

3GPP Long Term Evolution (LTE)

Krisna Haryantho

Seminar Innovative Internet-Technologien und Mobilkommunikation, WS 2008/2009

Institut für Informatik, Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste
Technische Universität München

haryantk@in.tum.de

Kurzfassung

Bei dieser Arbeit werden die Basisanforderungen der 3GPP UTRAN Long Term Evolution (LTE) Spezifikation für Mobilfunk-Telekommunikation diskutiert. Die grundlegende Einführung in die wichtigen Technologien, wie OFDMA und MIMO, die LTE unterstützen, werden ebenfalls behandelt. Das Kernnetzwerk (SAE), die Protokolle, sowie die ganzen Prozesse auf der physikalischen Sicht werden hier nicht diskutiert.

Schlüsselwörter

3GPP, Mobilfunk, OFDMA, MIMO, SC-FDMA, E-UTRAN, UMTS.

1. EINLEITUNG

Um eine erfolgreiche Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Instanzen, benötigt man einen Standard, der von allen Kommunikationsteilnehmern akzeptiert und verstanden wurde. Für die Mensch-Mensch Kommunikation gilt beispielsweise das Sprechen schon längst als allgemein gültiger Standard. Der Standard beschreibt genau, wie eine erfolgreiche Kommunikation errichtet werden kann. Für das Sprechen gelten der Mund und die Ohren als Sende- bzw. Empfangsapparat, die Luft als Transportmittel, die Sprache als Informationscodierung, usw.

In der Mobilfunktelefonie gibt es den 2G *Global System for Mobile Communications* (GSM) Standard, der eine globale Kommunikation zwischen Mobilfunkgeräten ermöglicht, solange ein GSM Netz verfügbar ist. GSM wurde später erweitert durch *Global Packet Radio Access* (GPRS), der eine höhere Datenrate hat, und einen erweiterten Service bietet, wie MMS oder WAP.

Der frühere 2G Standard wurde für Sprachverkehr gedacht. Die spätere Entwicklung unterstützt auch Datenverkehr mit relativ geringer Datenrate (noch geeignet für SMS, WAP). Die heutigen Anwendungen wie z.B. Videotelefonie und Internet setzen eine größere Datenrate voraus. Der 2G Standard ist deswegen nicht mehr geeignet für diese Zwecke.

Dies im Hintergrund definiert das 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) eine Reihe von Radio Technologien, die Flexibilität für alle Servicearten (z.B. Sprach- und Datenverkehr) bietet. Diese sind bekannt unter dem Namen UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Services*). UMTS basiert auf WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) und wurde später in HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) weiter entwickelt, der stellt eine größere Downlinkdatenrate zur Verfügung. Die Uplinkdatenrate wurde durch die Einführung von HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) gesteigert. HSDPA und HSUPA bilden zusammen HSPA (*High Speed Packet Access*)

LTE ist auch ein Radiostandard neben den oben genannten Technologien. Sie enthalten eine Reihe von Spezifikationen für ein

neues paket-orientiertes Radionetzwerk und wurde unabhängig von HSPA entwickelt. Die ersten Spezifikationen für LTE wurden Ende 2007 veröffentlicht.

Von der höchsten Ebene betrachtet lässt sich das 3G Mobilfunk-Netzwerk in drei Elemente zerlegen. Diese sind *User Equipment* (UE), *Radio Access Network* (RAN) und *Core Network* (CN). Die UEs sind z.B. Mobiltelefone, Laptop (mit dem entsprechenden Benutzer-Identifikationsmodul), usw. und diese bauen eine Kommunikation über die Luftschnittstelle mit Elementen im RAN. Im UMTS Fall besteht das RAN aus NodeBs und Radio Network Controllers (RNC).

Während der RNC für die meisten Radio-Funktionalitäten (wie z.B. Ressourcenallokation, Scheduling) verantwortlich ist, übernimmt das NodeB die Aufgabe einer Basisstation, die hauptsächlich die physikalische Verbindung mit den UE gewährleistet. Ein NodeB ist genau mit einem RNC verbunden. Es kann aber zur Optimierung der Systemperformanz auch mit einem oder mit mehreren NodeBs verbunden werden. Die NodeBs stehen in einer n:1 Beziehung zu den RNCs. Es kann aber auch mehrere RNCs in einem System geben.

Die RNCs kommunizieren miteinander über die Iu-Schnittstelle. Alle RNCs werden dann direkt an das Kernnetzwerk (CN) angeschlossen. Das CN stellt Dienste wie IP-Paketdienste, Abrechnungsdienste, Mobilitätsmanagement, Session-Management.

