

Überblick zu Kapitel 4 von Beispiele von Nachrichtensystemen

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) ist ein Mobilfunksystem der *dritten* Generation, das bei seiner Einführung eine zukunftsweisende Alternative zu den bis dahin verwendeten Mobilfunksystemen darstellen sollte. Es bietet im Vergleich zu **GSM** nicht nur eine hochwertigere Sprachqualität, sondern dank seiner schnellen und paketvermittelten Übertragung auch eine Vielfalt erweiterter Dienste und Funktionalitäten.

UMTS wurde Ende der 1990er Jahre im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der *International Telecommunication Union* (ITU) und dem 3GPP–Forum (*3rd Generation Partnership Project*) standardisiert und ist seit 2004 in Europa kommerziell verfügbar. In Deutschland wurden bis Ende 2007 mehr als 10 Millionen Nutzer registriert. Weltweit nutzen derzeit (2011) um die 200 Millionen Teilnehmer UMTS oder ähnliche Mobilfunksysteme der dritten Generation.

Dieses Kapitel beinhaltet im Einzelnen:

- UMTS als Mobilfunksystem der dritten Generation,
- die Dienste und Sicherheitsaspekte in UMTS,
- die UMTS–Netzarchitektur,
- die physikalischen, logischen und Transportkanäle sowie deren Interaktionen,
- die zellulare Architektur in UMTS und deren Mechanismen,
- die in UMTS verwendete Sprach– und Kanalcodierung,
- die Bandspreizung und CDMA als Basis von UMTS,
- die Funkressourcenverwaltung und Leistungsregelung in UMTS–Netzen,
- die Weiterentwicklungen von UMTS wie HSDPA und HSUPA,
- ein Ausblick auf Long Term Evolution (LTE), dem Schlagwort der 4. Generation.

Dem 4G–Standard LTE ist im Buch „Mobile Kommunikation“ ein eigenes Kapitel gewidmet.

Die theoretischen Grundlagen werden auf 54 Bildschirmseiten dargelegt. Außerdem beinhaltet dieses Kapitel noch 65 Grafiken, acht Aufgaben und eine Zusatzaufgabe mit insgesamt 41 Teilfragen sowie sechs Interaktionsmodule:

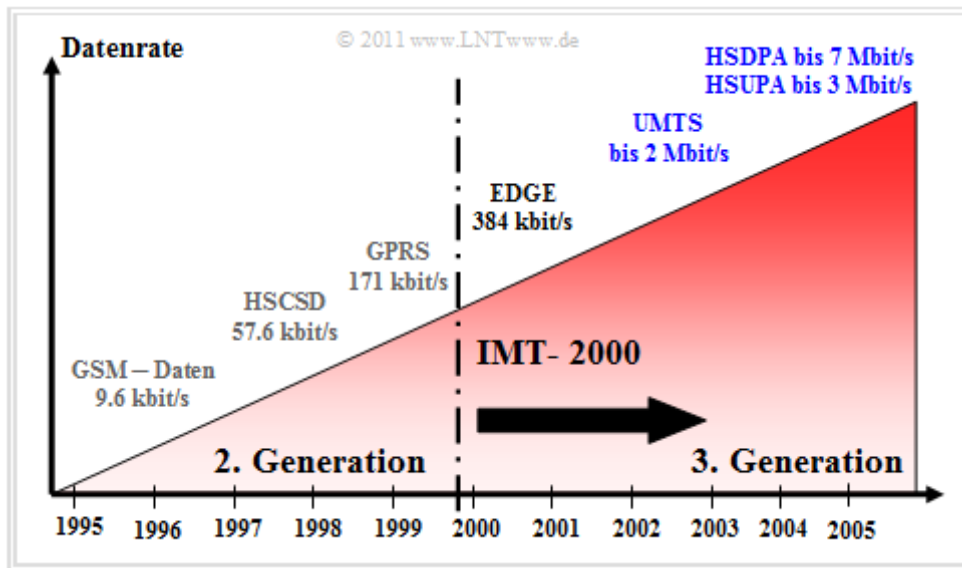
- **Mehrwegeausbreitung und Frequenzselektivität** (IM zu Kapitel 4.1)
- **Zur Verdeutlichung des Dopplereffekts** (IM zu Kapitel 4.1)
- **Handover bei UMTS** (IM zu Kapitel 4.2)
- **Qualität verschiedener Sprach-Codecs** (IM zu Kapitel 4.3 – Dateigröße: 11.3 MB !)
- **Walsh-Funktionen** (IM zu Kapitel 4.3)
- **OVSF-Codes** (IM zu Kapitel 4.3)

Geeignete Literatur: [Bay06] – [BS+02] – [Dre06] – [Hin08] – [HT03] – [Ka+01] – [KM04] – [KVV02] – [MoCh03] – [Mur01] – [Sau06] – [Vie16] – [VLU06] – [Wer06] – [WSA02] – [WSA03]

Bei der Erstellung dieses Kapitel war **Khaled Soussi** im Rahmen seiner Studienarbeit von September 2007 bis März 2008 beteiligt. Die Betreuer dieser Studienarbeit waren Dr.–Ing. **Klaus Eichin** und Prof. Dr.–Ing. habil. **Günter Söder**.

Anforderungen an Mobilfunksysteme der dritten Generation

Die wichtigste Motivation zur Entwicklung von **Mobilfunksystemen der dritten Generation** war die Erkenntnis, dass die Systeme der zweiten Generation den Bandbreitenbedarf zur Nutzung multimedialer Dienste nicht zufrieden stellen konnten. Die Grafik zeigt die Entwicklung der Mobilfunksysteme seit 1995 hinsichtlich Leistungsfähigkeit bzw. Datenübertragungsrate. Die für HSPA angegebenen Datenraten sind für 2006/2007 realistisch. Bis Ende 2008 ist mit einer Erhöhung bis zum Faktor 2.5 zu rechnen. In den Spezifikationen werden dagegen für den Uplink 5.8 Mbit/s und für den Downlink 14.4 Mbit/s (also deutlich höhere Maximalwerte) genannt, die aber in der Praxis wohl nicht erreichbar sein werden.



Die Mobilfunksysteme der dritten Generation sollen über eine größere Bandbreite und eine genügende Reserve an Leistungsfähigkeit verfügen, um auch bei den stetig wachsenden Anforderungen eine hohe Dienstgüte gewährleisten zu können.

Bei der Entwicklung der Systeme der dritten Generation hat die *International Telecommunication Union* (ITU) eine wichtige Rolle gespielt. Sie hat unter anderem einen Anforderungskatalog erstellt, der ihre Eigenschaften festlegt. Dieser Anforderungskatalog umfasst folgende Rahmenbedingungen:

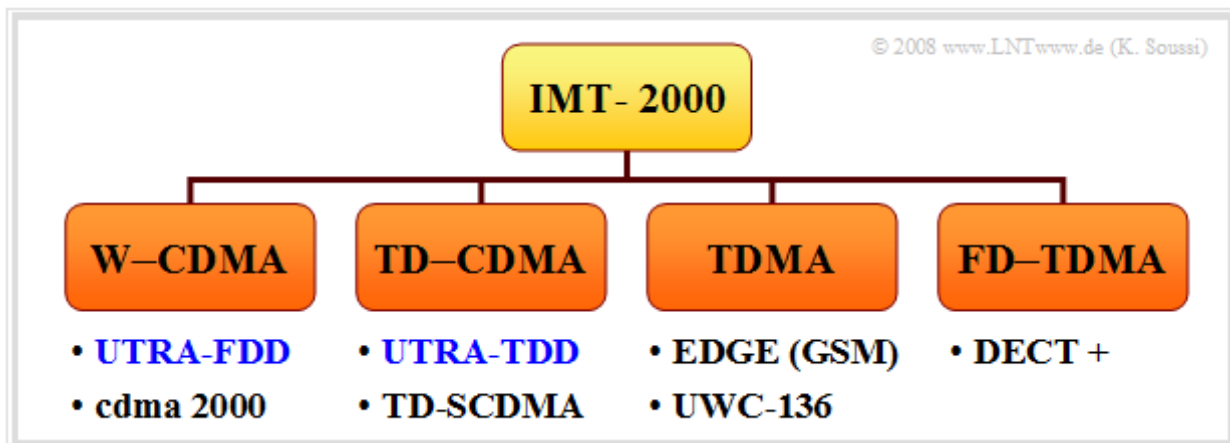
- Hohe Datenraten von 144 kbit/s (Standard) bis 2 Mbit/s (In-door),
- symmetrische und asymmetrische Datenübertragung (IP-Dienste),
- leitungsvermittelte (*circuit-switched*) und paketvermittelte (*packed-switched*) Übertragung,
- hohe Sprachqualität und hohe Spektraleffizienz,
- nahtloser Übergang von Systemen der zweiten Generation,
- globale Erreichbarkeit und Verbreitung,
- Anwendungen unabhängig vom verwendeten Netz (*Virtual Home Environment*).

Der IMT-2000-Standard

Im Jahre 1992 wurde von der *International Telecommunication Union* (ITU) der Standard **IMT-2000** (*International Mobile Telecommunications at 2000 MHz*) ins Leben gerufen, der die genannten Anforderungen ermöglichen sollte. IMT-2000 umfasst eine Reihe verschiedener Mobilfunksysteme der dritten Generation, die im Laufe der Standardisierung aneinander angenähert wurden, um die Entwicklung von gemeinsamen Endgeräten für alle diese Standards zu ermöglichen.

Um national unterschiedliche Vorarbeiten zu berücksichtigen und den Netzbetreibern die Möglichkeit zu geben, die bereits bestehenden Netzarchitekturen zum Teil weiter zu verwenden, beinhaltet IMT-2000 mehrere Einzelstandards. Diese lassen sich grob in vier Kategorien einteilen:

- **W-CDMA:** Dazu zählt man die FDD-Komponente des europäischen UMTS-Standards sowie das amerikanische cdma2000-System.
- **TD-CDMA:** Zu dieser Gruppe zählt die TDD-Komponente von UMTS sowie das chinesische TD-SCDMA, das mittlerweile in den UMTS-TDD-Standard integriert ist.
- **TDMA:** Eine Weiterentwicklung des GSM-Ablegers EDGE und des amerikanischen Pendant UWC-136, auch bekannt als DS-AMPS.
- **FD-TDMA:** Die Weiterentwicklung des europäischen Schnurlos-Telefonie-Standards DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunication*).



Im Folgenden konzentrieren wir uns auf das in Europa entwickelte System **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*), das die beiden erstgenannten Standards W-CDMA und TD-CDMA der Systemfamilie IMT-2000 unterstützt.

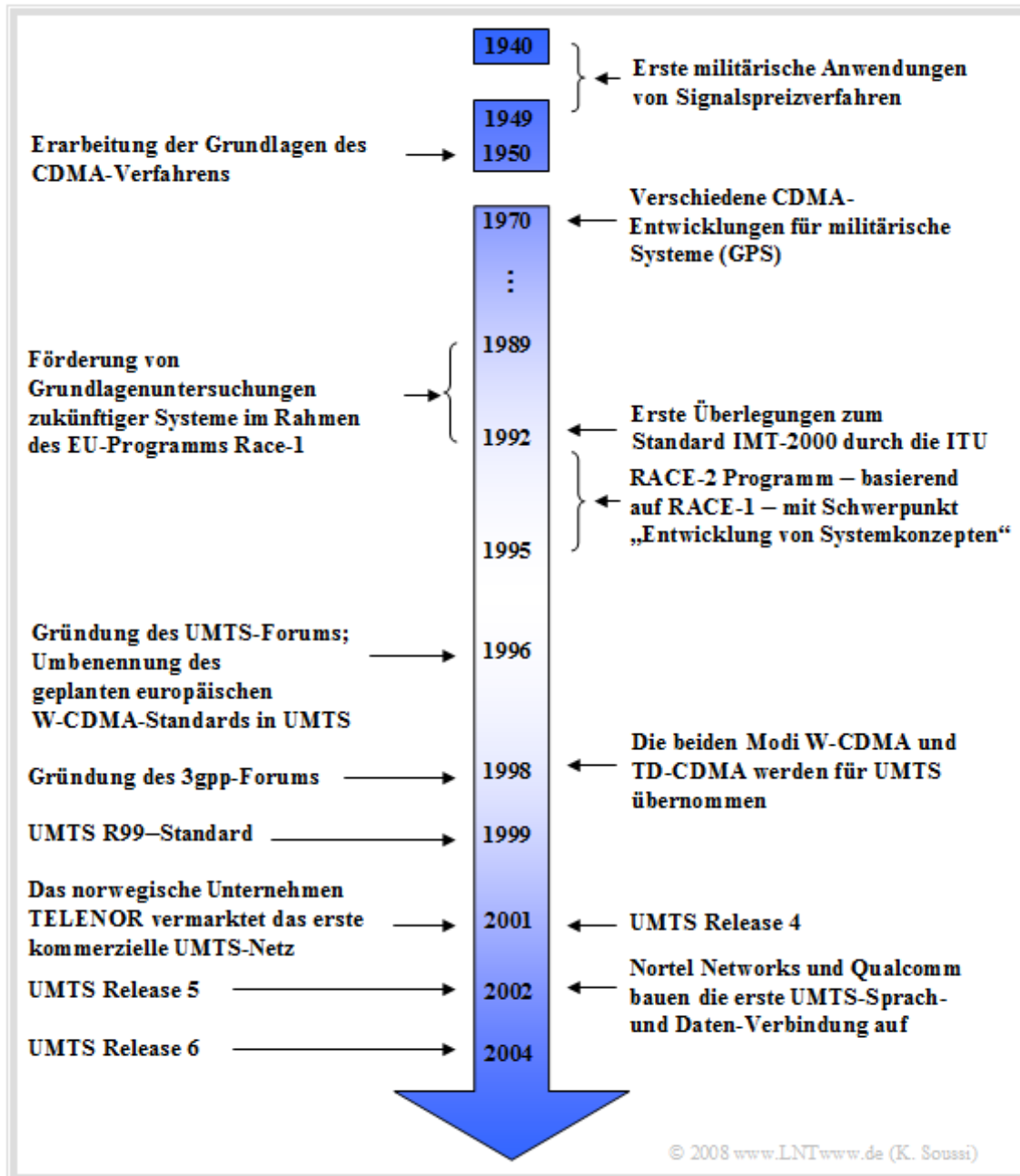
Historische Entwicklung von UMTS (1)

Es folgen einige Daten zur historischen Entwicklung von UMTS und der darin verwendeten Techniken. Weitere Informationen finden Sie beispielsweise unter diesem **Internet-Link**.

- **1940–1950** Erste militärische Anwendungen von Signalspreizverfahren.
- **1949** Erste Grundzüge des CDMA-Verfahrens durch **C. E. Shannon** und **J. R. Pierce**.
- **1970** Verschiedene CDMA-Entwicklungen für militärische Systeme, z.B. GPS.
- **1989–1992** Grundlagenforschung zu den Eigenschaften zukünftiger Mobilfunksysteme im Rahmen des EU-Programms RACE-1 (*Research, Analysis, Communication, Evaluation*).
- **1992** Erste Überlegungen zum Standard IMT-2000 durch die ITU.
- **1992–1995** EU-Programm RACE-2 mit dem Schwerpunkt „Entwicklung von Systemkonzepten“ – basierend auf den Ergebnissen von RACE-1.
- **1996** Gründung des UMTS-Forums in Zürich – Umbenennung des geplanten europäischen Standards „W-CDMA“ in „UMTS“.
- **1998** Übernahme der beiden Modi *W-CDMA* und *TD-CDMA* in den UMTS-Standard auf der ETSI-SMG-Sitzung in Paris.
- **1998** Gründung des *3gpp-Forums* (*3rd Generation Partnership Project*) durch die Gremien ETSI-SMG, T1P1, ARIB TTC und TTA.
- **1999** Verabschiedung des Standards UMTS-R99 (Release 1999) durch die ETSI. Dieser gilt als Basis für die ersten verfügbaren UMTS-Endgeräte.
- **2001** Verabschiedung der Release 4 als Weiterentwicklung von UMTS-R99: *Quality of Service* (QoS) wird nun sowohl an der Funkschnittstelle als auch im Festnetz unterstützt.
- **2001** Erstes kommerzielle UMTS-Netz des norwegischen Unternehmens TELENOR.
- **2002** Verabschiedung der UMTS Release 5: Die an das GSM-Festnetz angelehnte Architektur wird durch ein vollständig IP-basiertes Festnetz ersetzt.
- **2002** Erste UMTS-Sprach- und Datenverbindung von Nortel Networks und Qualcomm. Damit gelten diese beiden Firmen als Vorreiter bei der Umsetzung der UMTS-Technologie.
- **2004** Verabschiedung der UMTS Release 6. Dieser weiterentwickelte Standard bietet dem Nutzer einen verbesserten QoS und dem Anbieter eine effektivere Ressourcenverwaltung.

