

Überblick zu Kapitel 4 von „Mobile Kommunikation“

Dieses Kapitel bietet einen umfassenden Überblick über *Long Term Evolution* (LTE). LTE ist ein aus heutiger Sicht (2011) neuer Mobilfunkstandard, der UMTS ersetzen soll und vermutlich die nächsten Jahre der mobilen Sprach- und Datenübertragung prägen wird.

Im Folgenden wird zunächst eine grobe Übersicht über Motivation, Funktionsweise und Eigenschaften von LTE gegeben. Danach folgt eine tiefer gehende Systembeschreibung der technischen Abläufe bei LTE, insbesondere im Kapitel 4.4 zum Thema „Bitübertragungsschicht“.

Darüber hinaus werden im Detail behandelt:

- Die *Motivation* für LTE und die *Frequenzbandaufteilung*,
- die *Entwicklung* der Mobilfunkstandards hin zu LTE,
- einige *technische Details* zur Sprach- und Datenübertragung,
- das neue Übertragungsverfahren *SC-FDMA* und dessen Unterschied zu *OFDMA*,
- eine detaillierte Beschreibung des *Übertragungsablaufs* mit SC-FDMA,
- die Beschreibung und Funktionsweise der *verschiedenen Kanäle* in der Bitübertragungsschicht,
- einen Ausblick auf das Nachfolgesystem *LTE-Advanced*.

Geeignete Literatur: [DFJ++08] – [Fuj09] – [Ges08] – [GR09] – [Gut10] – [Hin08] – [HR09] – [HT09] – [IXIA09] – [Mey10] – [MG08] – [MLG06] – [Sol09] – [WGM07]

Die Theorie zu LTE wird auf 44 Seiten dargelegt. Außerdem beinhaltet dieses Kapitel noch 29 Grafiken, zwei Aufgaben und eine Zusatzaufgabe mit insgesamt 12 Teilaufgaben (es fehlen noch einige Aufgaben), sowie drei Interaktionsmodule (IM), nämlich:

- **Diskrete Fouriertransformation** (IM zu Kapitel 4.3 – Größe 279 kB)
- **OFDM** (IM zu Kapitel 4.3 – Größe 1.31 MB)
- **Prinzip der QAM** (IM zu Kapitel 4.4 – Größe 154 kB)

Was ist LTE?

Das Kürzel **LTE** steht für „*Long Term Evolution*“ und bezeichnet den UMTS nachfolgenden, neuen Mobilfunkstandard. Durch die konzeptionelle Neuentwicklung soll LTE auf lange Zeit („*Long Term*“) den sich immer weiter erhöhenden Bedarf an Bandbreite und immer höheren Geschwindigkeiten stillen.

Der LTE-Standard wurde erstmals 2008 als UMTS-Release 8 durch das **3GPP** (*Third Generation Partnership Project*) – einem Konglomerat verschiedener internationaler Telekommunikationsverbände – definiert und wird seitdem kontinuierlich durch sogenannte „Releases“ fortentwickelt. Durch das Bekenntnis der größten Mobilfunkanbieter weltweit ist LTE der erste (größtenteils) einheitliche Standard der Mobilfunktechnologie.

Man bezeichnet LTE entsprechend der UMTS-Release 8 auch als „3.9G“, da es die von der ITU (*International Telecommunication Union*) spezifizierten Bedingungen für den Mobilfunk der vierten Generation (4G) zunächst nicht ganz erfüllt. Das momentan neueste Release 10 (vom Juli 2011) genügt dagegen den 4G-Standards. Im **Kapitel 4.5** sind die Features dieser als LTE-A (LTE-Advanced) bezeichneten Technik angegeben.

Nachfolgend sind wichtige Systemeigenschaften von LTE stichpunktartig zusammengestellt. Einige der Aussagen entstammen der Internetseite **ITWissen**:

- LTE basiert auf den Mehrfachzugriffsverfahren OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) im Downlink bzw. SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) im Uplink. Die detaillierte Beschreibung von OFDMA und insbesondere auch dessen Unterschiede zu OFDM findet sich in **Kapitel 4.3**.
- Die Verwendung dieses Modulationsverfahrens ermöglicht Orthogonalität zwischen den einzelnen Nutzern, was in einer geringeren Intersymbolinterferenz und einer erhöhten Netzwerkkapazität resultiert [**HT09**]. Diese Technik ermöglicht in Verbindung mit *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) Spitzendatenraten von 100 Mbit/s im Downlink.
- Neben der gegenüber dem 3G-System UMTS deutlich höheren Datenrate nutzt die LTE-Technik die zur Verfügung stehende Bandbreite effizienter aus. Durch die Kombination des aktuellsten Stands der Technik mit den vorhandenen Erfahrungen von GSM und UMTS ist der neue Standard damit nicht nur sehr viel schneller, sondern auch einfacher und flexibler [**Mey10**].

Entwicklung der UMTS-Mobilfunkstandards hin zu LTE

Die Entwicklung der Mobilfunkstandards der dritten Generation wurde bereits im dritten Kapitel dieses Buches ausführlich thematisiert. Aus diesem Grund wird hier detailliert nur auf die neueren Entwicklungen eingegangen. Zunächst eine kurze unkommentierte Übersicht der UMTS Releases vor LTE aus **[Hin08]**:

- **Release 99** (Dezember 1999):
UMTS 3G FDD und TDD; 3.84 Mchip/s; CDMA–Luftschnittstelle.
- **Release 4** (Juli 2001):
Niedrigere Chiprate (1.28 Mchip/s) bei TDD; einige Korrekturen und kleinere Verbesserungen.
- **Release 5** (März 2002):
IP Multimedia Subsystem (IMS); **High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA)**.
- **Release 6** (März 2005):
High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA); **Multimedia Broadcast&Multicast Services (MBMS)**; Kooperation mit Wireless LAN; Push-to-Talk; Generic Access Network (GAN).
- **Release 7** (Dezember 2007):
Verkleinerung der Latenzzeit; verbessertes Quality of Service (QoS); Echtzeitanwendungen (zum Beispiel VoIP, EDGE Evolution); MIMO bei UMTS; TDD–Option 7.68 Mchip/s.

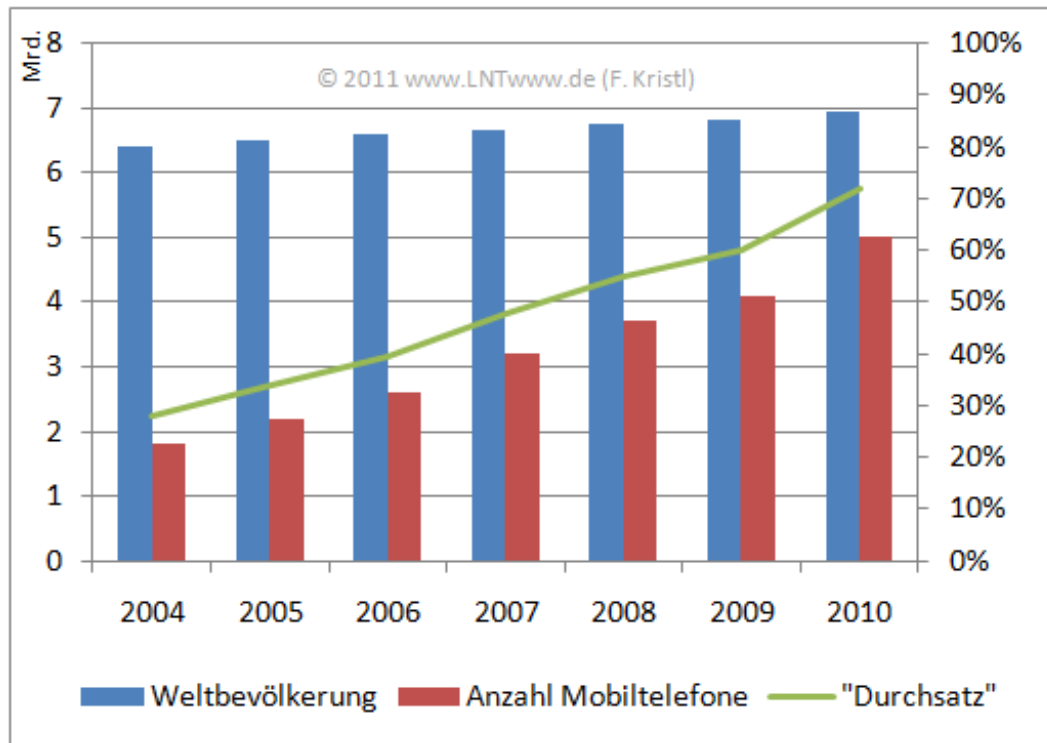
Das **Release 8** vom Dezember 2008 war gleichbedeutend mit der Einführung von LTE und die Basis für die erste Generation von LTE–fähigen Endgeräten. Die wichtigsten Neuerungen und Charakteristiken von Release 8 – zusammengefasst vom **3GPP** – waren:

- Eine hohe spektrale Effizienz und sehr kurze Latenzzeiten,
- die Unterstützung verschiedener Bandbreiten,
- eine einfache Protokoll– und Systemarchitektur,
- Rückwärtskompatibilität und Kompatibilität zu anderen Systemen wie **cdma2000**,
- FDD (*Frequency Division Duplex*) und TDD (*Time Division Duplex*) gleichzeitig nutzbar,
- Unterstützung von *Self-Organizing Networks* (SON).

Auf diese Features (und einige andere mehr) wird in **Kapitel 4.2** noch im Detail eingegangen. **Release 9** enthält demgegenüber nur kleinere Verbesserungen und wird hier nicht näher betrachtet. Das momentan neueste **Release 10** vom Juli 2011 beschreibt die Weiterentwicklung LTE–Advanced (LTE–A).

Entwicklung der Mobilfunkteilnehmer

Während der letzten Jahre hat die Anzahl der Mobilanschlüsse drastisch zugenommen. Die Grafik zeigt für die Jahre 2004 bis 2010 bei den absoluten Zahlen der mobilen Endgeräte (rote Balken, linke Skala) eine Zunahme von 1.8 auf ca. 5 Milliarden. Die blauen Balken (linke Skala) zeigen die Entwicklung der Weltbevölkerung im gleichen Zeitraum. Die (prozentuale) Anzahl der Mobiltelefone (grüne Kurve, rechte Skala) bezogen auf die Weltbevölkerung ist in den Jahren 2004 bis 2010 von knapp 30% auf über 70% gestiegen. Dabei fließen natürlich Nutzer mit mehr als einem Mobiltelefon in die Statistik ein. Es besitzen also momentan keineswegs 70% der Weltbevölkerung ein Mobiltelefon.



Überproportional zugenommen hat – insbesondere seit der Einführung von Flatratetarifen – die Nutzung mobiler Datendienste. Die folgende Aussagen beziehen sich auf das Jahr 2010:

- Der globale mobile Datenverkehr verzeichnete 2010 einen Zuwachs um 159 Prozent und ist damit deutlich stärker angestiegen als erwartet. Mobile Datenübertragung verursacht bereits jetzt mehr Traffic als die Sprachübertragung im Mobilfunknetz.
- Allein der mobile Datenverkehr war damit im Vergleichsjahr 2010 dreimal so groß wie das komplette Verkehrsaufkommen im Jahr 2000 (damals vorwiegend Sprachübertragung).
- Obwohl Smartphones 2010 nur 13 Prozent aller mobilen Endgeräte ausmachten, waren sie für 78 Prozent der Daten- und Sprachübertragung verantwortlich.
- Zu dieser Entwicklung haben auch 94 Millionen Laptopnutzer beigetragen, die das Internet unterwegs über UMTS-Modems nutzten. Ein solcher Laptopnutzer verursachte dabei im Mittel das 22-fache Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Smartphone-Benutzers.

Motivation und Ziele von LTE

Das amerikanische Telekommunikationsunternehmen Cisco-Systems geht in einem **White Paper** davon aus, dass im Jahre 2015

- die Nutzung mobiler Daten sechszwanzigmal höher sein wird als noch 2010,
- diese Nutzung dabei pro Jahr nochmals um 92% zunimmt, und
- die gigantische Menge von 6.3 Exabyte pro Monat ($6,3 \cdot 10^{18}$ Byte) erreicht wird.

Es wird außerdem vorausgesagt, dass 2015 fünf Milliarden Menschen mit dem Internet verbunden sein werden [HT09]. Darüber hinaus werden aber gleichzeitig weitere kabellose Übertragungstechnologien entwickelt, die ebenso hohe Datenübertragungsraten versprechen. Alle diese Faktoren verlangen nach der Weiterentwicklung des 3GPP-Mobilfunkstandards.

Bereits 2004 hat 3GPP mit der Definition der Ziele von LTE begonnen, um mit der rasanten Entwicklung bei leitungsbezogenen Verbindungen mithalten zu können. Die genauen Ziele wurden dann Ende 2004 im LTE Release 6 vergleichend zur HSPA-Technologie (*High Speed Packet Access*) festgeschrieben. Als Hauptziele wurden genannt:

- Eine rein paketorientierte Übertragung und ein hohes Maß an Beweglichkeit und Sicherheit.
- Geringere Komplexität, Kostenreduzierung und optimierte Endgerätebatterielaufzeiten.
- Bandbreitenflexibilität zwischen 1.5 MHz und 20 MHz.
- Eine möglichst hohe spektrale Effizienz (Datenrate pro einem Hertz Bandbreite).
- Maximal mögliche Datenraten von 100 Mbit/s im Downlink bzw. 50 Mbit/s im Uplink.
- Signaldurchlaufzeiten geringer als 10 Millisekunden.

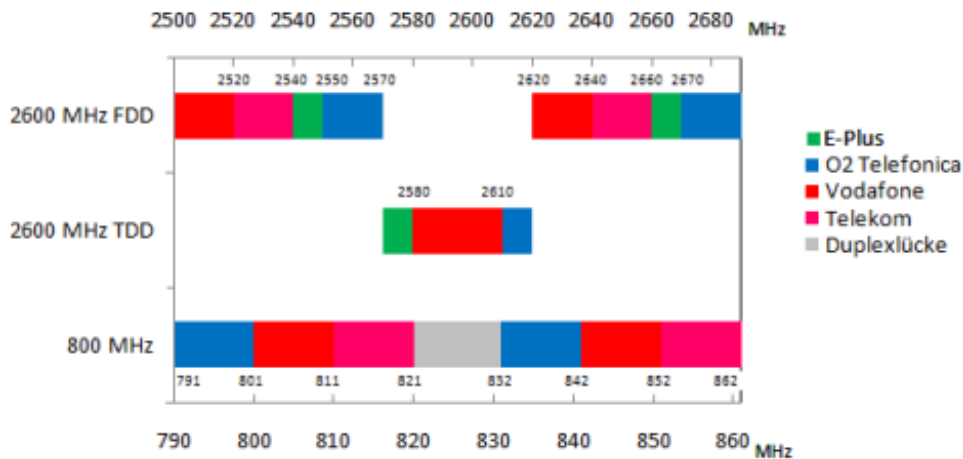
Dies bedeutet eine Erhöhung der spektralen Effizienz um den Faktor zwei bis vier, eine Reduktion der Latenz auf die Hälfte und ein Verzehnfachen der maximalen Datenrate im Vergleich zu HSPA. Auf die einzelnen Punkte, die einen Großteil der LTE-spezifischen technischen Charakteristika darstellen, wird in **Kapitel 4.2** noch genauer eingegangen.

LTE-Frequenzbandaufteilung

Für LTE werden neue Frequenzen benötigt. In Deutschland wurden 2010 hierfür zwei Frequenzbereiche versteigert (siehe Grafik):

- der „Frequenzbereich um 800 MHz“, genauer von 791 MHz bis 862 MHz; hier wurden nur gepaarte Spektren für FDD vergeben; je zweimal 10 MHz für O2, Vodafone und die Telekom;
- der „Bereich um 2.6 GHz“, genauer gesagt von 2500 MHz bis 2690 MHz; hier wurden neben gepaarten Spektren für FDD (insgesamt 140 MHz) auch ungepaarte Spektren für TDD (50 MHz) vergeben. Mehr über den Unterschied zwischen FDD und TDD findet sich in **Kapitel 4.2**.

Außerdem besteht die Möglichkeit, LTE nach und nach in das bestehende GSM-Netz um 900 MHz bzw. 1800 MHz einzuführen. Dies wird insbesondere durch die Spektrumsflexibilität von LTE begünstigt. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht die Ergebnisse der Versteigerung der Frequenzen um 2.6 GHz (oben) bzw. um 800 MHz (unten).



Die beiden versteigerten Frequenzbereiche haben unterschiedliche Systemeigenschaften, die sie jeweils interessant für verschiedene Anwendungsbereiche machen. Der Bereich um 800 MHz wird auch als **Digitale Dividende** bezeichnet, da er durch die Umstellung des TV-Übertragungsstandards von PAL auf DVB-T frei wurde, also durch die Digitalisierung der terrestrischen Fernsehübertragung.

Laut Vereinbarung der Bundesregierung mit den (deutschen) Netzbetreibern muss dieser Bereich dazu genutzt werden, bisher schlecht oder gar nicht mit Breitbandinternet versorgte Regionen zu schnellen Internetanschlüssen zu verhelfen. Dafür wurden vier verschiedene Stufen für den Versorgungsgrad einer Region mit Breitbandinternet definiert. Erst wenn in ganz Deutschland 90% der jeweilig vorangegangenen Stufe abgedeckt sind, darf mit der nächsten Stufe begonnen werden.