Im LTE Fall besteht das RAN (das RAN bei LTE heißt *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*/E-UTRAN) nur noch aus einem logischen Element, nämlich das eNodeB. Grob gesagt übernimmt das eNodeB gleich die Funktionalitäten des NodeBs und des RNCs. Die eNodeBs sind mit SAE (*System Architecture Evolution*) verbunden, dem Kern-Netzwerk von LTE.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Luftschnittstelle zwischen dem eNodeB und UE. Im zweiten Abschnitt werden einige wichtige Anforderungen, die in der LTE Spezifikation verlangt werden, diskutiert. Im dritten Abschnitt werden die Mehrfachzugriffsverfahren für LTE besprochen, sowohl für Downlink- als auch für Uplink-Übertragungen. Im vierten Abschnitt wird Mehr-Antennen-Verfahren vorgestellt, das die Performanz von LTE nochmal verbessert.

2. HINTERGRUND & ANFORDERUNGEN

„3GPP ist eine weltweite Kooperation von Standardisierungs-gremien für die Standardisierung im Mobilfunk“ [10]. Seit der Entstehung im Jahr 1998, hat 3GPP zahlreiche Spezifikationen für ein global einheitliches (im Sinne von Technologie und Standard) Mobilfunksystem gemacht. Die von 3GPP veröffentlichten Standards sind chronologisch: Release 99 (das erste UMTS Netzwerk mit WCDMA), Release 5 (HSDPA), Release 6 (HSUPA), Release 7 (HSPA+). Der Name LTE wurde dem 3GPP Release 8 vergeben.

Das Ziel von LTE ist die Verbesserung der Spektraleffizienz, der Dienste, und der Interoperabilität mit anderen bestehenden Standards (GSM, UMTS, usw.), sowie eine Senkung der Betriebskosten (operative Kosten) [9]. Dafür hat 3GPP eine Liste von Anforderungen zusammengestellt, die in [1] zu erfahren sind. Die wichtigsten Anforderungen sind unter anderen:

- Spitzendatenrate von 50/100 Mbps für jeweils Uplink/ Downlink. Uplink bezeichnet man die Datenübertragung vom UE zur Basisstation, Downlink die von der Basisstation zum UE. Mit Spitzendatenrate meint man die maximal erreichbare Nutzdatenrate.
- Server-UE *Round Trip Time* (RTT) von geringer als 30ms und Zugriffsverzögerung von geringer als 300ms.
- Verbesserte Energieeffizienz.
- Flexibilität für Bandbreitenallokation mit 1,4, 5, 10, 20 MHz Spektrum.
- Bessere Spektraleffizienz, d.h. mehr Bits pro Sekunde pro Hz Frequenzband.
- Möglichkeit für Zusammenbetrieb mit älteren Systemen (z.B. UMTS, GSM) sowie mit anderen nicht von 3GPP spezifizierten Systemen
- Höhere Mobilität und Sicherheit
- Höhere Kapazität im Vergleich zu HSDPA/HSUPA
- Unterstützung für ein gepaartes und nicht-gepaartes Spektrum

Die Spitzendatenrate hängt linear von der Spektrumallokation ab. Je breiter das allokierte Spektrum, desto größer ist die resultierende Datenrate. Die Spitzendatenrate kann auch von der Anzahl der Sende- und Empfangsantenne abhängen. Die Spezifikation geht von der Benutzung von zwei Empfangsantennen und einer Sendeantenne jeweils für Downlink und Uplink aus. Dies wird im Abschnitt 4 genauer behandelt.

Mit dieser Konfiguration soll ein LTE System mit 20 MHz Downlink-Spektrum-Allokation eine Downlink-Spitzendatenrate von 100Mbps; das sind 5 bps/Hz. Zum Vergleich, WCDMA Systeme verwenden ein 5 MHz Spektrum und haben eine Downlink - Spitzendatenrate von 384 Kpbs, das ist 0,00768 bps/Hz. HSDPA Systeme mit 5 MHz Spektrum können eine Downlink-Spitzendatenrate von 14,4 Mbps erreichen, das ist 2,88 bps/Hz.

Im Uplink soll das LTE System unter 20 MHz Uplink-Spektrum-Allokation eine Uplink-Spitzendatenrate von 50 Mbps erreichen; das ist 2,5 bps/Hz. WCDMA bzw. HSUPA Systeme haben eine Spitzendatenrate von 384 Kbps bzw. 5,7 Mbps. Beide verwenden ein 5 MHz Spektrum und schaffen somit eine Spektraleffizienz von 0,0768 bps/Hz bzw. 1,14 bps/Hz.