Historische Entwicklung von UMTS (2)

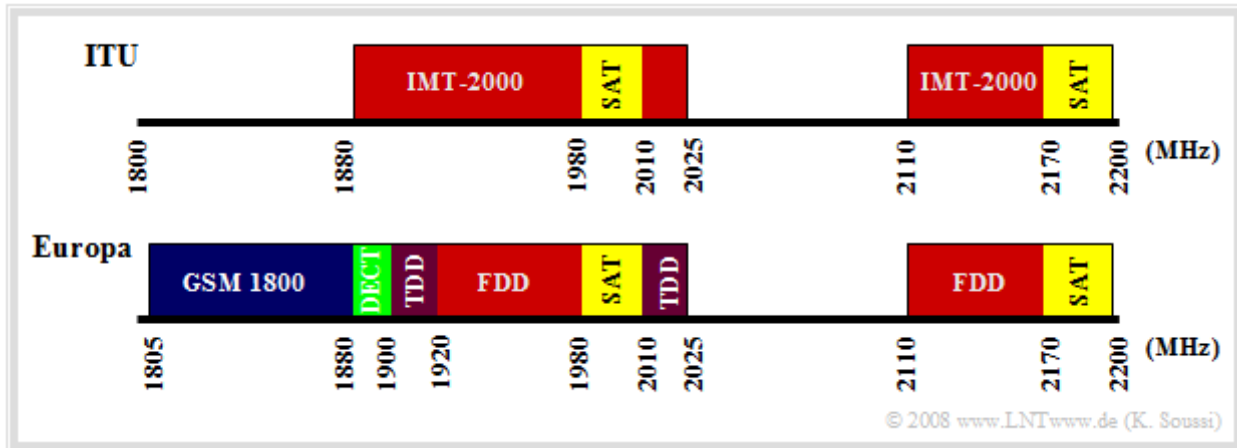
Die Grafik fasst die historische Entwicklung von UMTS nochmals zusammen.



Man erkennt, dass auch bei UMTS zwischen den ersten Konzeptüberlegungen und der endgültigen Einführung mehr als ein Jahrzehnt vergangen ist. Bei der Einführung anderer Kommunikationssysteme (ISDN, DSL, GSM) war dies ähnlich.

Frequenzspektren für UMTS

Zuständig für die Zuweisung von Bandbreiten und Frequenzbänder der Kommunikationssysteme ist die *International Telecommunication Union* (ITU). Insbesondere bei UMTS gibt es Abweichungen zwischen den europäischen und den ITU–Frequenzzuweisungen, da manche Frequenzbänder schon von anderen Mobilfunksystemen belegt sind. In der folgenden Grafik sind die europäische (unten) sowie die ITU–Frequenzzuweisung (oben) dargestellt.



Hierbei bedeuten:

- **GSM 1800** – Frequenzband für den Downlink des GSM 1800,
- **SAT** – satellitengestützte Systeme, jeweils 30 MHz für Uplink und Downlink,
- **DECT** – *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* (Schnurlostelefon– Standard),
- **UTRA–FDD** – *UMTS Terrestrial Radio Access–Frequency Division Duplex*,
- **UTRA–TDD** – *UMTS Terrestrial Radio Access–Time Division Duplex*.

UTRA–FDD (oder kurz FDD) besteht aus 12 gepaarten Uplink– und Downlink–Frequenzbändern zu je 5 MHz Bandbreite. Die Frequenzbänder liegen in Europa zwischen 1920 und 1980 MHz im Uplink sowie zwischen 2110 und 2170 MHz im Downlink.

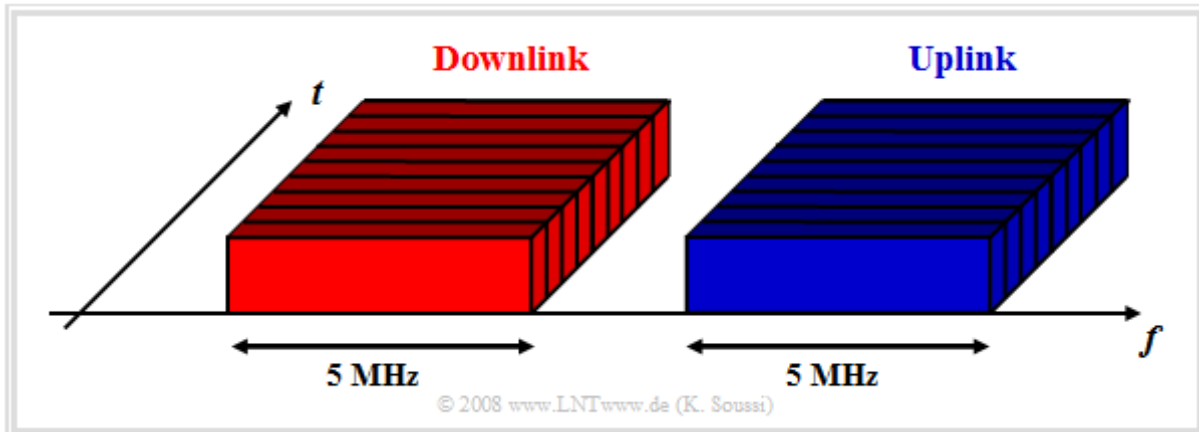
Dagegen besteht UTRA–TDD (oder kurz TDD) aus 5 Frequenzbändern zu je 5 MHz Bandbreite, in denen mittels Zeitmultiplex sowohl Uplink– als auch Downlink–Daten übertragen werden sollen. Für TDD sind die Frequenzen zwischen 1900 und 1920 MHz (vier Kanäle) und zwischen 2020 und 2025 MHz (ein Kanal) reserviert. Das Band zwischen 2010–2020 wurde noch nicht lizenziert und wird deswegen in Deutschland ebenfalls noch nicht genutzt.

Vollduplexverfahren (1)

Um die beiden Übertragungsrichtungen Uplink und Downlink zu trennen, werden in UMTS zwei unterschiedliche Betriebsmodi unterstützt. Man unterscheidet:

- *UMTS Terrestrial Radio Access Frequency Division Duplex (UTRA-FDD)*,
- *UMTS Terrestrial Radio Access Time Division Duplex (UTRA-TDD)*.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Modi zeigt sich vor allem in der physikalischen Ebene des Protokollstapels. Die beiden Verfahren unterscheiden sich dabei sowohl in ihren Duplex- als auch in ihren Vielfachzugriffsverfahren.



Im **UTRA-FDD-Modus** werden – wie in obiger Grafik zu sehen – die Uplink- und Downlink-Daten gleichzeitig auf unterschiedlichen, aber korrespondierenden gepaarten Frequenzblöcken zu je 5 MHz übertragen. Dabei ist zu beachten:

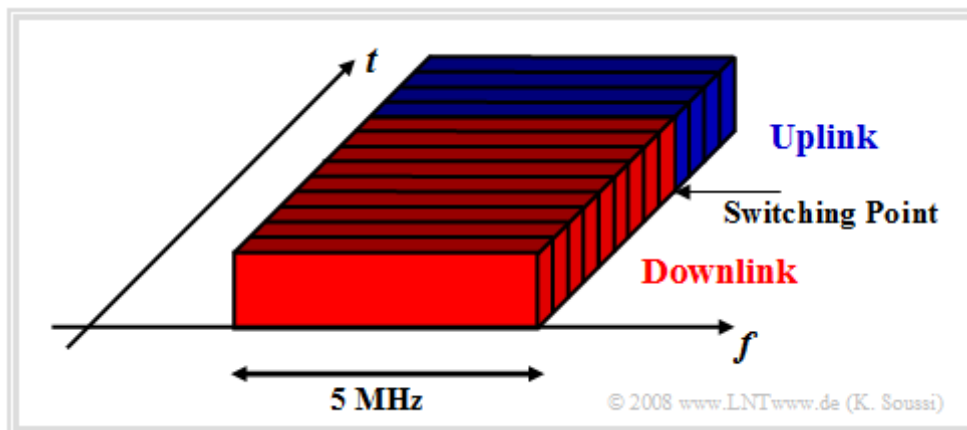
- Daten verschiedener Teilnehmer werden auf dem gleichen Frequenzband gesendet und empfangen. Die Verwendung von verschiedenen *CDMA-Spreizcodes* ermöglicht die Trennung der jeweiligen Teilnehmerdaten.
- Es wird außerdem das *TDMA-Verfahren* verwendet, um periodische Funktionen wie z.B. die Leistungssteuerung zu realisieren.
- Das *FDMA-Verfahren* kann zusätzlich zu CDMA und TDMA genutzt werden, wenn der Netzbetreiber über mehr als einen Frequenzkanal verfügt.

Der FDD-Modus wird nur in Europa und meist bei symmetrischen Diensten verwendet, deren Bandbreitenanforderungen im Uplink und im Downlink etwa gleich sind. Dies ist zum Beispiel bei der Sprachkommunikation oder der Videotelefonie der Fall.

Vollduplexverfahren (2)

Im **UTRA-TDD-Modus** werden Uplink- und Downlink-Daten im gleichen Frequenzband übertragen. Dabei werden Uplink und Downlink zeitlich getrennt, wie die folgende Grafik zeigt. Weiterhin gilt:

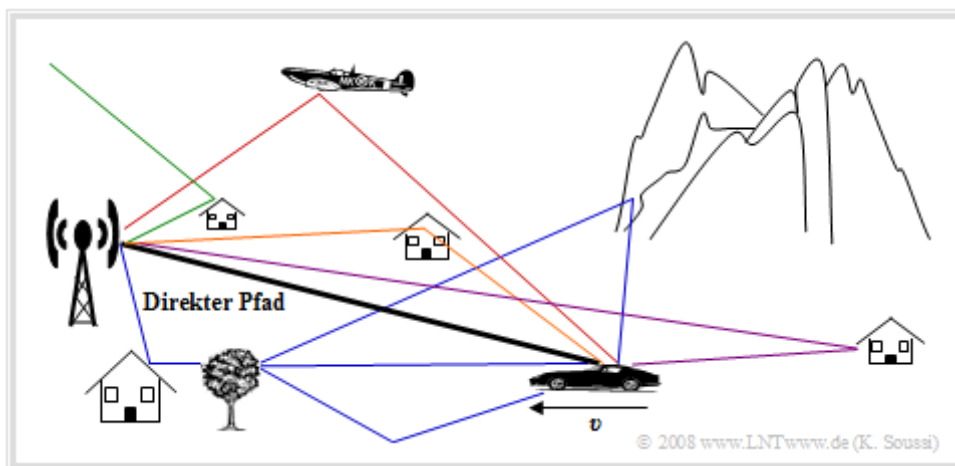
- Der Umschaltzeitpunkt (*Switching Point*) kann abhängig vom Datenvolumenverhältnis zwischen Uplink und Downlink flexibel gewählt werden.
- Die Teilnehmer werden beim TDD-Modus sowohl durch den Spreizcode (wie bei FDD) als auch durch den Zeitschlitz gekennzeichnet.
- Wie bei FDD kann zusätzlich zu CDMA und TDMA noch das FDMA-Verfahren zum Einsatz kommen, wenn der Netzbetreiber über mehr als einen Frequenzkanal verfügt.



Der TDD-Modus wird derzeit in Europa noch nicht genutzt und wird nach seiner Einführung hauptsächlich bei asymmetrischen Diensten (Beispiel: Downloads oder Surfen im Internet) zum Einsatz kommen, bei denen sich die Datenvolumina von Downlink und Uplink deutlich unterscheiden.

Eigenschaften des UMTS–Funkkanals

Im UMTS–Funkkanal treten neben Interferenzen durch andere Teilnehmer und Rauschen zusätzlich eine Reihe unvorhersehbarer, störender und verzerrender Effekte auf, die sich zudem über der Zeit verändern. Bedingt durch Reflexionen sowie Streuungen und Beugungen an Objekten erfährt das gesendete Signal eine **Mehrwegeausbreitung**. Dabei erreicht das Signal den Empfänger nicht nur über den direkten Pfad, sondern über mehrere Wege mit unterschiedlichen Laufzeiten und unterschiedlich gedämpft.



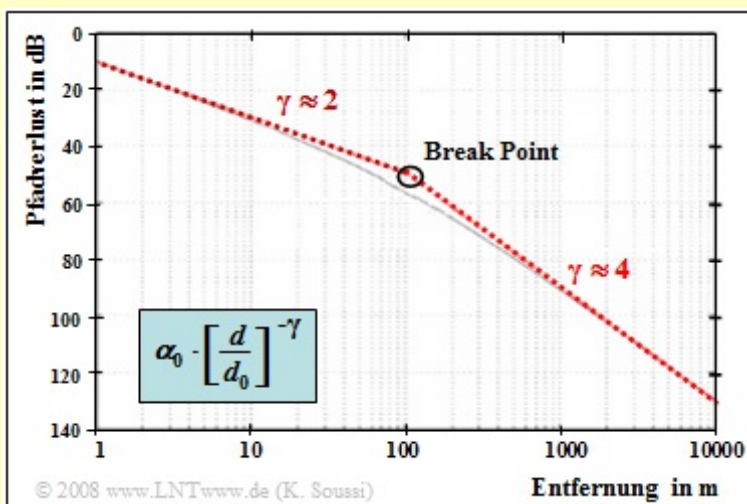
Die Mehrwegeausbreitung wird von der Umgebung beeinflusst, zusätzlich aber auch von einer möglichen Bewegung des Teilnehmers, wie in der Grafik durch die Bewegungsgeschwindigkeit v angedeutet ist.

Der **Pfadverlust** (englisch: *Path-Loss*) geht auf Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen zurück – siehe **Kapitel 2.1** des Buches „Mobile Kommunikation“. Für die Untersuchung dieses Dämpfungsphänomens gehen wir von einem vereinfachten Pfadverlustmodell aus. Dieses besagt:

- Die Empfangsleistung eines Funksignals fällt mit der Entfernung d um $d^{-\gamma}$, wobei der Parameter γ eine mediumsabhängige Konstante der Funkausbreitungswelle darstellt.
- Unter Berücksichtigung von konstruktiven oder destruktiven Bodenreflexionen nimmt die Konstante γ unterhalb des so genannten *Break Points* (d_0) Werte zwischen 2 und 3 an.
- Oberhalb des *Break Points* verstärken sich die Reflexionseffekte und die Ausbreitungskonstante γ wächst auf Werte zwischen 3.5 und 4 an.

Beispiel: Rechts dargestellt ist der Pfadverlust (in dB) in Abhängigkeit der Entfernung d . Bei diesem Beispiel ist die Konstante $\alpha_0 = 10^{-5}$ (also 50 dB) gesetzt und der *Break Point* liegt bei $d_0 = 100$ m.

- Im linken Bereich gilt $\gamma \approx 2$.
- Für $d > d_0$ ist dagegen $\gamma \approx 4$.



Frequenz- und zeitselektives Fading (1)

Eine wesentliche Eigenschaft des Mobilfunkkanals stellt das so genannte **Fading** dar. Dieses entsteht durch zeitlich veränderliche Signalabschattungen (englisch: *Shadowing*) und durch mögliche Bewegungen des Mobilfunkteilnehmers.

Im Buch „Mobile Kommunikation“ wird diese Art der Signalbeeinträchtigung ausführlich behandelt. Hier folgt nur eine kurze Zusammenfassung. Man unterscheidet zum einen:

- **schnelles Fading** (englisch: *Fast Fading* oder *Short Term Fading*) mit kurzzeitigen Einbrüchen der Empfangsleistung im Mikrosekundenbereich,
- **langsames Fading** (englisch: *Long Term Fading*) – also nur langsame Veränderungen (meist) im Sekundenbereich.

Fast Fading beeinträchtigt hauptsächlich Systeme mit großer Symboldauer, also kleiner Bandbreite. Da aber die Bandbreite bei UMTS sehr viel größer ist als bei GSM, ist dieses System weniger anfällig gegenüber *Fast Fading*.

Weiterhin lässt sich Fading auch noch wie folgt klassifizieren:

- **Frequenzselektives Fading** wird durch Mehrwegeausbreitung über Pfade mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten verursacht. Als Folge dieses Fadings werden verschiedene Frequenzanteile durch die Leistungsübertragungsfunktion $|H_K(f)|^2$ des Kanals unterschiedlich gedämpft.
- **Zeitselektives Fading** entsteht durch eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger. Dadurch kommt es abhängig von der Bewegungsrichtung (hin zum oder weg vom Sender) zu Frequenzverschiebungen, die physikalisch durch den *Dopplereffekt* beschrieben werden.

