenne mit dem besten SNR.
- *Maximum Ratio Combining (MRC)*: Berechnung des optimalen Summensignals aus den einzelnen Antennensignalen, um das größtmögliche SNR zu erzielen.
- *Equal Gain Combining (EGC)*: Vereinfachung des MRC-Verfahrens hinsichtlich der Rechenkomplexität und damit nicht optimal.

Bei der Sendediversität werden bei LTE auf der Basisstationsseite die folgenden Konzepte eingesetzt:

- *Space Frequency Block Codes (SFBC)*
- *Cyclic Delay Diversity (CDD)*

Teilweise benötigen die Techniken für Sendediversitäten einen Rückkanal (*closed loop*), damit die Basisstationen Informationen über den Kanal erhalten können. Hierbei ist es aufwendig die Latenzzeiten ausreichend gering zu halten, um eine schnelle Anpassung an den Kanal zu ermöglichen. *Open loop* Verfahren benötigen diese Information nicht. Zur Datenratenerhöhung

Tabelle II
IN LTE VERWENDETE MEHRANTENNENSYSTEME

Modus	Konstellation	N_{Rx}	N_{Tx}	Beschreibung
Einzelantenne	SISO	1	1	
Selection Combining	SIMO	2-4	1	Empfangsdiversität
Maximum Ratio Combining	SIMO	2-4	1	Empfangsdiversität
Space Frequency Block Codes	MISO, MIMO	1-4	2;4	Sendediversität
Cyclic Delay Diversity	MIMO	2-4	2-4	Sendediversität (nur mit Open-Loop Raum-Multiplex)
Close Loop Spatial Multiplexing	MIMO	2-4	2-4	Raum-Multiplex
Multi-user MIMO	MIMO	2-4	2-4	Raum-Multiplex für verschiedene Nutzer

mittels Mehrantennensystemen nutzt man den Raum aus und benutzt das Verfahren *Raum-Multiplex (Spatial Division Multiplex, SDM)*. Dazu sendet man N parallele Datenströme auf dem gleichen Frequenzband, welche am Empfänger auf geeignete Weise zurückgewonnen werden. Damit kann die Datenrate theoretisch um den Faktor N erhöht werden, wobei N die Anzahl der Antennen darstellt und der Empfänger mindestens so viele Antennen besitzen muss wie der Sender. Weiterhin dürfen die Kanäle der einzelnen Datenströme nur eine geringe räumliche Korrelation aufweisen. Dies kann zum einen durch geeignete Ausrichtung der Antennen und deren Polarisation erreicht werden. Zum anderen spielt aber auch die Umgebung eine Rolle. So sind z.B. Räume innerhalb von Gebäuden sehr gut geeignet, da hier viele Reflexionen entstehen und die Mehrwegeausbreitung ausgeprägt ist. Diese sorgt ebenfalls für geringe Korrelation zwischen den Datenströmen. Neben dem *single-user MIMO (SU-MIMO)* verwendet LTE auch *multi-user MIMO (MU-MIMO)*. Damit werden Daten synchron über Raum-Multiplex zu verschiedenen Benutzern übertragen. Tabelle II fasst die im LTE-Standard verwendeten Mehrantennenkonzepte übersichtlich zusammen.

IV. EIGENSCHAFTEN VON LONG TERM EVOLUTION

Das Ziel von LTE ist eine höhere Datenrate, kurze Latenzzeiten, bessere Abdeckung in einer Mobilfunkzelle und eine variable Bandbreite.

Das LTE System unterstützt aufgrund der eingesetzten Zugriffsverfahren OFDMA und SC-FDMA flexible Bandbreiten.