Die Wahl für dieses Projekt fiel auf den Frequenzbereich um 800 MHz. Durch die vergleichsweise niedrige Frequenz ergeben sich gute Ausbreitungseigenschaften, was für die kostengünstige Versorgung ländlicher Bereiche sinnvoll und auch notwendig ist. Eine LTE-800 Basisstation erreicht einen maximalen Senderadius von immerhin 10 km. Sie ist damit natürlich für weniger gleichzeitige Nutzer ausgelegt – optimal für dünn besiedelte Regionen.

Die **Duplexlücke**, eine sogenannte „Mittenlücke“, bleibt frei, um Interferenzen zwischen dem Uplink und dem Downlink zu vermeiden. Darüber hinaus kann sie für die Veranstaltungstechnik genutzt werden, da der Frequenzbereich um 800 MHz vor Einführung von LTE von Funkmikrofonen genutzt wurde. In

solchen Gebieten, in denen LTE flächendeckend verfügbar ist, müssen zukünftig Funkmikrofone auf die Duplexlücke ausweichen können.

Die unterschiedliche Bedeutung der beiden Frequenzbereiche für die Netzbetreiber werden auch am Ergebnis der Frequenzversteigerung von 2010 deutlich. Der niedrigere Frequenzbereich erbrachte für 60 MHz knapp 3.6 Milliarden Euro (60 /Hz), die 190 MHz um 2.6 GHz dagegen nur 344 Millionen Euro (1.80 /Hz). Zum Vergleich: Die Versteigerung der UMTS-Frequenzen im Jahr 2000 resultierte in der astronomische Summe von 50 Milliarden Euro für 60 MHz bzw. 833 Euro pro Hertz Bandbreite.

3GPP Third Generation Partnership Project

Auf den letzten Seiten wurde schon mehrfach das **Third Generation Partnership Project** (oder kurz 3GPP) erwähnt. Hier soll ein kurzer Überblick über das Selbstverständnis dieser Gruppe, seine Struktur und seine Aktivitäten gegeben werden. Die Informationen sind direkt der **3GPP-Website** entnommen.

Das 3GPP ist eine Gruppe verschiedener internationaler Normierungsorganisationen, die sich zum Zweck der Einheitlichkeit zusammengeschlossen haben. Es wurde am 4.12.1998 von fünf Partnern gegründet:

- **ARIB** (*Association of Radio Industries and Businesses*, Japan)
- **ETSI** (*European Telecommunication Standards Institute*)
- **ATIS** (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*, USA)
- **TTA** (*Telecommunications Technology Association*, Korea)
- **TTC** (*Telecommunications Technology Committee*, Japan)

Das 3GPP entwickelt, akzeptiert und pflegt einen weltweit anwendbaren Standard im Mobilfunk. Die regelmäßig und häufig abgehaltenen Konferenzen sind die wichtigsten Instanzen bei der Fortschreibung der Standardisierung der technischen Spezifikationen von LTE. Änderungsanträge durchlaufen einen festgesetzten Standardisierungsprozess mit drei Stufen, der eine hohe Qualität und gute Strukturierung der Arbeit des 3GPP ermöglicht. Hat ein Release die letzte Stufe erreicht und ist fertiggestellt, wird er von den Partnern bzw. den in den Partnerorganisationen vereinigten Telekommunikationsunternehmen an den Markt weitergegeben.

In **[Gut10]** findet man folgende Einschätzung: „Ziel der 3GPP-Standardisierung ist die Erstellung von *technischen Spezifikationen (TS)*, die alle *technischen Details einer Mobilfunktechnologie detailliert beschreiben*. Die Spezifikationen für LTE sind *extrem umfangreich*, der *Detailgrad ist so hoch gewählt*, damit *Mobilfunkgeräte unterschiedlicher Hersteller in allen Netzen problemlos funktionieren*“.

Paketorientierte Übertragung (1)

Anders als die bisherigen Mobilfunkstandards verlässt sich LTE vollkommen auf die **paketorientierte** Übertragung. Dagegen nutzen sowohl GSM als auch UMTS für die Sprachübertragung zusätzlich noch eine verbindungsorientierte Übertragung mit fester Reservierung der Ressourcen, was auch verständlich erscheint: Eine „gestückelte Übertragung“, wie es beim paketorientierten Verfahren der Fall ist, ist für die Sprachübertragung nicht möglich.

Das hier beschriebene Problem ist eine der großen Herausforderungen bei der Entwicklung von LTE, denn die Sprachübertragung ist für die Netzbetreiber weiterhin die größte Einnahmequelle. Solange also keine gut funktionierende Lösung vorhanden ist, wird der Umstieg auf LTE nur schleppend anlaufen. So ist auch das im Dezember 2009 gestartete kommerzielle LTE-Netz in Schweden zunächst nur für die Datenübertragung ausgelegt, und kann nur mit Notebooks mit LTE-Modems genutzt werden.

Um das Problem der Einbindung von Sprachübertragungsverfahren zu lösen, gibt es einige Ansätze. Die folgenden Informationen dazu sind aus dem Internet-Dokument **[Gut10]** entnommen.

1. Eine sehr einfache und nahe liegende Methode ist **Circuit Switched Fallback**, die auf Grund ihrer Benutzerunfreundlichkeit allerdings nur als Brückentechnologie in Frage kommt. Eine leitungsgebundene Übertragung wird dabei nur für die Sprachübertragung verwendet. Das Prinzip ist:

- Das Endgerät meldet sich im LTE-Netz an und parallel dazu auch noch in einem GSM- oder UMTS-Netz.
- Bei eingehendem Anruf erhält das Endgerät von der sog. *Mobile Management Entity* (MME) des LTE-Netzes eine Nachricht, woraufhin eine leitungsgebundene Übertragung über das GSM- oder das UMTS-Netz aufgebaut wird.
- Die „MME“ ist ein wichtiger Kontrollknoten im LTE-Netz, der zum Beispiel für die Nutzer-Authentifizierung und für Benachrichtigungen aller Art verantwortlich ist.
- Ein großer Nachteil dieser Problemlösung (eigentlich ist es eine „Problemverschleierung“) ist die dadurch entstehende Verzögerung beim Verbindungsaufbau, sowie die fehlende Zukunftssicherheit, sollte das komplette Netz auf LTE umgestellt werden.

Zwei weitere Problemlösungsansätze werden auf der nächsten Seite genannt.

Paketorientierte Übertragung (2)

2. Eine weitere Möglichkeit bietet **Voice over LTE via GAN** (VoLGA), die auf der von 3GPP entwickelten GAN-Technologie (*Generic Access Network*) basiert. In aller Kürze lässt sich das Prinzip wie folgt darstellen:

- GAN ermöglicht leitungsbezogene Dienste über ein paketorientiertes Netzwerk (IP-Netzwerk), beispielsweise WLAN (*Wireless Local Area Network*). Mit kompatiblen Endgeräten kann man sich so im GSM-Netz über eine WLAN-Verbindung registrieren lassen und leitungsbasierte Dienste nutzen. VoLGA nutzt diese Funktionalität, in dem es WLAN durch LTE ersetzt.
- Vorteilhaft ist die schnelle Implementierung von VoLGA, da keine langwierige Neuentwicklung und keine Änderungen am Kernnetz notwendig sind. Allerdings muss dem Netz als Hardware ein sogenannter *VoLGA Access Network Controller* (VANC) hinzugefügt werden. Dieser sorgt für die Kommunikation zwischen Endgerät und **Mobile Management Entity** bzw. dem Kernnetz.

Auch wenn VoLGA für Sprachverbindungen nicht auf ein GSM- oder UMTS-Netz zurückgreifen muss wie **Circuit Switched Fallback**, so wurde es doch vom Großteil der Mobilfunkgemeinde auch nur als (unbefriedigende) Zwischenlösung betrachtet. Lediglich T-Mobile war bis zuletzt ein Verfechter dieser Technologie, beendete im Februar 2011 jedoch ebenfalls jede weitere Forschung und Entwicklung zu VoLGA. Die Hintergründe finden sich in diesem **Internet-Artikel**.

3. Der für die Realisierung leitungsgebundener Übertragung im zukünftigen LTE-Netz wahrscheinlichste Ansatz ist **IP Multimedia Subsystem** (IMS). Es handelt sich dabei um eine vom 3GPP vorgeschlagene Technologie, die entwickelt wurde, um den Zugriff auf Dienste aus verschiedenen Netzwerken zu standardisieren. Einige technische Fakten zu IMS sind:

- Das IMS-Basisprotokoll ist das von *Voice over IP* bekannte *Session Initiation Protocol* (SIP). Es handelt sich dabei um ein Netzprotokoll, mit dem Verbindungen zwischen zwei Teilnehmern aufgebaut und gesteuert werden können.
- IMS wird mittlerweile von den meisten Netzbetreibern als der richtige Ansatz zur Lösung des Problems der paketorientierten Übertragung betrachtet. Es ermöglicht langfristig die Entwicklung zu einem vollständig IP-basierten Netzwerk und bietet damit Zukunftssicherheit.

Dieser auch *Voice over LTE* (VoLTE) genannte Ansatz ist aber auf Grund seiner Komplexität nicht einfach zu realisieren. Trotzdem setzen namhafte Provider wie der amerikanische Konzern Verizon voll auf diese Technik. Wie im bereits oben erwähnten **Internet-Artikel** formuliert, soll die Technik Mitte 2012 soweit ausgereift sein, um während des Telefonierens häufige Verbindungstrennungen zu vermeiden.

Bandbreitenflexibilität

LTE lässt sich durch die Verwendung von **OFDM** mit vergleichsweise wenig Aufwand an unterschiedlich breite Frequenzbänder anpassen. Diese Tatsache ist eine aus verschiedenen Gründen – siehe **[Mey10]** – wichtige Eigenschaft, insbesondere für die Netzbetreiber:

- Abhängig von den gesetzlichen Vorschriften in verschiedenen Ländern können die Frequenzbänder für LTE unterschiedlich groß sein. Auch der Ausgang der staatspezifischen Versteigerungen der LTE-Frequenzen (getrennt nach FDD und TDD) hat die Breite der Spektren beeinflusst.
- Oft betreibt man LTE im Hinblick auf eine spätere Migration in der „Frequenz-Nachbarschaft“ etablierter Funkübertragungssysteme, mit deren Abschaltung in Kürze gerechnet wird. Steigt die Nachfrage, so kann man LTE nach und nach auf den frei werdenden Frequenzbereich ausweiten.
- Als Beispiel sei die Migration der Fernsehkanäle nach der Digitalisierung genannt: Im jetzt frei gewordenen VHF-Frequenzbereich um 800 MHz wird ein Teil des LTE-Netzwerks angesiedelt – siehe **Grafik** im Kapitel 4.1.
- Eigentlich könnten die Bandbreiten mit einem Feinheitsgrad von bis zu 15 kHz (entsprechend einem OFDMA-Unterträger) gewählt werden. Da dies jedoch unnötig Overhead produzieren würde, hat man als kleinste adressierbare LTE-Ressource eine Dauer von einer Millisekunde und eine Bandbreite von 180 kHz festgelegt. Ein solcher Block entspricht zwölf Unterträgern (180 kHz geteilt durch 15 kHz).

Um die Komplexität und den Aufwand bei der Hardwarestandardisierung möglichst gering zu halten, hat man sich auf eine ganze Reihe zulässiger Bandbreiten zwischen 1.4 MHz und 20 MHz geeinigt. Die standardisierten Bandbreiten, die Anzahl der verfügbaren Blöcke sowie der „Overhead“ sind **[Ges08]** entnommen:

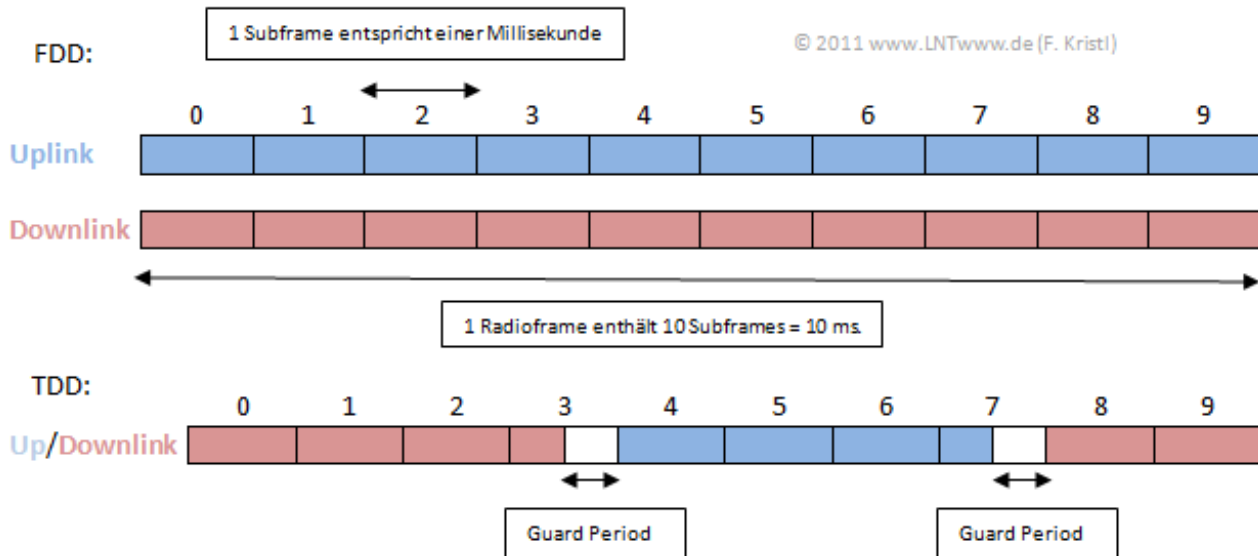
- 6 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 1.4 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 28.6%,
- 15 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 3 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 10%,
- 25 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 5 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 10%,
- 50 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 10 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 10%,
- 75 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 15 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 10%,
- 100 verfügbare Blöcke in der Bandbreite 20 MHz \Rightarrow relativer Overhead ca. 10%.

Da sonst einige LTE-spezifische Funktionen nicht funktionieren würden, müssen mindestens 6 Blöcke bereitgestellt werden. Der relative Overhead ist bei kleiner Kanalbandbreite (1.4 MHz) vergleichsweise hoch. Ab einer Bandbreite von 3 MHz beträgt der relative Overhead konstant 10%. Weiter gilt, dass alle Endgeräte auch die maximale Bandbreite von 20 MHz unterstützen müssen **[GR09]**.

FDD, TDD und Halb-Duplex-Verfahren (1)

Eine weitere wichtige Neuerung von LTE ist das Halb-Duplex-Verfahren, welches eine Mischung aus den beiden bereits von UMTS bekannten Duplexverfahren **Frequency Division Duplex (FDD)** und **Time Division Duplex (TDD)** darstellt. Solche Duplexverfahren sind erforderlich, damit Sender und Empfänger klar voneinander getrennt sind und die Übertragung reibungslos funktioniert.

Die folgende Grafik illustriert den Unterschied zwischen FDD- und TDD-basierter Übertragung.



Mit Hilfe der beiden Methoden FDD und TDD kann LTE sowohl in gepaarten, als auch in ungepaarten Frequenzbereichen betrieben werden. Die beiden Verfahren stellen gewissermaßen einen Gegensatz dar:

- FDD benötigt ein gepaartes Spektrum, also jeweils ein Frequenzband für die Übertragung von der Basisstation in Richtung Endgerät (Downlink) und eines für die Übertragung in umgekehrter Richtung (Uplink). Downlink sowie Uplink können dabei aber gleichzeitig übertragen werden.
- TDD wurde für ungepaarte Spektren konzipiert. Zwar benötigt man nun für Uplink und Downlink nur noch ein einziges Band. Sender und Empfänger müssen sich nun allerdings bei der Übertragung abwechseln. Das Hauptproblem von TDD ist die erforderliche Synchronität der Netze.

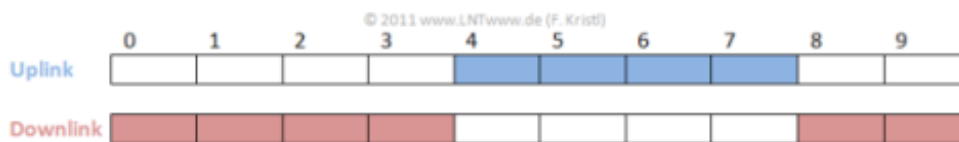
FDD, TDD und Halb-Duplex-Verfahren (2)

In der **Grafik** auf der vorherigen Seite sind die Unterschiede zwischen FDD und TDD zu erkennen. Man sieht, dass man bei TDD beim Wechsel von Downlink zu Uplink (bzw. umgekehrt) eine Guard Period einfügen muss, damit es nicht zu einer Überlagerung der Signale kommt.

Obwohl FDD in der Praxis voraussichtlich stärker genutzt werden wird (und die FDD-Frequenzen für die Provider auch sehr viel teurer waren), gibt es einige Gründe, die für TDD sprechen:

- Frequenzen sind – wie sich bei der Versteigerung 2010 wieder gezeigt hat – ein rares und teures Gut. TDD benötigt aber nur die halbe Frequenzbandbreite.
- Die TDD-Technik ermöglicht verschiedene Modi, die festlegen, wie viel Zeit für Downlink bzw. Uplink verwendet werden soll und kann so auf individuelle Anforderungen abgestimmt werden.

