



Juni 2015

Faktenblatt LTE und LTE-Advanced

Die „Long Term Evolution“ von UMTS

Zusammenfassung

Mit LTE (Long Term Evolution) wird der Nachfolger des verbreiteten Mobilfunkstandards UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) bezeichnet. Dessen Einführung ist eine der Antworten auf das rasante Wachstum des mobilen Datenverkehrs. Weltweit verdoppelte sich bisher das über Mobilfunknetze übertragene Verkehrsvolumen ca. alljährlich. In vielen Ländern, so auch in der Schweiz, verdoppelte sich dieser Verkehr in nur sieben Monaten.

LTE umfasst eine für den Mobilfunk optimierte Luftschnittstelle die sich bereits in terrestrischen digitalen Rundfunknetzen bewährte. Dies erfordert neue Ausrüstungen in bestehenden und zusätzlichen Basisstationen und neue Teilnehmergeräte (Handy, Tablet, PC, Modem, Router). Neben einer Vielzahl anderer Eigenschaften bringt LTE vor allem höhere Bitraten auf der Luftschnittstelle zwischen Basisstation und Teilnehmergerät. Damit steigt die Übertragungskapazität der Mobilfunknetze und es können entweder mehr Endkunden mit gleicher Bitrate oder gleich viele Endkunden mit höheren Bitraten bedient werden. Zudem trägt das kürzere Datenübertragungsintervall (Latenz) zu einer spürbar verbesserten Reaktionsfreudigkeit des Netzes bei. Auch verbraucht LTE gegenüber UMTS im Teilnehmergerät weniger Energie und ermöglicht eine längere Autonomie bei eingeschaltetem Datendienst.

Die Weiterentwicklung der Luftschnittstelle ist eng an die Weiterentwicklung des Kernnetzes (Vernetzung der Basisstationen) gekoppelt. Die Weiterentwicklung des Kernnetzes läuft unter der Bezeichnung SAE (Services Architecture Evolution). LTE und SAE haben unter anderem die Ziele der Steigerung des Benutzererlebnisses und die Senkung der Kosten pro übertragenes Bit.

Dieses Faktenblatt gibt einen Überblick über die Luftschnittstelle LTE, deren Weiterentwicklungen sowie Einblicke in den Netzaufbau und die Dienste ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.



Inhalt

1	Abkürzungen	1
2	Überblick.....	3
3	Frequenzen und Konzessionen.....	5
4	Technologie der LTE-Luftschnittstelle	5
4.1	Überblick.....	5
4.2	Downlink	7
4.3	Uplink.....	8
4.4	Spektrale Effizienz.....	8
4.5	Carrier aggregation	9
4.6	MIMO.....	10
5	Mobilfunknetze	12
6	Dienste	13
7	Referenzen	14

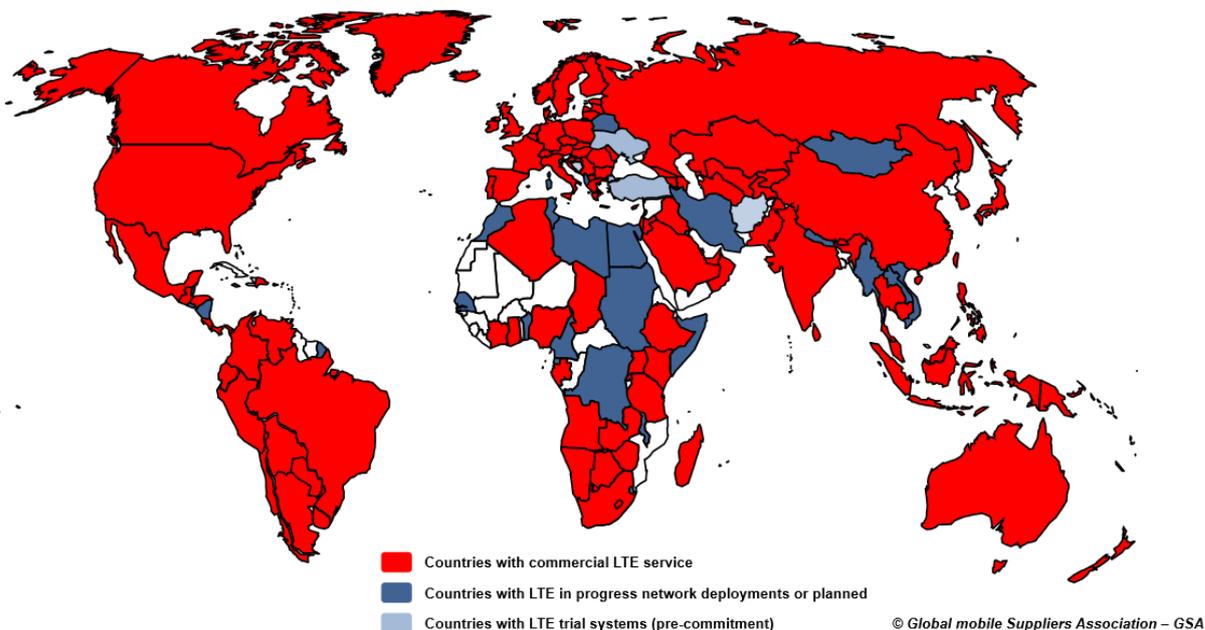
1 Abkürzungen

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AIPN	All-IP Network
AMC	Adaptive Modulation and Coding
APN	Access Point Name
BAKOM	Bundesamt für Kommunikation
bps	Bit pro Sekunde
CDMA	Code Division Multiple Access
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-T	Terrestrial Digital Video Broadcast
eMBMS	Evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System (EPS = E-UTRAN + EPC)
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FTTx	Fiber To The x (Home, Building, Curb ...)
GBR	Guaranteed Bitrate
GHz	Giga-Hertz (10^9 Hertz)
GSM	Global System for Mobile Communications
HetNet	Heterogeneous Network
HSPA	High Speed Packet Access
ICIC	Inter Cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	IP Multimedia System
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
LIPTO	Local Internet Protocol Traffic Offload
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MHz	Mega-Hertz (10^6 Hertz)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Mehrfachantennenverfahren)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PER	Packet error rate
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAT	Radio Access Technology

RB	Resource Block
RRM	Radio Resource Management
SAE	Services Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDMA	Space Division Multiple Access
SFN	Single-Frequency Network
SIPTO	Selected Internet Protocol Traffic Offload
SIR	Signal to Interference Ratio
SMS	Short Message Service
SON	Self Organising Network
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WRC	World Radio Conference (ITU)

Gemäss der Global Suppliers Association (GSA) sind im April 2015 weltweit 393 LTE Netze kommerziell in Betrieb (davon 54 LTE TDD²) und weitere rund 200 Betreiber würden den Bau eines LTE Netzes beabsichtigen. (siehe Abbildung 2).