Hier sei auf zwei Interaktionsmodule aus dem Buch „Mobile Kommunikation“ verwiesen:

- **Mehrwegeausbreitung und Frequenzselektivität**
- **Zur Verdeutlichung des Dopplereffekts**

Auf der nächsten Seite wird dargelegt, unter welchen Bedingungen mit welchen dieser Fadingarten zu rechnen ist.

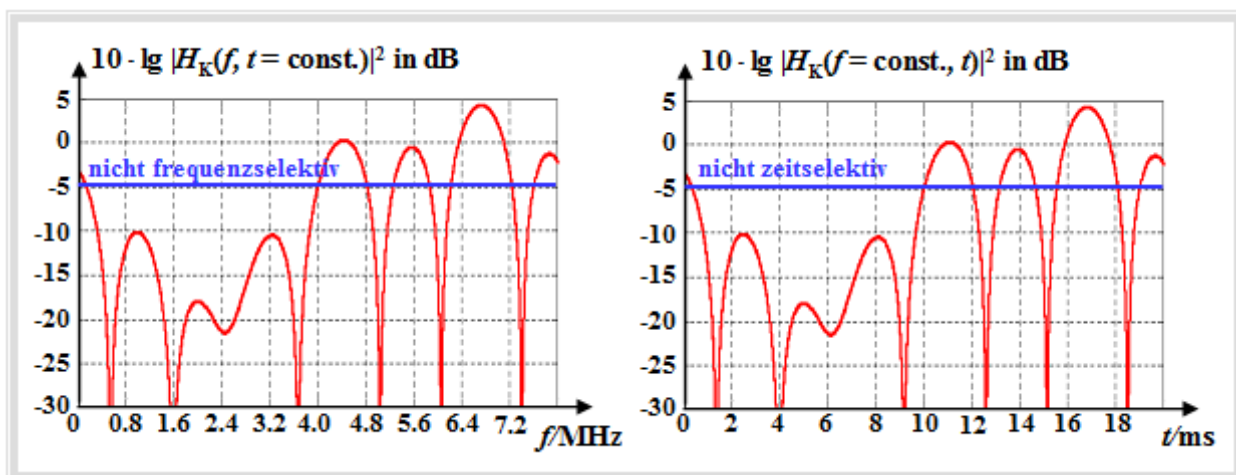
Frequenz- und zeitselektives Fading (2)

Die beiden auf der letzten Seite genannten Fadingeigenschaften *frequenzselektiv* und *zeitselektiv* sollen noch etwas genauer erläutert werden.

Durch den Empfang verschiedener Streukomponenten mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten entsteht eine Mehrwegeverbreiterung (englisch: *Delay Spread*) T_V , definiert als Differenz zwischen maximaler und minimaler Verzögerungszeit. Der Kehrwert hiervon ist näherungsweise die **Kohärenzbandbreite** B_K .

- Man spricht dann von *frequenzselektivem Fading*, wenn die Kohärenzbandbreite B_K sehr viel kleiner als die Signalbandbreite B_S ist. Als Folge werden verschiedene Frequenzanteile durch den Kanal unterschiedlich gedämpft, woraus lineare Verzerrungen resultieren.

Die linke Grafik verdeutlicht diesen Effekt. Dargestellt ist die Leistungsübertragungsfunktion $|H_K(f, t)|^2$ des Kanals zu einer festen Zeit t . Während blau nichtfrequenzselektives Fading mit -5 dB eingezeichnet ist, zeigt die rote Kurve ein Beispiel von frequenzselektivem Fading: Unterschiedliche Frequenzanteile werden dabei unterschiedlich gedämpft.



Beim zeitselektiven Fading entsteht eine so genannte Dopplerverbreiterung (englisch: *Doppler Spread*) B_D , die als Differenz zwischen der maximal und der minimal auftretenden Dopplerfrequenzen definiert ist. Deren Kehrwert bezeichnet man als die **Korrelationsdauer** $T_D = 1/B_D$. In manchen Literaturstellen wird diese Größe auch als *Kohärenzzeit* bezeichnet.

- Bei UMTS tritt immer dann *zeitselektives Fading* auf, wenn die *Korrelationsdauer* T_D sehr viel kleiner als die *Chipdauer* T_C ist. Die rechte Grafik zeigt schematisch das zeitselektive Fading, wobei nun die Leistungsübertragungsfunktion $|H_K(f, t)|^2$ des Kanals für eine feste Frequenz aufgetragen ist. Die blaue Kurve gilt hier für nicht zeitselektives Fading.

Mehr über die hier kurz angerissene Thematik erfahren Sie im Buch „Mobile Kommunikation“:

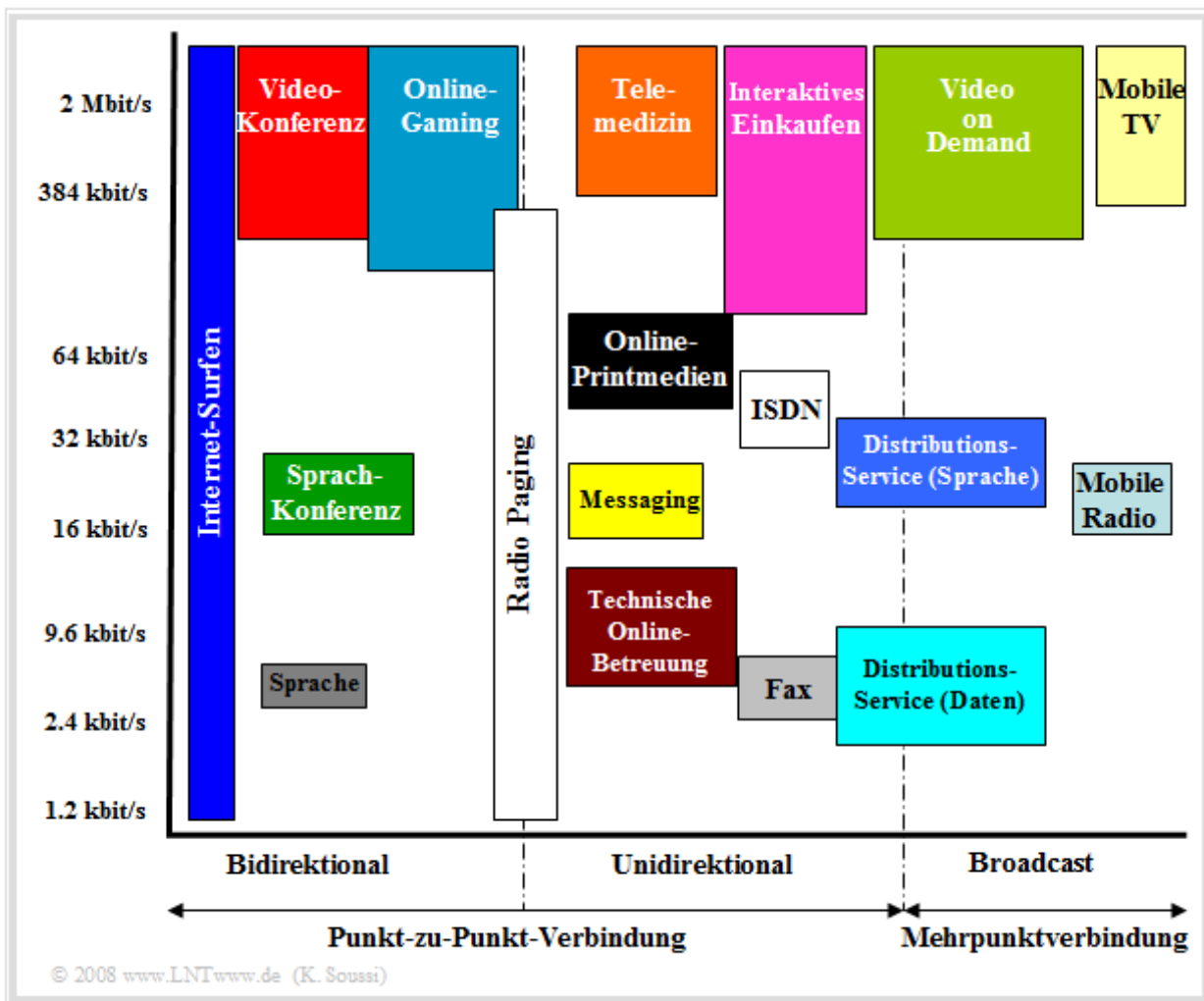
- **Mehrwegeverbreiterung und Kohärenzbandbreite**
- **Korrelationsdauer und Dopplerverbreiterung**

UMTS–Dienste

Die Einführung von UMTS hat sich unter Anderem die Erweiterung und Diversifikation der angebotenen Mobilfunkdienste zum Ziel gesetzt. Ein UMTS–fähiges Endgerät muss zusätzlich zu den klassischen Diensten (Sprachübertragung, Messaging, usw.) eine Reihe komplexerer multimedialer Anwendungen und Funktionen unterstützen.

Man kann diese Dienste – je nach Anwendung – in sechs Hauptkategorien unterteilen:

- **Information:** Internet–Surfen (*Info–on–demand*), Online–Printmedien,
- **Kommunikation:** Video– und Audiokonferenz, Fax, ISDN, Messaging,
- **Unterhaltung:** Mobile TV, Mobile Radio, Video–on–Demand, Online–Gaming,
- **Geschäftlicher Bereich:** Interaktives Einkaufen, E–Commerce,
- **Technischer Bereich:** Online–Betreuung, Distributionservice (Sprache und Daten),
- **Medizinischer Bereich:** Telemedizin.



In der Abbildung sind die Dienste nach Datenrate und Art der Verbindung klassifiziert:

- Die Höhe eines Kästchens gibt (in etwa) den Bereich für die erforderliche Datenrate an.
- Die Breite deutet näherungsweise auf den Datenumfang hin.

Sicherheitsaspekte

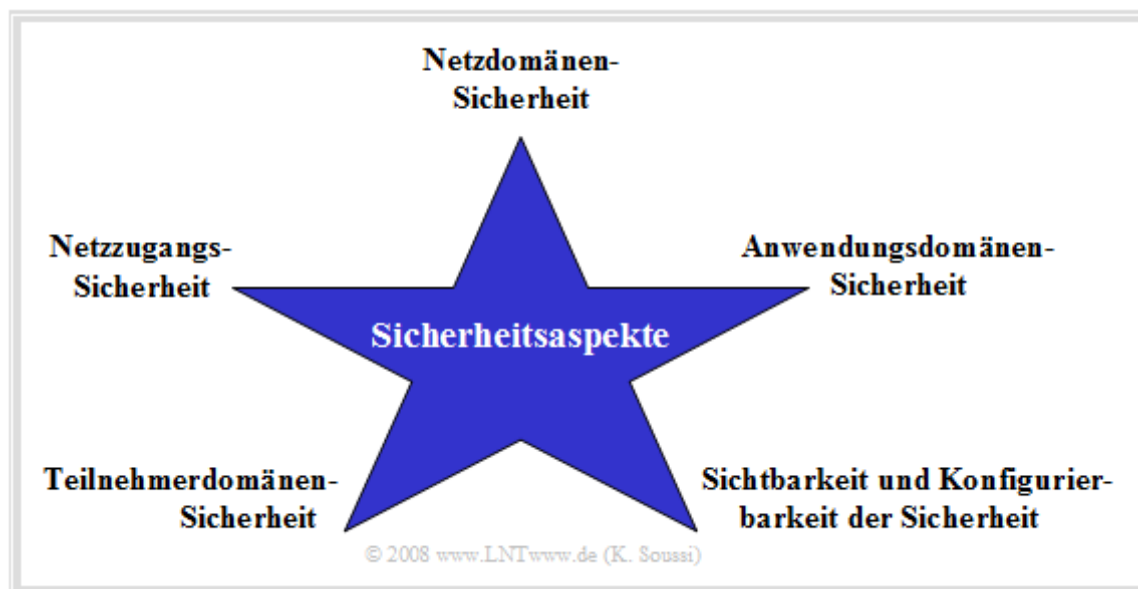
Die Sicherheitsmerkmale in UMTS–Netzen basieren auf den genau gleichen Prinzipien wie bei GSM. Allerdings wurden einige GSM–Sicherheitsfunktionen entfernt, ersetzt oder ausgebaut. Dadurch wurden die Verschlüsselungsalgorithmen robuster, die Authentifizierungsalgorithmen strenger und die Kriterien zur Vertraulichkeit eines Teilnehmers enger.

Die wesentlichen von GSM übernommenen Sicherheitsmaßnahmen bei UMTS sind:

- Authentifizierung des Teilnehmers,
- Vertraulichkeit der Teilnehmeridentität,
- Verschlüsselung der Funkschnittstelle.

Zusätzlich zu diesen werden bei UMTS noch weitere Sicherheitsmaßnahmen beachtet:

- Gegenseitige Authentifizierung, um die Nutzung falscher Basisstationen zu vermeiden,
- Verschlüsselung der Verbindung zwischen Basisstation und zugehörigem Kontrollknoten,
- Verschlüsselung und Authentifizierung der Sicherheitsdaten bei der Übertragung,
- Mechanismen zur Aktualisierung der Sicherheitsmerkmale.



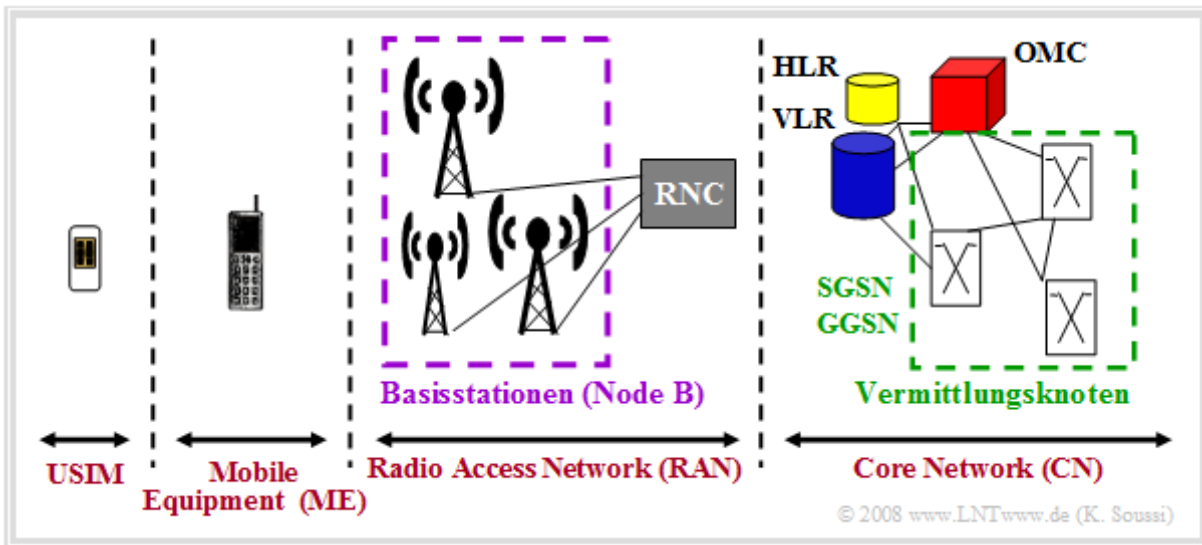
Man kann die oben aufgeführten Sicherheitsmaßnahmen entsprechend der Grafik klassifizieren. Man unterscheidet Sicherheitskonzepte für

- den sicheren **Netzzugang** (*Network Access Security*) für jeden Teilnehmer,
- die **Netzdomäne** (*Network Domain Security*) – ein sicherer Austausch von Kontrolldaten zwischen den Knoten innerhalb der Netzanbieterdomäne wird sichergestellt,
- die **Teilnehmerdomäne** (*User Domain Security*) – der Zugang zu den Endgeräten wird sichergestellt,
- die **Anwendungsdomäne** (*Application Domain Security*) – der sichere Austausch zwischen Anwendungen der Teilnehmerendgeräte und der Netzanbieter wird garantiert.

Der UMTS–Teilnehmer kann jederzeit erkennen, welche dieser Sicherheitsmaßnahmen in Betrieb sind und welche davon für bestimmte Dienste benötigt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von **Sichtbarkeit und Konfigurierbarkeit** der Sicherheit.

Basiseinheiten der Systemarchitektur

Bei der Architektur von UMTS–Netzen unterscheidet man vier grundlegende logische Einheiten. Die Interaktion dieser Einheiten ermöglicht das Bedienen und das Betreiben des Gesamtnetzes.