Für die eigentliche Neuerung, das **Halb-Duplex-Verfahren**, benötigt man zwar wie bei FDD auch ein gepaartes Spektrum. Sender und Empfänger der Basisstation wechseln sich aber trotzdem wie bei TDD ab: Jedes Endgerät kann gleichzeitig entweder nur Senden oder nur Empfangen.

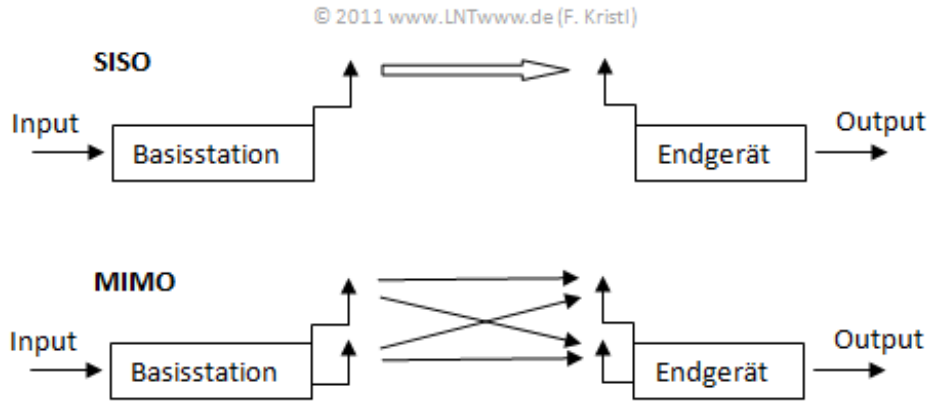


Der wesentliche Vorteil des Halb-Duplex-Verfahrens besteht darin, dass durch die Verwendung des TDD-Konzepts die Anforderungen an die Endgeräte stark sinken und sich diese einfacher und billiger produzieren lassen.

Dass diesem Aspekt in der Standardisierung große Bedeutung zugemessen wurde, lässt sich auch an der Verwendung von OFDMA im Downlink und SC-FDMA im Uplink erkennen: Dadurch wird eine längere Batterielaufzeit der Endgeräte erreicht und es können günstigere Bauteile verwendet werden. Mehr dazu finden Sie im **Kapitel 4.3**.

Mehrantennensysteme (1)

Eine weitere Neuerung von LTE ist die Verwendung von Mehrantennenkonzepten. Bei der unter dem Namen **Multiple Input Multiple Output** (MIMO) zusammengefassten Technologie handelt es sich allerdings nicht um eine LTE-spezifische Entwicklung. Beispielsweise nutzt auch WLAN diese Methode. Das prinzipielle Konzept von MIMO wird in der folgenden Grafik verdeutlicht.



Durch die Maximierung der Datenrate und Erhöhung der Effizienz der Kanalausnutzung (Kapazität) führt MIMO zu hohen Gewinnen gegenüber **Single Input Single Output** (SISO), insbesondere bezogen auf die Anpassung der Übertragung bei wechselnden Bedingungen. Neben MIMO-Systemen gibt es auch noch MISO- und SIMO-Systeme, bei denen die Anzahl der Sende- und Empfangsantennen nicht übereinstimmt.

Weitere Vorteile der MIMO-Technik sind:

- ein Diversitätsgewinn (Raum-, Zeit- und Frequenzdiversität),
- ein höheres Signal-to-Noise Ratio (SNR) bei gleicher Sendeleistung, oder
- eine geringere erforderliche Leistung bei gleicher Qualität (SNR),
- eine höhere Redundanz und damit ein robusteres System.

Nicht möglich ist jedoch, dass alle Vorteile gleichzeitig eintreten. Abhängig von der Kanalbeschaffenheit kann es auch passieren, dass man nicht einmal die Wahl hat, welchen Vorteil man nutzen will.



© 2011 www.LNTwww.de (F. Kristl)

Unter dem Begriff „MIMO“ fasst man meist verschiedene Mehrantennenverfahren mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammen, die jeweils in gewissen Situationen von Nutzen sein können. Diese sind in der zweiten Grafik anschaulich abgebildet. Die Bildbeschreibung folgt auf der nächsten Seite.

Mehrantennensysteme (2)

Nun werden die in der **unteren Grafik** auf der vorherigen Seite zusammengefassten MIMO–Methoden genauer beschrieben. Dabei setzen wir voraus, dass sowohl der Sender als auch der Empfänger mehrere Antennen besitzt. Damit lassen sich gleichzeitig auch mehrere Datenströme übertragen. LTE unterstützt neben SISO auch 2x2–MIMO und 4x4–MIMO im Downlink.

1. Werden die weitgehend unabhängigen Kanäle eines MIMO–Systems von einem einzigen Teilnehmer genutzt, so spricht man von **Single–User MIMO**. Bei dieser Anwendung (in der Grafik links oben) gilt:

- Ausgehend von einer FDD-basierten Übertragung mit **64–QAM–Modulation** (das heißt, eine quadratische 8x8–Signalraumkonfiguration) lässt sich für Single–User MIMO mit SISO–Betrieb eine Übertragungsrate von 100 Mbit/s erzielen.
- Bei 2x2–MIMO verdoppelt sich theoretisch die Datenrate. Mit der Anzahl der Antennen erhöht sich aber auch der Overhead durch Kanalcodierung, Protokollheader und der Referenzsymbole zur Kanalmessung, so dass der Zuwachs geringer ist. Man erreicht bei 2x2–MIMO immerhin 172.8 Mbit/s, was insbesondere für mobile Endgeräte interessant ist.
- LTE ermöglicht maximal 4x4–MIMO, also jeweils vier Antennen an Sender und Empfänger. Theoretisch sind damit Datenraten (im Downlink) bis zu 326.4 MBit/s möglich, allerdings nur bei optimalen Kanalbedingungen.
- Als Empfänger (Endgeräte) kommen allerdings bei 4x4–MIMO aufgrund der Komplexität von Mehrantennensystemen nur Laptops mit LTE–Modems in Frage. Bei einem Handy beschränkt man sich auf 2x2–MIMO.

2. Im Gegensatz zum Single–User MIMO ist das Ziel beim **Multi–User MIMO** nicht die maximale Datenrate für einen Empfänger, sondern die Maximierung der Anzahl der Endgeräte, die das Netz gleichzeitig nutzen können (siehe Schaubild oben rechts). Dabei werden verschiedene Datenströme zu unterschiedlichen Nutzern übertragen. Dies ist besonders an Orten mit einer hohen Nachfrage nützlich, wie zum Beispiel an Flughäfen oder auch in Fußballstadien.

3. Der Betrieb mehrerer Antennen dient aber nicht nur der Maximierung der Nutzeranzahl oder der Geschwindigkeit, sondern im Falle von schlechten Übertragungsbedingungen können mehrere Antennen auch ihre Sendeleistung bündeln und so gezielt Daten zu einem Teilnehmer übertragen, um dessen Empfangsqualität zu verbessern. Man spricht von **Beamforming**, wodurch natürlich auch die Reichweite einer Senderstation erhöht wird. Diese Anwendung ist in der Grafik unten links dargestellt.

4. Die vierte Möglichkeit, den Vorteil mehrerer Antennen zu nutzen, ist **Antennendiversität**. Mit Hilfe der Diversität eines MIMO-Kanals erhöht man die Redundanz und gestaltet so die Übertragung robuster gegenüber Störungen. Gibt es zum Beispiel vier Kanäle, so übertragen diese alle die gleichen Daten. Fällt ein Kanal aus, so sind immer noch drei Kanäle vorhanden, die die Information transportieren können.

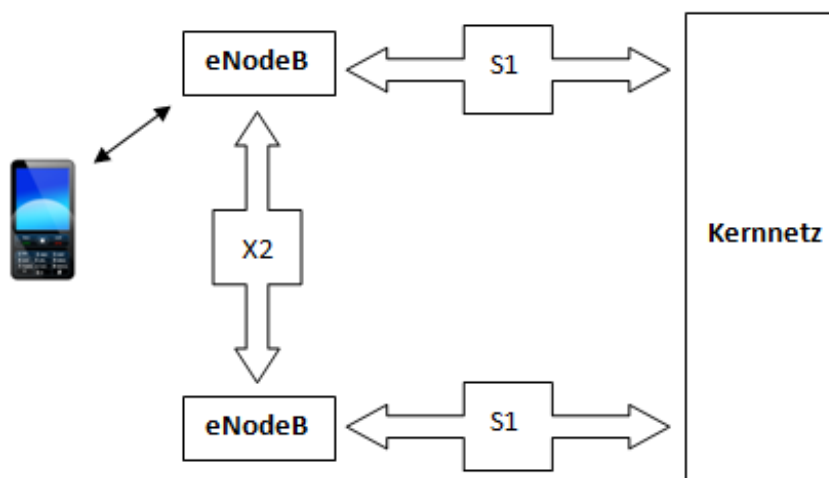
Systemarchitektur (1)

Die LTE–Architektur ermöglicht ein vollständig auf dem IP–Protokoll basierendes Übertragungssystem. Um dieses Ziel zu erreichen, musste die für UMTS spezifizierte Systemarchitektur nicht nur verändert, sondern teilweise komplett neu konzipiert werden. Dabei wurden auch andere IP–basierte Technologien wie mobiles WiMAX oder WLAN integriert, um in diese Netze problemlos wechseln zu können.

Die LTE–Systemarchitektur lässt sich in zwei große Bereiche einteilen:

- das LTE–Kernnetz *Evolved Packet Core* (EPC),
- die Luftschnittstelle *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN) – eine Weiterentwicklung von **UMTS Terrestrial Radio Access Network** (UTRAN).

© 2011 www.LNTwww.de (F. Kristl)

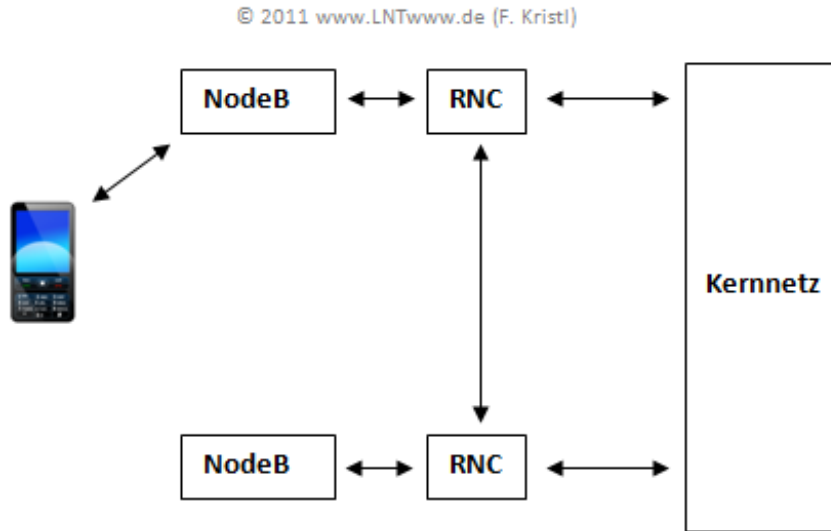


Das *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN) überträgt die Daten zwischen dem Endgerät und der Basisstation, die in der LTE–Architektur „eNodeB“ genannt wird (im Gegensatz zu „NodeB“ bei UMTS). Aus obiger Grafik erkennt man:

- Alle Basisstationen sind sowohl mit dem Kernnetz (EPC) als auch mit allen benachbarten Basisstationen verbunden. Die Verbindungen zu den benachbarten Basisstationen bewirken, dass bei einem Zellenwechsel (also wenn sich das Endgerät aus dem Umkreis einer Basisstation in Richtung einer anderen bewegt) möglichst wenige Pakete verloren gehen.
- Dazu kann die Basisstation, deren Versorgungsgebiet der Nutzer gerade verlässt, eventuell noch zwischengespeicherte Daten direkt und schnell an die „neue“ Basisstation weitergeben. Damit ist eine (weitgehend)durchgehende Übertragung sichergestellt.
- Alle Basisstationen sind über sogenannte X2–Schnittstellen miteinander verbunden, wodurch die Datenübertragung beim Wechsel von einer Funkzelle zur nächsten nur 20 Millisekunden beträgt. Bei UMTS musste noch der Umweg über den *Radio Network Controller* (RNC) gegangen werden, was zu Latenzzeiten von bis zu 100 Millisekunden führte.

Systemarchitektur (2)

Die Neukonzipierung der Basisstationen (eNodeB anstelle von NodeB) und die Schnittstelle X2 sind die entscheidenden Weiterentwicklungen von UMTS hin zu LTE. Das **Blockdiagramm** auf der letzten Seite illustriert insbesondere die mit der neuen Technologie einhergegangene Reduzierung der Komplexität gegenüber UMTS (siehe nachfolgende Grafik).



Bei LTE bestehen zwischen einem „eNodeB“ und dem Kernnetz (EPC) zwei Verbindungen über die sogenannte S1-Schnittstelle,

- eine für die Übertragung von Nutzdaten, und
- eine für die Übertragung von Signalisierungsdaten.

Dagegen ist in den herkömmlichen UMTS-Netzen zwischen einer Basisstation (NodeB) und dem Kernnetz noch der *Radio Network Controller* (RNC) zwischengeschaltet, der hauptverantwortlich für den Wechsel zwischen verschiedenen Zellen ist.

Durch die LTE-Systemarchitektur wird die Komplexität reduziert. Die Funktionalität des RNC geht zum Teil in die Basisstation, zum anderen in die **Mobility Management Entity** (MME) im Kernnetz über. Diese Reduktion der Schnittstellen verkürzt die Signaldurchlaufzeit im Netzwerk signifikant.

Systemarchitektur (3)

Das LTE-Kernnetz *Evolved Packet Core* (EPC) eines Netzbetreibers – in der Fachsprache nennt man dieses auch **Backbone** – besteht aus verschiedenen Netzwerkkomponenten. Das EPC ist über das *Backhaul* (englische Bezeichnung für *Rücktransport*) mit den Basisstationen verbunden. Damit bezeichnet man die Anbindung eines vorgelagerten, meist hierarchisch untergeordneten Netzknotens an einen zentralen Netzknoten.

Momentan besteht das *Backhaul* zum Großteil aus Richtfunk und sogenannten E1-Leitungen. Diese sind Kupferleitungen und erlauben einen Durchsatz von ca. 2 Mbit/s. Für GSM- und UMTS-Netzwerke waren diese Verbindungen noch ausreichend, aber bereits für das großflächig vermarktete **HSDPA** reichen solche Datenraten nicht. Für LTE ist ein solches *Backhaul* komplett unbrauchbar:

- Das langsame Kabelnetzwerk würde die schnellen Funkverbindungen ausbremsen, und es wäre insgesamt kein Geschwindigkeitszuwachs festzustellen.
- Aufgrund der geringen Kapazitäten der Leitungen mit E1-Standard wäre auch ein Ausbau mit weiteren baugleichen Leitungen nicht wirtschaftlich.

Das *Backhaul* muss also im Zuge der LTE-Einführung neu entworfen werden. Dabei ist es wichtig, Zukunftssicherheit im Auge zu behalten, steht doch die nächste Generation **LTE-Advanced** bereits vor der Einführung. Schenkt man dem von Experten propagierten Moores Law für Mobilfunkbandbreiten Glauben, so ist die teure Neuverlegung von Kabeln der wichtigste Faktor für die Zukunftssicherheit.

Aufgrund der rein paketorientierten Übertragungstechnik bietet sich für das LTE-Backhaul der ebenfalls IP-basierte Ethernetstandard an, der mit Hilfe von Lichtwellenleitern realisiert wird. Die Firma Fujitsu stellt in der Studie [Fuj09] die These auf, dass die momentane Infrastruktur noch für die nächsten zehn bis fünfzehn Jahre eine wichtige Rolle für das LTE-Backhaul spielen wird.

Für den Generationenwechsel hin zu einem Ethernet-basierten *Backhaul* gibt es zwei Ansätze:

- der parallele Betrieb der Leitungen mit E1 und Ethernet Standard,
- die sofortige Migration zu einem auf Ethernet basierenden *Backhaul*.

Ersteres hätte den Vorteil, dass die Netzbetreiber den Sprachverkehr weiterhin über die alten Leitungen laufen lassen und ausschließlich den bandbreitenintensiven Datenverkehr über die leistungsfähigeren Leitungen abwickeln könnten. Die zweite Möglichkeit wirft einige technische Probleme auf:

- Die vorher durch die langsamen E1-Standard-Leitungen transportierten Dienste müssten sofort auf ein paketbasiertes Verfahren umgestellt werden.
- Ethernet bietet (anders als der jetzige Standard) bisher keine *End-to-End-Synchronisierung*, was beim Funkzellenwechsel zu starken Verzögerungen bis hin zu Dienstunterbrechungen führen kann – also eine gewaltige Einbuße der Servicequalität. Im **Konzept SyncE** werden jedoch von der Fa. Cisco bereits Vorschläge unterbreitet, wie die Synchronisation realisiert werden könnte.