Mit derzeit weltweit ca. 7 Milliarden Teilnehmern (potentiell LTE-Netz fähige SIM-Karten resp. Verbindungsverträge) nach den Standards von 3GPP, hat sich LTE klar gegen konkurrierende Mobilfunkstandards wie CDMA2000/EV-DO oder IEEE/WiMAX durchgesetzt (siehe Abbildung 9).



Quelle: www.gsacom.com ³

Abbildung 2: Kommerzielle und beabsichtigte LTE-Netze weltweit – Stand Mai 2015

Der LTE-Standard unterstützt alle Mobilfunkfrequenzen. LTE wurde zuerst im E-UTRA Band 3 (1800 MHz) eingeführt, welches durch GSM genutzt wurde und weiterhin genutzt wird (vgl. Tabelle 1). Dies war der Anfang der schrittweisen Substitution von GSM durch LTE. Die Wahl des Bandes 3 für die Einführung von LTE erforderte von den Netzbetreibern vorerst keine zusätzlichen Antennenpanels an den Basisstationen. Solche wären bei der Wahl neuer Frequenzbänder wie 20 oder 7 (800 MHz, 2.6 GHz) notwendig gewesen. Zudem bietet das Band 3 mit 2 x 75 MHz Bandbreite genügend Kapazität für eine Aufteilung zwischen GSM und LTE. Wegen der hohen Flexibilität kommen Multi-RAT fähige Basisstationen zum Einsatz, welche alle Mobilfunktechnologien (GSM, UMTS/HSPA+, LTE-x) unterstützen und diese statisch oder dynamisch je nach Bedarf für die Nutzung zur Verfügung stellen können. Die ersten Teilnehmergeräte unterstützten teilweise bereits die Frequenzbänder 20 und/oder 7 (siehe Tabelle 1).

Anders als bei UMTS kommen bei LTE-Teilnehmergeräten standardmässig beide Verfahren zur gleichzeitigen⁴ Datenübertragung von der Basisstation zum Teilnehmergerät und in der anderen Richtung zum Einsatz: Frequenzduplex FDD und Zeitduplex TDD. Viele Teilnehmergeräte unterstützen beide Duplexverfahren. Dies erlaubt die Ausnutzung von Skaleneffekten in der Produktion der Endgerätekomponten und den Teilnehmergeräten. Für den Endnutzer ist dadurch die Möglichkeit des weltweiten Roaming in Netzen mit unterschiedlichen Duplexmethoden gegeben und für Netzbetreiber steht potentiell mehr nutzbares Spektrum zur Verfügung.

² http://www.gsacom.com/downloads/pdf/Snapshot_LTE-TDD_extract_GSA_Evolution_to_LTE_report_090415.php4

³ http://www.gsacom.com/downloads/pdf/LTE_World_map_393_LTE_networks_launched_090415.php4

⁴ mindestens annäherungsweise

3 Frequenzen und Konzessionen

Die Eidgenössische Kommunikationskommission ComCom versteigerte im Februar 2012 alle damals zur Verfügung stehenden Mobilfunkfrequenzen⁵. Alle Frequenzblöcke à 5 MHz aus den in Tabelle 1 aufgeführten Frequenzbändern wurden von den drei bestehenden Schweizer Mobilfunk Betreiberfirmen ersteigert. Die Auktionseinnahmen für den Bund beliefen sich auf rund 996 Millionen Schweizer Franken.

Frequenzband	E-UTRA operating bands	Bandbreite	Duplexverfahren	Unterstützt ab LTE-Release
800 MHz	20	2x30 MHz	FDD	9
900 MHz	8	2x35 MHz	FDD	8
1800 MHz	3	2x75 MHz	FDD	8
2100 MHz	1	2x60 MHz	FDD	8
2600 MHz	7	2x70 MHz	FDD	8
	38	1x45 MHz	TDD	
	Total	585 MHz		

Tabelle 1: Frequenzbänder für LTE in Europa

In vielen Ländern auf allen Kontinenten sind zusätzliche Mobilfunkbänder für IMT-Systeme in den Bereichen 700 MHz, 1400 MHz und 3.5 GHz mit einer gesamten potentiellen Bruttobandbreite von bis zu 525 MHz in Planung. Der Entscheid darüber wird an der Weltfunkkonferenz⁶ WRC-15 im November 2015 gefällt. Dann wird entschieden, ob auch Frequenzbänder zwischen ca. 6 GHz und 100 GHz für IMT verwendet werden sollen.

4 Technologie der LTE-Luftschnittstelle

4.1 Überblick

3GPP definiert seit 2005 die Anforderungen (Requirements) für LTE und LTE-Advanced basierend auf den Anforderungen der ITU-R für IMT-2000 und IMT-Advanced. Die wichtigsten initialen technischen Leistungsziele für LTE waren:

- Signifikante Erhöhung der Datenrate im Downlink auf bis zu 100 Mbit/s in der Bandbreite von 20 MHz, also einer Erhöhung der Spektrumseffizienz auf theoretisch bis zu 5 bit/s/Hz/cell mit einer Sende- und zwei Empfangsantennen (dies entspricht der 3- bis 4-fachen Spektrumseffizienz gegenüber UMTS/HSDPA Rel. 6)
- Signifikante Erhöhung der Datenrate im Uplink auf bis zu 50 Mbit/s in der Bandbreite von 20 MHz, also einer Erhöhung der Spektrumseffizienz auf theoretisch bis zu 2.5 bit/s/Hz/cell mit einer Sende- und zwei Empfangsantennen (dies entspricht der 3- bis 4-fachen Spektrumseffizienz gegenüber UMTS/HSDPA Rel. 6)
- Flexible Spektrumsnutzung durch skalierbare Kanalbandbreiten von 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz und 20 MHz
- Verzögerungszeit über die Luftschnittstelle vom Teilnehmergerät zur Basisstation soll kürzer als 5 ms sein. Round-trip delay kleiner als 10 ms
- Flexible Spektrumsnutzung durch Duplex-Verfahren FDD und TDD
- Höhere Datenraten am Zellenrand als mit UMTS
- Mobilität bis zu 500 km/h (optimiert für 0 – 15 km/h)
- Unterstützung von verschiedenen QoS- und Mobilitäts-Anforderungen
- Integration von MIMO in den Standard
- Tiefe Übertragungskosten pro Bit über die Luftschnittstelle
- Einfache, skalierbare Architektur, weniger Netzelemente, offene Schnittstellen
- Möglichst kleiner Energieverbrauch der Teilnehmergeräte (hohe Autonomie)

⁵ <http://www.comcom.admin.ch/themen/00783/index.html?lang=de>

⁶ <http://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>

Die wichtigsten Neuerungen im Kernnetz sind die flache, dezentrale Architektur auf der Basis des Internet Protokolls sowie der Wegfall der Leitungsvermittlung. Rein paketvermittelte Netzwerke sind All-IP-Netze (AIPN). Das Hauptmerkmal ist die wesentlich flachere Hierarchie der Netzelemente als leitungsvermittelte Netze (2G und 3G) aufweisen. Das Ziel dieser Architektur ist die Senkung der Kosten bei flexibler Skalierbarkeit (siehe Kapitel 5 und 6).