Da die Datenrate linear von der Spektrumbreite abhängt, egal welche Spektrumallokation (z.B. 5, 10 oder 20 MHz) man nimmt, ist das LTE System immer spektraleffizienter als WCDMA und HSPA.

Die Effizienz der Energieverbrauch (Strom) ist ein sehr wichtiger Punkt, besonders beim UE. Eine verbesserte Energieeffizienz kann erreicht werden, in dem man die Ressourcen (hier das Spektrum) effektiv ausnutzt. Z.B. wenn die Sendenantenne aktiv ist, dann sendet sie immer mit dem besten Modulationsverfahren für die entsprechende Kanalbedingung. Mehr dazu wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Für die Mobilfunkanbieter bietet LTE eine flexiblere Spektrum-Allokation in dem Sinne, dass ein Anbieter frei wählen kann, wie breit die Bandbreite für sein LTE System sein wird. Die möglichen Allokationen sind 1,4, 3, 10, 15, 20 MHz. Der Anbieter hat auch die Möglichkeit, die Allokation später zu vergrößern. Da der komplette Umstieg auf LTE kostenintensiv ist und es noch

einige Zeiten dauert, bis das ganze Land mit LTE Service bedeckt wird, kann beispielsweise ein Mobilfunkanbieter, der ein 20 MHz Band hat, in der Einführungsphase erst ein 5 MHz Band für LTE zuteilen. Die drei restlichen 5 MHz Bänder kann er für HSPA oder HSPA+ verwenden. In der späteren Phasen kann er stufenmäßig seine Bandbreitenallokation für LTE vergrößern. So dient HSPA+ als Übergang von UMTS zu LTE. Dies ist aus wirtschaftlichen Gründen günstiger als wenn er gleich in der Einführungsphase das komplette 20 MHz Band für LTE allokiert bzw. ganz auf HSPA+ verzichten würde.

3. MEHRFACHZUGRIFFSVERFAHREN

3GPP hat für LTE OFDMA im Downlink und SC-FDMA im Uplink als Mehrfachzugriffsverfahren gewählt. OFDMA ist eigentlich schon ein bekanntes Verfahren, das z.B. in WLAN und DVB-T angewandt wird. Es war damals technisch schwierig, OFDMA in Mobilfunknetzwerke effektiv einzusetzen und deshalb hat man WCDMA als Mehrfachzugriffsverfahren für UMTS gewählt.

Einige wichtige Gründe für die Wahl von OFDMA in LTE sind [4]:

- *Größere Bandbreite und Bandbreitenflexibilität.* LTE will aber eine hohe Datenrate unter Verwendung von großer Bandbreite von bis zu 20MHz erzielen. Mit steigender Bandbreite bleiben die OFDMA Subträger noch orthogonal zueinander, während WCDMA Systeme ihre Leistung verlieren. In UMTS verwendet man deshalb 5 MHz Bandbreite.
- *Flache Architektur.* Diese ist gekennzeichnet durch die Belegung aller Radio-Funktionalitäten inklusive das Paket- und Frequenzdomäne-Scheduling in der Basisstation (eNodeB). Das Scheduling der Frequenzdomäne, das die Zellkapazität bis zu 50% vergrößern kann, kann nicht in CDMA gemacht werden.
- *Energieeffiziente Uplink-Übertragung mit SC-FDMA.* Siehe Abschnitt 3.2.

3.1 Downlink-Übertragung

Im folgenden werden die OFDMA Grundprinzipien erklärt. Zur Verständnishilfe werden zunächst zwei sehr bekannte und einfachere Mehrfachzugriffsverfahren vorgestellt, FDMA und TDMA

3.1.1 FDMA

FDMA steht für *Frequency Division Multiple Access*. Wie der Name sagt, werden bei FDMA die verfügbare Frequenzbänder in kleinere Frequenzbänder zerlegt. Diese werden als Träger bezeichnet. Im trivialen Fall sind die Träger gleich groß. Jeder Nutzer bekommt einen von diesen Träger zugeteilt. Somit sendet und empfängt ein Nutzer mittels dem Träger, der ihm vorher zugeteilt worden ist.

Der Vorteil von diesem Verfahren ist, dass die Nutzer gleichzeitig senden oder empfangen können ohne auf die anderen zu warten, da jeder Nutzer seinen eigenen Träger hat.