Diese erstrecken sich über 1.4 MHz bis 20 MHz. Es wird sowohl FDD (*Frequency Division Duplexing*) als auch TDD (*Time Division Duplexing*) eingesetzt. Für FDD existieren gepaarte Frequenzbänder, sodass für den Downlink und den Uplink unterschiedliche Bänder verwendet werden. Für TDD sind die Bänder ungepaart, d.h für den Uplink und den Downlink werden dieselben Frequenzbänder verwendet. Im nächsten Abschnitt werden die in Deutschland verwendeten Frequenzbänder vorgestellt. IMT-2000 fordert, dass LTE auch bei hohen Relativgeschwindigkeiten von 350 km/h eine Verbindung gewährleistet. Zwar hält LTE diese Forderung ein, doch kann man bei solchen Geschwindigkeiten keine hohen Datenraten erwarten. Eine hohe Performance ergibt sich für Geschwindigkeiten zwischen 15 km/h und 120 km/h. Optimale Datenraten erhält man für Geschwindigkeiten <15 km/h. Die eingesetzten (linearen) Modulationsverfahren beschränken sich auf QPSK, 16 QAM und 64 QAM. Sie werden abhängig von der momentanen Kanalsituation eingesetzt. Ein weiteres Feature von LTE ist die Verwendung von mehreren Antennen auf Sender- und Empfängerseite (vgl. III). Im Downlink werden Mehrantennensysteme bis zu 4x4 verwendet, wobei 4 Empfangsantennen nur in größeren Endgeräten zum Einsatz kommen. Im Uplink wird lediglich eine Sendeantenne an den Mobilstationen verwendet, wobei an den Basisstationen durchaus mehrere Antennen verwendet werden. Tabelle III zeigt eine Übersicht der Eigenschaften für die LTE-Luftschnittstelle. Die Spitzendatenraten im Downlink beziehen sich auf eine Kanalbandbreite von 20 MHz, einer 64 QAM und eine geringe Relativgeschwindigkeit von Mobilstation zu Basisstation. Im Uplink ist ebenfalls eine Bandbreite von 20 MHz und ein SISO-System angenommen. Hierbei handelt es sich um die *maximal* erreichbaren Raten. Die tatsächlich erreichbare Datenrate ist abhängig von der Anzahl der Nutzer in der Funkzelle, der Entfernung zwischen Mobil- und Basisstation, Relativgeschwindigkeit des Nutzers gegenüber der Basisstation und den Kanaleigenschaften.

Tabelle III
EIGENSCHAFTEN DER LTE-LUFTSCHNITTSTELLE

Bandbreite [MHz]	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Duplexverfahren	FDD, TDD
Zugriffsverfahren	Downlink: OFDMA, Uplink: SC-FDMA
Mobilität [km/h]	bis 350
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM
MIMO	Downlink: 2x2, 4x2, 4x4, Uplink: 1x2, 1x4
Spitzendatenraten [Mbit/s]	DL: 100 (1x1), 172.8 (2x2), 326.4 (4x4) UL: 50 (QPSK), 57.6 (16QAM), 86.4 (64QAM)

LTE wird stetig von 3GPP weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung, die den Ansprüchen von IMT-Advanced gerecht wird, wird als *LTE-Advanced* bezeichnet. LTE-Advanced soll eine noch bessere spektrale Effizienz erreichen. Dazu sollen eine Bandbreite von bis zu 40 MHz im Uplink, bis zu 100 MHz im Downlink und höherwertige Mehrantennensysteme bis zu 8x8 verwendet werden. Damit werden im Uplink

Datenraten bis zu 500 MBit/s und im Downlink bis zu 1 Gbit/s angestrebt. LTE-Advanced soll der Mobilfunkstandard der vierten Generation werden (4G). Allerdings ist es im Interesse der Mobilfunkanbieter zunächst vor allem ländliche Regionen, die Engpässe bezüglich Breitband-Internet via DSL aufweisen, mit LTE auszustatten, um diesen möglichst schnell einen Breitband-Internetzugang zu gewährleisten. LTE-Advanced könnte später durch ein paar technische Veränderungen an den Basisstationen nachgerüstet werden, wobei dann auch neue Endgeräte notwendig sind.

V. LTE IN DEUTSCHLAND

Durch die Digitalisierung des Rundfunks (auch *Digitale Dividende* genannt) wurden Frequenzbänder in Deutschland frei. Die Bänder im Bereich von 791-842 MHz und 2500-2690 MHz wurden bereits im April 2010 in Form von Frequenzblöcken versteigert und im August 2010 zugeordnet. Ein Frequenzblock umfasst eine Bandbreite von 5 MHz. Aufgrund der Frequenzbereiche werden diese auch als LTE-800 und LTE-2600 bezeichnet. Bei der Versteigerung haben die Mobilfunkanbieter O2, Vodafone, Deutsche Telekom und E-Plus Frequenzblöcke gekauft. Die Tabellen IV, V und VI zeigen die zugeordneten Frequenzblöcke.