Die wichtigsten Neuerungen der Luftschnittstelle LTE sind die Einführung der

- Modulationsart OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) und des Kanalzugriffsverfahrens OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) im Downlink,
- SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) im Uplink,
- sowie skalierbare Kanalbandbreiten.

SC-FDMA ist eine Methode, die mit OFDMA verwandt ist. Dieses Verfahren ermöglicht den Betrieb des Systems mit skalierbaren Kanalbandbreiten, gewählt wurde ein Bereich von 1,4 MHz bis 20 MHz. Damit kann LTE flexibel in den jeweils zugeteilten Bandbreiten eingesetzt werden und setzt nicht wie UMTS einen zusammenhängenden Block von mindestens 5 MHz oder dem Mehrfachen davon voraus.

Flexible Kanalbandbreiten erlauben das schrittweise Refarming⁷ der bestehenden Infrastruktur resp. der Netze sowie den Einsatz in fragmentierten Frequenzuteilungen, wie sie durch die Koordination an den Landesgrenzen beispielsweise bei den GSM-Vorzugsfrequenzen gegeben sind.

Die Technik, die hinter LTE steckt, ist komplex: Eine sehr engmaschige und agile Aufteilung der Trägersignale im Zeit- und Frequenzbereich verschafft LTE einen Effizienzvorteil gegenüber den bisher in öffentlichen Mobilfunknetzen eingesetzten Luftschnittstellen.

Bei LTE können die Funkparameter mit den neuen Kanalzugriffsverfahren OFDMA und SC-FDMA im Takt des Sendeintervalls (TTI) von einer Millisekunde agil an die augenblicklichen Eigenschaften des Funkkanals adaptiert werden(siehe Abbildung 3).

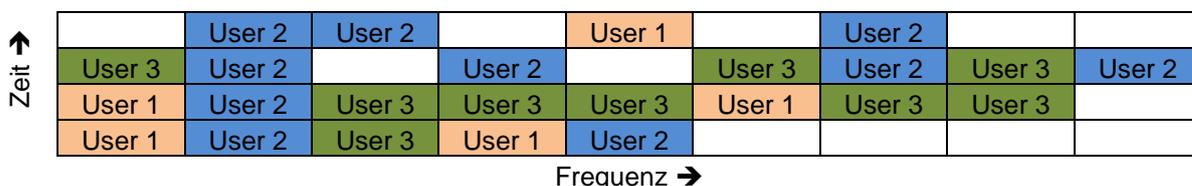


Abbildung 3: Beispiel der Verteilung von Zeit/Frequenz-Ressourcen-Blöcken auf 3 Teilnehmer

Diese Zuteilung übernimmt ein Scheduler-Algorithmus in der Basisstation, welcher die Ressourcenallokation disponiert. Dazu übermittelt das Teilnehmergerät Messwerte an die Basisstation im entsprechenden Kontrollkanal. Im Gegenzug signalisiert die Basisstation die Ressourcenallokationen an die Teilnehmergeräte der Funkzelle im entsprechenden Kontrollkanal. Der Scheduler-Algorithmus ist nicht standardisiert die Darstellung der Messwerte und die Protokolle auf der Luftschnittstelle hingegen schon.

Mit LTE Release 8/9 wurde erstmals die Schallmauer von 100 MBit/s im Downlink durchbrochen: Der neue Mobilfunkstandard verspricht - zumindest theoretisch - maximale Datenraten von bis zu 326 MBit/s im Downlink und 86 MBit/s im Uplink. Mit LTE Release 10/11 können theoretisch bis zu 1 Gbps im Downlink und bis zu 500 Mbps im Uplink erreicht werden. Diese Steigerung wird vor allem Mehrfachantennen (MIMO) durch die Ausnutzung von Raummultiplex (SDMA) erreicht (siehe Kapitel 4.4 und 4.6). Dabei können bis zu 8 Antennen in Basisstation und Teilnehmergerät (8x8 MIMO) im Downlink und bis zu vier Antennen in Basisstation und Teilnehmergerät im Uplink (4x4 MIMO) eingesetzt werden.

Bereits in der ersten Ausbauphase waren Datenraten von bis zu 100 MBit/s möglich. LTE verspricht nicht nur deutlich höhere Datenraten und bessere Spektrumseffizienz als seine Vorgänger, sondern auch kürzere Latenzzeit (Laufzeit eines Datenpaketes vom Sender zum Empfänger). Die Latenzzeit

⁷ Refarming meint die Migration von einer Funktechnologie zu einer anderen, meist von einer Älteren zu einer Neuere.

beträgt bei LTE maximal 5 Millisekunden, bei UMTS liegt die mittlere Latenzzeit bei 70 bis 140 Millisekunden. Die Streuung der Latenzzeit (delay jitter) wurde mit LTE ebenfalls verkleinert.

Für Echtzeit-Dienste wie VoIP und Gaming ist eine kurze Latenzzeit und die geringe Schwankung der Latenzzeit eine Voraussetzung für eine korrekte Funktion. Deshalb musste ebenfalls die für einen Handover benötigte Zeit zwischen den Funkzellen stark verkürzt werden. Dies wird auch durch das EPS und die flache Netzhierarchie des Kernnetzes erreicht. Die gesteigerte Reaktionsfreudigkeit des Netzes ist für die gefühlte Geschwindigkeit entscheidend, eine hohe Datenrate alleine reicht für diese Erfahrung nicht aus. LTE soll gegenüber UMTS gar den Konsum von Videoinhalten begünstigen⁸.

Durch Verbesserungen von MBMS soll LTE künftig als Plattform zur Verbreitung von Rundfunkdiensten in Mobilfunknetzen positioniert werden. Ab Release 10 wird die Weiterentwicklung von eMBMS mit „LTE-Broadcast“ bezeichnet und hat das Potential in gewissen Märkten eine Alternative zu DVB-T und anderen Rundfunktechnologien zu werden.