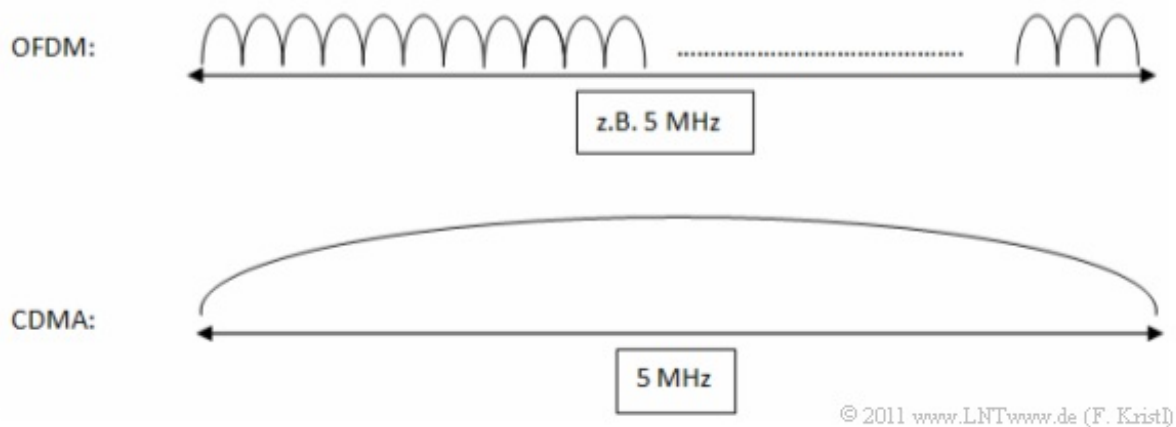
Für Ballungsgebiete wäre eine direkte Umstellung des Backhails sicher lohnenswert, da für eine vergleichsweise hohe Zahl an neuen Nutzern nur relativ wenige neue Kabel verlegt werden müssten. Gerade im ländlichen Raum ergäben sich aber durch größere Grabungsarbeiten schnell hohe Kosten. Dies ist aber genau der Bereich, der laut **Vereinbarung** zwischen den (deutschen) Mobilfunkbetreibern und der Bundesregierung als erstes abgedeckt werden muss.

Allgemeines zur LTE–Übertragungstechnik

Im Gegensatz zum Vorgänger UMTS setzt *Long Term Evolution* (LTE) eine Variante des auch von WLAN genutzten OFDM–Konzepts ein, um die Übertragungsressourcen systematisch aufzuteilen. Das Mehrfachzugriffsverfahren **OFDM** besitzt ebenso wie **CDMA** die Fähigkeit, das System gegen punktuell auftretende Übertragungsstörungen zu schützen.

Zwar wäre es möglich, die bei der zweiten und dritten Mobilfunkgeneration verwendeten Technologien so anzupassen und zu erweitern, dass sie auch die geforderten Vorgaben der vierten Generation erfüllen. Die schnell ansteigende Komplexität von CDMA beim Empfang von Signalen auf mehreren Pfaden lässt die technische Realisierung jedoch als wenig sinnvoll erscheinen.

Die stark abstrahierte Grafik zeigt die Aufteilung der kompletten Bandbreite für einzelne Unterträger und erklärt den Unterschied zwischen CDMA (UMTS) und OFDM (LTE).



OFDM besitzt also im Gegensatz zu CDMA viele – typischerweise sogar mehrere hundert – Unterträger mit einer Bandbreite von einigen Kilohertz. Dazu wird der Datenstrom aufgeteilt und jeder der vielen Unterträger einzeln mit nur geringer Bandbreite moduliert.

In LTE benutzt man OFDMA, eine auf OFDM basierende Übertragungstechnik. Hierfür sprechen unter anderem folgende Gründe **[HT09]**:

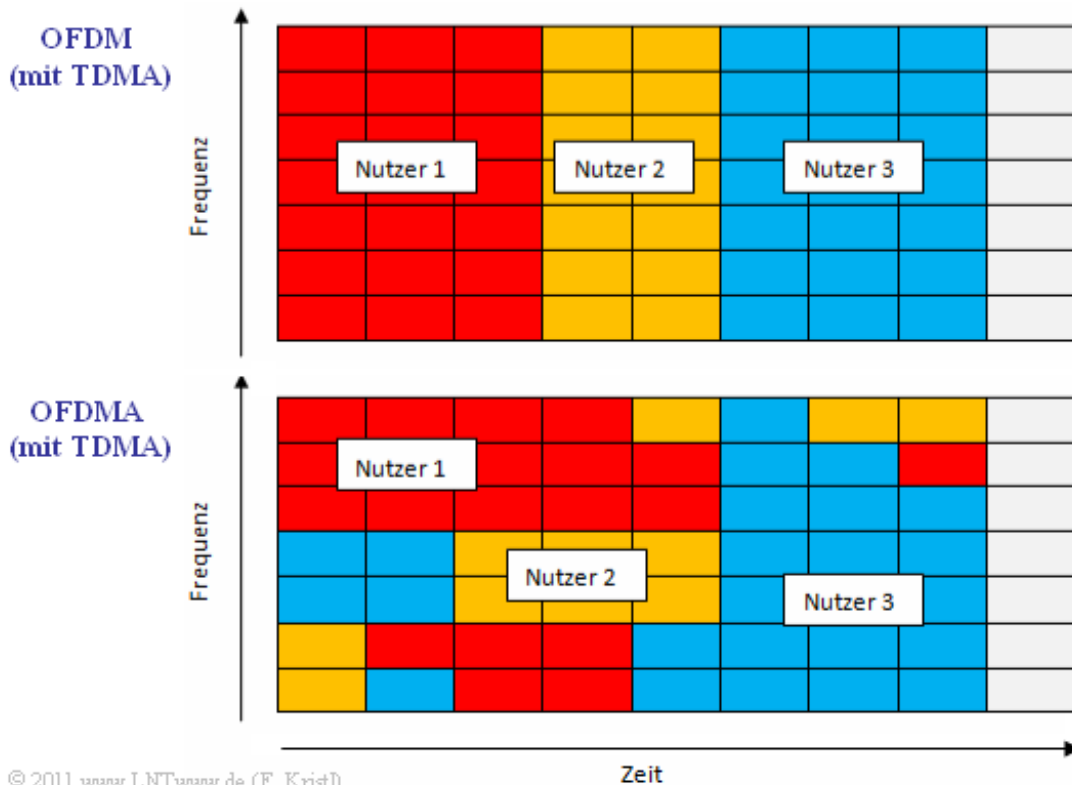
- Eine hohe Leistung in frequenzgesteuerten Kanälen,
- die niedrige Komplexität im Empfänger,
- gute Spektraleigenschaften und Bandbreitenflexibilität, sowie
- Kompatibilität mit den neuesten Empfänger– und Multiantennentechnologien.

Auf der folgenden Seite werden die Unterschiede zwischen den Mehrfachzugriffsverfahren OFDM und OFDMA kurz erläutert.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede von OFDM und OFDMA

Das Prinzip von *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) wurde bereits im **Kapitel 5.5** des Buches „Modulationsverfahren“ 5 erklärt. OFDM teilt das zur Verfügung stehende Frequenzband in eine große Anzahl von schmalbandigen Unterträgern auf, wobei zu beachten ist:

- Damit die einzelnen Unterträger möglichst wenig Intercarrier-Interferenz aufweisen, werden die Frequenzen der Unterträger so gewählt, dass sie zueinander orthogonal sind.
- Das bedeutet, dass bei der Mittenfrequenz eines Unterträgers alle anderen Träger keine Spektralanteile aufweisen. Das Ziel ist es, für jeden Nutzer die gegenwärtig günstigsten Ressourcen auszuwählen, um ein in der Gesamtheit optimales Ergebnis zu erhalten.
- Konkret bedeutet das weiterhin, dass – angepasst an die jeweilige Netzsituation – die verfügbaren Ressourcen demjenigen Nutzer zugeteilt werden, der damit in diesem Moment am meisten anfangen kann. Zu diesem Zweck misst die Basisstation für die Abwärtsstrecke zum Endgerät hin die Leitungsqualität mit Hilfe von Referenzsymbolen.



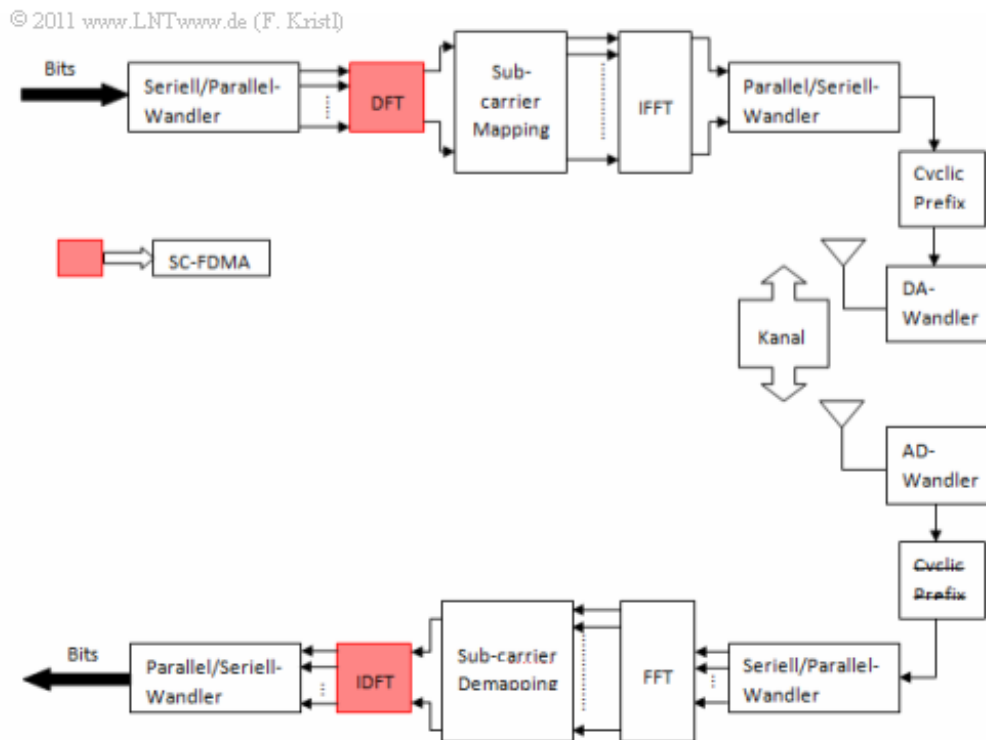
© 2011 www.LNTwww.de (F. Kristl)

Die Grafik zeigt oben die Frequenzzuteilung bei OFDM. Das untere Schaubild zeigt die Zuteilung bei *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). Man erkennt:

- Bei OFDMA beschränkt sich die neue Ressourcenzuteilung nach Kanalschwankungen nicht wie bei OFDM nur auf den Zeitbereich, sondern es kann auch der Frequenzbereich optimal angepasst werden.
- Dadurch kann die OFDMA-Ressourcenzuteilung besser an die äußeren Umstände angepasst werden. Um diese Flexibilität optimal nutzen zu können, ist allerdings eine Abstimmung zwischen der Basisstation (eNodeB) und dem Endgerät notwendig. Mehr dazu später im **Kapitel 4.4**.

Unterschiede zwischen OFDMA und SC-FDMA (1)

Es gibt Übertragungsverfahren wie beispielsweise **WiMAX**, die OFDMA in beiden Richtungen nutzen. Die LTE-Spezifizierung durch das 3GPP-Konsortium legt dagegen fest, dass OFDMA nur im Downlink – also bei der Übertragung von der Basisstation zum Endgerät – eingesetzt wird. In der Gegenrichtung, also bei der Übertragung vom Endgerät zur Basisstation \Rightarrow Uplink, verwendet man dagegen *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) entsprechend dem folgenden Blockschaltbild.



Aus dieser Darstellung erkennt man, die beiden Systeme SC-FDMA und OFDMA sehr ähnlich sind, oder anders ausgedrückt, dass SC-FDMA auf OFDMA aufbaut. Lässt man im obigen SC-FDMA-Strukturplan die rot hinterlegten Komponenten weg, so erhält man die Beschreibung eines OFDMA-Systems.

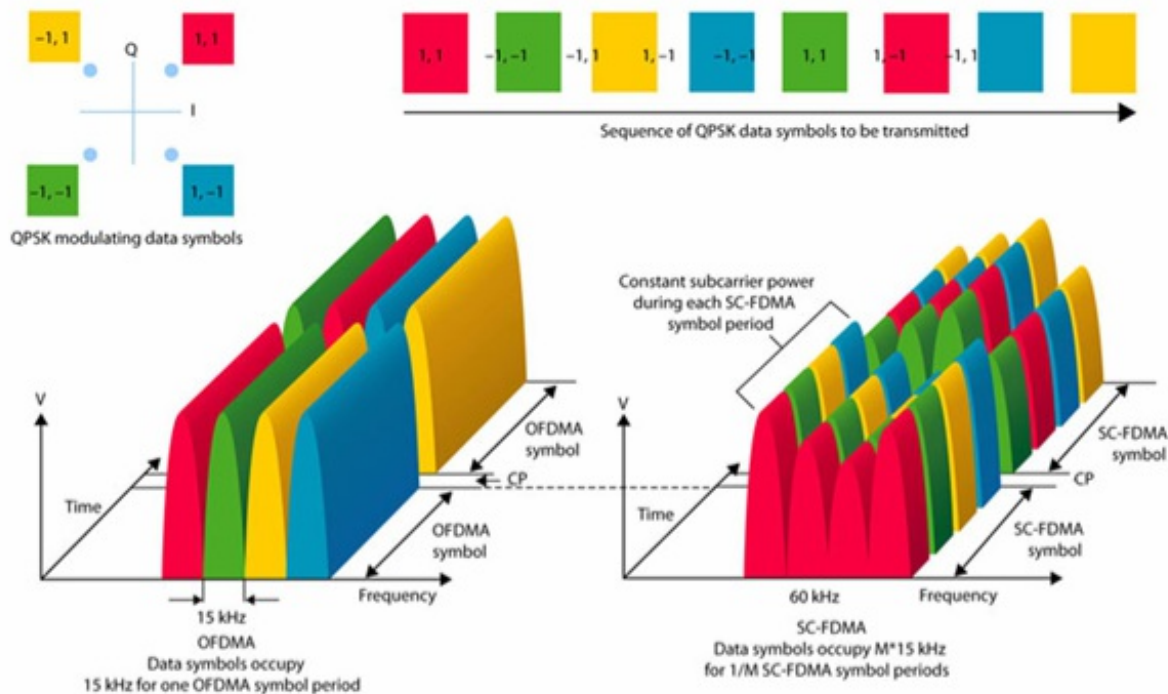
Die Signalerzeugung funktioniert ähnlich wie bei OFDMA, allerdings mit kleinen, für den Mobilfunk aber durchaus wichtigen Änderungen:

- Der Hauptunterschied liegt in der zusätzlichen **diskreten Fouriertransformation** (DFT), die sendeseitig direkt nach der Seriell/Parallel-Wandlung vollzogen wird.
- Damit handelt es sich nicht mehr um ein Multiträgerverfahren, sondern eben um ein „Single Carrier“ FDMA. Wegen der notwendigen DFT/IDFT-Operationen findet man auch die Bezeichnung *DFT-spread-OFDM*.

Unterschiede zwischen OFDMA und SC-FDMA (2)

Fassen wir die Aussagen der letzten Seite nochmals kurz zusammen. SC-FDMA unterscheidet sich von OFDMA folgendermaßen:

- Die Datensymbole werden mit einer Gruppe gleichzeitig übertragener Unterträger gesendet und nicht jedes Symbol von einem einzelnen, orthogonalen Unterträger.
- Diese Unterträgergruppe kann dann als ein Frequenzband betrachtet werden, das die Daten sequenziell überträgt. Daher rührt der Name „*Single Carrier FDMA*“.
- Während in OFDMA-Systemen die zu übertragenden Symbole direkt die verschiedenen Unterträger erzeugen, durchlaufen sie in SC-FDMA-Systemen zunächst eine diskrete Fouriertransformation (DFT). So werden die Datensymbole aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert, bevor sie die OFDM-Prozedur durchlaufen [Ixi09].



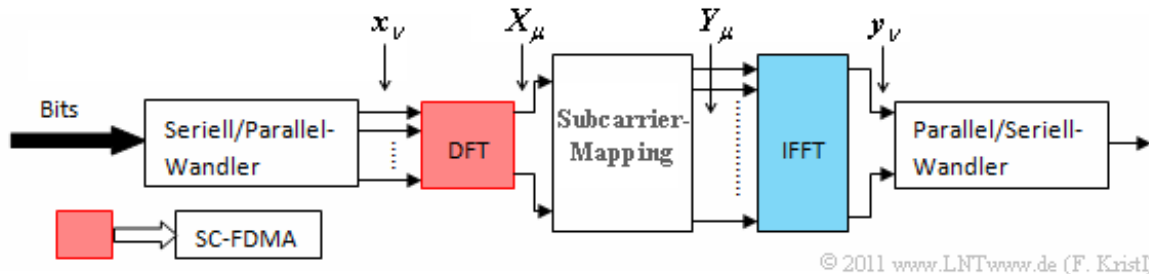
Man kann den Unterschied zwischen OFDMA und SC-FDMA aber auch so beschreiben:

- Bei einer OFDMA-Übertragung enthält jeder orthogonale Unterträger nur die Informationen eines Signals.
- Hingegen beinhaltet bei SC-FDMA jeder einzelne Unterträger Informationen über alle in dieser Periode übertragenen Signale.

Dieser Unterschied und die quasi-sequentielle Übertragung bei SC-FDMA lassen sich in obigem Schaubild besonders gut erkennen. Dieses stammt aus einem PDF-Dokument von **Agilent-3GPP**.

Funktionsweise von SC-FDMA (1)

Nun soll der SC-FDMA-Übertragungsvorgang genauer betrachtet werden. Die Informationen hierzu stammen größtenteils aus [MG08]. Auf den Zweck und die Funktion des *Cyclic Prefix* wird hier nicht näher eingegangen. Die Gründe sind dieselben wie bei OFDM und können im **Kapitel 5.6** des Buches „Modulationsverfahren“ nachgelesen werden.