Dies ist aber auch gleich ein Nachteil, denn es ist nicht sinnvoll für jeden Nutzer immer die gleich große Bandbreite zuzuteilen. Es scheint zwar als eine faire Verteilung, aber nicht alle Nutzer benötigen immer zu einem Zeitpunkt dieselbe Bandbreite. Außerdem sind bei einem einfachen FDMA System die Ressourcenzuteilungen (die Ressourcen sind die viele kleine Frequenzbänder) relativ starr, d.h. wenn die verfügbaren Frequenzbänder schon einmal zugeteilt werden, dann muss jeder Nutzer immer denselben Träger benutzen.

Bei guter Kanalkondition stellt dies kein Problem dar. Sobald aber eine Störung auf diesem Kanal auftaucht, wird eine Datenübertragung über diesen Kanal nicht optimal für den betroffenen Nutzer. Für einen anderen Nutzer könnte derselbe Kanal allerdings optimal sein. Wenn man die Ressourcenzuteilung in FDMA System effizienter und flexibler macht, hat das System noch bessere Leistung.

3.1.2 TDMA

TDMA steht für *Time Division Multiple Access*. Analog zu FDMA wird bei TDMA die Zeit zugeteilt. Ein Nutzer bekommt einen festen Zeitschlitz zugeteilt und darf nur innerhalb dieses Zeitschlitzes senden oder empfangen. In jedem Zeitschlitz darf nur ein Nutzer senden oder empfangen. In TDMA Systemen sendet und empfängt ein Nutzer mit der vollen Systembandbreite.

Der Vorteil ist, dass man keine Frequenzsynchronisation machen muss, was meistens sehr aufwändig ist. Die Zeitsynchronisation dagegen ist mit heutiger Hardware sehr genau und einfach. Der Kritikpunkt bei TDMA ist aber die Verzögerung der Zugriffszeit und die uneffiziente Ressourcenverteilung (die Ressourcen sind die Zeitschlitz).

Wenn alle Nutzer immer aktiv am Senden oder Empfangen sind, so mag es kein Problem sein, denn die gesamte Datenrate bleibt erhalten. Wenn aber ein oder mehrere Nutzer nichts senden oder empfangen, so senkt er die gesamte Datenrate des Systems, denn er gibt seinen Zeitschlitz nicht ab, was für den anderen Nutzer mit höherem Ressourcenbedarf eine große Bedeutung haben könnte.

3.1.3 OFDMA

OFDMA steht für *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*. Die Basisidee ist die beiden vorherigen Verfahren sehr geschickt zu kombinieren. In Abbildung 1 sieht man sowohl Zeitschlitz als auch Frequenzschlitze, dargestellt als Rechtecke.

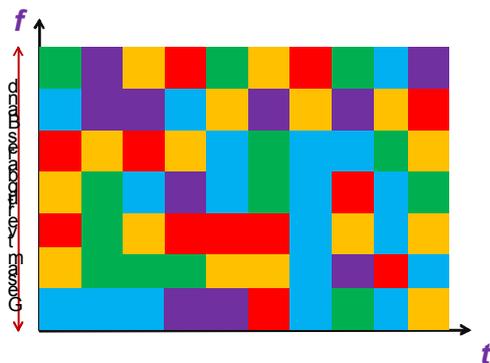


Abbildung 1: Ressourcenzuteilung in OFDMA. Farben repräsentieren verschiedene Nutzer

Die Kästen werden in LTE als *Resource Block* (RB) bezeichnet. Ein RB besteht aus 12 Subträgern und ist eine Millisekunde lang.

Ein Subträger dient zur Übertragung von Symbolen. Symbole sind in der Nachrichtentechnik Modulationszeichen, die Bitfolgen repräsentieren/modellieren. Die Anzahl der Bits, die durch ein Symbol repräsentiert werden können, hängt von dem Modulationsverfahren ab. Es muss nicht für alle Subträger immer dasselbe Modulationsverfahren angewandt werden.

In OFDMA wird das gesamte Frequenzband ähnlich wie FDMA in viele sehr kleine Subträger zerlegt.

Der obere Teil von Abbildung 2 zeigt die Frequenzzerlegung i, reinen FDMA System, das untere zeigt das von OFDMA. Ein wichtiger Punkt in OFDMA ist, dass die Subträger zu einander

orthogonal stehen. D.h. der Abtastpunkt von jedem Subträger ist immer beim Nullgang der anderen Subträger. Somit können Intersymbol-Interferenzen vermieden werden. Das führt anschließend zu einer besseren Symbolrückgewinnung/erkennung auf der Empfängerseite. Außerdem können die Subträger durch diese Eigenschaft näher aneinander positioniert werden. Man beachte den Bandbreitengewinn im Vergleich zum reinen FDMA System. In LTE beträgt die Entfernung zwischen zwei benachbarten Subträgern 15 KHz[3].