4.2 Downlink

Für den Downlink wurde für LTE das OFDMA-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) gewählt. OFDMA ist die Verwendung von OFDM für ein Mehrfach-Zugriffsverfahren. Im Gegensatz zu OFDM werden bei OFDMA Blöcke einzelner Subträger zu einem bestimmten Zeitpunkt einem Teilnehmer zugeordnet (siehe Abbildung 3).

Diese Ressourcenzuteilung geschieht in rascher Abfolge (1 ms) und ist daher sehr agil. Diese (Subträger-)Frequenz- und Zeitnischen heißen "Physical Resource Blocks" (PRB). Weitere Details der Struktur und Parameter finden sich im Kasten.

Durch OFDM werden die Empfänger, verglichen mit anderen Breitbandssystemen, wesentlich vereinfacht, weil dadurch die Korrektur der Kanalverzerrungen vergleichsweise einfach realisierbar ist. Ein wichtiger Grund für die Wahl von OFDM war die Anforderung der Frequenznutzung in variablen Bandbreiten von 1,4 MHz bis 20 MHz. Bei relativ kleinen Bandbreiten und grossen Bitraten ist CDMA nicht mehr vorteilhaft.

Ein weiterer Vorteil von OFDM im Downlink ist der vergleichsweise einfache Aufbau von Gleichwellennetzen (SFN), also der Verwendung derselben Frequenz in unmittelbar benachbarten Zellen. Vor allem zur Übertragung von Rundfunkdiensten mittels eMBMS sind Gleichwellennetze effizient. Die Nur-Downlink Verwendung von TDD-Frequenzbereichen und neue Nur-Downlink Frequenzbereiche stehen im Zusammenhang mit der durch Videostreaming getriebenen Verkehrs-Asymmetrie. Der wachsende Videokonsum führt zu einer Verkehrsasymmetrie zwischen Downlink und Uplink. Die beobachteten Asymmetrien (DL zu UL) betragen im Jahr 2012 bis zu Faktoren von 7 bis 11.

Ein Nachteil von OFDM ist die hohe Anforderung an die Linearität des Sendeverstärkers. Dies ist durch ein verfahrensbedingtes hohes Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) des Modulations-signals bedingt. Verstärker mit hoher Linearität haben einen relativ hohen Stromverbrauch und

Weitere Funkparameter des LTE-Downlink

Die Resource Blocks (PRB) bestehen aus 12 OFDM-Subträgern von je 15 kHz und somit einer Bandbreite von 180 kHz während der Zeitdauer eines Slots von 0.5 ms.

7 Symbole bilden einen Slot womit ein Resource Block mindestens 84 Symbole umfasst. 2 Slots (14 Symbole) zusammen bilden einen Subframe wodurch das minimale Übertragungsintervall (TTI) von 1 ms definiert ist. Ein Radioframe besteht aus 10 Subframes (20 Slots) und dauert 10 ms.

Die zum Einsatz kommenden Modulationsarten der Subträger sind QPSK, 16-QAM und 64-QAM mit 2, 4 und 6 Bit/Symbol. Die Wahl der Modulationsart (AMC) wird dynamisch mittels selektiver Zeitplanung (selective scheduling) durch den Scheduler-Algorithmus in der Funk-Ressourcenverwaltung (RRM) aufgrund der durch das Teilnehmergerät signalisierten augenblicklichen Eigenschaften des Funkkanals getroffen. Die minimale Scheduling-Resource besteht aus 2 Resource Blocks. Der Subträger-Frequenzwechsel (frequency hopping) kann auf Basis der Slots erfolgen.

⁸ http://business.chip.de/news/LTE-Treiber-fuer-mobile-Netflix-und-Co._72556383.html

sind teurer. Beide Aspekte bedeuten höhere Anschaffungs- und Betriebskosten einer Basisstation, doch überwiegen die Vorteile einfacherer Teilnehmergeräte.

Diese Eigenschaften von LTE erlauben letztlich die sehr flexible Anpassung an

- Umgebungen (Indoor, Urban, Suburban, Rural),
- verschiedene Mobilitätsbedingungen (von stationär/nomadisch bis 500 km/h)
- Zellradien von Hotspots (zehn Meter) bis mehrere zehn Kilometer
- Frequenzbänder von 400 MHz bis 4 GHz

4.3 Uplink

Für den Uplink wurde ein Einträger-Frequenzmultiplex (SC-FDMA) Verfahren gewählt. Vorteile dieses Verfahrens sind die relativ niedrigen Nachbarkanalleistungen, auch mit einem nur beschränkt linearen Endverstärker. SC-FDMA stellt keine sehr hohen Anforderungen an die Linearität des Teilnehmergeräte-Sendeverstärkers und damit kein grosser Stromverbrauch. Ein hoher Stromverbrauch wäre ein grosser Nachteil in durch Akkumulator versorgten Teilnehmergeräten, der durch die Wahl von SC-FDMA elegant umgangen wird. Der Stromverbrauch eines Teilnehmergerätes mit SC-FDMA ist etwa drei Mal kleiner verglichen mit OFDM bei gleicher Bitfehlerrate.

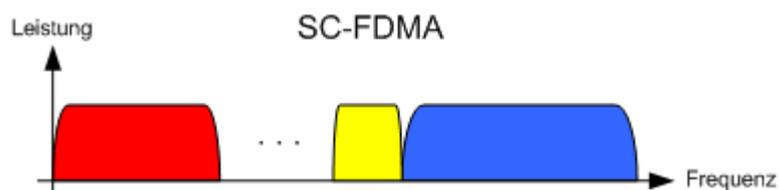


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Sendespektrums im Uplink. Die verschiedenen Farben symbolisieren das belegte Spektrum der einzelnen Teilnehmer.

Bei SC-FDMA wird beim Empfänger in der Basisstation ein relativ komplexer Entzerrer (Equalizer) benötigt. SC-FDMA ist unempfindlicher gegen Trägerfrequenz-Abweichungen als OFDMA. Damit wurde ein wesentlicher Teil der Komplexität des Uplink zur Basisstation hin verschoben, dies zugunsten günstigerer und energieeffizienterer Teilnehmergeräte. Das Mehrfachzugriffs-Verfahren SC-FDMA im Uplink stellte eine Novität in der Mobilfunkwelt dar.

Jeder Teilnehmer erhält von der Basisstation einen Bereich des Uplink-Frequenzkanals für eine bestimmte Zeit zugeteilt. Diese Zuteilung geschieht wie im Downlink in Zeitintervallen (TTI) von einer Millisekunde (Abbildung 3). Abbildung 4 zeigt ein Beispiel des Empfangssignals der Basisstation von drei Teilnehmern.