Die folgende Beschreibung bezieht sich auf den hier gezeigten SC-FDMA-Sender. Beachten Sie, dass bei LTE die Modulation an die Kanalqualität angepasst wird: In stark verrauschten Kanälen wird 4-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* mit vier Signalraumpunkten) verwendet, die (nahezu) identisch mit der QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*) ist. Bei besseren Bedingungen wird auf eine höherstufige QAM bis hin zu 64-QAM umgeschaltet. Weiter gilt:

- Ein Eingangsdatenblock besteht aus K komplexen Modulationssymbolen x_ν , die mit einer Rate von R_Q [Symbole/s] erzeugt werden.
- Die diskrete Fouriertransformation (DFT) erzeugt K Symbole im Frequenzbereich entsprechend

$$X_\mu = \sum_{\nu=0}^{K-1} x_\nu \cdot \exp(-j \cdot \frac{2\pi \cdot \nu \cdot \mu}{K}),$$

die auf K von insgesamt N orthogonalen Unterträgern moduliert werden. Diese Unterträger werden über eine größere Bandbreite von $B_K = N \cdot f_0$ verteilt, wobei $f_0 = 15$ kHz die bei LTE kleinste adressierbare Bandbreite angibt. Weiter gilt:

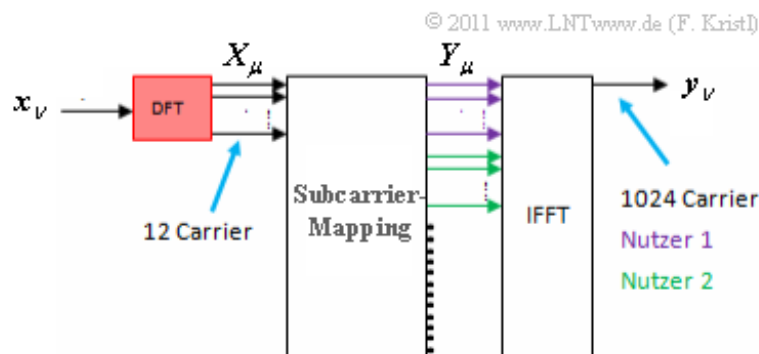
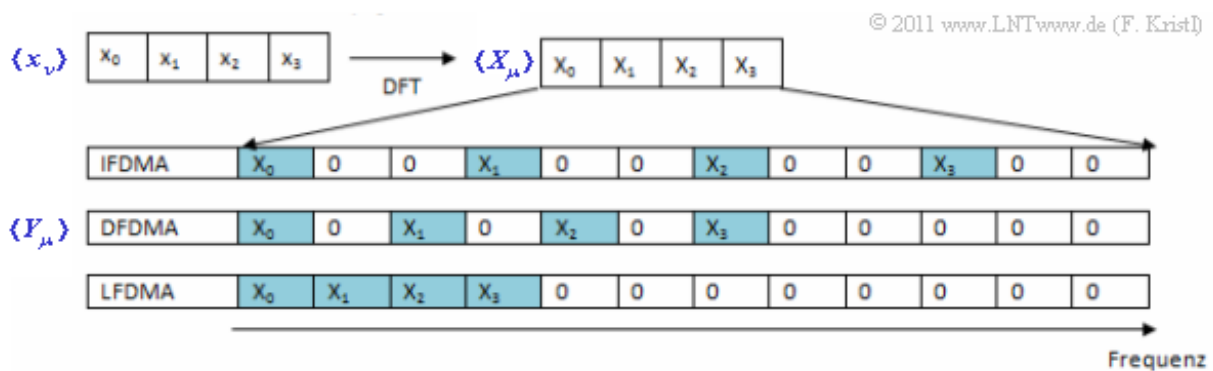
- Die Kanalübertragungsrate ergibt sich zu $R_C = J \cdot R_Q$ mit dem Spreizfaktor $J = N/K$. Dieses SC-FDMA-System könnte dann gleichzeitig J orthogonale Eingangssignale verarbeiten. Im Fall von LTE wäre zum Beispiel $K = 12$ (kleinster adressierbarer Block) und $N = 1024$. J gibt folglich auch die Anzahl der Endgeräte an, die gleichzeitig mit dieser Basisstation verbunden sein können.
- Nach dem so genannten *Subcarrier-Mapping* – darunter versteht man die Zuordnung der von der DFT erzeugten Symbole auf die zur Verfügung stehenden Unterträger – sind die Symbole dann auf eine gewisse Bandbreite „gemappt“, zum Beispiel im Falle von $K = 12$ auf den Bereich von 0 bis 180 kHz oder von 180 kHz bis 360 kHz.
- Die folgende IFFT-Transformation (oben blau markiert) generiert aus den Ausgangswerten Y_μ im Frequenzbereich dann die Darstellung y_ν dieses Mappings im Zeitbereich. Diese Symbole werden dann durch den Parallel/Seriell-Wandler in eine für die Übertragung geeignete Sequenz überführt.

Funktionsweise von SC-FDMA (2)

Für das **Subcarrier-Mapping** gibt es verschiedene Ansätze:

- **DFDMA** oder *Distributed Mapping*: Hier werden die Modulationssymbole auf einen gewissen Bereich der zur Verfügung stehenden Kanalbandbreite verteilt.
- **IFDMA** oder *Interleaved FDMA*: Sonderform von DFDMA, wenn die Modulationssymbole auf die komplette Bandbreite mit jeweils gleichen Abständen verteilt werden.
- **LFDMA** oder *Localized Mapping*: Die K Modulationssymbole werden direkt benachbarten Unterträgern zugeordnet. Dies entspricht der derzeitigen 3GPP-Spezifikation.

Die folgende Abbildung zeigt diese drei Arten für das *Subcarrier-Mapping*. Zur Vereinfachung der Darstellung beschränken wir uns hier auf die (sehr kleinen) Parameterwerten $K = 4$ und $N = 12$.



Die untere Grafik zeigt dieses Übertragungsschema, wobei von den für den LTE-Uplink realistischeren Zahlenwerten $K = 12$ und $N = 1024$ sowie *Localized Mapping* (LFDMA) ausgegangen wird. Dargestellt sind in dieser Skizze nur die beiden ersten der insgesamt J Nutzer.

Funktionsweise von SC-FDMA (3)

Es kann dabei gezeigt werden, dass der Sender bei SC-FDMA die drei Schritte

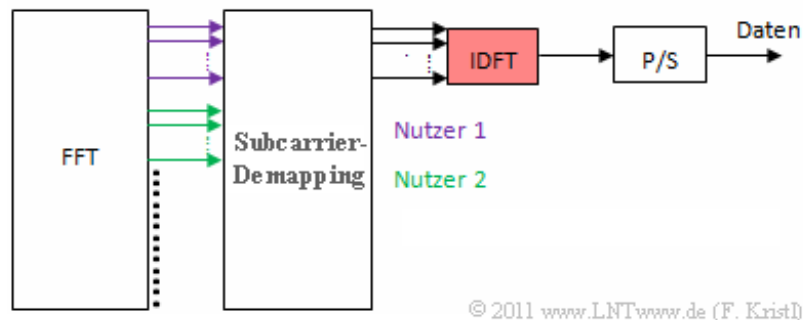
- Diskrete Fouriertransformation (DFT),
- Subcarrier-Mapping, und
- Inverse diskrete (Fast-) Fouriertransformation (IFFT)

gar nicht einzeln durchlaufen muss. Diese drei Operationen können gemeinsam als eine lineare Operation betrachtet werden. Die vollständige und mathematisch nicht ganz einfache Herleitung findet sich zum Beispiel in [MG08]. Jedes Element der Ausgangssequenz y_v ist dann durch eine gewichtete Summe der Eingangssequenzelemente x_v darstellbar, wobei die Gewichte komplexwertig sind.

Anstatt der vergleichsweise komplizierten Fouriertransformation reduziert sich die Operation somit

- auf eine Multiplikation mit einer komplexen Zahl, und
- dem J -fachen Wiederholen der Eingangssequenz x_v .

Diese Wiederholung wird durch Überabtastung gewährleistet. Im obigen Zahlenbeispiel käme man so auf den Zahlenwert $J = N/K = 1024/12 = 85.33 \approx 86$, was eine 86-fache Überabtastung bedeutet. Diese Komplexitätsreduzierung bringt einen Gewinn hinsichtlich des erreichbaren **Peak-to-Average Power Ratio** (PAPR). Genauere Betrachtungen dazu folgen auf der nächsten Seite.

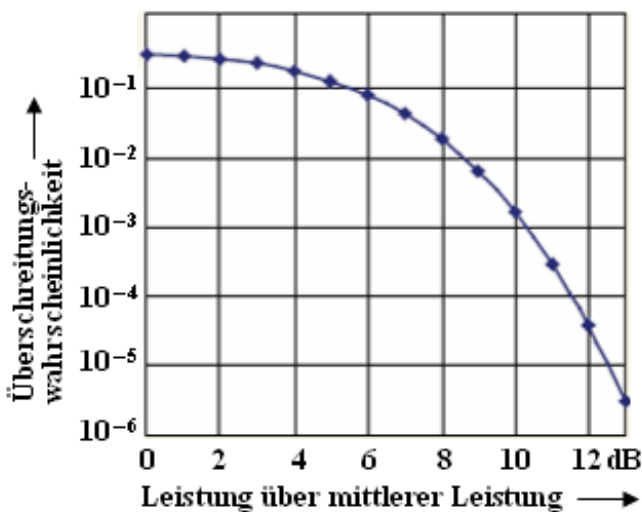


Auf der Empfängerseite, die in dieser Grafik dargestellt ist, separiert die Basisstation die Nutzer in der Frequenzebene. Man nennt diesen Block *Subcarrier-Demapping*. Zur Transformation durchlaufen die einzelnen Datensätze danach eine K -fache IDFT, die die Daten in den Zeitbereich rücktransformiert.

Vorteile von SC-FDMA gegenüber OFDM (1)

Der entscheidende Vorteil von SC-FDMA gegenüber OFDMA ist sein niedrigeres *Peak-to-Average Power-Ratio* (PAPR) auf Grund seiner Einzelträgerstruktur. Das PAPR ist das Verhältnis von momentaner Spitzenleistung zur mittleren Sendeleistung und lässt sich auch durch den **Crest-Faktor** ausdrücken, doch sind die beiden Größen nicht identisch. Der Crest-Faktor bezieht sich auf die Signalamplituden – also nicht auf die Leistungen – und ist gleich der Wurzel aus dem PAPR-Wert.

Die folgende Grafik zeigt die Wahrscheinlichkeit in doppelt-logarithmischer Darstellung, dass bei einem 64-QAM-OFDM-System Diagramm die Signalleistung über der mittleren Leistung liegt. Zwar ist die Wahrscheinlichkeit für große „Ausreißer“ gering. Beispielsweise wird die mittlere Leistung nur in 0.1% der Zeit um mehr als 10 dB überschritten.



Die Grafik wurde weitgehend aus dem Artikel [Wu09] entnommen, der im Internet zu finden ist.

Dennoch stellen die vereinzelt auftretenden hohen Spitzen in der OFDM-Signalenergie ein Problem für die Leistungsverstärker des Empfängers dar. Diese sollten im linearen Bereich betrieben werden, da ansonsten das Signal verzerrt wird. Dies passiert aufgrund von:

- Intercarrier-Interferenz innerhalb des Signals,
- Interferenzen von benachbarten Kanälen aufgrund von Spektrumserweiterung.

Daher muss der Verstärker die meiste Zeit mit einer niedrigeren Leistung als möglich betrieben werden, was seine Effizienz drastisch reduzieren kann.

Bei SC-FDMA ist das PAPR niedriger, unter anderem deshalb, weil man es quasi als Einzelträger-Übertragungsverfahren betrachten kann. Dadurch kann zum Beispiel ein sog. *Pulse-shaping*-Filter verwendet werden, der das PAPR reduziert. Das niedrigere PAPR ist der wesentliche Grund dafür, dass im LTE-Uplink SC-FDMA zum Einsatz kommt und nicht OFDMA. Ein niedriges PAPR bedeutet eine längere Batterielaufzeit, ein für Mobiltelefone – insbesondere Smartphones – äußerst wichtiges Kriterium. Gleichzeitig bietet SC-FDMA eine ähnliche Leistungsfähigkeit und Komplexität wie OFDM.

Beispiel: Wir betrachten ein OFDM-System mit N Trägern, alle mit gleicher Signalamplitude A . Dann ist nach einer stark vereinfachten Rechnung mit gleichem Proportionalitätsfaktor

- die maximale Signalleistung proportional zu $(N \cdot A)^2$, und
- die mittlere Signalleistung proportional zu $N \cdot A^2$.

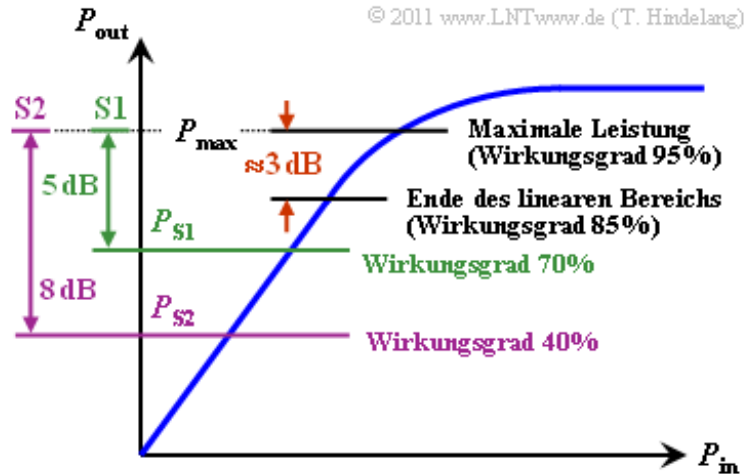
Daraus ergibt sich für *Peak-to-Average Power-Ratio* als der Quotient dieser beiden Leistungen zu $\text{PAPR} = N$. Schon bei nur zwei Trägern ergibt sich $\text{PAPR} = 2$ entsprechend 3 dB.

Somit muss der Verstärker selbst bei nur zwei Trägern immer 3dB unterhalb der maximalen Leistung arbeiten, um im Fall von Signalspitzen keine Signalverzerrungen zu produzieren. Wie auf der nächsten Seite gezeigt wird, bedeuten 3dB aber bereits einen Rückgang des Wirkungsgrads auf 85%.

Vorteile von SC-FDMA gegenüber OFDM (2)

PAPR steht in direkter Beziehung zur Sendeverstärkereffizienz. Die maximale Effizienz wird erreicht, wenn der Verstärker in der Umgebung der Sättigungsgrenze arbeiten kann. Die Grafik zeigt eine beispielhafte Verstärkerkennlinie, also die Ausgangsleistung aufgetragen über der Eingangsleistung.

Wäre PAPR = 0 dB (also 1), so könnte die (mittlere) Sendeleistung P_S gleich der zulässigen Spitzenleistung P_{max} gesetzt werden und der Verstärkerwirkungsgrad würde (beispielhaft) 95% betragen. Je größer PAPR ist, desto weiter entfernt von der Sättigungsgrenze muss man den Verstärker dann betreiben, um zu starke Signalverzerrungen zu verhindern.



Hier einige numerische Beispiele:

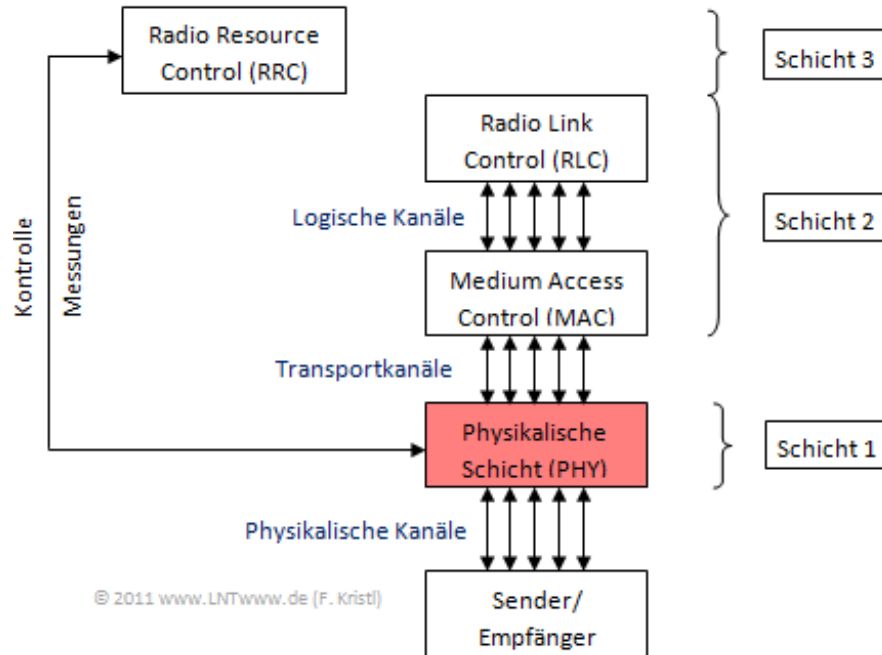
- Bei einem PAPR = 2 entsprechend der Überschlagsrechnung auf der letzten Seite müsste man die mittlere Sendeleistung um 3 dB kleiner wählen, damit P_{max} zu keinem Zeitpunkt überschritten würde. Der Wirkungsgrad würde so auf 85% zurückgehen.
- Ein Back-off von 3 dB reicht aber bei weitem nicht aus, vielmehr geht man in der Praxis von Werten zwischen 5 dB und 8 dB aus [Hin08]. Entsprechend obiger Kurve sinkt aber bereits bei 5 dB der Wirkungsgrad auf nur mehr 70% (System S1).
- Mit dem System S2 können zwar alle Signalspitzen kleiner 8 dB vom Verstärker verzerrungsfrei übertragen werden, aber der Verstärkerwirkungsgrad beträgt nur noch 40%. Wie aus der Grafik der letzten Seite zu ersehen ist, treten trotzdem noch in ca. 2% der Zeit starke Verzerrungen auf.
- Die mittlere Sendeleistung sei $P_S = 100$ mW. Dann muss bei einem PAPR von 8 dB (Faktor 9) der Verstärker bis zu $P_{max} = 900$ mW verzerrungsfrei arbeiten, bei PAPR = 2 (3 dB) dagegen nur bis 200 mW. Der Unterschied zwischen den beiden Verstärkern ist ein enormer Kostenfaktor.