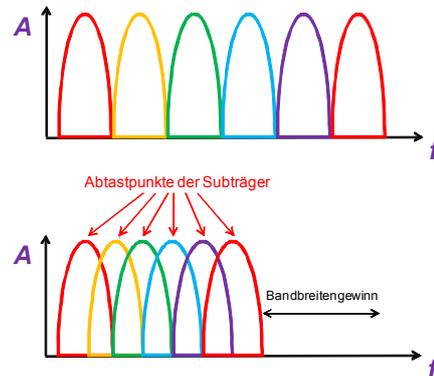


Abbildung 2: Orthogonalität der Subträger

Wie vorhin schon gesagt, besteht ein RB aus 12 Subträger (das entspricht 180KHz Bandbreite) und ist eine Millisekunde lang.

Die Mehrwegeausbreitung zeigt das Phänomen, dass ein Signal sich verbreitet und über mehrere Wege ans Ziel ankommt. Es ist durchaus möglich, dass das gleiche Signal mehrmals am Empfänger ankommt. Das kann Intersymbolstörungen verursachen, wo das Empfangen von dem nächsten Symbol durch das verzögerte Wiederempfangen von dem früheren gestört wird.

Eine Besonderheit bei OFDMA ist die Verwendung von Zyklischem Präfix, um Intersymbolstörungen wegen Mehrwegeausbreitung zu bekämpfen. Ein zyklisches Präfix ist Teil eines Symbols (normalerweise der Fußteil eines Symbols), der kopiert und am Kopf jenes Symbols angehängt wird. Ein zyklische Präfix soll die Rolle eines Schutzintervalls übernehmen. Die Länge des zyklischen Präfixes muss größer als die maximal mögliche Mehrwegeausbreitungsverzögerung sein, damit eine Intersymbolstörungen verhindert werden kann. Auf der Empfängerseite wird das zyklische Präfix ignoriert. Die LTE Spezifikation definiert zwei Varianten des zyklischen Präfixes, das normale und erweiterte zyklische Präfix. Die beiden unterscheiden sich nur in ihrer Länge/ Duration (in Mikrosekunde).

Ein RB hat die Dauer von 14 Symbolen (eine Millisekunde), wenn das normale zyklische Präfix verwendet wird. Kommt das erweiterte zyklische Präfix in Frage, so reduziert sich die Dauer auf 12 Symbole. Die Anzahl der Bits, die ein Symbol repräsentieren, hängt von dem angewandten Modulationsverfahren ab, wie in Tabelle 1 zu sehen ist. Man spricht hier von der Ordnung des Modulationsverfahrens. Je höher die Ordnungszahl ist, desto mehr Bits kann ein Modulationssymbol repräsentieren.

Tabelle 1: Modulationsverfahren

Modulationsverfahren	Bits pro Symbol
PSK	1
QPSK	2
16QAM	4

Jedem Nutzer wird nach seinem Bedarf und nach seinem Kanal-kondition RB zugeteilt. Ein Scheduler im eNodeB ist für diese Aufgabe zuständig. Der Scheduler beurteilt anhand eines Feed-back-Signals die Kanal-kondition für jeden Nutzer, und versucht immer den besten nutzer-spezifischen Kanal für ihn zu benutzen. Dies ist möglicherweise ein Kanal mit keiner oder sehr geringer Störung.

Modulationsverfahren höherer Ordnung wie 64QAM haben zwar eine hohe Datenrate zur Folge, aber je größer die Ordnungszahl ist, desto komplexer und fehleranfälliger werden die Modulations-symbole sein. Ein möglichst störungsfreier Kanal ist deswegen wichtig, weil der Empfänger das übertragene Symbole wieder erkennen muss. Da der Scheduler immer die besten Kanäle sucht, kann im Durchschnitt immer das beste Modulationsverfahren eingesetzt werden. Die Allokation von RB anhand der Kanal-kondition geschieht einmal pro Millisekunde im eNodeB.