Man unterscheidet:

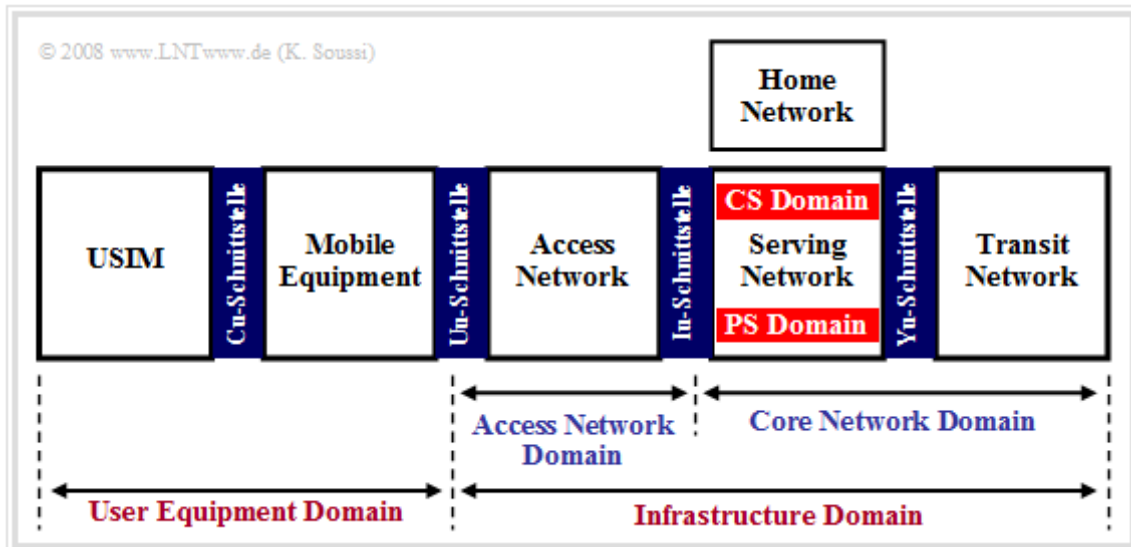
- **Universal Subscriber Identity Module (USIM)** – Das USIM ist eine entnehmbare IC–Karte, die Funkinformationen und Informationen zur eindeutigen Identifizierung und Authentifizierung des Teilnehmers enthält. Sie unterscheidet sich von der herkömmlichen SIM–Karte durch erweiterte Sicherheitsfunktionen, größere Speicherkapazität und einen integrierten Mikroprozessor, der zur Ausführung von Programmen dient.
- **Mobile Equipment (ME)** – Ausgestattet mit einer USIM–Karte stellt das UMTS–Endgerät sowohl die Funkschnittstelle für die Datenübertragung als auch die Bedienelemente für die Benutzer bereit. Es unterscheidet sich von der gängigen GSM–Mobilstation durch eine erweiterte Funktionalität, Multimedia–Anwendungen sowie komplexere und vielfältigere Dienste. Vielfach finden sich auch die Bezeichnungen *User Equipment (UE)* und *Terminal Equipment (TE)*.
- **Radio Access Network (RAN)** – Darunter versteht man die Festnetzinfrastruktur von UMTS, die für die Funkübertragung und die damit verbundenen Aufgaben zuständig ist. Das RAN enthält die Basisstationen (*Node B*) und die Kontrollknoten (*Radio Network Controller – RNC*), die das RAN und das *Core Network* verbinden.
- **Core Network (CN)** – Dieses stellt das Weitverkehrsnetz dar und ist für den Datentransport verantwortlich. Es enthält Vermittlungseinrichtungen (SGSN, GGSN) zu externen Netzen und Datenbanken zur Mobilitäts– und Teilnehmerverwaltung (HLR, VLR). Das *Core Network* enthält auch die Netzmanagement–Einrichtungen (*Operation and Maintenance Center – OMC*), die zur Verwaltung des Gesamtnetzes erforderlich sind.

Domänen und Schnittstellen (1)

Die auf der letzten Seite aufgeführten Einheiten des UMTS–Netzes werden in so genannte Domänen (englisch: *Domains*) zusammengefasst. Darunter versteht man Funktionsblöcke, die zur Standardisierung und zur Untersuchung der funktionalen Einheiten und Schnittstellen innerhalb des UMTS–Netzes dienen.

Man unterscheidet zwei Hauptkategorien von Domänen, nämlich

- die *User Equipment Domain*, und
- die *Infrastructure Domain*.



Die **User Equipment Domain** enthält alle Funktionen, die einen Zugang zum UMTS–Netz ermöglichen, wie zum Beispiel Verschlüsselungsfunktionen für die Übertragung der Daten über die Funkschnittstelle. Man kann diese Domäne in zwei Domänen unterteilen:

- die **USIM Domain** – die SIM–Karte ist ein Teil dieser Domäne;
- die **Mobile Equipment Domain** enthält alle Funktionen, über die ein Endgerät verfügt.

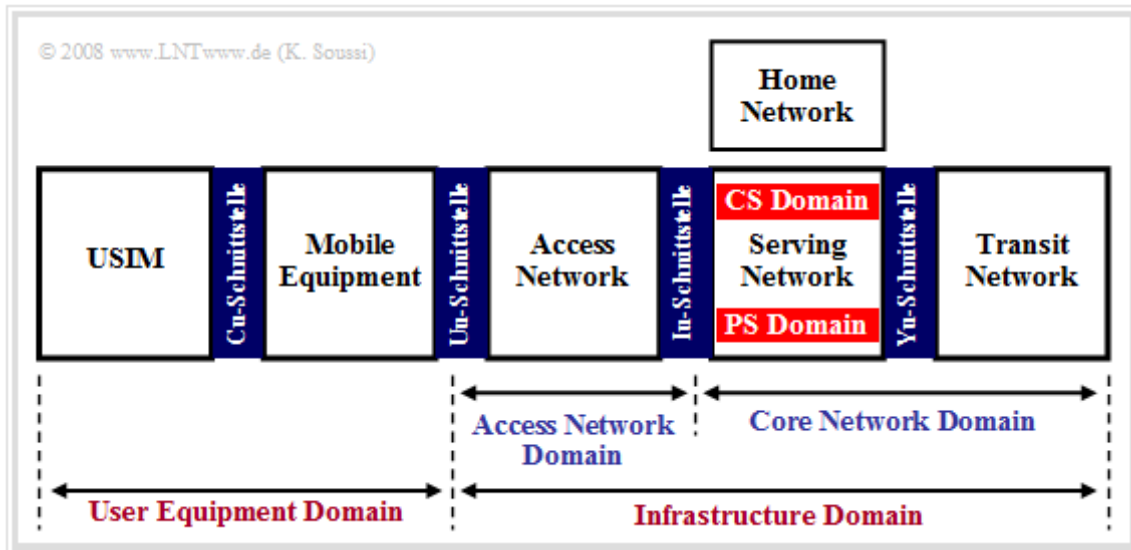
Diese beiden Domänen sind über die **Cu–Schnittstelle** verbunden. Diese umfasst die elektrischen und physikalischen Spezifikationen sowie den Protokollstapel zwischen USIM–Karte und Endgerät. Dadurch können USIM–Karten verschiedener Netzbetreiber mit allen Endgeräten betrieben werden.

Eine weitere wichtige Schnittstelle ist die **Uu–Schnittstelle**, die die Radioverbindung zwischen der Mobilstation und der auf der nächsten Seite beschriebenen *Infrastructure Domain* herstellt.

Die Bildbeschreibung wird auf der nächsten Seite fortgesetzt.

Domänen und Schnittstellen (2)

Die Beschreibung der letzten Seite wird fortgesetzt.



Die **Infrastructure Domain** gliedert sich in die zwei folgenden Domänen:

- Die **Access Network Domain** fasst alle Basisstationen – die bei UMTS „Node B“ genannt werden – und die Funktionen des *Radio Access Networks* (RAN) zusammen.
- Die **Core Network Domain** ist für die möglichst fehlerfreie Übermittlung und den Transport der Nutzerdaten verantwortlich.

Diese beiden Domänen sind über eine **Iu-Schnittstelle** verbunden. Diese ist für die Datenvermittlung zwischen dem *Access Network* und dem *Core Network* verantwortlich und stellt die Trennung zwischen der Transportebene und der Funknetzebene dar.

Die *Core Network Domain* kann wiederum in drei Unterdomänen unterteilt werden:

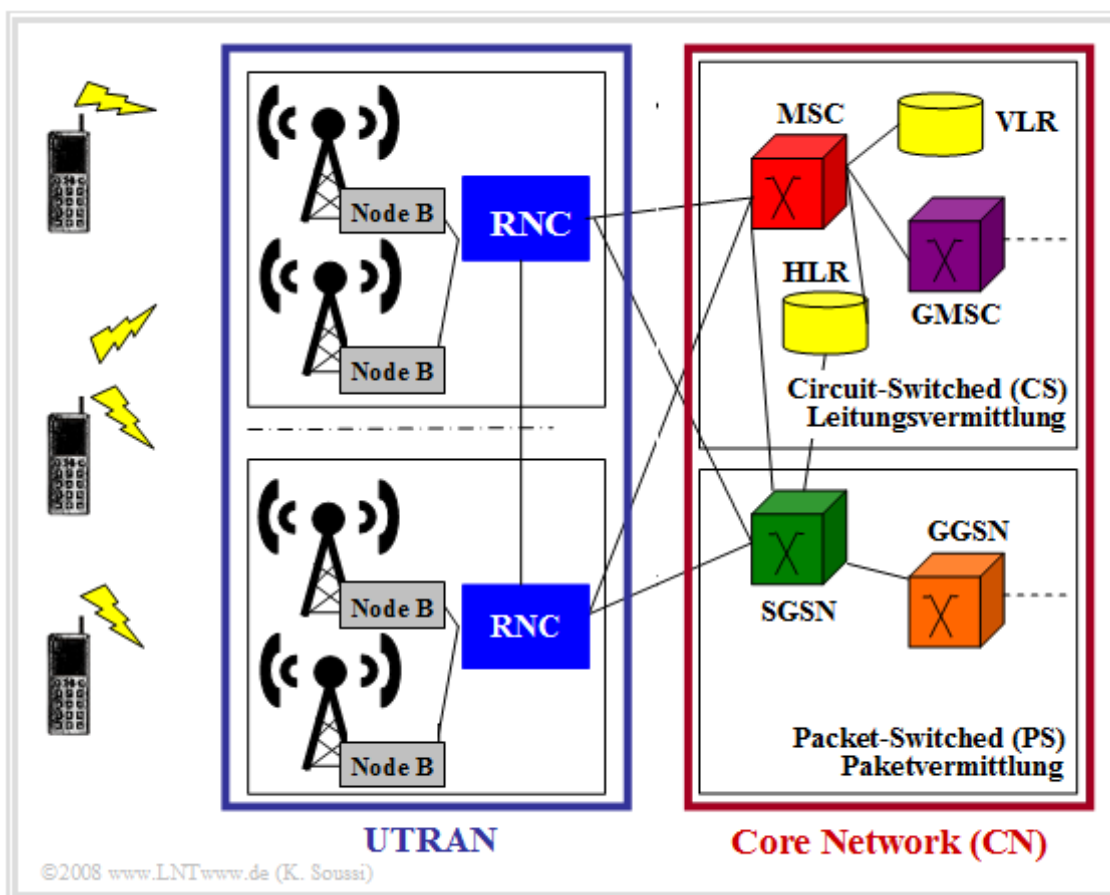
- Die *Serving Network Domain* enthält alle Funktionen und Informationen, die für den Zugang zum UMTS-Netz nötig sind.
- Die *Home Network Domain* enthält alle Funktionalitäten, die im Heimatnetz eines (fremden) Teilnehmers durchgeführt werden.
- Die *Transit Network Domain* ist ein so genanntes Transitnetz. Dieses wird nur dann wirksam, wenn Datenbankabfragen im Heimatnetz des Teilnehmers durchzuführen sind und das *Serving Network* nicht direkt mit dem *Home Network* verbunden ist.

Architektur der Zugangsebene (1)

UMTS–Netze unterstützen sowohl eine Leitungs– als auch eine Paketvermittlung:

- Bei der **Leitungsvermittlung** (englisch: *Circuit Switching*, CS) wird der Funkkanal während der gesamten Dauer der Verbindung den beiden Kommunikationspartnern so lange zugewiesen, bis alle Informationen übertragen wurden. Erst danach wird der Kanal freigegeben.
- Bei der **Paketvermittlung** (englisch: *Packet Switching*, PS) können die Teilnehmer den Kanal nicht exklusiv nutzen, sondern der Datenstrom wird im Sender in kleine Datenpakete – jeweils mit der Zieladresse im Header versehen – aufgeteilt, und erst danach versendet. Der Kanal wird von mehreren Teilnehmern gemeinsam benutzt.

Diese beiden Modi erkennt man auch in der Architektur der Zugangsebene des UMTS–Netzes im *Core Network* (CN) wieder, die in der nachfolgenden Grafik dargestellt ist.



Die Zugangsebene kann man in zwei Hauptblöcke unterteilen. Man unterscheidet bei UMTS:

- Das **UMTS Terrestrial Radio Access Network** (UTRAN) sichert die Funkübertragung von Daten zwischen der Transportebene und der Funknetzebene.
- Das **Core Network** (CN) ist für die Vermittlung der Daten (sowohl *circuit-switched* als auch *packet-switched*) innerhalb des UMTS–Netzes zuständig.

Auf der nächsten Seite werden die Aufgaben von UTRAN und *Core Network* noch genauer erläutert.

Architektur der Zugangsebene (2)

Das **UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)** sichert die Funkübertragung von Daten zwischen der Transportebene und der Funknetzebene. Zum UTRAN gehören die Basisstationen und die Kontrollknoten, deren Funktionen nachfolgend genannt werden:

- Ein **Node B** – wie eine UMTS–Basisstation meist genannt wird – umfasst die Antennenanlage sowie den CDMA–Empfänger und ist unmittelbar mit den ME–Funkschnittstellen verbunden. Zu seinen Aufgaben gehören die Datenratenanpassung, Daten– und Kanal(de)codierung, Interleaving sowie Modulation bzw. Demodulation. Jeder Node B kann eine oder mehrere Zellen versorgen.
- Der **Radio Network Controller (RNC)** ist für die Steuerung der Basisstationen verantwortlich. Ebenso ist er innerhalb der Zellen zuständig für die Rufannahmesteuerung, Verschlüsselung und Entschlüsselung, ATM–Vermittlung, Kanaluweisung, Handover und Leistungssteuerung.

Das **Core Network (CN)** übernimmt die Vermittlung der Daten innerhalb des UMTS–Netzes. Dazu enthält es bei *Leitungsvermittlung* folgende Hardware– und Softwarekomponenten:

- Das **Mobile Services Switching Center (MSC)** ist zuständig für das Routing von Gesprächen, Lokalisierung, Authentifizierung, das Handover und die Verschlüsselung von Teilnehmerdaten.
- Das **Home Location Register (HLR)** enthält alle Teilnehmerdaten wie zum Beispiel Tarifmodell, Telefonnummer sowie die zugehörigen dienstspezifischen Berechtigungen und Schlüssel.
- Das **Visitor Location Register (VLR)** enthält Ortsinformationen über lokal registrierte Nutzer und Kopien der Datensätze aus dessen HLR. Diese Daten sind dynamisch: Sobald der Teilnehmer seinen Aufenthaltsort ändert, werden diese Informationen verändert.

Bei *paketvermittelter Übertragung* gibt es folgende Einrichtungen bzw. Register:

- Der **Serving GPRS Support Node (SGSN)** ist anstelle von MSC und VLR für Routing und Authentifizierung zuständig und hält eine lokale Kopie der Teilnehmerinformationen gespeichert.
- Am **Gateway GPRS Support Node (GGSN)** gibt es Übergänge zu anderen Paketdatennetzen wie zum Beispiel dem Internet. Eintreffende Pakete werden durch eine integrierte Firewall gefiltert und an den entsprechenden SGSN weitergeleitet.
- Das **GPRS Register (GR)** ist Teil des *Home Location Register (HLR)* und enthält zusätzliche Teilnehmerinformationen, die für die paketvermittelte Übertragung benötigt werden.