Die Daten werden, ähnlich wie bei OFDM, auf Subträger verteilt, wobei eine Fouriertransformation (FT) als Vorverzerrung eingesetzt wird. Deshalb spricht man bei SC-FDMA von Quasi-Sub-Trägern. Die von einem bestimmten Teilnehmer benutzten Quasi-Sub-Träger sind immer unmittelbar aneinandergrenzend angeordnet und bilden dadurch einen einzigen Block. Dadurch werden die einzelnen Teilnehmer auf eine eigene Trägerfrequenz (eben einen „Single Carrier“) innerhalb des Uplink-Kanals moduliert. Die Kombination mehrerer Teilnehmer im Uplink ergibt ein einfaches Frequenzmultiplex-Mehrfach-Zugriffsverfahren (FDMA) wie in Abbildung 4 gezeigt. Die Verteilung der Quasi-Sub-Träger auf die Teilnehmer wird vom Scheduler (siehe 4.1) so gewählt, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt keine nur ein aktives Teilnehmergerät in derselben Zelle den gleichen Block von Sub-Trägern belegt.

4.4 Spektrale Effizienz

Die Entwicklung der durchschnittlichen spektralen Effizienz in einer Funkzelle im Downlink über die verschiedenen Mobilfunktechnologien und Releases zeigt Abbildung 5. Die spektrale Effizienz ist ein Mass für die Übertragungskapazität einer Luftschnittstelle in Bit pro Sekunde pro Hertz Bandbreite pro Zelle (bit/s/Hz/cell) welche auf alle Teilnehmer in einer Funkzelle aufgeteilt wird.

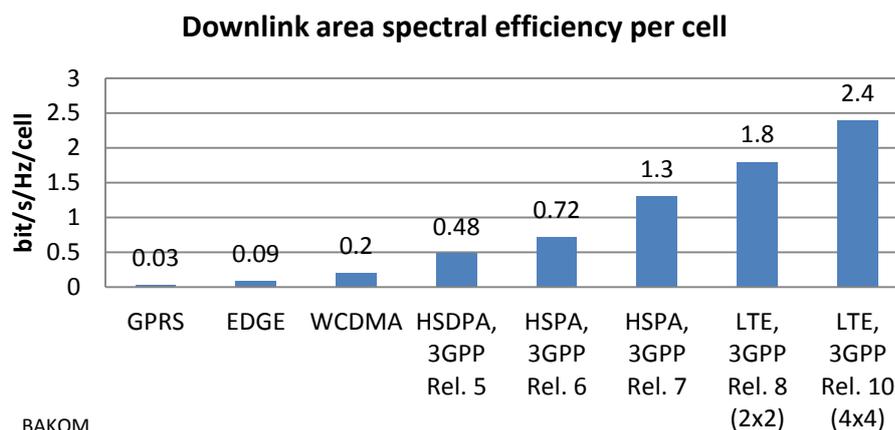


Abbildung 5: Spektrale Effizienz verschiedener Mobilfunktechnologien (3GPP)

Beispiel spektrale Effizienz: Die Bandbreite eines Funkkanals betrage 5 MHz und die mittlere spektrale Effizienz liege bei 1.8 bit/s/Hz/cell und je zwei Send- resp. Empfangsantennen (MIMO 2x2). Die *mittlere* Übertragungskapazität C mit welcher alle Teilnehmer dieser Funkzelle mittels dem 5 MHz breiten Funkkanal versorgt werden, beträgt im Downlink demnach 9 Megabit pro Sekunde:

$$C = 5 \text{ MHz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 9 \cdot 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{s}} = 9 \text{ Mbps}$$

Mit einem 10 MHz breiten Funkkanal, alles andere gleichbleibend, stünde die doppelte *mittlere* Übertragungskapazität zur Verfügung, also 18 Mbps. Davon zu unterscheiden ist die mittlere durchschnittliche Übertragungskapazität pro Teilnehmer, welche von der Empfangsgüte des Teilnehmers und/oder der durch die anderen Teilnehmer verursachten Verkehrsauslastung abhängig ist.

Die *maximale* spektrale Effizienz oder *maximale* Übertragungskapazität dient allenfalls Marketingzwecken und der Demonstration der Leistungsfähigkeit eines Systems doch ist sie letztlich in der Praxis weniger relevant.

4.5 Carrier aggregation

Ab LTE-Release 10 können im Up- bzw. Downlink bis zu je 5 benachbarte Kanäle innerhalb eines Frequenzbandes (Intra-band contiguous) aggregiert werden (Abbildung 6). Die Anzahl aggregierter Carrier kann im Up- bzw. Downlink verschieden gross sein. Die aggregierten Kanäle werden vom System den höheren Netzwerkschichten logisch als ein einziger Kanal, mit entsprechend höherer Kapazität, zur Verfügung gestellt.

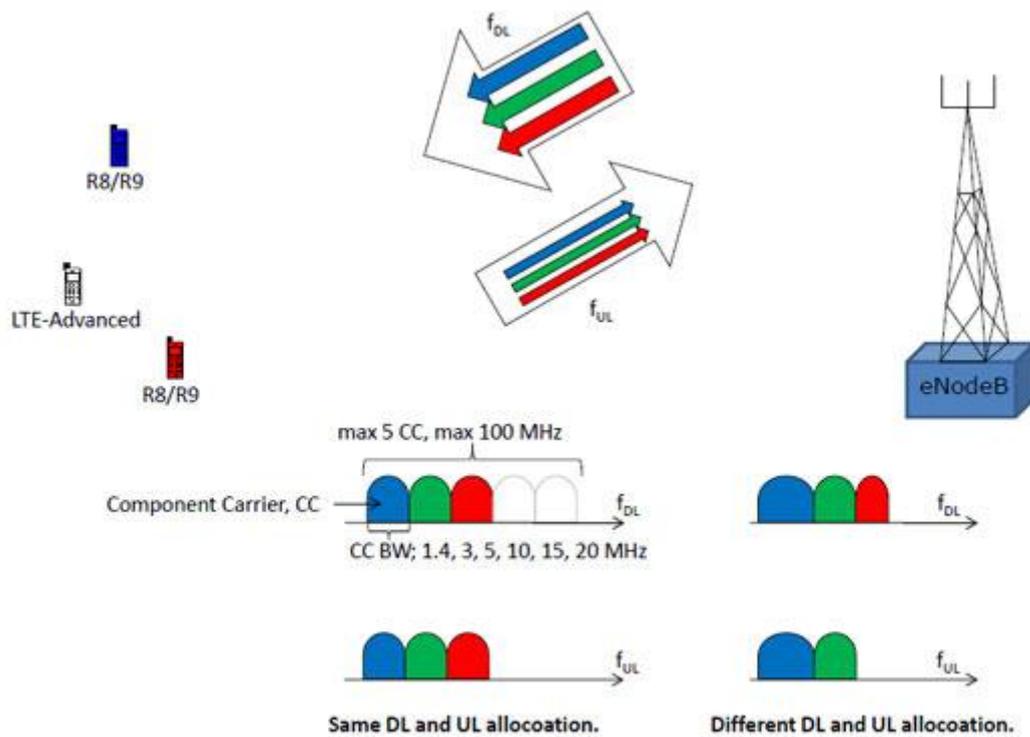


Abbildung 6: Carrier aggregation ab LTE Release 10

Ab LTE-Release 11 können im Down- und Uplink ebenfalls eine unterschiedliche Anzahl von bis zu 5 Kanälen, jedoch aus denselben oder verschiedenen Frequenzbändern (Inter-band non-contiguous) aggregiert werden, siehe Abbildung 7. [7]