An dieser Stelle lässt sich die Spitzendatenrate mittels folgender Formel berechnen:

$$\text{Max (bps)} = \#ST \times \# \frac{\text{Symbole}}{ST \cdot 1\text{ms}} \times \# \frac{\text{Bt}}{\text{Symbol}} \times 1000 \frac{\text{ms}}{\text{s}}$$

Angenommen, dass ein 20 MHz Spektrum allokiert ist, 12 Symbole pro RB (1 ms), und 64QAM immer angewandt werden kann, so erreicht man eine Spitzendatenrate von 86,4 Mbps. Man beachte, dass bei der Berechnung die Anzahl von Subträger in einem 20 MHz Spektrum auf 1200 abgerundet ist. 64QAM liefert 6 Bits/Symbol.

Die LTE Spezifikation beschreibt eine Standardkonfiguration mit dem Einsatz von 2x2 MIMO (Siehe Abschnitt 4). In diesem Fall verdoppelt sich die Spitzendatenrate noch bis zu 170Mbps.

Dieser theoretische Wert kann aus den folgenden Gründen in der Realität nicht erreicht werden [8]:

- Fehlerkorrigierender Code (*Error correcting code*). Er wird verwendet, um die Fehlerrate zu senken. Die Länge von einem solchen Code beträgt oft ca. 30% der gesamten Codelänge
- *Retransmission*. Bei der Datenübertragung über die Luft können unkorrigierbare Bitfehler vorkommen. Die betroffenen Bits müssen in dem Fall erneut übertragen werden. Dies geschieht bis zu ca. 20% der Zeit.
- Sehr viele Kontroll- und Signalbits müssen neben den Nutzdaten mitgesendet werden.
- Die 64QAM Modulation arbeitet nur bei sehr kleiner Entfernung zur Basisstation [8]. Bei großer Entfernung zur Basisstation kann man die Symbole nicht mehr zurück-gewinnen.

3.1.4 Stärken & Schwächen von OFDMA in LTE

Die Vorteile von OFDMA sind:

- *Größere Bandbreite ist möglich*. Siehe Anfang Abschnitt 3.
- *Flexiblere Ressourcenallokation*. Ein klarer Vorteil gegenüber FDMA und TDMA. Wie man in Abbildung 1 sieht, bekommt der Nutzer nun zu jedem Zeitpunkt ein Resource, d.h. minimale bis keine Zugriffsverzögerung. Der Nutzer kann auch jedem Frequenzbereich zugeteilt werden. Sobald ein Kanal gestört ist, wird ein anderer besserer Kanal für ihn verwendet.
- *Sehr spektraleffizient*. Da das eNodeB nach jeder Millisekunde eine neue mit der Zeit immer bessere Ressourcenallokation berechnet, kann im Durchschnitt fast immer das beste Modulationsverfahren verwendet werden.

- *Sehr robust gegen Mehrwegeausbreitung* [6]. Dies ist möglich durch Einsatz vom zyklischen Präfix.
- *Einfachere MIMO Operation*

Die bedeutendsten Nachteile sind:

- *Aufwändige Frequenz-Synchronization*. Da jeder Nutzer zu jedem Zeitpunkt praktisch alle verfügbare RBs zugeteilt werden kann, so muss der Sender sehr genau wissen, wann er für welchen Nutzer in welchem Frequenzbereich senden muss. Dieser Prozess ist sehr aufwändig
- Hohe *Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR)*. Das ist eine der größten Herausforderungen in OFDMA. Die hohe PAPR beim übertragenen Signal benötigt Linearität am Sender. Lineare Verstärker haben geringe Effizienz [3] bezüglich Energieverbrauch. Die Folge dafür wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

3.2 Uplink-Übertragung

Mit OFDMA schafft man eine sehr hohe Datenrate durch die effiziente Nutzung von Ressourcen. Das Problem liegt aber an der hohen PAPR, die OFDMA nicht so energieeffizient macht. Bei den Basisstationen ist das Problem nicht so groß, denn die Basisstationen können immer mit Strom versorgt werden. Aber bei UEs, vor allem bei mobilen Geräten, bei welchen der Energieverbrauch eine wichtige Rolle spielt, ist dies ein großes Problem. Aus diesem Grund ist OFDMA keine optimale Lösung für Uplink-Übertragungen.

Der Trick ist, OFDMA zu modifizieren, so dass die PAPR deutlich sinkt. Die Idee wurde in SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*, realisiert.

SC-FDMA funktioniert prinzipiell gleich wie OFDMA. Die Benennung *Single Carrier* ist aber etwas verwirrend, denn auch in SC-FDMA werden mehrere Subträger (und nicht nur einer!) für einen Nutzer verwendet. Der einzige Unterschied besteht darin, dass in SC-FDMA nur noch benachbarte RBs einem Nutzer zugeteilt werden können. Dies wird in der Abbildung 3 deutlich gemacht.