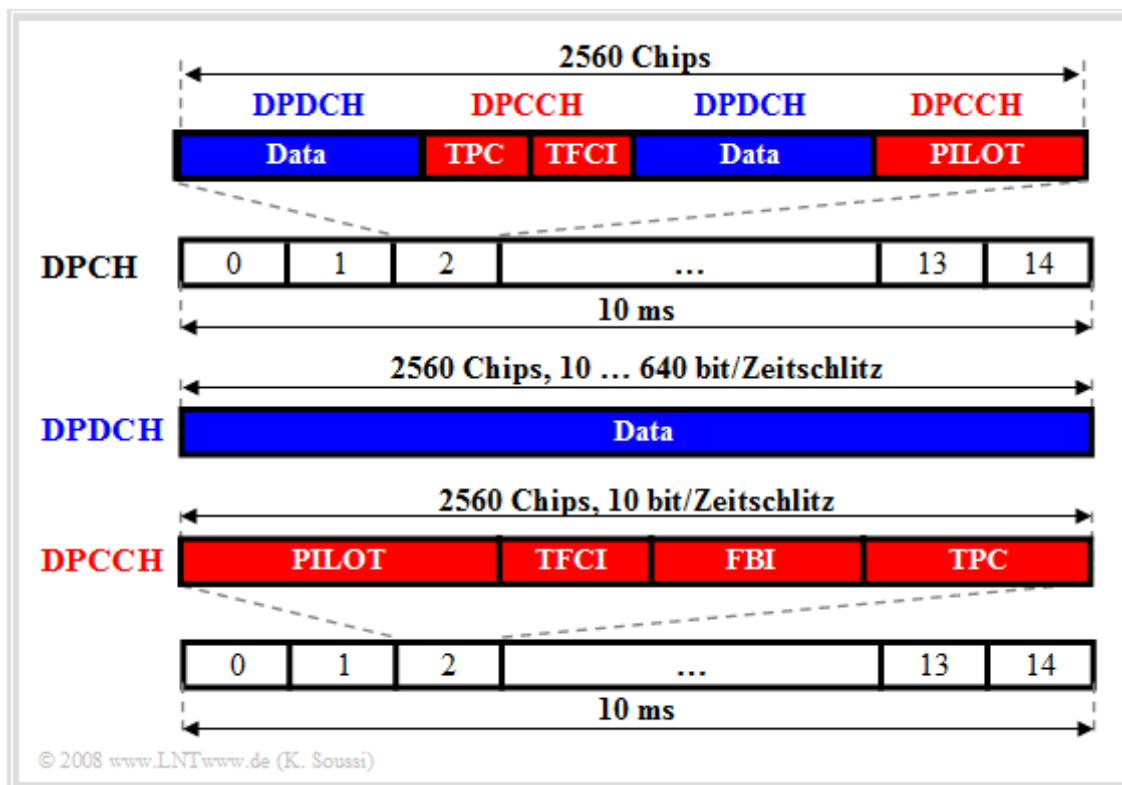
Physikalische Kanäle (1)

Physikalische Kanäle dienen der Kommunikation auf der physikalischen Ebene der Funkschnittstelle und werden innerhalb einer Basisstation (*Node B*) verarbeitet. Dabei unterscheidet man zwischen den *dedizierten physikalischen Kanälen* und *gemeinsam genutzten physikalischen Kanälen*.

Die **dedizierten physikalischen Kanäle** werden einzelnen Kommunikationspartnern fest zugewiesen. Zu diesen gehören:

- *Dedicated Physical Data Channel (DPDCH)* – Dabei handelt es sich um einen unidirektionalen Uplink–Kanal, der Nutz– und Signalisierungsdaten aus höheren Schichten transportiert.
- *Dedicated Physical Control Channel (DPCCH)* – Dieser Kontrollkanal enthält Informationen der physikalischen Schicht für die Steuerung der Übertragung, Leistungssteuerungs–Kommandos und Transportformat–Indikatoren, um nur einige Beispiele zu nennen.
- *Dedicated Physical Channel (DPCH)* – Dieser Kanal umfasst den DPDCH und den DPCCH im Downlink und hat eine Länge von 2560 Chips.

Die Grafik zeigt den strukturellen Aufbau des DPDCH (blau), des DPCCH (rot) sowie des einhüllenden DPCH. Im DPCH werden in 10 ms genau $15 \cdot 2560 = 38400$ Chips übertragen, woraus sich für die Chiprate 3.84 Mchip/s ergibt.



Die Nutzdaten im DPDCH werden aufgesplittet und pro Zeitschlitz werden – je nach Spreizfaktor J – zwischen 10 ($J = 256$) und 640 ($J = 4$) Bit übertragen. Im DPCCH werden einheitlich pro Zeitschlitz zehn Kontrollbits übertragen.

Physikalische Kanäle (2)

In der Tabelle sind die von allen Teilnehmern **gemeinsam genutzten** physikalischen Kanäle aufgelistet.

Abkürzung	Bezeichnung	Uplink	Downlink	TDD	FDD
CCPCH	Common Control Physical Channel		•	•	•
P-CCPCH	Primary Common Control Physical Channel		•	•	•
S-CCPCH	Secondary Common Control Physical Channel		•	•	•
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel		•	•	•
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	•		•	•
CPICH	Common Pilot Channel		•		•
SCH	Synchronization Channel	•	•	•	•
AICH	Aquisition Indication Channel		•		•
PICH	Paging Indication Channel		•	•	•
PRACH	Physical Random Access Channel	•			•
PCPCH	Physical Common Packet Channel	•			•

© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

Im Folgenden werden die Eigenschaften einiger ausgewählter Kanäle beschrieben:

- Der **CCPCH** ist ein Downlink–Kanal mit zwei Unterkanälen. Der **P–CCPCH** beinhaltet Daten, die für den Betrieb innerhalb einer Funkzelle notwendig sind, während der **S–CCPCH** Daten enthält, die für die Paging–Prozedur und für den Transport von Kontrolldaten verantwortlich sind.
- Der **PDSCH** und der **PUSCH** sind gemeinsam genutzte Kanäle, die sowohl Nutzdaten als auch Kontrolldaten transportieren können. Der erste ist allein für den Downlink zuständig, der zweite für den Uplink.
- **CPICH**, **SCH**, **AICH** und **PICH** sind gemeinsam genutzte Kanäle, die für die Steuerung und Synchronisierung des Gesamtsystems verantwortlich sind. **CPICH** ermittelt die Zugehörigkeit der Mobilstation zu einer Basisstation, **SCH** dient zur Zellsuche und Synchronisation der Mobilstation.
- Der **AICH** überprüft und ermittelt die Verfügbarkeit des Systems, während der **PICH** für den Funkruf bei der Teilnehmerlokalisierung zuständig ist.
- Der **PRACH** kontrolliert die Übertragung von Nachrichten des Zufallszugriffkanals **RACH**, während der **PCPCH** für den Transport von Datenpaketen nach dem **CDMA/CD–Verfahren** zuständig ist.

Logische Kanäle

Die logischen Kanäle befinden sich in der MAC–Referenzschicht und werden durch den Typ der übertragenen Daten gekennzeichnet. MAC steht hierbei für *Medium Access Control*.

Abkürzung	Bezeichnung	Uplink	Downlink	Control Channel	Traffic Channel
BCCH	Broadcast Control Channel		●	●	
PCCH	Paging Control Channel		●	●	
DCCH	Dedicated Control Channel	●	●	●	
CCCH	Common Control Channel	●	●	●	
DTCH	Dedicated Traffic Channel	●	●		●
CTCH	Common Traffic Channel		●		●

© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

Die in der Tabelle zusammengestellten logischen Kanäle lassen sich in zwei Klassen unterteilen, nämlich in die Kontrollkanäle (*Control Channels*) und die Verkehrskanäle (*Traffic Channels*):

- Über die **Kontrollkanäle** (mit der Endung CCH) werden sowohl Kontrollinformationen (BCCH) als auch Paging–Informationen (PCCH) transportiert. Es können aber auch teilnehmerspezifische Signalisierungsdaten (DCCH) oder Transportinformationen zwischen den Teilnehmergeräten und dem UTRAN (CCCH) ausgetauscht werden.
- Dagegen werden über die **Verkehrskanäle** Teilnehmerinformationen ausgetauscht. Während der DTCH einem mobilen Teilnehmer zum Nutzdatentransport individuell zugewiesen werden kann, wird ein CTCH vorwiegend an alle oder an eine vordefinierte Gruppe von Teilnehmern vergeben.

Transportkanäle (1)

Transportkanäle befinden sich in der physikalischen Schicht des ISO/OSI–Schichtenmodells. Sie

- werden durch die Parameter der Datenübertragung (z.B. die Datenrate) gekennzeichnet,
- gewährleisten die gewünschten Anforderungen bezüglich der Fehlerschutzmechanismen,
- legen die Art der Datenübertragung – so zu sagen das „WIE“ – fest.

Man unterscheidet zwei Klassen von Transportkanälen, nämlich dedizierte und gemeinsam genutzte Transportkanäle.

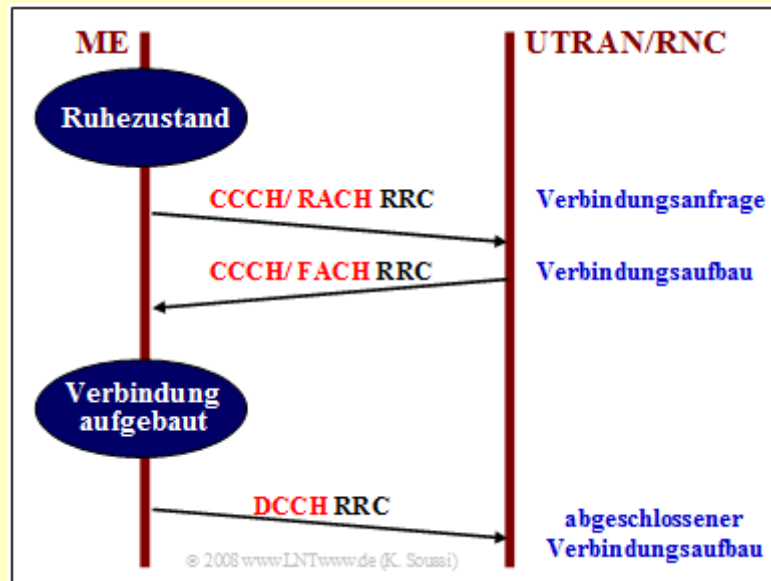
Zur Klasse der **dedizierten Transportkanäle** (*Dedicated Transport Channels – DTCH*) gehören die **Dedicated Channels** (DCH), die einem Teilnehmer fest zugewiesen werden. Ein DCH transportiert sowohl Nutzdaten als auch Kontrolldaten (Handover–Daten, Messdaten, ...) an die höheren Schichten, in denen sie dann interpretiert und verarbeitet werden.

Zu den **gemeinsam genutzten Transportkanälen** (*Common Transport Channels – CTCH*) gehören beispielsweise:

- Der *Broadcast Channel* (**BCH**) ist ein Downlink–Kanal, der netzbetreiberspezifische Daten der Funkzelle (zum Beispiel *Access Random Codes* zur Signalisierung eines Verbindungsaufbaus) an die Teilnehmer verteilt. Charakteristisch ist seine relativ hohe Leistung und niedrige Datenrate (nur 3.4 kbit/s), um allen Nutzern einen möglichst fehlerfreien Empfang und hohen Prozessgewinn zu ermöglichen.
- Der *Forward Access Channel* (**FACH**) ist ein Downlink–Kanal, zuständig für den Transport von Kontrolldaten. Eine Zelle kann mehrere FACH–Kanäle enthalten, wobei einer der Kanäle eine niedrige Datenrate aufweisen muss, um allen Nutzern die Auswertung seiner Daten zu ermöglichen.
- Der *Random Access Channel* (**RACH**) ist ein unidirektionaler Uplink–Kanal. Der Teilnehmer kann damit den Wunsch äußern, eine Funkverbindung aufbauen zu wollen. Außerdem können auch kleine Datenmengen übertragen werden.
- Der *Common Packet Channel* (**CPCH**) ist ein unidirektionaler Uplink–Datenkanal, der für paketorientierte Dienste ausgelegt ist und eine Erweiterung des RACH–Kanals darstellt.
- Der *Paging Channel* (**PCH**) ist ein unidirektionaler Downlink–Kanal zur Lokalisierung eines Teilnehmers mit Daten für die Paging–Prozedur.

Transportkanäle (2)

Beispiel: Die Grafik soll die Interaktion zwischen den Transportkanälen RACH und FACH mit den logischen Kanälen CCCH und DCCH bei einem einfachen Verbindungsaufbau erläutern.



Einige Erklärungen zu diesem Schaubild:

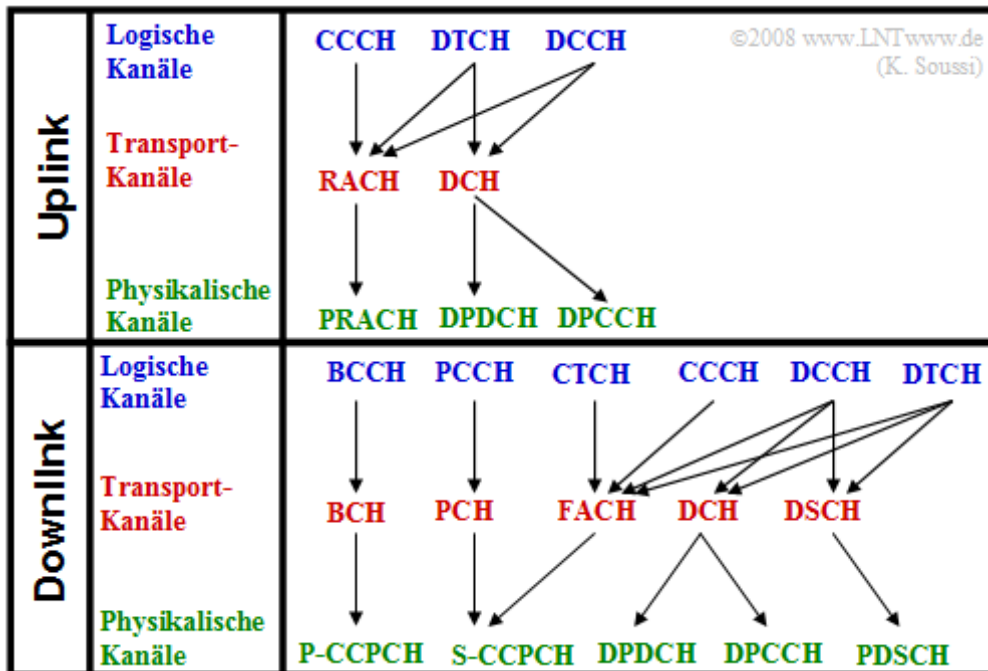
- Ein mobiler Teilnehmer (ME) äußert den Wunsch für einen Verbindungsaufbau. Als erstes wird dann mit Hilfe des logischen Kanals \Rightarrow CCCH und des Transportkanals \Rightarrow RACH eine Verbindungsanfrage über den UTRAN an den *Radio Network Controller* (RNC) gesendet.
- Hierzu wird das RRC–Protokoll (*Radio Resource Control*) verwendet, das die Aufgabe hat, die Signalisierung zwischen dem Teilnehmer und UTRAN/RNC zu gewährleisten.
- Der RNC antwortet auf diese Anfrage über den Transportkanal \Rightarrow FACH. Dabei werden dem Teilnehmer die nötigen Kontrolldaten für den Verbindungsaufbau übersendet.
- Die Verbindung wird mit Hilfe des logischen Kanals \Rightarrow DCCH tatsächlich aufgebaut.