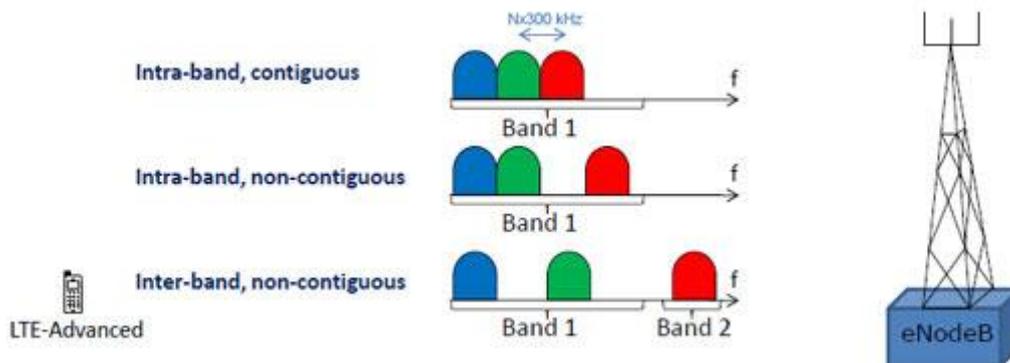


Abbildung 7 Carrier Aggregation ab LTE Release 11

4.6 MIMO

MIMO-Antennensysteme spielen bei LTE eine wichtige Rolle. Durch den Einsatz von intelligenten Antennen kann die Spektrumseffizienz gesteigert werden. Bei LTE sind MIMO-Antennensysteme bei der Basisstation und beim Teilnehmergerät ein integrierter Bestandteil des Standards. Dies ist bei UMTS nicht zutreffend.

MIMO erlaubt die parallele Übertragung von Daten mit mehreren Antennen beim Sender und beim Empfänger auf derselben Frequenz und zur selben Zeit durch den Einsatz mehrerer Antennen in Sende- und Empfangsrichtung. Verschiedene Anwendungen von MIMO sind für LTE vorgesehen. Diese können allgemein in die Gruppen Raum-Multiplex (Space Multiplex), Raum-Diversität (Space

Diversity), Beamforming oder in eine geeignete Mischform davon eingeteilt werden. Welche Form von MIMO wo und wann eingesetzt wird hängt von den QoS-Anforderungen des Dienstes (Kapitel 6), der Datenrate, dem Zustand des Mobilfunkkanals und den Möglichkeiten des Teilnehmergerätes resp. der Geräteklasse abhängig. Das schematische Prinzip zeigt Abbildung 8.

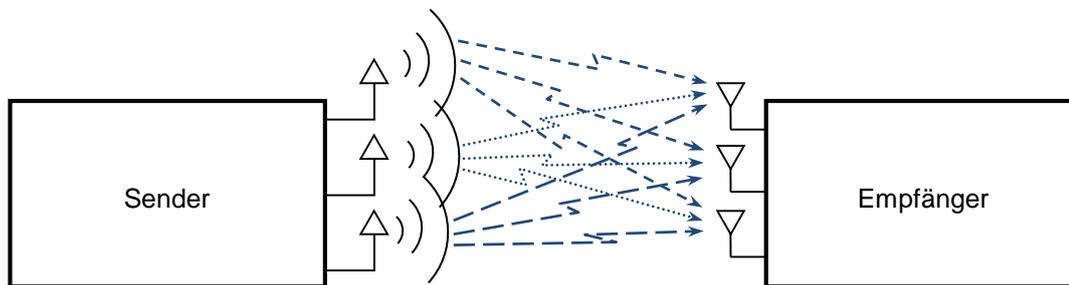


Abbildung 8: Prinzip der Mehrantennenübertragung mit MIMO (3x3)

Raum-*Diversität* (Space Diversity) ermöglicht eine signifikante Verbesserung der Qualität des Funkkanals bei starkem und schnellem Fading. Die Feedback-Information vom Teilnehmergerät zur Basisstation ermöglicht dieser eine optimale Zuteilung der Zeit/Frequenz-Ressourcen (PRB) zu einem bestimmten Link. Die Kanalressourcen (PRB) können, je nach Scheduler-Algorithmus, denjenigen Teilnehmern zugeteilt werden, welche die besten momentanen Bedingungen des Übertragungskanals besitzen (Multi User Space Diversity). Dadurch wird der mittlere Datendurchsatz auch pro Teilnehmer maximiert, indem weniger wertvolle Übertragungszeit von Daten durch augenblicklich schlechte Übertragungskanäle aufgewendet wird. Wenige Millisekunden später ist die Verbindung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit besser. Die Methode nutzt demnach die in der Regel meist rasch schwankende Übertragungsqualität geschickt aus, ohne dass der Endnutzer davon etwas merkt.

Raum-*Multiplex* (Space Multiplex) auf der anderen Seite ermöglicht eine sehr hohe Datenrate, vorausgesetzt, der Funkkanal hat eine gute Qualität - d.h. eine hohe mittlere Empfangsleistung, ein hohes Signal-zu-Interferenzverhältnis (SIR) und eine geringe Korrelation zwischen den einzelnen Antennen. Raum-Multiplex kann in Single-User Raum-Multiplex und in Multi-User Raum-Multiplex unterteilt werden. Der Systemdurchsatz ist in beiden Fällen der gleiche. Bei *Single-User* Raum-Multiplex werden die parallelen Datenströme der verschiedenen Sendeantennen von der Basisstation zu einem einzelnen Teilnehmer übertragen. Die Anzahl der Datenströme ist abhängig von der MIMO-Antennenkonfiguration. Bei einem 4x4 MIMO (je 4 Sende- und Empfangsantennen) kann damit beispielsweise theoretisch die 4-fache Datenrate, verglichen mit einem konventionellen Antennensystem (1x1), erreicht werden. Bei *Multi-User* Raum-Multiplex werden die Datenströme von der Basisstation auf verschiedene Teilnehmer aufgeteilt (SDMA). Bei einem 4x4 MIMO beispielsweise können im Downlink insgesamt vier Teilnehmer mit der gleichen Ressource (PRB) bedient werden. Die Datenrate des einzelnen Teilnehmers beträgt somit bei diesem Beispiel nur ein Viertel der Datenrate von Single-User Raum-Multiplex, die Systemdatenrate ist jedoch dieselbe, weil 4 Teilnehmer die Ressourcen benützen.