Aufgrund dieser Auflistung kann zusammengefasst werden:

- OFDM mit einem großen Back-off im Uplink würde zu Problemen führen, nämlich zu extrem kurzen Batterielaufzeiten der mobilen Endgeräte. Daher wird im LTE-Uplink das konkurrierende Verfahren SC-FDMA verwendet.
- Zudem ist die Komplexität der Sendeeinheit bei SC-FDMA allgemein niedriger als bei anderen Verfahren \Rightarrow billigere Endgeräte [MLG06]. Außerdem würde die Empfängerkomplexität auf Grund der hohen Frequenzdiversität im Kanal stark ansteigen, wenn man das bei UMTS genutzte CDMA-Verfahren auf 4G-Standards erweitern würde [IXIA09].
- Allerdings wird die Frequenzbereichsentzerrung bei SC-FDMA komplizierter als bei OFDMA. Dies ist der Hauptgrund, warum man SC-FDMA nur im Uplink verwendet. So müssen diese komplizierten Entzerrer nur in den Basisstationen eingebaut werden und nicht in den Endgeräten.

Allgemeine Beschreibung (1)

Die physikalische Schicht (englisch: *Physical Layer*) ist die unterste Schicht im OSI-Schichtenmodell der *Internationalen Organisation für Normung* (ISO); sie wird auch Bitübertragungsschicht genannt. Diese beschreibt die physikalische Übertragung der Bitfolgen bei LTE und die Funktionsweise der verschiedenen Kanäle gemäß der 3GPP-Spezifikation. Alle Spezifikationen sind dabei sowohl für FDD als auch für TDD gültig.



Die Grafik zeigt die drei Schichten der LTE-Protokollarchitektur. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Schichten findet über drei verschiedene Arten von Kanälen statt:

- Logische Kanäle,
- Transportkanäle,
- Physikalische Kanäle.

In diesem Kapitel geht es hauptsächlich um die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger in der untersten, in der Grafik rot hervorgehobenen **physikalischen Schicht**. Grundsätzlich ist anzumerken:

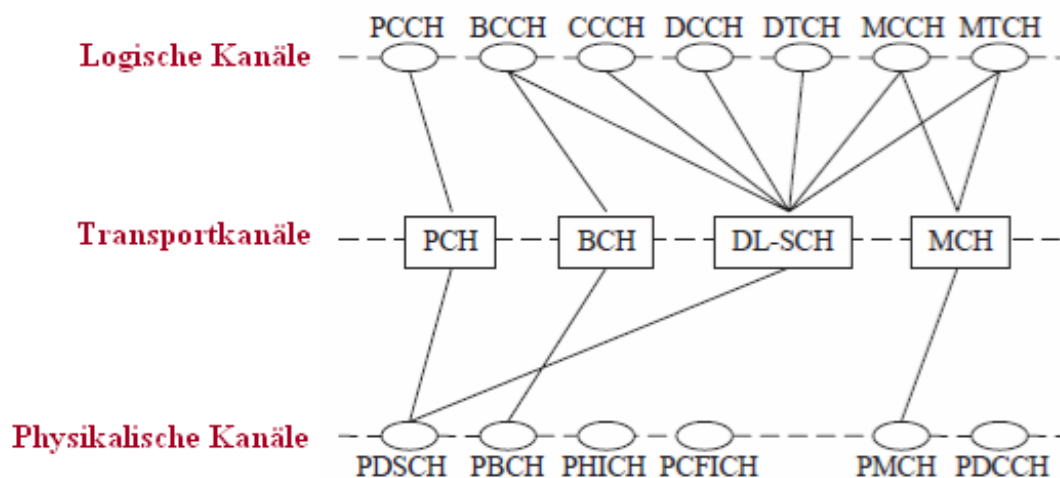
- Genau wie das Internet verwendet LTE ausschließlich eine paketbasierte Übertragung, ohne einem einzelnen Nutzer spezifisch Ressourcen zuzuweisen.
- Das Design der LTE-Bitübertragungsschicht wird demzufolge durch das Prinzip der dynamisch zugewiesenen Netzressourcen geprägt.
- Die Bitübertragungsschicht spielt eine Schlüsselrolle bei der effizienten Zuordnung und Ausnutzung der vorhandenen Systemressourcen.

Allgemeine Beschreibung (2)

Entsprechend der **Grafik auf der letzten Seite** kommuniziert die physikalische Schicht mit

- dem Block *Medium Access Control* (MAC) und tauscht dabei über sogenannte Transportkanäle Informationen über die Benutzer und die Regelung bzw. Kontrolle des Netzes aus,
- dem Block *Radio Resource Control* (RRC), wobei laufend Kontrollbefehle und Messungen ausgetauscht werden, um die Übertragung an die Kanalqualität anzupassen.

Die Komplexität der LTE-Übertragung soll durch die folgende Grafik angedeutet werden, die direkt vom *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) übernommen wurde. Sie zeigt die Kommunikation zwischen den einzelnen Schichten (Kanälen) und gilt ausschließlich für den Downlink.



Auf den nächsten Seiten werden die physikalische Schicht und die physikalischen Kanäle etwas genauer betrachtet, wobei wir zwischen Uplink und Downlink unterscheiden, uns aber nur auf das Wesentliche beschränken. In Wirklichkeit übernehmen die einzelnen Kanäle noch eine Reihe weiterer Funktionen, deren Beschreibung aber den Umfang dieses Tutorials sprengen würde. Wer interessiert ist, findet eine detaillierte Beschreibung zum Beispiel in [HT09].

Physikalische Kanäle im Uplink (1)

LTE verwendet im Uplink – also bei der Übertragung von einem Endgerät zur Basisstation – das Vielfachzugriffsverfahren **SC-FDMA**. Dementsprechend existieren in der 3GPP-Spezifikation folgende physikalische Kanäle:

- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH),
- *Physical Random Access Channel* (PRACH),
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH).

Die eigentlichen Nutzdaten werden in dem physikalischen Kanal **PUSCH** übertragen, wobei die Übertragungsgeschwindigkeit davon abhängt, wie viel Bandbreite dem jeweiligen Nutzer in diesem Moment zur Verfügung steht. Die Übertragung basiert auf dynamisch zugeordneten Ressourcen in Zeit- und Frequenzbereich mit einer Auslösung von einer Millisekunde bzw. 180 kHz. Diese Zuordnung wird durch den **Scheduler** in der Basisstation (eNodeB) vorgenommen. Ohne Anweisung der Basisstation kann ein Endgerät keinerlei Daten übertragen.

Die Ausnahme bildet dabei die Verwendung des physikalischen Kanals **PRACH**, dem einzigen Kanal im LTE-Uplink mit nicht-synchronisierter Übertragung. Eine wesentliche Aufgabe dieses Kanals ist die Anforderung einer Erlaubnis, über einen der beiden anderen physikalischen Kanäle Daten versenden zu dürfen. Durch das Versenden eines *Cyclic Prefix* und einer Signatur auf dem PRACH werden Endgerät und Basisstation synchronisiert und sind damit bereit für weitere Übertragungen.

Der dritte Uplink-Kanal **PUCCH** wird ausschließlich zur Übertragung von Kontrollsignalen verwendet. Darunter versteht man

- positive und negative Empfangsbestätigungen (ACK/NACK),
- Anfragen nach wiederholter Übertragung (im Falle eines NACK), sowie
- den Austausch von Informationen über die Kanalqualität zwischen Endgerät und Basisstation.

Die Beschreibung der physikalischen Kanäle des LTE-Uplinks wird auf der nächsten Seite fortgesetzt.

Physikalische Kanäle im Uplink (2)

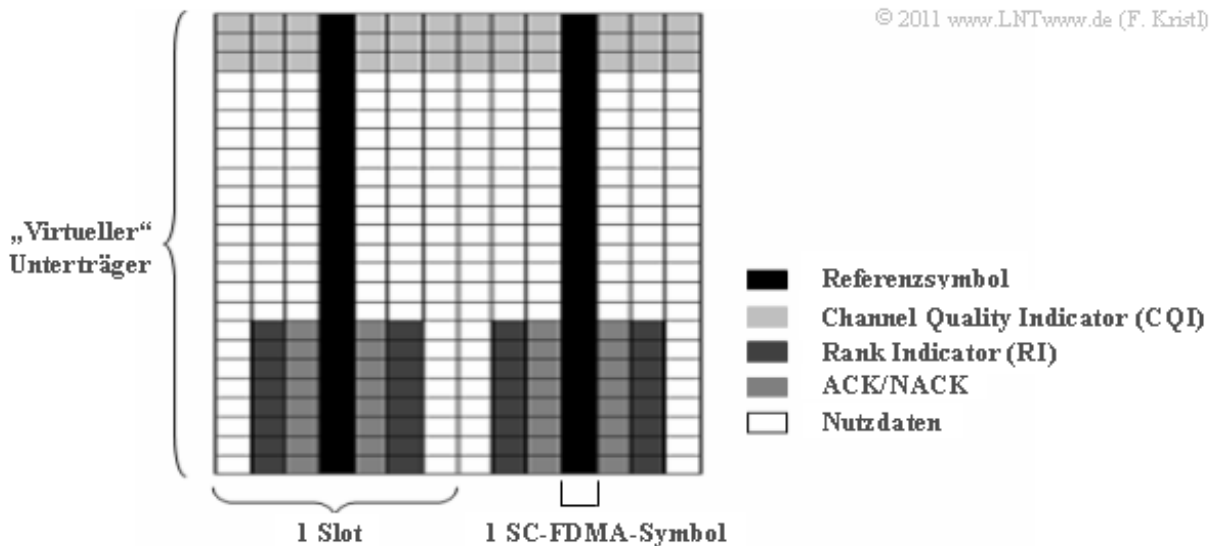
Werden gleichzeitig Nutzdaten vom Endgerät zur Basisstation gesendet, so kann die Übertragung solcher Kontrollsignale ebenfalls über den PUSCH erfolgen. Sind keine Nutzdaten zu übertragen, wird dagegen PUCCH verwendet.

Eine gleichzeitige Verwendung von PUSCH und PUCCH ist aufgrund von Einschränkungen durch das Einträger-Übertragungsschemas SC-FDMA nicht möglich. Hätte man für alle Kontrollinformationen nur einen *Shared Channel* gewählt, so hätte man sich entscheiden müssen zwischen

- zwischenzeitlichen Problemen bei der Nutzdatenübertragung, oder
- dauerhaft zu wenige Ressourcen für die Kontrollinformationen.

Die Informationen über die Kanalqualität werden mit Hilfe sogenannter Referenzsymbolen gewonnen. Als Indikatoren für die Kanalqualität werden dann Informationen zum *Channel Quality Indicator (CQI)* und zum *Rank Indicator (RI)* versendet. Eine detaillierte Erklärung zur Gewährleistung der Kanalqualität findet sich zum Beispiel in [HR09] oder [HT09].

Die Referenzsymbole bzw. Kanalqualitätsinformationen sind im PUSCH folgendermaßen verteilt:



Diese Grafik beschreibt die Anordnung der Nutzinformation und der Signalingdaten in einem „virtuellen“ Unterträger. Virtuell deshalb, weil es ja bei SC-FDMA keine Unterträger gibt wie bei OFDMA. Die Referenzsymbole sind notwendig, um die Kanalqualität zu schätzen. Diese Informationen werden dann als *Channel Quality Indicator (CQI)* bzw. als *Rank Indicator (RI)* ebenfalls über den PUSCH übertragen.

Physikalische Kanäle im Downlink (1)

Im Gegensatz zum Uplink verwendet LTE im Downlink – also bei der Übertragung von der Basisstation zum Endgerät – das Vielfachzugriffsverfahren **OFDMA**. Entsprechend wurden vom 3GPP-Konsortium hierfür folgende physikalische Kanäle spezifiziert:

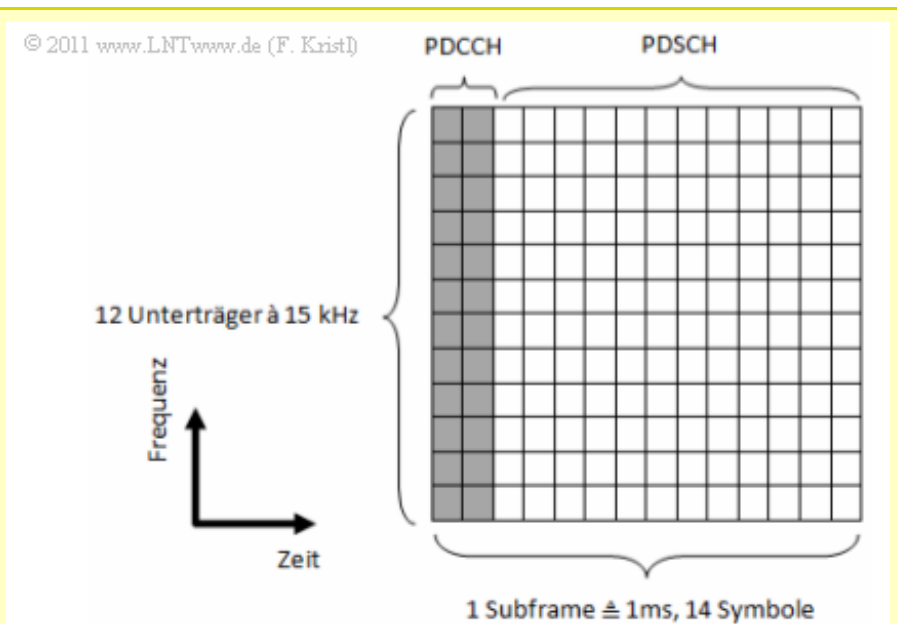
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*,
- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*,
- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*,
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*,
- *Physical Broadcast Channel (PBCH)*,
- *Physical Multicast Channel (PMCH)*.

Die Nutzdaten werden über den **PDSCH** übertragen. Die Ressourcenzuweisung geschieht sowohl im Zeitbereich (mit einer Auflösung von 1 ms) als auch im Frequenzbereich (Auflösung: 180 kHz). Aufgrund der Verwendung von OFDMA als Übertragungsverfahren hängt die individuelle Geschwindigkeit jedes Nutzers von der Anzahl der zugewiesenen Ressourcenblöcke (à 180 kHz) ab. Ein *eNodeB* vergibt die Ressourcen bezogen auf die Kanalqualität jedes einzelnen Nutzers.

Im **PDCCH** sind alle Informationen bezüglich der Zuweisung von Ressourcenblöcken bzw. Bandbreite sowohl für den Uplink als auch für den Downlink enthalten. Ein Endgerät erhält dadurch Informationen, wie viele Ressourcen zur Verfügung stehen.

Beispiel: Die Grafik zeigt an einem Beispiel die Aufteilung zwischen den beiden Kanälen PDCCH und PDSCH.

Der Kanal PDCCH kann pro Subframe bis zu vier Symbole belegen (in der Grafik: zwei).



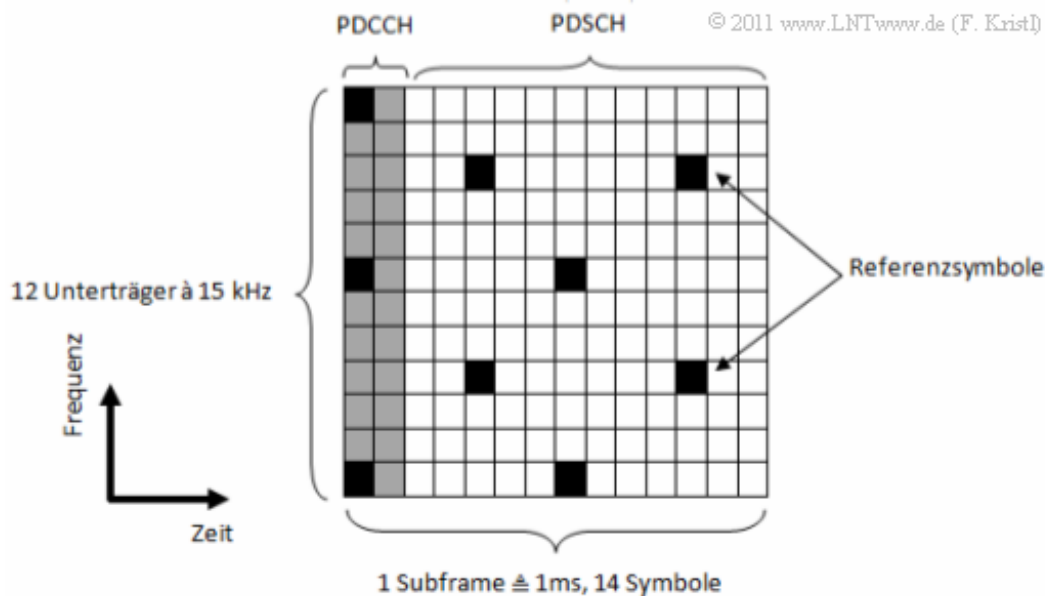
Die weiteren physikalischen Kanäle des LTE-Downlinks werden auf der nächsten Seite beschrieben.