Kommunikation innerhalb des ISO/OSISchichtenmodells

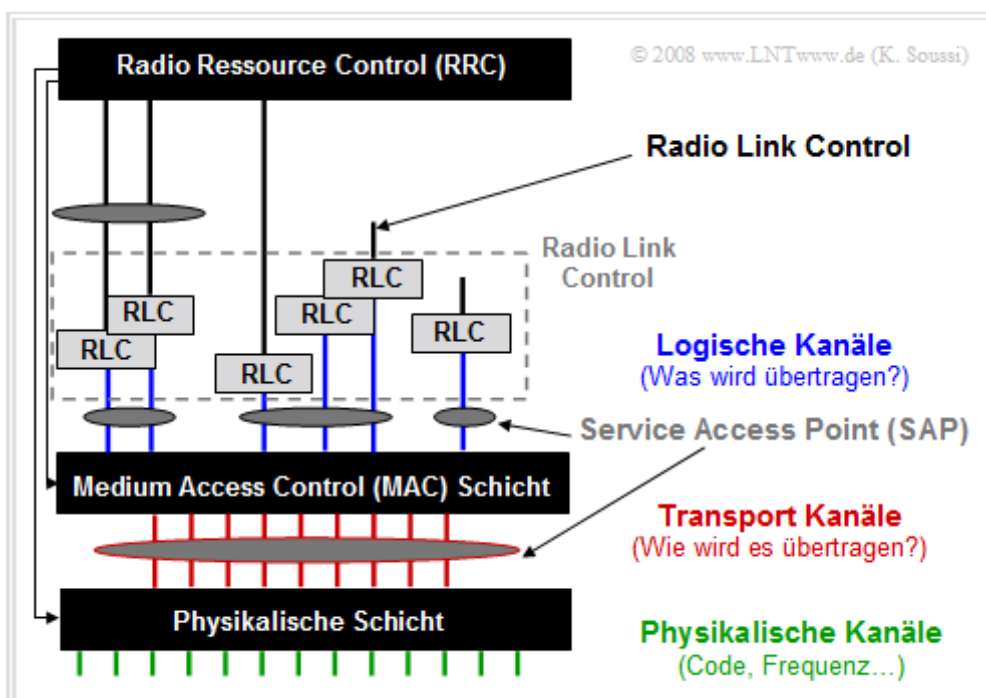
Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Schichten des ISO/OSI–Modells wird durch die auf den letzten Seiten vorgestellten logischen, physikalischen und Transport–Kanäle sichergestellt. Um die Funktionsfähigkeit und den Datenaustausch innerhalb des Gesamtmodells zu garantieren, müssen diese entsprechend der folgenden Grafik aufeinander abgebildet werden:

- Zunächst erfolgt die Abbildung des logischen Kanals auf den Transportkanal,
- danach die Abbildung des Transportkanals auf einen physikalischen Kanal.

Die Grafik zeigt die Struktur für Aufwärtsrichtung (Uplink) und Abwärtsrichtung (Downlink).

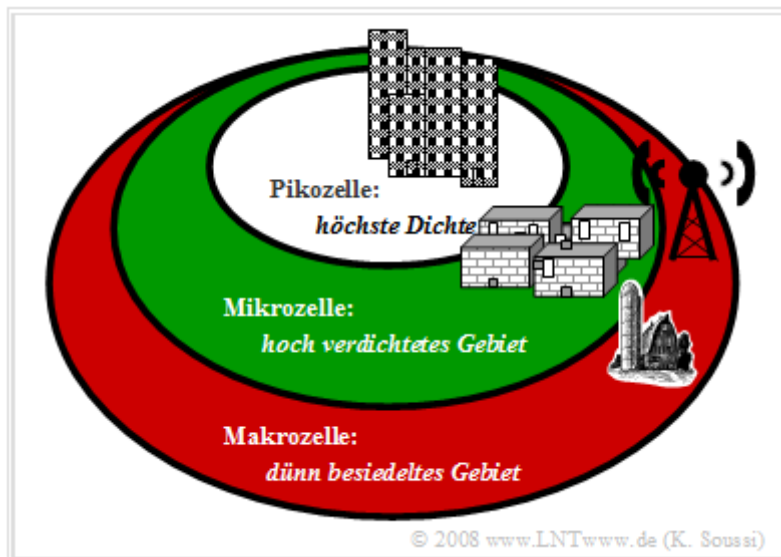


Die untere Darstellung soll einen Gesamtüberblick über die Struktur der drei untersten Schichten des ISO/OSI–Modells geben und die Interaktionen der verschiedenen Kanalarten vermitteln.



Zellulare Architektur von UMTS (1)

Um ein flächendeckendes Netz mit geringer Sendeleistung und ausreichender Frequenzökonomie zu ermöglichen, werden auch bei UMTS wie bei GSM Funkzellen eingerichtet. Die Funkzellen sind im UMTS–Netz (Trägerfrequenz um 2 GHz) deutlich kleiner als bei GSM (Trägerfrequenz um 900 MHz), da bei gleicher Sendeleistung die Reichweite von Funksignalen mit steigender Frequenz abnimmt.



Die Grafik zeigt die **Zellenstruktur** von UMTS. Man erkennt daraus einen hierarchischen Aufbau und drei Typen von Funkzellen:

- **Makrozellen** sind mit 4 bis 6 Kilometer Durchmesser die größten Zellen. Sie erlauben relativ schnelle Bewegungen. Beispielsweise ist eine Bewegungsgeschwindigkeit bis zu maximal 500 km/h zulässig, wenn die Datenrate 144 kbit/s beträgt. Eine Makrozelle kann möglicherweise eine Vielzahl von Mikro- und Pikozellen überlagern.
- **Mikrozellen** sind mit 1 bis 2 km deutlich kleiner als Makrozellen. Sie erlauben wesentlich höhere Datenraten bis 384 kbit/s, dafür aber nur langsamere Bewegungsgeschwindigkeiten. Zum Beispiel ist bei der Datenrate 384 kbit/s die maximal zulässige Geschwindigkeit 120 km/h. Eine Mikrozelle überlagert keine, eine oder eine Vielzahl von Pikozellen.
- **Pikozellen** versorgen nur sehr kleine Gebiete mit etwa 100 Meter Durchmesser, aber sehr hohem Datenaufkommen. Sie werden in hochverdichteten Orten wie zum Beispiel Flughäfen, Stadien, usw. eingesetzt. Zulässig sind theoretisch Datenraten bis 2 Mbit/s.

Zellulare Architektur von UMTS (2)

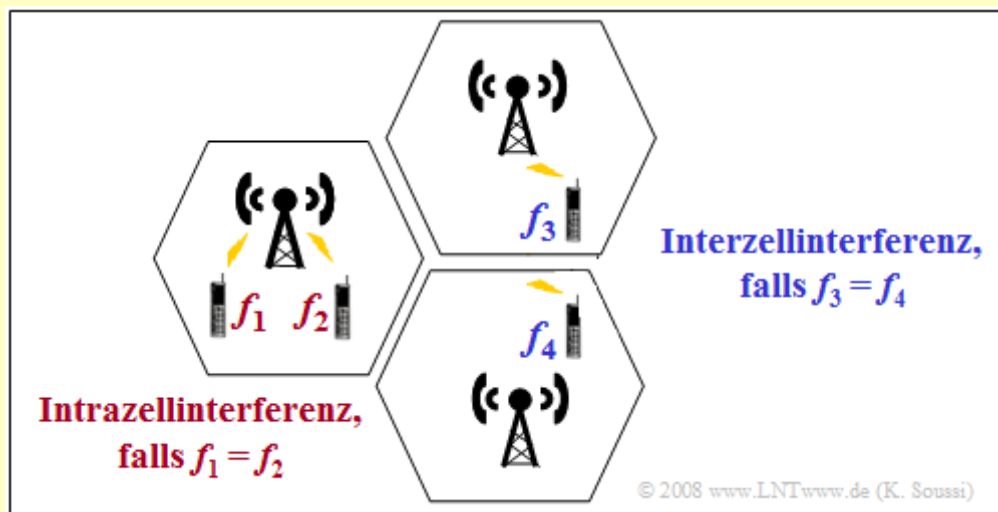
Da UMTS als Vielfachzugriffsverfahren *Code Division Multiple Access* (CDMA) verwendet, benutzen alle Teilnehmer den gleichen Frequenzkanal. Dies resultiert in einer relativ hohen **Interferenzleistung** und einem sehr niedrigen Träger–zu–Interferenz–Abstand (englisch: *Carrier–to–Interference Ratio*, CIR). Dieses ist zumindest deutlich kleiner als bei GSM, das auf FDMA und TDMA basiert.

Ein niedriges CIR kann die Übertragungsqualität erheblich beeinträchtigen, nämlich dann, wenn sich die Signale unterschiedlicher Teilnehmer destruktiv überlagern, was zu Informationsverlust führt.

Man unterscheidet zwei Arten von Interferenzen:

- **Intrazellinterferenz** entsteht durch die Verwendung des gleichen Frequenzkanals von mehreren Teilnehmern innerhalb der gleichen Zelle.
- Dagegen kann es zu **Interzellinterferenz** kommen, wenn Teilnehmer verschiedener Zellen den gleichen Frequenzkanal benutzen.

Beispiel: Die Grafik veranschaulicht beide Arten der Zellinterferenz. In der linken Zelle kommt es zu *Intrazellinterferenzen*, wenn die beiden Frequenzen f_1 und f_2 identisch sind.



Dagegen gibt es *Interzellinterferenz*, wenn in den beiden rechten Funkzellen gleiche Frequenzen verwendet werden ($f_3 = f_4$). Intrazellinterferenzen sind wegen des geringen Abstands der Intrazellstörer meistens gravierender als Interzellinterferenzen, das heißt, sie bewirken ein deutlich kleineres CIR.

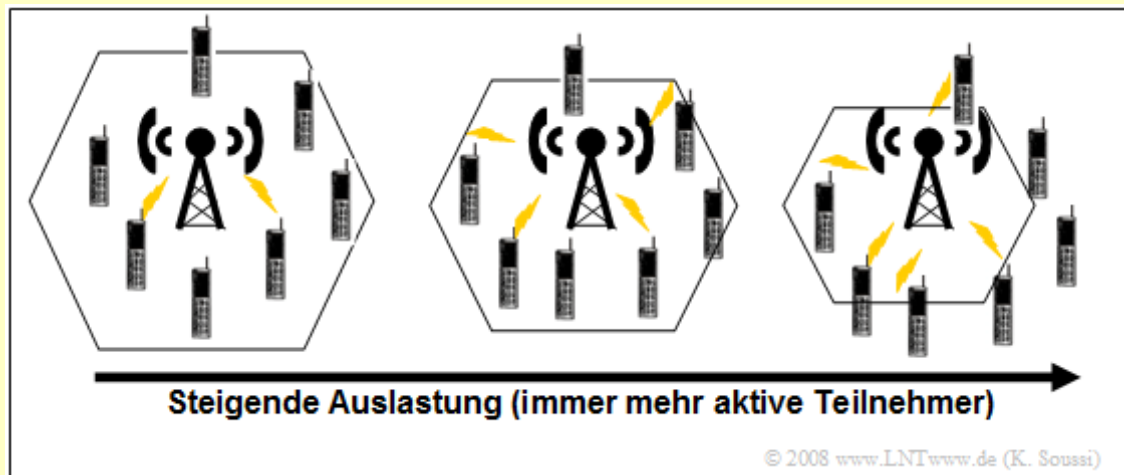
Zellulare Architektur von UMTS (3)

Um den Einfluss der Interferenzleistung auf die Übertragungsqualität zu begrenzen, wird bei UMTS die so genannte **Zellatmung** eingesetzt. Diese lässt sich wie folgt beschreiben:

- Nimmt die Anzahl der aktiven Teilnehmer und damit die aktuelle Interferenzleistung zu, so wird der Zellenradius verkleinert.
- Da nun weniger Teilnehmer in der Zelle senden, wird damit auch der störende Einfluss der Zellinterferenz geringer.
- Für die Versorgung der am Rande einer ausgelasteten Zelle stehenden Teilnehmer springt dann die weniger belastete Nachbarzelle ein.

Eine Alternative zur Zellatmung ist, dass man die Gesamtsendeleistung innerhalb der Zelle verringert, was allerdings eine Reduzierung der Sende– und damit auch der Empfangsqualität bedeutet.

Beispiel: In der Grafik erkennt man, dass die Anzahl der aktiven Teilnehmer im Versorgungsgebiet von links nach rechts zunimmt.



- Lässt man die Zellengröße gleich, so gibt es in der Zelle mehr aktive Teilnehmer als vorher und dementsprechend nimmt die Qualität aufgrund der Intrazellinterferenzen deutlich ab.
- Verkleinert man dagegen die Zellengröße im gleichen Maße, wie die Teilnehmerzahl zunimmt, so sind in einer Zelle nicht mehr Teilnehmer aktiv als vorher und die Qualität bleibt erhalten.

Handover in UMTS

Um den Übergang zwischen verschiedenen Zellen für Mobilfunkteilnehmer möglichst unterbrechungsfrei erscheinen zu lassen, wird bei leitungsvermittelten UMTS–Diensten – wie auch bei GSM – ein Handover eingesetzt. Man unterscheidet bei UMTS zwei Arten:

- **Hard Handover** – Hierbei wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die Verbindung hart zu einem anderen *Node B* umgeschaltet. Diese Art von Handover geschieht im TDD–Modus während des Umschaltens zwischen Sender und Empfänger.
- **Soft Handover** – Dabei kann ein Mobiltelefon mit bis zu drei Basisstationen kommunizieren. Die Übergabe eines Teilnehmers von einem *Node B* zu einem anderen erfolgt allmählich, bis der Teilnehmer diesen Bereich verlässt. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Makrodiversität*.

Die *Downlink–Daten* werden im *Radio Network Controller (RNC)* aufgeteilt (*Splitting*), über die beteiligten *Node Bs* ausgestrahlt und in der Mobilstation wieder zusammengesetzt (*Rake Processing*).

Im *Uplink* werden hingegen die gesendeten Daten von allen beteiligten Basisstationen empfangen. Die Zusammenlegung der Daten (*Soft Combining*) findet im RNC statt. Dieser leitet anschließend die Daten an das *Core Network (CN)* weiter.

Man unterscheidet bei *Soft Handover* drei Sonderfälle:

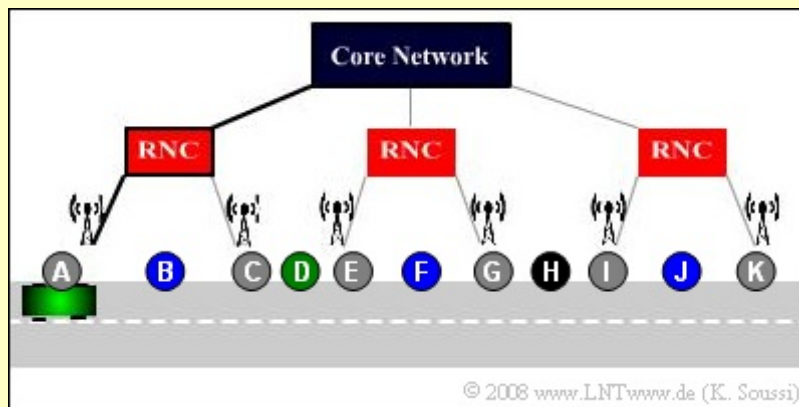
Bei **Softer Handover** wird ein Teilnehmer über verschiedene Pfade der gleichen Basisstation *Node B* versorgt. Dagegen geschieht bei **Intra–RNC Handover** die Versorgung der Teilnehmer über zwei verschiedene Basisstationen, die an denselben RNC angeschlossen sind. Das *Combining* und *Splitting* der Daten findet in dem gemeinsamen RNC statt.

Befindet sich der Teilnehmer in einem Gebiet, das von zwei benachbarten *Radio Network Controllern* verwaltet wird, so liegt **Inter–RNC Handover** vor. Der erste RNC, den man auch als *Serving RNC (SRNC)* bezeichnet, übernimmt die Kommunikation mit dem *Core Network* und ist für *Combining* und *Splitting* verantwortlich. Der zweite RNC – der so genannte *Drift RNC (DRNC)* – übernimmt die Kommunikation mit dem SRNC und mit dem von ihm verwalteten *Node B*.

Beispiel: Die nachfolgende Flash–Animation soll dieses Szenario verdeutlichen. Man erkennt

- Hard Handover bei H,
- Inter–RNC Handover bei grüner Markierung D,
- Intra–RNC Handover bei blauen Marken: B, F, J,
- nur eine RNC–Verbindung bei A, C, E, G, I, K.