Der Trade-off zwischen Raum-*Multiplex* und Raum-*Diversität* wurde im Hinblick auf den Systemdurchsatz (totale Datenrate in der Zelle) und die Teilnehmer-Datenraten untersucht. Grosse Datenraten für einen einzelnen Teilnehmer können bei hohem Signal-zu-Interferenzverhältnis (SIR) mit Single User Raum-Multiplex erreicht werden. Simulationen ergaben, dass in einem interferenzlimitierten System die Gebiete mit hohem SIR relativ klein sind und der Gewinn beim Systemdurchsatz bei Raum-Multiplex vergleichsweise bescheidener ausfällt. Raum-Multiplex für Single-User kann jedoch für isolierte Zellen oder für Teilnehmer in der Nähe der Basisstation für die Übertragung mit sehr grossen Datenraten eingesetzt werden. Raum-*Diversität* ist jedoch für Mobilfunksysteme, die in der Regel interferenzlimitiert sind und kleine SIR aufweisen, vorteilhafter sein als Raum-*Multiplex* und erlaubt insgesamt einen grösseren Systemdurchsatz.

Mit Beamforming können mehrere Teilnehmer gleichzeitig mit der gleichen Ressource angesprochen werden (SDMA) oder es können starke Interferenzsignale ausgeblendet werden.

Mischformen der verschiedenen MIMO-Anwendungen werden wohl für LTE in der Praxis grosse Bedeutung erlangen. So können beispielsweise mit Beamforming einzelne Sektoren gebildet werden und

innerhalb des Sektors werden dann Raum-Multiplex oder Raum-Diversität eingesetzt – je nach Qualität des Funkkanals und der Distanz des Teilnehmers von der Basisstation.

5 Mobilfunknetze

LTE wurde anfänglich zur Bewältigung des stark wachsenden Datenverkehrs eingesetzt. Mittlerweile steht die Einführung des Sprachdienstes (VoIP) kurz bevor oder er ist in einigen Mobilfunknetzen bereits abgeschlossen (siehe Kapitel 6).

Die Durchdringung des Marktes mit LTE-fähigen Teilnehmergeräten und die Netzabdeckungen sind in der Schweiz, wie in anderen Ländern, wegen der bei ca. 80% liegenden Smartphone Verbreitung bereits weit fortgeschritten. Die Verkehrslast verschiebt sich dadurch zunehmend von den 2G und 3G-Netzen auf die LTE-Netze.

Insbesondere die Bedeutung von GSM (2G) nimmt zunehmend ab und das Spektrum wird dadurch mit spektral effizienterer Technologie (Bits pro Sekunde und Hertz Bandbreite) genutzt (siehe Abbildung 9 und 4.1).

Mobile subscriptions by technology (billion)

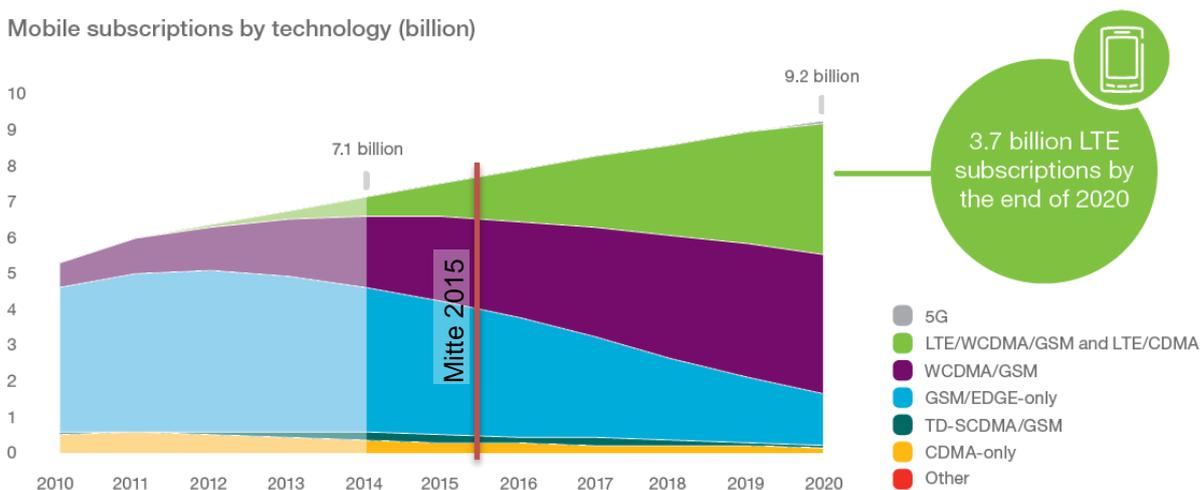


Abbildung 9: Entwicklung der Teilnehmeranschlüsse nach Technologie (1 Billion = 1 Milliarde, Quelle: Ericsson Mobility Report, June 2015)

Der Wechsel von GSM/EDGE, welches gemäss Abbildung 5 eine mittlere spektrale Effizienz von 0.09 bit/s/Hz/cell aufweist, auf HSPA Rel. 7 mit 1.3 bit/s/Hz/cell oder auf LTE Rel. 8 mit 1.8 bit/s/Hz/cell, bedeutet ein durchschnittlicher Kapazitätssprung um den Faktor von mindestens 10 resp. ca. 20 mit derselben eingesetzten Bandbreite. Meistens wurde und wird GSM/EDGE im 900 MHz Band durch UMTS/HSPA+ und im 1800 MHz Band durch LTE und LTE-A ersetzt.

Die Bedeutung des in Mobilfunknetzen eingesetzten „Layering“, also verschiedener Zellenradien, wird durch LTE weiter verfeinert. Nach Makrozellen, welche in ruraler Umgebung bis zu wenigen 10 Kilometern im Radius messen konnten, steigt mit dem wachsenden Verkehrsvolumen die Bedeutung kleinerer Versorgungszellen wie Mikro- und Pico-Zellen. In urbanen und sub-urbanen Umgebungen misst der Zellenradius, je nach Mobilfunkverkehrsdichte, teilweise viel weniger als 2 km.