Physikalische Kanäle im Downlink (2)

Die Beschreibung der physikalischen Kanäle des LTE-Downlinks wird fortgesetzt: Über den Kanal **PCFICH** wird dem Endgerät mitgeteilt, wie viele Symbole den Kontrollinformationen des **PDCCH** zuzuordnen sind. Sinn dieser dynamischen Aufteilung zwischen Kontroll- und Nutzdaten ist folgender:

- Einerseits können viele Nutzer mit niedriger Datenrate (zum Beispiel zur Sprachübertragung) unterstützt werden. Dieses Szenario benötigt eine größere Abstimmung, das heißt, in diesem Fall würde der **PDCCH** drei oder vier Symbole umfassen.
- Andererseits kann man den durch **PDCCH** bedingten Overhead soweit reduzieren, dass bei wenigen gleichzeitigen Nutzern diesen eine hohe Datenrate gewährt werden kann.

Über den **PDCCH** hinaus werden auch im Downlink Referenzsymbole benötigt, um die Kanalqualität zu schätzen und den *Channel Quality Indicator* (CQI) zu berechnen. Diese Referenzsymbole sind gemäß der folgenden Grafik auf die Unterträger bzw. Symbole verteilt.



Zu den anderen physikalischen Kanälen des LTE-Downlinks ist anzumerken:

- Die einzige Aufgabe des Downlink-Kanals **PHICH** (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) ist es zu signalisieren, ob ein im Uplink verschicktes Paket angekommen ist.
- Über den Broadcast-Kanal **PBCH** (*Physical Broadcast Channel*) versenden die Basisstationen ungefähr alle 40 Millisekunden an alle mobilen Endgeräte in der Funkzelle Systeminformationen mit Betriebsparameter sowie Synchronisationssignale, die zur Anmeldung im Netz benötigt werden.
- Einen ähnlichen Zweck hat der Multicast-Kanal **PMCH** (*Physical Multicast Channel*), worüber Informationen für sogenannte Multicast-Übertragungen – zu mehreren Empfängern gleichzeitig – gesendet werden. Es kann sich zum Beispiel um das in einem zukünftigen Release geplanten mobilen Fernsehen via LTE oder um Ähnliches handeln.

Abläufe in der physikalischen Ebene (1)

Unter „Abläufen in der physikalischen Ebene“ versteht man verschiedene Methoden und Verfahren, die in der Bitübertragungsschicht Anwendung finden. Darunter fallen unter anderem:

- *Timing Advance*,
- *Paging*,
- *Random Access*,
- *Channel Feedback Reporting*,
- *Power Control*,
- *Hybrid Adaptive Repeat and Request*.

Eine komplette Auflistung mit zugehöriger Beschreibung findet sich zum Beispiel in [HT09]. Hier soll nur auf die beiden letztgenannten Verfahren etwas genauer eingegangen werden.

Leistungsregelung (englisch: *Power Control*)

Unter *Power Control* versteht man im Allgemeinen die Regelung der Übertragungsleistung mit dem Ziel, die Übertragungsqualität zu verbessern, die Netzkapazität zu vergrößern und den Stromverbrauch zu verringern. Die Ziele bei der Standardisierung von LTE waren:

- Einerseits sollte der Stromverbrauch in den Endgeräten minimiert werden, um für diese längere Batterielaufzeiten zu gewährleisten.
- Andererseits sollte verhindert werden, dass die Basisstationen eine zu große Leistungsspanne bereithalten müssen.

Bei LTE wird *Power Control* nur im Uplink angewandt, wobei es sich eher um eine „langsame“ Leistungsregelung handelt. Damit ist gemeint, dass das in LTE spezifizierte Verfahren nicht so schnell reagieren muss wie beispielsweise bei UMTS (*W-CDMA*). Der Grund ist, dass durch Verwendung des orthogonalen Trägersystems *SC-FDMA* das sogenannte **Near-Far-Problem** nicht existiert.

Genau genommen wird bei LTE durch *Power Control* nicht die absolute Leistung kontrolliert, sondern die spektrale Leistungsdichte, also die Leistung pro Bandbreite. Anstatt zu versuchen, Leistungsspitzen durch zeitweiliges Reduzieren der Übertragungsleistung zu glätten, können solche Leistungsspitzen auch zur kurzzeitigen Erhöhung der Datenrate ausgenutzt werden.

Insgesamt soll durch die LTE-Leistungsregelung die optimale Balance gefunden werden zwischen einer möglichst geringen Leistung und gleichzeitig einer für die Übertragungsqualität (QoS) noch akzeptablen Interferenz. Dies wird konkret erreicht durch Abschätzen des Verlustes bei der Übertragung sowie die Berechnung eines Korrekturfaktors entsprechend den momentanen Standorteigenschaften. Die hier gemachten Aussagen stammen großteils aus [DFJ08].

Abläufe in der physikalischen Ebene (2)

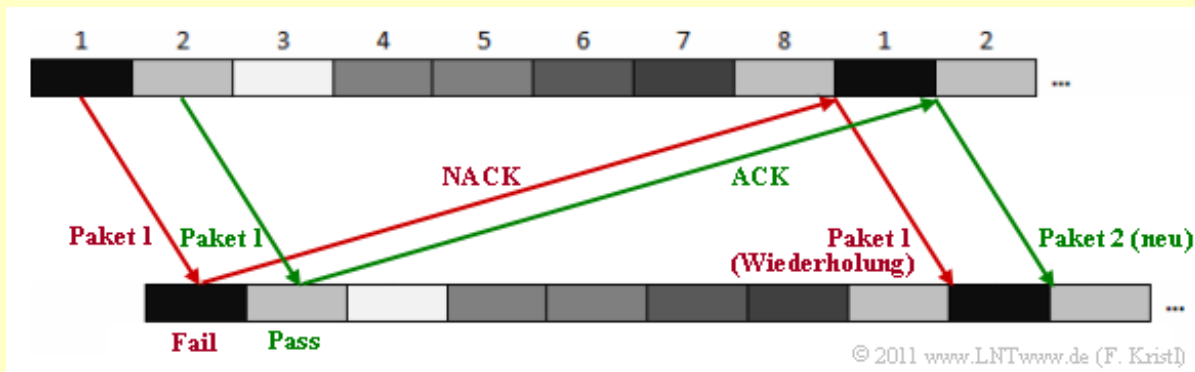
Hybrid Adaptive Repeat and Request

Jedes Kommunikationssystem benötigt zur Sicherstellung einer ausreichenden Übertragungsqualität ein Schema zur erneuten Übertragung verloren gegangener Daten aufgrund auftretender Übertragungsfehler. In LTE wurde hierfür *Hybrid Adaptive Repeat and Request* (HARQ) spezifiziert. Dieses Verfahren wird auch bei UMTS in ähnlicher Form eingesetzt.

Der auf der *Stop-and-wait*-Technik basierende Ablauf ist folgender: Nachdem ein Endgerät ein Paket von der Basisstation erhalten hat, wird es decodiert und es wird ein Feedback über den PUCCH gesendet. Im Falle einer fehlgeschlagenen Übertragung („NACK“) wird das Paket erneut gesendet. Erst wenn die Übertragung erfolgreich war (Feedback: „ACK“), wird das nächste Paket verschickt.

Um trotz der *Stop-and-wait*-Prozedur eine kontinuierliche Datenübertragung zu gewährleisten, benötigt LTE mehrere gleichzeitige HARQ-Prozesse. In LTE werden sowohl im Uplink als auch im Downlink jeweils acht parallele Prozesse verwendet.

Beispiel: Die Grafik verdeutlicht die Funktionsweise bei acht gleichzeitigen HARQ-Prozessen. Der erste Prozess scheitert in diesem Beispiel im ersten Versuch bei der Übertragung von Paket 1. Der Empfänger teilt dieses „Fail“ dem Sender durch ein „NACK“ mit. Dagegen ist der zweite parallel ablaufende Prozess mit seinem ersten Paket erfolgreich: „Pass“.



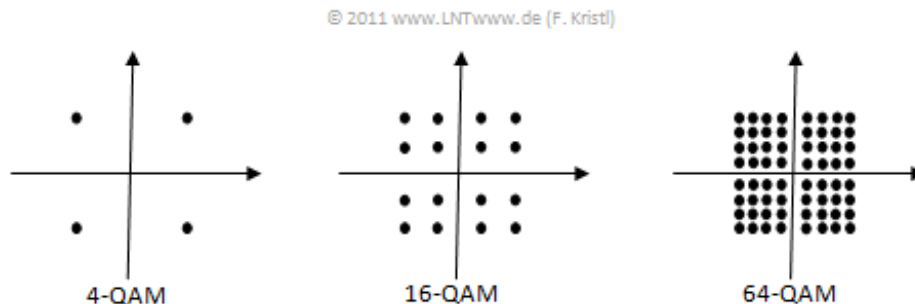
Im nächsten Schritt sendet der erste HARQ-Prozess nach Erhalten von „NACK“ sein erstes Paket nochmals. Der zweite Prozess sendet hingegen aufgrund der Quittierung „ACK“ nun ein neues Paket. Ebenso verfahren die anderen Prozesse, die in diesem Beispiel außer Acht gelassen wurden.

Modulation bei LTE (1)

LTE verwendet das Modulationsverfahren **Quadratur-Amplitudenmodulation** (englisch: *Quadrature Amplitude Modulation*, QAM). Dabei stehen sowohl im Uplink als auch im Downlink verschiedene Varianten zur Verfügung, nämlich

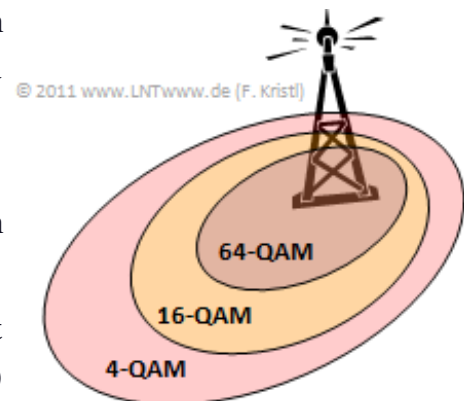
- 4-QAM (identisch mit QPSK) \Rightarrow 2 bit pro Symbol,
- 16-QAM \Rightarrow 4 bit pro Symbol,
- 64-QAM \Rightarrow 6 bit pro Symbol.

Die folgende Grafik zeigt die Signalraumkonstellationen dieser Varianten.



Je nach Umgebungsbeschaffenheit bzw. je nach Entfernung zur Basisstation wählt der **Scheduler** das passende Modulationsverfahren (siehe nachfolgende Grafik):

- 64-QAM ermöglicht die besten Datenraten, ist aber auch am anfälligsten gegenüber Übertragungsstörungen und wird daher nur in der Nähe der Basisstationen verwendet.
- Je schwächer die Verbindung ist, desto einfacher muss das Modulationsverfahren sein, desto geringer wird aber auch die spektrale Effizienz (in bit/s pro Hertz).
- Sehr robust ist 4-QAM. Dieses Modulationsverfahren mit nur 2 bit pro Symbol (je eines für Real- und Imaginärteil) kann man auch noch für deutlich größere Entfernungen anwenden als beispielsweise 16-QAM.
- Aufgrund der genau gleichen Signalraumkonstellation bezeichnet man die 4-QAM häufig auch als *Quaternary Phase Shift Keying* (QPSK). Die vier Signalraumpunkte sind zum einen quadratisch angeordnet (QAM-Prinzip). Sie liegen aber auch auf einem Kreis (Kennzeichen der PSK).

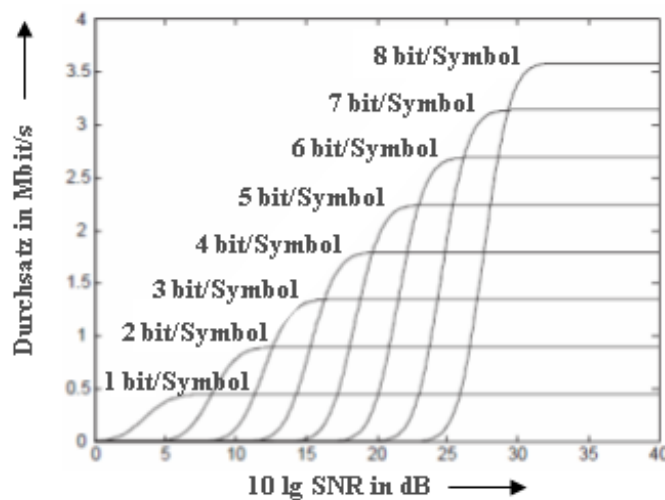


Hinweis: Die Quadratur-Amplitudenmodulation ist keine LTE-spezifische Entwicklung, sondern wird auch bei vielen bereits etablierten kabelgebundenen Übertragungsverfahren verwendet, wie zum Beispiel **Digital Subscriber Line** (DSL).

Modulation bei LTE (2)

Die nachfolgende Grafik, entnommen aus [MG08], gibt folgenden Sachverhalt wieder:

- Mit QPSK (2 bit/Symbol) erreicht man im LTE-Uplink bei den in [MG08] getroffenen Annahmen einen Durchsatz (englisch: *Throughput*) von knapp einem Mbit/s.
- Erst ab einer gewissen Signalstärke (englisch: *Signal-to-Noise Ratio*, SNR) verwendet man eine höherstufige QAM, zum Beispiel 16-QAM (4 bit/Symbol) oder 64-QAM (8 bit/Symbol).
- Ist das SNR hinreichend groß, so werden mit zunehmender Stufenzahl um so bessere Ergebnisse hinsichtlich des Datendurchsatzes erzielt.



Anzumerken ist, dass in den Kontrollkanälen stets die niederratige QPSK (2-QAM) verwendet wird, da diese Informationen

- einerseits auf Grund ihrer geringen Größe keine hohen Datenraten benötigen, und
- andererseits auf Grund ihrer Wichtigkeit (nahezu) fehlerfrei empfangen werden sollten.

Eine Ausnahme bildet der Kanal **PUSCH** im Uplink, der sowohl Nutz- als auch Kontrolldaten überträgt. Aus diesem Grund wird hier für beide Signale die gleiche Modulationsart verwendet.

Scheduling bei LTE

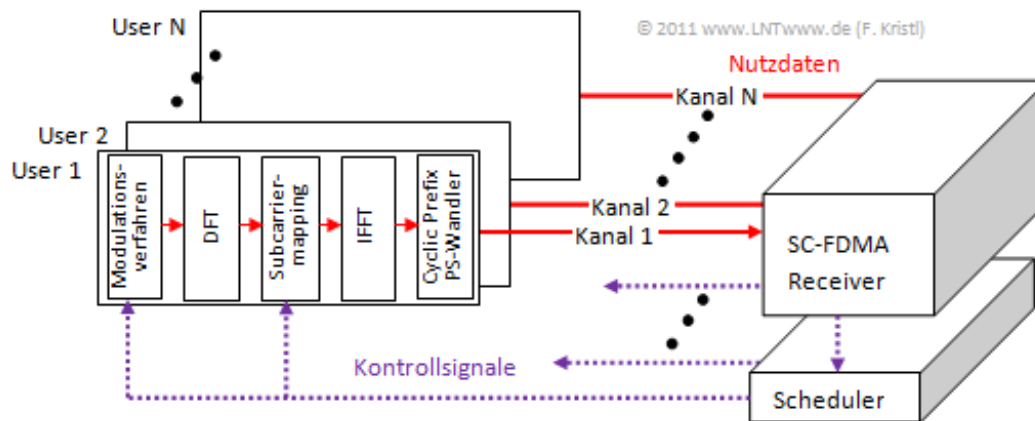
Alle LTE-Basisstationen enthalten einen Scheduler, der zwischen

- einer möglichst großen Gesamtübertragungsrate
- bei gleichzeitig ausreichend guter Übertragungsqualität (englisch: *Quality of Service*, QoS)

abwägt. Ein QoS-Kriterium ist zum Beispiel die *Paketerzögerungsdauer*. Der Scheduler versucht also, mit Hilfe von Algorithmen die Gesamtsituation zu optimieren.

Scheduling ist notwendig, um eine faire Ressourcenverteilung zu gewährleisten. Ein konkretes Beispiel ist, dass einem Nutzer, der momentan zwar einen schlechten Kanal und damit eine geringe Effizienz besitzt, trotzdem ausreichend viele Ressourcen zugeordnet werden müssen, da sonst die angestrebte (und ihm garantierte) Übertragungsqualität nicht eingehalten werden kann.

Der Scheduler kontrolliert dazu einerseits die Auswahl des Modulationsverfahrens und andererseits das **Subcarrier-Mapping**. Die Funktionsweise des Schedulers wird anhand der folgenden Grafik für den Uplink verdeutlicht. Für den Downlink gelten ähnliche Aussagen.