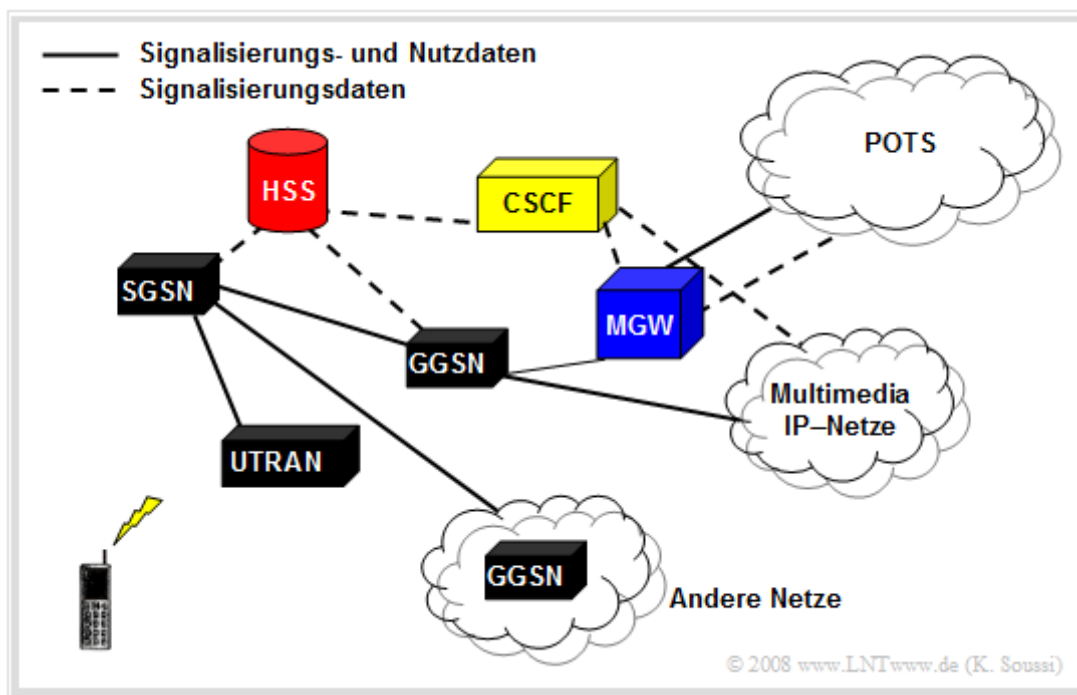
START der Animation



© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

IP–basierte Netze

Mit dem UMTS Release 5 wurden unter Anderem **IP–basierte Netze** (*IP Core Networks*) eingeführt. Dabei werden sowohl Nutzdaten als auch Kontrolldaten über ein internes IP–Netz übertragen. Das bedeutet, dass sowohl leitungsvermittelte Dienste als auch paketvermittelte Dienste auf der Basis von IP–Protokollen erbracht werden.



Die Grafik zeigt die Netzarchitektur von UMTS Release 5 in schematischer Weise. Im Vergleich zur ursprünglichen UMTS–Netzarchitektur (Release 99) wurde das Netz um folgende Knoten ergänzt:

- Das **Media Gateway (MGW)** ist für die Wiedergewinnung der in *Voice–over–IP* (VoIP) konvertierten Sprachpakete in herkömmliche Sprachdaten verantwortlich.
- Der **Home Subscriber Server (HSS)** fasst die aus dem *UMTS Release 99* bekannten Register HLR und VLR zusammen.
- Der **Call State Control Function (CSCF)**–Knoten ist für die gesamte Steuerung des IP–Netzes in *UMTS Release 5* zuständig und stellt zudem die Kommunikation zwischen CSCF–Knoten und Teilnehmer über das *Session Initiation Protokoll* (SIP) her.

Es spricht vieles für den Einsatz einer solchen IP–basierten Netzarchitektur, da diese eine Reihe von Verbesserungen bereitstellt. Wesentliche **Vorteile** von IP–Netzen sind:

- eine zukunftsweisende Alternative zur jetzigen Auslegung,
- eine preiswerte Routing–Technologie ⇒ große Einsparungen bei der Vermittlungstechnik,
- große Flexibilität bei der Einführung neuer Dienste, und
- eine leichte Implementierung von Netzüberwachungstechniken.

Entscheidende **Nachteile** dieser Architektur sind derzeit (2011) allerdings auch:

- die mühsame Integration der Infrastruktur der zweiten Mobilfunkgeneration,
- die Notwendigkeit von Übergangsknoten zur Konvertierung der Daten in sog. Gateways,
- das Fehlen eines eindeutigen und zuverlässigen Sicherheitskonzeptes.

Sprachcodierung (1)

Im Kapitel **GSM** dieses Buches wurden bereits mehrere Sprachcodex ausführlich beschrieben. Ein Sprachcodex dient zur Reduzierung der Datenrate eines digitalisierten Sprach- oder Musiksignals. Dabei wird Redundanz und Irrelevanz aus dem Originalsignal entfernt. Das Kunstwort *Codec* weist darauf hin, dass die gleiche Funktionseinheit sowohl zur Codierung wie auch zur Decodierung verwendet wird.

Unter anderem wurde der **Adaptive Multi-Rate** Codec (AMR) vorgestellt, der im Frequenzbereich von 300 bis 3400 Hz ein dynamisches Umschalten zwischen acht verschiedenen Modi (Einzelcodex) unterschiedlicher Datenrate im Bereich von 4.75 bis 12.2 kbit/s erlaubt und auf **ACELP** basiert.

Auch in UMTS Release 99 und UMTS Release 4 werden diese AMR-Codex unterstützt. Sie erlauben im Vergleich zu den früheren Sprachcodex (*Full-Rate*, *Half-Rate* und *Enhanced Full-Rate Vocoder*)

- eine Unabhängigkeit von den Kanalbedingungen und der Netzauslastung,
- die Möglichkeit, die Datenraten an die Bedingungen anzupassen,
- einen verbesserten flexiblen Fehlerschutz bei stärkerer Funkstörung, und
- dadurch insgesamt eine bessere Sprachqualität.

Im Jahre 2001 wurde vom 3gpp-Forum (*3rd Generation Partnership Project*) und der *International Telecommunication Union* (ITU) für das UMTS Release 5 der neue Sprachcodex **Wideband-AMR** spezifiziert. Dieser ist eine Weiterentwicklung des AMR und bietet

- eine erweiterte Bandbreite von 50 bis 7000 Hz (Abtastfrequenz 16 kHz),
- insgesamt 9 Modi zwischen 6.6 und 23.85 kbit/s (wovon aber nur 5 genutzt werden), und
- eine verbesserte Sprachqualität und einen besseren, natürlicheren Klang.

Die Tabelle gibt eine Übersicht über die verschiedenen Modi und deren Bitumfang.

Modus in kbit/s	6.60	8.85	12.65	14.25	15.85	18.25	19.85	23.05	23.85
Anzahl der Bits	132	177	253	285	317	365	397	461	477

© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

Sie können sich die Qualität dieser Sprachcodierverfahren bei Sprache und Musik mit dem folgenden Interaktionsmodul verdeutlichen:

Qualität verschiedener Sprach-Codex (Dateigröße: 11.3 MB !)

Anmerkung: Die untere Grenzfrequenz von Wideband-AMR ist zwar mit 50 Hz spezifiziert, aber auf Grund verwendeter Vorfilter ist diese meist – und auch in der Audio-Demo – auf 200 Hz angehoben, um die Störanfälligkeit zu reduzieren und die Kerndaten von Handy-Lautsprechern und –Mikrofonen zu berücksichtigen.

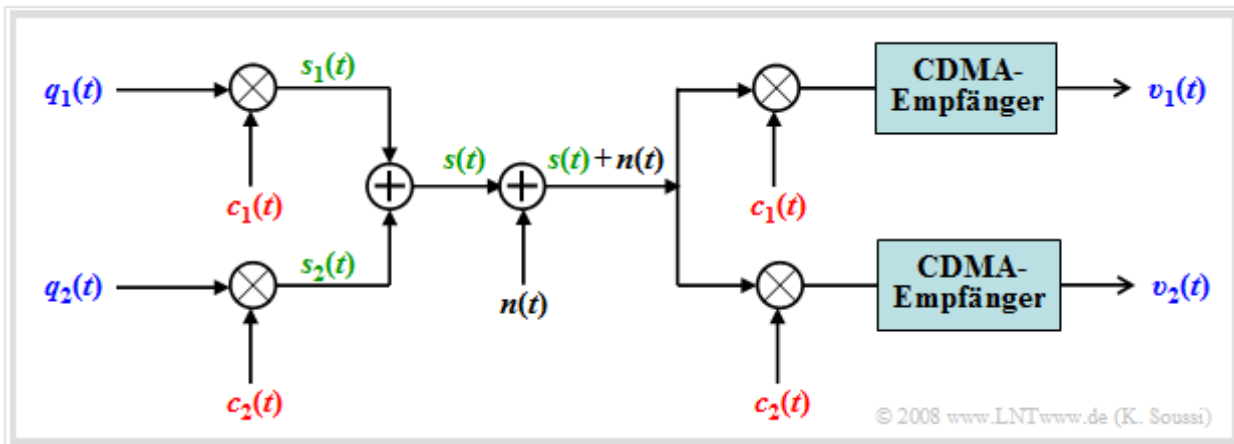
Sprachcodierung (2)

Im Folgenden sind einige wesentliche **Merkmale von Wideband-AMR** aufgelistet:

- Die Sprachdaten werden an den Codec als PCM-codierte Sprache mit **16000 Abtastwerten pro Sekunde** geliefert. Die Sprachcodierung erfolgt in **Blöcken von 20 ms** und die Datenrate wird alle 20 ms angepasst.
- Das Frequenzband (50 Hz bis 7000 Hz) wird in zwei Teilbänder unterteilt, die unterschiedlich codiert werden, um mehr Bits den subjektiv wichtigen Frequenzen zuweisen zu können. Das obere Band (6400 Hz bis 7000 Hz) wird nur im höchsten Modus (23.85 kbit/s) übertragen. In allen anderen Modi werden bei der Codierung nur die Frequenzen 50 Hz bis 6400 Hz berücksichtigt.
- Wideband-AMR unterstützt **Discontinuous Transmission (DTX)**. Dieses Feature bedeutet, dass die Übertragung bei Sprachpausen angehalten wird, wodurch sowohl der Energieverbrauch der Mobilstation als auch die Gesamtinterferenz an der Luftschnittstelle gesenkt werden. Dieses Verfahren ist auch unter dem Namen *Source-Controlled Rate (SCR)* bekannt.
- Die **Voice Activity Detection (VAD)** ermittelt, ob gerade gesprochen wird oder nicht und fügt auch bei kürzeren Sprachpausen einen SID-Rahmen (*Silence Descriptor*) ein. Dem Teilnehmer wird das Gefühl einer kontinuierlichen Verbindung suggeriert, indem der Decoder während Sprachpausen synthetisch erzeugtes Hintergrundgeräusch (englisch: *Comfort Noise*) einfügt.

Anwendung des CDMA–Verfahrens in UMTS (1)

UMTS verwendet das Vielfachzugriffsverfahren **Direct Sequence Code Division Multiple Access** (DS–CDMA), das bereits im **Kapitel 5.1** des Buches „Modulationsverfahren“ besprochen wurde.



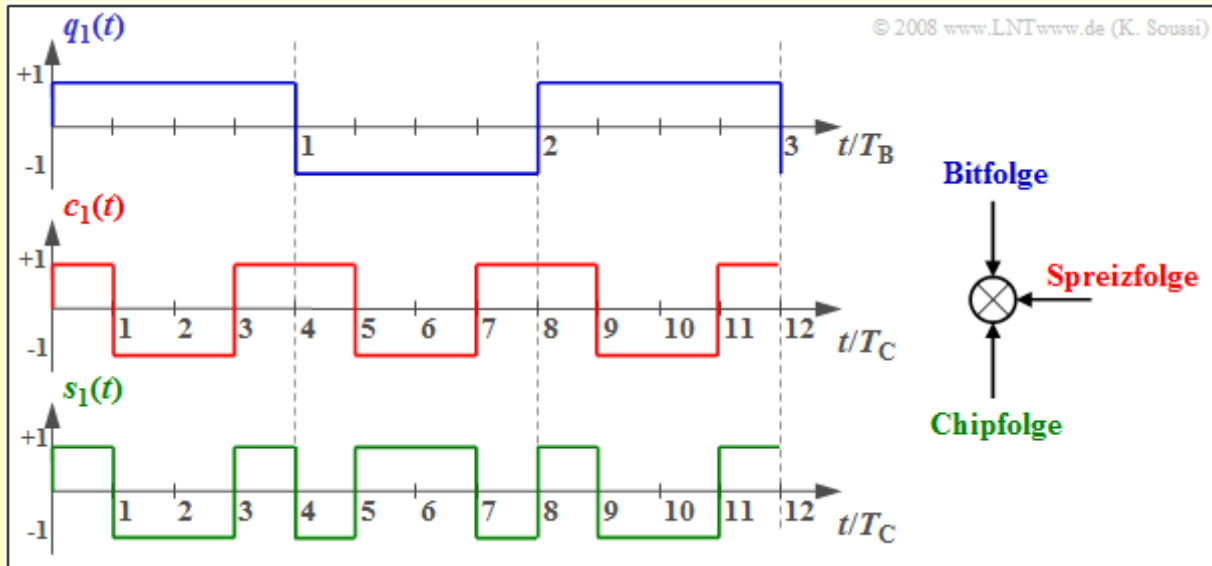
Hier folgt eine kurze Zusammenfassung entsprechend der Grafik, die ein solches System im äquivalenten Tiefpassbereich und stark vereinfacht beschreibt:

- Die beiden Datensignale $q_1(t)$ und $q_2(t)$ sollen den gleichen Kanal nutzen, ohne sich gegenseitig zu stören. Die Bitdauer beträgt jeweils T_B .
- Jedes der Datensignale wird mit einem zugeordneten Spreizcode – $c_1(t)$ bzw. $c_2(t)$ – multipliziert und es wird das Summensignal $s(t) = q_1(t) \cdot c_1(t) + q_2(t) \cdot c_2(t)$ gebildet und übertragen.
- Beim Empfänger werden die gleichen Spreizcodes $c_1(t)$ bzw. $c_2(t)$ zugesetzt und damit die Signale wieder voneinander getrennt.
- Unter der Voraussetzung, dass die Spreizcodes orthogonal sind und dass das AWGN–Rauschen klein ist, gilt dann $v_1(t) = q_1(t)$ und $v_2(t) = q_2(t)$.
- Bei einem AWGN–Rauschsignal $n(t)$ wird die Bitfehlerwahrscheinlichkeit durch den oder die anderen Teilnehmer nicht verändert, solange die Spreizfolgen orthogonal sind.

Auf der nächsten Seite werden diese Aussagen an einem Beispiel verdeutlicht.

Anwendung des CDMA–Verfahrens in UMTS (2)

Beispiel: Die Grafik zeigt drei Datenbit (+1, -1, +1) des rechteckförmigen Quellensignals $q_1(t)$ von Teilnehmer 1, jeweils mit der Symboldauer T_B . Die Symboldauer T_C des Spreizcodes $c_1(t)$ – die man auch **Chipdauer** nennt – ist um den Faktor 4 kleiner. Durch die Multiplikation $s_1(t) = q_1(t) \cdot c_1(t)$ entsteht ein Chipstrom der Länge $12 \cdot T_C$.



Man erkennt weiter aus dieser Darstellung, dass $s_1(t)$ höherfrequenter ist als $q_1(t)$. Deshalb spricht man auch von **Bandspreizung** (englisch: *Spread Spectrum*). Der CDMA–Empfänger macht diese wieder rückgängig, was als **Bandstauchung** bezeichnet wird.

Zusammenfassend kann man sagen: Durch die Anwendung von DS–CDMA auf eine Nutzbitfolge

- vergrößert sich dessen Bandbreite um den **Spreizfaktor** $J = T_B/T_C$. Dieser ist gleich der Anzahl der *Chips pro Bit*;
- ist die Chiprate R_C um den Faktor J größer als die Bitrate R_B ;
- ist die Bandbreite des CDMA–Signals um J größer als die Bandbreite jedes einzelnen Nutzers.

Das heißt: Bei *UMTS* steht jedem Teilnehmer die gesamte Bandbreite über die gesamte Sendedauer zur Verfügung. Erinnern wir uns: Bei GSM werden als Vielfachzugriffsverfahren sowohl *Frequency Division Multiple Access* als auch *Time Division Multiple Access* verwendet.

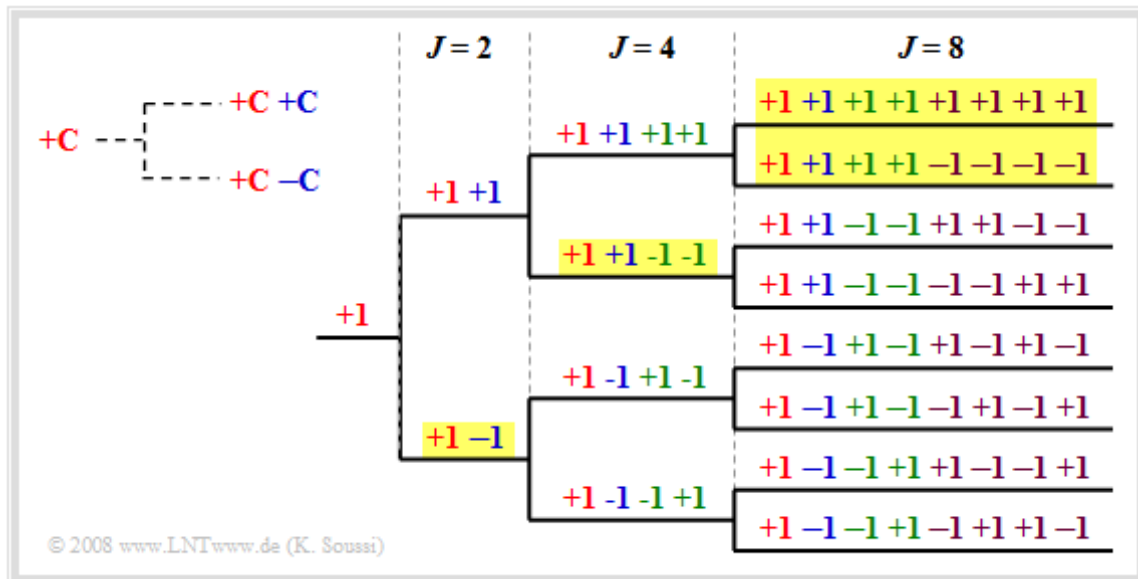
- Hier verfügt jeder Teilnehmer nur über ein begrenztes Frequenzband (FDMA), und
- er hat nur innerhalb von Zeitschlitzen Zugriff auf den Kanal (TDMA).