Pico-Zellen haben eine dem schnurlosen Telefon (DECT) ähnliche Reichweite von ca. 60 Meter in Gebäuden und ca. 250 Meter im Freien. Der primäre Zweck von Mikro-, Pico und Femto-Zellen ist das Offloading des Makrozellen-Layers. Die möglichst rasche Zu- und Abführung des Mobilfunkverkehrs über DSL, koaxiale und optische Netze (FTTx) und Richtfunk ins Kernnetz entlastet das Makrozellen-netz von Verkehrsaufkommen.

Ein wesentlicher Anteil am Gesamtverkehrsvolumen in Mobilfunknetzen entsteht in Gebäuden (z.B. Wohnung, Büro), also in unmittelbarer Nähe von Festnetzanschlüssen. So genannte Indoor-Versorgungsanlagen und Versorgungsanlagen in Tunnels, Einkaufs- und Parkhäusern, usw. sind bereits heute verbreitet, jedoch unterstützen die allermeisten Kleinzellen LTE noch nicht. Dies ist jedoch nur eine Frage der Zeit, denn es soll zu einem Paradigmenwechsel kommen: Die Indoor-Out-Versorgung (von innen nach aussen) soll durch solche Femtozellen erfolgen und den Mobilfunkverkehr, insbesondere von

den zukünftigen riesigen zu übertragenden Datenvolumina, möglichst nahe am Entstehungsort ins Kern-/Festnetz geleitet werden. Die Versorgung von Teilnehmern in der Nähe von Gebäuden ist dabei nicht vorrangig. Die bisherige Versorgungsstrategie eine Outdoor-In-Versorgung, d.h. die Versorgung im Gebäudeinneren wird von einer Basisstation draussen erbracht, soll ergänzt werden. Das Ziel ist die Versorgung von Outdoor-User durch Outdoor-Zellen und Indoor-User durch Indoor-Kleinzellen. Ein solches Mobilfunknetz ist ein heterogenes Netz. [11]

Die Signalisierung stellt bei Netzen mit einer grossen Anzahl Basisstationen, wie sie in heterogenen Netzen letztlich vorkommen, eine grosse Herausforderung dar. Der LTE Standard beinhaltet deshalb bereits Anpassungen, welche insbesondere die Signalisierung betreffen.

Der LTE-Standard beinhaltet Funktionen zur Selbstorganisation des Netzwerks (SON) sowie der Interferenzvermeidung durch Radio Resource Management (RRM) und Inter-Cell Interference Coordination (ICIC). Diese Funktionen vermindern Interferenzen zwischen Zellen und vereinfachen die Netzplanung. Dadurch soll der Datendurchsatz weiter maximiert werden und gleichzeitig Kosten eingespart werden. [10]

6 Dienste

Die Liste der Dienste ist kurz, denn alle Dienste werden mit Hilfe des Internet Protokolls (IP) erbracht. Anschlussnetz (LTE) und Kernnetz (EPC, EPS, SAE) kennen keine Leitungsvermittlung mehr und vom Netzbetreiber angebotene Sprachdienste werden über "Managed VoIP"⁹ wie z.B. VoLTE erbracht.

Ein Sprachkommunikationsdienst ist im 3GPP LTE Standard (heute) noch nicht enthalten. Deshalb existieren verschiedene proprietäre Lösungen von Netzausrüstern.

Eine zunehmend verbreitete Lösung ist der Industriestandard „Voice over LTE“ (VoLTE), der von der GSM Association (GSMA) ausgearbeitet wurde. Die GSMA ist eine Vereinigung von Mobilnetzbetreibern und Netzausrüstern. Die GSMA standardisiert den Sprachdienst und SMS, basierend auf dem IP Multimedia System (IMS). IMS ist die „Service Cloud“ des Betreibers, welche ihrerseits eine Komponente der Dienste-Architektur (SAE) ist. [8]

In der Schweiz unterstützte der erste Betreiber VoLTE ab Mitte 2015. Im Mai 2015 unterstützen die Topmodelle der Smartphones VoLTE.

Das 3GPP System unterscheidet zwischen standardisierten Verkehrsklassen (traffic class) und der Dienstqualität (QoS). Diese sind u.a. charakterisiert durch:

- Übertragungsverzögerung (Delay)
- Bit-/Paketfehlerrate (BER/PER)
- Priorität
- Garantierte Mindestdatenrate (GBR)
- Paketauslieferungsreihenfolge

Beispielsweise erfordern die Datenpakete eines VoIP-Dienstes vor allem eine kurze Verzögerungszeit bei der Übertragung und eine garantierte Mindestbitrate, um die Qualität des Sprachdienstes sicher zu stellen. Die Paketfehlerrate ist dabei, anders als beim Herunterladen einer Datei, weniger wichtig. Tabelle 2 zeigt Beispiele von Anforderungen verschiedener Anwendungen an die QoS-Attribute. [9]

Anwendung	Priorität	Maximale Verzögerung	Paketfehlerrate (PER)	Minimale garantierte Bitrate (GBR)
VoIP	2	100 ms	0.1 %	Ja, z.B. 172 kbps
Web-Browsing	8	300 ms	0.0001 %	Nein

Tabelle 2: Beispiele von QoS- Attributen für verschiedene Dienste

⁹ Managed VoIP bedeutet, dass der Betreiber die Sprachqualität durch Vorkehrungen sicherstellt

7 Referenzen

- [1] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9, 10, 11, 12
- [2] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *Base Station (BS) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9, 10, 11, 12
- [3] Seidel E. (2008): 3GPP Long Term Evolution, *LTE, The Future UMTS Standard*. CEI-Europe
- [4] Seisa S. / Toufik I. / Baker M. (2009): *LTE, The UMTS Long Term Evolution*. Wiley
- [5] Holma H. / Toskala A. (2011): *LTE for UMTS, Evolution to LTE-Advanced*. Wiley
- [6] Holma H. / Toskala A. (2012): *LTE-Advanced, Solution for IMT-Advanced*. Wiley
- [7] Wannstrom J. (2013): *Carrier Aggregation explained*. 3GPP
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>
- [8] GSM Association (2013): *IR.92 - IMS Profile for Voice and SMS Version 7.0*. GSMA
<http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2013/04/IR.92-v7.0.pdf>
- [9] 3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects; *Quality of Service (QoS) concept and architecture*. 3GPP TS 23.107
- [10] Volker P. / Seidel E. (2011): *Inter-Cell Interference Coordination for LTE-A*. Nomor Research GmbH
<http://www.nomor.de/uploads/1d/19/1d196a493af5511cc92466089924cc5c/2011-09-WhitePaper-LTE-A-HetNet-ICIC.pdf>
- [11] Qualcomm (2015): *The 1000x data challenge*. <https://www.qualcomm.com/invention/1000x>