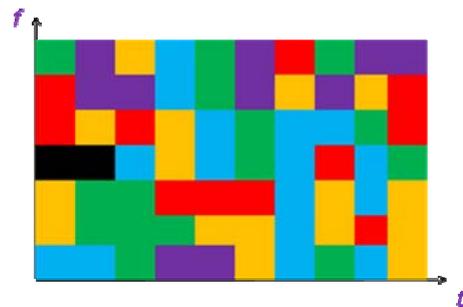


Abbildung 3: Ressourcenzuteilung in SC-FDMA

Zwar übernimmt SC-FDMA die meisten guten Eigenschaften von OFDMA, es verliert aber Flexibilität bezüglich der Ressourcenzuteilung. Auch die Spektraleffizienz ist hier nicht mehr so hoch wie in OFDMA, denn benachbarte RBs müssen nicht unbedingt die optimale für den jeweiligen Nutzer sein.

SC-FDMA hat aber eine niedrigere PAPR[7] und ist somit geeigneter für Uplink-Übertragung. Die Berechnung der Spitzendatenrate ist analog zu OFDMA. Während OFDMA ein bereits weitverbreitetes Mehrfachzugriffsverfahren darstellt, ist SC-FDMA (mit zyklischem Präfix) eine relativ neue Technologie, die noch nicht in irgendeinem vorhandenen System eingesetzt wurde.

4. MIMO

Um Kapazität und Datenrate zu erhöhen, hat man einige Möglichkeiten. Am einfachsten verwendet man eine größere Bandbreite. Die Datenrate ist linear zur Bandbreite. Wird die Gesamtbandbreite verdoppelt, so kann man zwei mal höhere Datenrate erreichen. Das Problem ist aber: die Bandbreite ist beschränkt und vor allem teuer. Im Juli/August 2000 haben beispielsweise sechs Mobilfunkanbieter alle eine UMTS Lizenz in Deutschland zu einem Preis von je über 8 Milliarden Euro ersteigert [11].

Man kann auch die Zellen kleiner machen. In diesem Fall muss jede Zelle geringere Anzahl von Nutzern bedienen. Die Kosten dafür ist, man braucht noch mehr Basisstationen, um die gleiche Fläche zu decken.

Eine andere Möglichkeit wäre, ein Modulationsverfahren der noch höheren Ordnung als 64QAM zu verwenden, um mehr Bits pro Symbol zu übertragen. Dies ist allerdings schwer wegen dem im Abschnitt 3.1.3 bekannten Problem und von daher wird stattdessen oft 16QAM oder sogar QPSK verwendet.

Im vorherigen Abschnitt wurde das Phänomen der Mehrwegeausbreitung genannt. Während man den negativen Effekt der Mehrwegeausbreitung durch den Einsatz von zyklischen Präfixen bekämpfen kann, kann man dieses Phänomen nicht vermeiden. Deshalb versucht in LTE man dieses Phänomen so auszunutzen, dass man auch einen guten Effekt durch die Mehrwegeausbreitung bekommt, in dem man mehrere Antennen sowohl beim Sender als auch beim Empfänger verwendet. Jede Sendeantenne sendet Daten unabhängig von anderen Sendeantennen. Dies ist in der Funktechnik auch bekannt unter dem Begriff MIMO (Multiple Input Multiple Output).

MIMO ist ein Raummultiplexing-Verfahren. Zu den Frequenz- und Zeitdomänen wird eine weitere Domäne hinzugefügt, der Raum (Siehe Abbildung 4). Nun kann man zum selben Zeitpunkt und im selben Frequenzbereich über verschiedene räumliche Wege senden/empfangen.

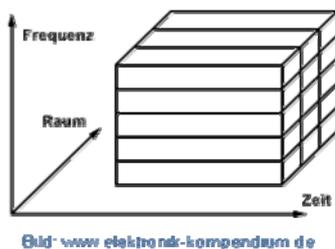


Abbildung 4: Raummultiplexing

Die wichtigsten Vorteile von MIMO System sind [5] :

- **Gruppengewinn.** Der Einsatz von mehreren Empfangsantennen führt trivialerweise zu einer gestiegenen Empfangsleistung. Durch das gezielte Senden werden Signale in Richtung der gewünschten Nutzer abgestrahlt. Die gesamte Sendeleistung wird dann für die vorhandene Sendeantenne verteilt. Der gesamte Energieverbrauch bei mehreren Sendeantennen ist nicht größer als bei nur einer Antenne. Bei UE mit mehreren Sendeantennen kann es deshalb sein, dass sie für eine Datenübertragung nur eine einzige Antenne verwendet, und trotzdem die optimale Datenrate erhält. D.h. geringer Energieverbrauch bei gleicher Datenrate.
- **Interferenzunterdrückungsgewinn.** Durch das gezielte Senden werden die Störungen für andere Nutzer auch geringer. Es gibt hier eine räumliche Trennung zwischen den Nutzern (Siehe Abbildung 5).