Tabelle IV
LTE-800 FREQUENZZUORDNUNGEN, FDD

Anbieter	Uplink	Downlink	Preis
O2	832-842 MHz	791-801 MHz	1,212 Mrd. €
Vodafone	842-852 MHz	801-811 MHz	1,210 Mrd. €
Deutsche Telekom	852-862 MHz	811-821 MHz	1,153 Mrd. €

Tabelle V
LTE-2600 FREQUENZZUORDNUNGEN, FDD

Anbieter	Uplink	Downlink	Preis
Vodafone	2500-2520 MHz	2620-2640 MHz	73,464 Mio. €
Deutsche Telekom	2520-2540 MHz	2640-2660 MHz	76,228 Mio. €
E-Plus	2540-2550 MHz	2660-2670 MHz	36,67 Mio. €
O2	2550-2570 MHz	2670-2690 MHz	71,415 Mio. €

Tabelle VI
LTE-2600 FREQUENZZUORDNUNGEN, TDD

Anbieter	Uplink + Downlink	Preis
Vodafone	2580-2605 MHz	44,96 Mio. €
Deutsche Telekom	2605-2610 MHz	8,598 Mio. €
E-Plus	2570-2580 MHz	16,502 Mio. €
O2	2610-2620 MHz	16,458 Mio. €

Die hohen Preise im 800-MHz Frequenzband sind auf die geringere Funkfeldämpfung zurückzuführen. Dies ermöglicht den Mobilfunkanbietern größere Funkzellen anzulegen. Damit wird die Zahl der benötigten Zellen drei bis fünf Mal kleiner als im 2600-MHz Band. Somit lassen sich in dem unteren Frequenzband die ländlichen Regionen sehr gut und relativ günstig abdecken, was das primäre Ziel der Anbieter ist.

Das 2600-MHz Frequenzband soll vor allem in städtischen Regionen mit hoher Nutzerdichte verwendet werden.

Die ersten kommerziellen LTE-Netze wurden in Europa im Dezember 2010 in Oslo und Stockholm eingeführt. Nutzer erreichen unter guten Bedingungen 100 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink. In Deutschland testete die Deutsche Telekom im Juni 2011 in Köln das LTE-Netz. Hier wurden im Downlink ebenfalls bis zu 100 Mbit/s erreicht. Andere Testergebnisse zeigen aber auch, dass die Raten je nach Lage auch deutlich niedriger sein können. In einem ländlichen Gebiet wurden beispielsweise nur 6 Mbit/s im Downlink und Uplink erreicht. Dennoch ermöglicht LTE diesen Regionen - wo bislang kein DSL-Anschluss vorhanden war - Zugang zu sehr schnellem Internet.

LITERATUR

- [Ali-11] T. Ali-Yahiya: *Understanding LTE and its Performance*. Springer, 2011.
- [DPS11] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld: *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2011.
- [EFK⁺06] H. Ekström, A. Furuskär, J. Karlsson, M. Meyer, S. Parkvall, J. Torsner, M. Wahlqvist: "Technical Solutions for the 3G Long-Term Evolution". *IEEE Communications Magazine*, 2006, S. 38–45.
- [HT11] H. Holma, A. Toskala: *LTE for UMTS - Evolution to LTE-Advanced*. John Wiley & Sons, 2011.
- [Kamm11] K.-D. Kammeyer: *Nachrichtenübertragung*. Vieweg Teubner, 2011.
- [Khan09] F. Khan: *LTE for 4G Mobile Broadband - Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge, 2009.
- [Kunz10] J. Kunze: "Empfängerarchitekturen für Mehrantennensysteme mit niedriger Verlustleistung im Mobilfunkstandard LTE". Ph.D. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- [Rum09] M. Rumney: *LTE and the Evolution to 4G Wireless - Design and Measurement Challenges*. John Wiley & Sons, 2009.
- [STB09] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker: *LTE-the UMTS long term evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, 2009.