Basierend auf [SABM06], [WGM07] und [MG08] ist zusammenfassend zu vermerken:

- Scheduler-Algorithmen sind aufgrund der vielen Optimierungskriterien, Parameter und möglichen Szenarien oft sehr kompliziert. Beim Entwurf geht man daher meist von einem optimalen System aus, bei dem jede Basisstation die Kanalübertragungsfunktionen zu jeder Zeit ausreichend genau kennt und die Übertragungsverzögerung kein Problem darstellt.
- Aus diesen Randbedingungen werden mit Hilfe von mathematischer Analyse verschiedene Ansätze erstellt [WGM07], deren Effektivität nur über praktische Tests überprüft werden kann. Eine ausführliche Beschreibung solcher Tests findet sich beispielsweise in [MG08].
- Prinzipiell kann die Gesamtübertragungsrate durch kanalabhängiges Scheduling (Ausnutzen von Frequenzselektivität) erhöht werden, allerdings verbunden mit einem großen hohen Overhead, da Testsignale über die komplette Bandbreite gesendet werden müssen und die Informationen an alle Endgeräte zu verteilen sind, wenn das komplette Optimierungspotential ausgenutzt werden soll.
- In verschiedenen Tests zeigten sich die eindeutigen und signifikanten Vorteile (Verdoppelung des Durchsatzes) von kanalbasiertem Scheduling, aber auch die zu erwartenden Verluste bei sich schneller bewegenden Nutzern. Mehr dazu in dem empfehlenswerten Dokument [SABM06].

Aufgrund vieler Vorteile ist Scheduling fester Bestandteil des vom 3GPP spezifizierten LTE-Release 8.

Wie schnell ist LTE wirklich?

Von bereits etablierten kabelbasierten Diensten wie beispielsweise **DSL** (*Digital Subscriber Line*) ist der Verbraucher gewöhnt, die angebotene Geschwindigkeit (zumindest weitgehend) auch nutzen zu können. Wie verhält es sich jedoch bei LTE? Welche Datenraten kann der einzelne LTE-Nutzer tatsächlich erreichen? Hier ist für die Provider wesentlich schwieriger, konkrete Angaben zur Datenrate zu machen, da bei einer Funkverbindung sehr viel mehr Einflüsse berücksichtigt werden müssen, die nur schwer vorhersagbar sind.

Wie bereits im **Kapitel 4.2** beschrieben, sind nach derzeitiger Planung mit LTE im Downlink Datenraten bis zu 326 Mbit/s möglich und im Uplink ca. 86 Mbit/s. Dabei handelt es sich aber um die maximal erreichbaren Werte. In der Realität wird aber die Geschwindigkeit von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Wir beziehen uns im Folgenden auf den Downlink – siehe **[Gut10]**:

- Da LTE ein sogenanntes *Shared Medium* ist, müssen sich alle Teilnehmer in einer Zelle die Gesamtdatenrate 326 Mbit/s teilen. Zu beachten ist, dass Sprachübertragung oder eine normale Nutzung des Internets weniger Verkehr erzeugt als zum Beispiel *Filesharing* oder Ähnliches.
- Je schneller sich ein Nutzer bewegt, desto geringer ist seine Datenrate. Ein elementarer Bestandteil der LTE-Spezifikation ist, dass für eine Mobilität bis 15km/h jeweils die höchsten Datenraten garantiert werden und bis 300 km/h zumindest noch „gute Funktionalität“.
- Die höchste theoretische Datenrate kann nur in nächster Nähe zur Basisstation erreicht werden. Je weiter ein Teilnehmer von dieser entfernt ist, desto geringer wird die Übertragungsgeschwindigkeit, was u. a. auf das Umschalten von 64-QAM bzw. 16-QAM auf 4-QAM (QPSK) zu erklären ist.
- Eine Abschirmung durch Wände und Gebäude oder das Vorhandensein von Störquellen jeglicher Art begrenzen die erreichbare Datenrate. Optimal wäre eine Sichtverbindung zwischen Empfänger und Basisstation (englisch: *Line of Sight*, LoS), ein Szenario, das eher selten anzutreffen ist.

Die Realität sieht im Sommer 2011 so aus: LTE ist bereits in einigen Ländern (zumindest testweise) verfügbar. Dazu gehören außer dem LTE-Vorreiter Schweden auch die USA und Deutschland. In verschiedenen Tests wurden Download-Geschwindigkeiten zwischen 5 und 12 Mbit/s erreicht, bei sehr guten Bedingungen bis zu 40 Mbit/s. Details finden Sie in einem **PDF-Dokument** von CNN.

Darüber hinaus scheint das momentan existierende LTE-Netz aufgrund zu hoher Verzögerungszeiten und den daraus resultierenden gelegentlichen Verbindungsunterbrechungen noch nicht bereit, die etablierten kabelgebundene Internetanschlüsse zu ersetzen. Die Entwicklung auf diesem Gebiet schreitet jedoch mit Riesenschritten voran, sodass diese Information vom Sommer 2011 nicht allzu lang aktuell sein dürfte.

Einige Systemverbesserungen durch LTE-Advanced (1)

Während im Sommer 2011 die ersten LTE-Systeme entsprechend dem Release 8 vom Dezember 2008 langsam auf den Markt kommen, steht der Nachfolger bereits vor der Tür. Das im Juni 2011 fertig gestellte Release 10 des 3GPP ist **Long Term Evolution-Advanced**, oder kurz LTE-A. Es erfüllt als erste Technologie die Anforderungen der ITU (*International Telecommunication Union*) an einen 4G-Standard. Eine Zusammenstellung dieser Anforderungen – auch IMT-Advanced genannt – finden Sie sehr detailliert auf der **ITU-Website**.

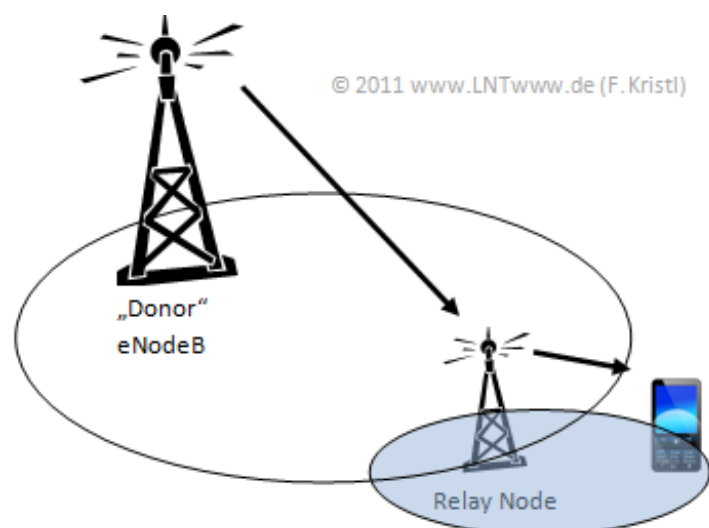
Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hier einige Eigenschaften von LTE-Advanced genannt:

1. Die Datenrate soll bei geringer Bewegung des Teilnehmers bis zu 1 Gbit/s betragen, bei schneller Bewegung bis zu 100 Mbit/s. Um diese Übertragungsgeschwindigkeiten zu erreichen, wurden einige neue technische Spezifikationen getroffen, auf die hier kurz eingegangen werden soll.
2. LTE-Advanced unterstützt Bandbreiten bis maximal 100 MHz, während die LTE-Spezifizierung (nach Release 8) nur 20 MHz vorsieht. Dabei müssen die FDD-Spektren nicht mehr symmetrisch zwischen Uplink und Downlink aufgeteilt sein. Es kann also zum Beispiel für den Downlink eine höhere Kanalbandbreite verwendet werden als für den Uplink, was der normalen Nutzung des mobilen Internets mit einem Smartphone entspricht.
3. Im Uplink von LTE-Advanced wird weiterhin SC-FDMA im verwendet, aber es wurden einige Verbesserungen im Ablauf erarbeitet, da das 3GPP mit der SC-FDMA-Übertragung bei LTE nicht zufrieden war.
4. Eine weitere interessante Neuheit stellt die Einführung sogenannter **Relay Nodes** dar. Ein solches *Relay Node* (RN) wird am Rand einer Zelle aufgestellt, um für bessere Übertragungsqualität an den Grenzen einer Zelle zu sorgen und so die Reichweite der Zelle zu erhöhen.

Ein *Relay Node* sieht für ein Endgerät aus wie eine normale Basisstation (eNodeB). Sie muss aber nur ein relativ kleines Einsatzgebiet versorgen und muss deshalb nicht aufwändig an das Backbone angeschlossen werden. In den meisten Fällen ist ein RN über Richtfunk mit der nächsten Basisstation verbunden.

Auf diese Art und Weise werden ohne allzu großen Aufwand hohe Datenraten und gute Übertragungsqualität ohne Unterbrechungen gewährleistet. Durch Erhöhen der räumlichen Nähe zu den Basisstationen wird damit auch die Empfangsqualität in Gebäuden verbessert.

Die Aufzählung der LTE-Neuerungen wird auf der nächsten Seite fortgesetzt.



Einige Systemverbesserungen durch LTE-Advanced (2)

5. Ein weiteres bei LTE-A hinzugekommenes Feature ist unter der Bezeichnung *Coordinated Multiple Point Transmission and Reception (CoMP)* bekannt. Damit versucht man, den störenden Einfluss von Interzellinterferenzen zu reduzieren. Mit intelligentem Scheduling über mehrere Basisstationen hinweg gelingt es sogar, Interzellinterferenz nutzbar zu machen. Dabei steht die Information für ein Endgerät an zwei benachbarten Basisstationen zur Verfügung und kann gleichzeitig übertragen werden. Details zur CoMP-Technik finden sich zum Beispiel in dem Whitepaper **LTE-Advanced Technology Instruction der Fa. Rohde & Schwarz**.

6. Durch die genannten Maßnahmen in Kombination mit vielen weiteren Verbesserungen gelingt es, die spektrale Effizienz (darunter versteht man den übertragbaren Informationsfluss in einem Hertz Bandbreite innerhalb einer Sekunde) von LTE-A gegenüber LTE signifikant zu erhöhen, und zwar

- im *Downlink* von 15 bit/s/Hz auf **30 bit/s/Hz**,
- im *Uplink* von 3.75 bit/s/Hz auf **15 bit/s/Hz**.

7. Natürlich muss zusätzlich auch die Rückwärtskompatibilität zum vorangegangenen Standard LTE und zu früheren Mobilfunksystemen gewährleistet werden. Auch mit einem UMTS-Handy sollte man sich in ein LTE-Netz einwählen können, auch wenn man die LTE-spezifischen Features nicht nutzen kann.

Anfang Juni 2011 gab es bereits die ersten Tests zu LTE-Advanced. Schweden, das bereits das erste kommerzielle LTE-Netz aufgebaut hat, übernahm auch hier wieder die Vorreiterrolle. Die Fa. Ericsson demonstrierte erstmals ein Testsystem mit praxistauglichen, handelsüblichen Endgeräten und will nach eigenen Angaben bereits 2013 mit der kommerziellen Nutzung von LTE-Advanced beginnen. In einem **Youtube-Video** ist ein LTE-Test in einem fahrenden Kleinbus zu sehen, bei dem Datenraten von über 900 Mbit/s im Downlink und 300 Mbit/s im Uplink erreicht wurden.

Standards in Konkurrenz zu LTE bzw. LTE-Advanced

Neben dem vom 3GPP-Konsortium spezifizierten LTE gibt es weitere Standards, die der schnellen mobilen Datenübertragung dienen sollen. Hier soll kurz auf die zwei wichtigsten eingegangen werden:

cdma2000 (oder IS-2000) und dessen Weiterentwicklung **UMB** (*Ultra Mobile Broadband*):

Hierbei handelt es sich um einen Mobilfunkstandard der dritten Generation, der vom **3GPP2** (*Third Generation Partnership Project 2*) spezifiziert und weiterentwickelt wurde. Weitere Informationen zu cdma2000 finden Sie im **Kapitel 4.1** des Buches „Beispiele von Nachrichtensystemen“.

Das 3GPP2 wurde nahezu zeitgleich mit dem fast namensgleichen **3GPP** im Dezember 1998 gegründet, offenbar aufgrund von ideologischen Differenzen.

Über die Weiterentwicklung dieses Standards ist weitaus weniger bekannt als zu LTE. Erwähnenswert ist, dass es für cdma2000 und UMB einen ausschließlich für Datenübertragung spezifizierten Substandard gibt. Der Kölner Telekommunikationsanbieter *NetCologne* bietet auf dieser Basis mobiles Internet im Bereich um 450 MHz an. Darüber hinaus ist cdma2000 in Deutschland unbedeutend.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*):

Unter dieser Bezeichnung versteht man eine auf dem IEEE-Standard 802.16 basierende drahtlose Übertragungstechnik. Sie gehört damit wie auch WLAN (802.11) und Ethernet (802.3) zur Familie der 802-Standards. Es gibt zwei verschiedene Unterspezifikationen zu WiMAX, nämlich

- einen für den Betrieb einer statischen Verbindung, die kein Handover erlaubt, und
- einen für den mobilen Betrieb, der UMTS und LTE Konkurrenz machen soll.

Das Potential der statischen WiMAX-Verbindungen liegt hauptsächlich in der großen Reichweite bei trotzdem vergleichsweise hoher Datenrate. Aus diesem Grund wurde statisches WiMAX zunächst als DSL-Alternative für wenig besiedelte Gebiete gehandelt. So sind bei einer Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger (*Line of Sight*, LoS) über 15 Kilometer etwa 4.5 Mbit/s möglich. In urbanem Gebiet ohne Sichtverbindung wird für WiMAX immerhin noch eine Reichweite von ca. 600 Meter angegeben, ein deutlich besserer Wert als die 100 Meter, die WLAN typischerweise bietet.

Momentan wird an einer Weiterentwicklung namens WiMAX2 gearbeitet. Nach Aussage der Initiatoren ist WiMAX2 in der mobilen Version ein 4G-Standard, der genau wie LTE-Advanced Datenraten bis zu 1 Gbit/s erreichen kann. Ende 2011 soll WiMAX2 in die Praxis umgesetzt werden. Ob es zu diesem Termin und der prognostizierten Datenrate klappt, wird sich zeigen.

In Deutschland spielt WiMAX (noch) keine besonders große Rolle, da sowohl die Bundesregierung in ihrer Breitbandoffensive als auch alle großen Provider LTE als Zukunft der mobilen Datenübertragung ausgerufen haben.

Meilensteine der Entwicklung von LTE und LTE-Advanced

Abschließend soll ein kurzer Überblick über einige Meilensteine bei der Entwicklung hin zu LTE gegeben werden:

- **2004:** Das japanische Telekommunikationsunternehmen **NTT DoCoMo** schlägt LTE als neuen internationalen Mobilfunkstandard vor.
- **09/2006:** **Nokia Siemens Networks** (NSN) stellt zusammen mit **Nomor Research** erstmals einen Emulator eines LTE-Netzes vor. Zur Demonstration wird ein HD-Video übertragen und zwei Nutzer spielen ein interaktives Onlinespiel.
- **02/2007:** Auf dem *3GSM World Congress*, der weltweit größten Mobilfunkmesse, demonstriert das schwedische Unternehmen **Ericsson** ein LTE-System mit 144 Mbit/s.
- **04/2008:** DoCoMo demonstriert eine LTE-Datenrate von 250 Mbit/s. Nahezu zeitgleich erreicht **Nortel Networks Corp.** (Kanada) 50 Mbit/s bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h.
- **10/2008:** Test des ersten funktionsfähigen LTE-Modems durch Ericsson in Stockholm. Das ist der Startschuss für die kommerzielle Nutzung von LTE.
- **12/2008:** Fertigstellung der Release 8 des 3GPP, gleichbedeutend mit LTE. Das Unternehmen **LG Electronics** entwickelt den ersten LTE-Chip für Mobiltelefone.
- **03/2009:** Auf der CeBIT in Hannover zeigt **T-Mobile** Videokonferenzen und Onlinespiele aus einem fahrenden Auto heraus.
- **12/2009:** Das weltweit erste kommerzielle LTE-Netz startet in der Stockholmer Innenstadt, nur 14 Monate nach Beginn der Testphase.
- **03/2010:** Die chinesische Firma **Huawei Technologies** stellt mit 1.2 Gbit/s einen beachtlichen Geschwindigkeitsrekord für den LTE-Downlink auf.
- **04/2010:** 3GPP beginnt mit der Spezifikation von Release 10, gleichbedeutend mit LTE-A.
- **05/2010:** Die LTE-Frequenzauktion in Deutschland endet. Der Erlös ist mit 4.4 Milliarden Euro deutlich geringer, als von den Experten erwartet und von Politikern erhofft.
- **08/2010:** T-Mobile baut in Kyritz die erste kommerziell nutzbare LTE-Basisstation Deutschlands. Für einen funktionierenden Betrieb fehlen aber noch die passenden Endgeräte.
- **12/2010:** In Deutschland laufen die ersten größeren Pilottests in den Netzen von Telekom, **O2** und **Vodafone** an. Inzwischen sind auch entsprechende LTE-Router verfügbar.
- **02/2011:** In Südkorea werden erste erfolgreiche Tests mit dem Nachfolger LTE-Advanced durchgeführt.
- **03/2011:** Das 3GPP Release 10 ist fertiggestellt.
- **06/2011:** Start des ersten deutschen LTE-Netzes in Köln. Bis Ende 2011 will die Telekom in 100 weiteren Städten für eine großflächige Verbreitung von LTE sorgen.