- **(Raum-)Multiplexgewinn.** Bei Raummultiplexing werden die Signale auf N Sendeantennen gleichmäßig verteilt. Die Datenrate kann dadurch um das N-fache erhöht werden.



Abbildung 5: Räumliche Trennung

LTE unterstützt im Downlink die 2x2 und 4x4 MIMO (Die Bezeichnung NxN MIMO bedeutet den Einsatz von N Sende- und Empfangsantennen) Konfigurationen [3]. Die 2x2 MIMO ist als Basiskonfiguration in LTE festgelegt. Mit 4x4 MIMO kann theoretisch eine vierfach größere Datenrate erreicht werden. Die Vergrößerung der Datenrate betrifft nicht nur das gesamte System, sondern auch die einzelnen Nutzer.

Im Uplink wird MIMO nicht offiziell unterstützt, denn durch Einsatz von mehreren Sendeantennen steigt auch die Energieverbrauch, was nicht optimal für Mobilgeräte ist. An der Stelle kann Multi User MIMO (MU-MIMO) eingesetzt werden [8]. Hier senden zwei Mobilgeräte Daten gleichzeitig über dasselbe Frequenzband. Der Empfänger (die Basisstation) erkennt die zwei Übertragungsvorgänge zum selben Zeitpunkt. Auf diese Weise erfährt jede Nutzer keine Steigerung der Datenrate, jedoch verdoppelt sich die Datenrate des Systems.

5. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

LTE bietet eine sehr attraktive Leistung hinsichtlich der Datenrate, Kapazität, und Kosten. Der Einsatz von OFDMA im Downlink ermöglicht eine effiziente Nutzung des Spektrums, hohe Datenrate, und geringe Antwortzeit. Im Uplink wird die Energie effizienter durch SC-FDMA genutzt, ohne dabei einen großen Verlust an Datenrate zu verursachen. Mit 4x4 MIMO im Downlink kann theoretisch bis zu vierfache Datenrate erreicht werden.

Die Netzwerk Elemente für LTE sind nicht kompatibel mit UMTS oder HSPA, d.h. ein Betreiber, der LTE einführen will, muss das RAN fast komplett neu aufbauen. Die Möglichkeit für dem synchronen Betrieb mit vorhandenen Netzwerke (wie GSM, UMTS) soll jedoch noch bestehen.

LTE soll langfristig UMTS ablösen und befindet sich am Ende der Standardisierungsphase. Man sagt LTE sei die Brücke zu 4G. LTE soll während der Einführungsphase im Frequenzbereich um 2,6 GHz operieren. Die ersten Produkte sind erst 2010 auf dem Markt zu erwarten.

6. LITERATUR

- [1] 3GPP Technical Report TR 25.913, ver. 8.0.0. 'Requirements for Evolved UTRA and Evolved UTRAN', Januar 2009
- [2] 3GPP Technical Specification TS 36.211, ver 8.4.0. 'Physical Channels and Modulations', September 2008
- [3] 3GPP Technical Specification TS 36.300, ver 8.6.0. 'Overall Description Stage 2', September 2008

- [4] Holma, Harri und Antti Toskala (ed.). *WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2007
- [5] Kaiser, Thomas und Andreas Wilzek. 'MIMO – der Datenturbo für die mobile drahtlose Zukunft'. NTZ Heft 1/2007
- [6] Van Nee, L. und R. Prasad. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House, 2000.
- [7] Dahlman, Erik, et. al. 'Key Features of the LTE Radio Interface'. Ericsson Review No. 2. 2008
- [8] Sauter, Martin. *Beyond 3G*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2009
- [9] Wikipedia. *3GPP Long Term Evolution*. 26. Januar 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution
- [10] Wikipedia. *3rd Generation Partnership Project*. 24. März 2009. http://de.wikipedia.org/wiki/3rd_Generation_Partnership_Project
- [11] Teltarif.de. *UMTS Auktion beendet: sechs Lizenznehmer im Boot*. 24. März 2009. <http://www.teltarif.de/arch/2000/kw33/s2829.html>