Spreizcodes und Verwürfelung in UMTS (1)

Die Spreizcodes für UMTS sollen

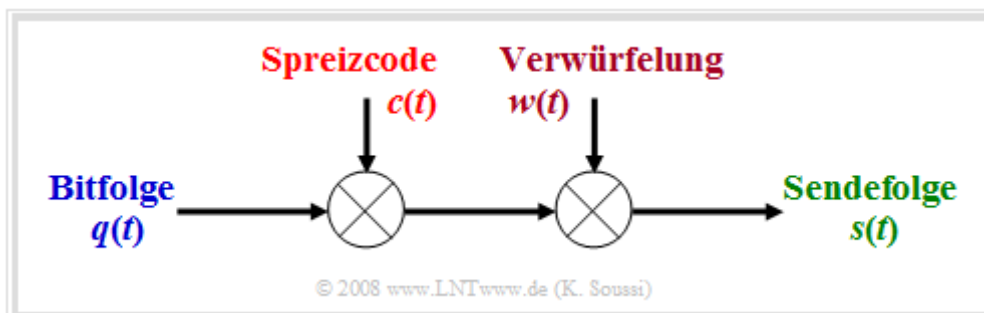
- zueinander orthogonal sein, um eine gegenseitige Beeinflussung der Teilnehmer zu vermeiden,
- eine flexible Realisierung unterschiedlicher Spreizfaktoren J ermöglichen.

Ein Beispiel dafür sind die **Codes mit variablem Spreizfaktor** (englisch: *Orthogonal Variable Spreading Faktor*, OVSF), die Codes der Längen von $J = 4$ bis $J = 512$ bereitstellen. Diese können, wie in der Grafik zu sehen ist, mit Hilfe eines Codebaums erstellt werden. Dabei entstehen bei jeder Verzweigung aus einem Code C zwei neue Codes $(+ C + C)$ und $(+ C - C)$.



Anzumerken ist, dass kein Vorgänger und Nachfolger eines Codes benutzt werden darf. Im Beispiel könnten also acht Spreizcodes mit Spreizfaktor $J = 8$ verwendet werden oder die vier gelb hinterlegten Codes – einmal mit $J = 2$, einmal mit $J = 4$ und zweimal mit $J = 8$. Beispielsweise können die unteren vier Codes mit dem Spreizfaktor $J = 8$ nicht herangezogen werden, da sie alle mit „+1 -1“ beginnen, was bereits durch den OVSF-Code mit Spreizfaktor $J = 2$ belegt ist. Der hier dargelegte Sachverhalt wird auch durch das Flash-Interaktionsmodul **OVSF-Codes** verdeutlicht.

Um mehr Spreizcodes zu erhalten und damit mehr Teilnehmer versorgen zu können, wird nach der Bandspreizung mit $c(t)$ die Folge mit $w(t)$ chipweise nochmals verwürfelt, ohne dass eine weitere Spreizung stattfindet. Der **Verwürfelungscode** $w(t)$ hat die gleiche Länge und dieselbe Rate wie $c(t)$.

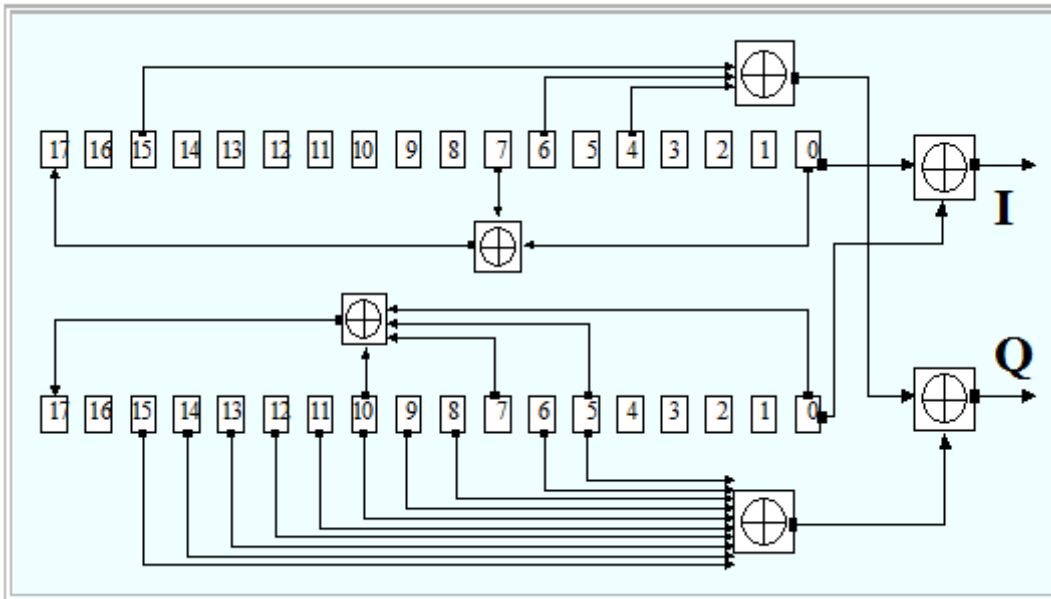


Durch die Verwürfelung (englisch: *Scrambling*) verlieren die Codes ihre vollständige Orthogonalität; man nennt sie *quasi-orthogonal*. Bei diesen Codes ist zwar die **Kreuzkorrelationsfunktion** (KKF) zwischen unterschiedlichen Spreizcodes ungleich null, sie zeichnen sich aber durch eine ausgeprägte **Autokorrelationsfunktion** um den Nullpunkt aus, was die Detektion am Empfänger erleichtert.

Spreizcodes und Verwüfelung in UMTS (2)

Die Verwendung quasi-orthogonaler Codes macht Sinn, da die Menge an orthogonalen Codes begrenzt ist und durch die Verwüfelung verschiedene Teilnehmer auch gleiche Spreizcodes verwenden können.

In UMTS werden für die Verwüfelung so genannte **Goldcodes** verwendet. Die Grafik aus [3gpp05] zeigt das Blockschaltbild zur schaltungstechnischen Erzeugung solcher Codes. Dabei werden zunächst zwei unterschiedliche **Pseudonoise-Folgen** gleicher Länge (hier: $N = 18$) mit Hilfe von Schieberegistern parallel erzeugt und dann mit *Exklusiv-Oder-Gatter* bitweise addiert.



Im Uplink hat jede Mobilstation einen eigenen Verwüfelungscode und die Trennung der einzelnen Kanäle erfolgt über den jeweils gleichen Code. Dagegen hat im Downlink jedes Versorgungsgebiet eines Node B einen gemeinsamen Verwüfelungscode.

	Spreizcode		Verwüfelungscode	
	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink
Typ	OVSF- Codes		Komplexe Goldcodes	
Länge	4 ... 256 Chips	4 ... 512 Chips	38400 Chips	38400 Chips
Dauer	1.04 μ s ... 133.34 ms		10 ms	10 ms
verfügbaren Codes	4 ... 256	4 ... 512	16.777.216	7680
Bandspreizung	Ja		Nein	
Zur Trennung von	Nutzdaten und Kontrolldaten	Teilnehmer in einer Zelle	Teilnehmern	Versorgungsgebieten

Die Tabelle fasst einige Daten der Spreiz- und Verwüfelungscodes zusammen.

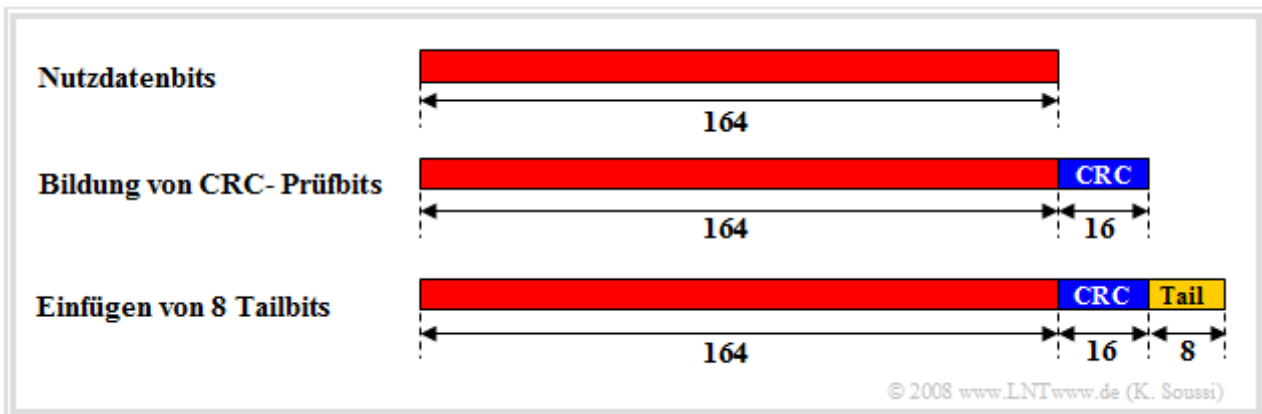
Kanalcodierung (1)

Ebenso wie bei GSM erfahren EFR- und AMR-codierte Sprachdaten im UMTS einen zweistufigen Fehlerschutz, bestehend aus

- Bildung von CRC-Prüfbits (englisch: *Cyclic Redundancy Check*), und
- Faltungscodierung (englisch: *Convolutional Coding*).

Diese Verfahren unterscheiden sich jedoch von denjenigen bei GSM durch eine größere Flexibilität, da sie bei UMTS unterschiedliche Datenraten berücksichtigen.

Für die **Fehlererkennung** mittels CRC werden je nach Größe des Transportblockes (10 oder 20 ms) 8, 12, 16 oder 24 *CRC-Bits* gebildet und an diesen angehängt. Am Ende eines jeden Rahmens werden außerdem 8 Tailbits eingefügt, die Synchronisationszwecken dienen. Die Grafik zeigt einen beispielhaften Transportblock des DCH-Kanals mit 164 Nutzdatenbits, an den 16 CRC-Prüfbits und acht Tailbits angehängt werden.



Für die **Fehlerkorrektur** kommen bei UMTS – je nach Datenrate – zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz:

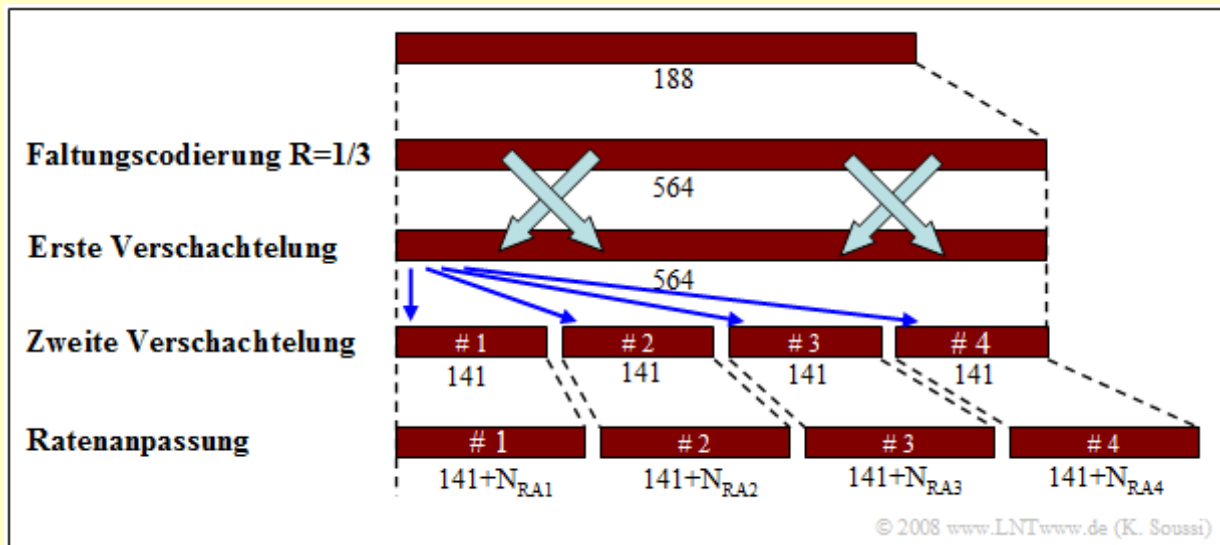
- Bei niedrigen Datenraten werden wie bei GSM-Faltungscodes (englisch: *Convolutional Codes*) mit den Coderaten $r = 1/2$ oder $r = 1/3$ verwendet. Diese werden mit acht Speicherelementen eines rückgekoppelten Schieberegisters (256 Zustände) erzeugt. Der Codiergewinn beträgt mit der Coderate $1/3$ und bei niedrigen Fehlerraten ca. 4.5 bis 6 dB.
- Bei höheren Datenraten verwendet man **Turbo-Codes** der Rate $r = 1/3$. Das Schieberegister besteht hier aus drei Speicherzellen, die insgesamt acht Zustände annehmen können. Der Gewinn der Turbo-Codes ist gegenüber Faltungscodes um 2 bis 3 dB größer und ist abhängig von der Anzahl der Iterationen. Sie benötigen dafür zum einen Prozessoren mit hoher Rechenleistung, zum anderen kann es zu relativ großen Verzögerungen kommen.

Die Beschreibung wird auf der nächsten Seite fortgesetzt.

Kanalcodierung (2)

Nach der Kanalcodierung werden die Daten wie bei GSM einer **Verwürfelung** (englisch: *Interleaving*) zugeführt, um empfangsseitig die durch Fading entstandenen Bündelfehler auflösen zu können. Schließlich werden zur **Ratenanpassung** der entstandenen Daten an den physikalischen Kanal einzelne Bit nach einem vorgegebenen Algorithmus entfernt (*Puncturing*) oder wiederholt (*Repetition*).

Beispiel: Die Grafik zeigt zunächst die Zunahme der Bits durch einen Faltungs- oder Turbo code der Rate 1/3, wobei aus dem 188 Bit-Zeitrahmen (nach der CRC-Prüfsumme und den Tailbits) ein 564 Bit-Rahmen entsteht.



Danach folgt eine erste externe Verschachtelung und dann eine zweite interne Verschachtelung. Nach dieser wird der Zeitrahmen in vier Unterrahmen mit jeweils 141 Bit aufgeteilt und diese werden anschließend durch eine Ratenanpassung an den physikalischen Kanal angepasst.

Pulsformung und Modulation in UMTS (1)

Das **Sendeimpulsfilter** wandelt die binären $\{0, 1\}$ Daten in physikalische Signale. Es wird beschrieben durch den Frequenzgang $H_S(f)$, der formgleich mit dem Spektrum eines einzelnen Sendeimpulses ist.

Bei UMTS ist das Empfangsfilter $H_E(f) = H_S(f)$ an den Sender angepasst (*Matched-Filter*) und der Gesamtfrequenzgang $H(f) = H_S(f) \cdot H_E(f)$ erfüllt das **erste Nyquistkriterium**:

$$H(f) = H_{\text{CRO}}(f) = \begin{cases} 1 & \text{für } |f| \leq f_1, \\ 0 & \text{für } |f| \geq f_2, \\ \cos^2\left(\frac{\pi \cdot (|f| - f_1)}{2 \cdot (f_2 - f_1)}\right) & \text{sonst.} \end{cases}$$

Das bedeutet: Zeitlich aufeinander folgende Impulse stören sich nicht gegenseitig \Rightarrow es treten keine **Impulsinterferenzen** (englisch: *Intersymbol Interference*, ISI) auf. Die zugehörige Zeitfunktion lautet:

$$h(t) = \text{si}(\pi \cdot t/T_C) \cdot \frac{\cos(r \cdot \pi t/T_C)}{1 - (2r \cdot t/T_C)^2}.$$

„CRO“ steht hierbei für **Cosinus-Rolloff** (englisch: *Raised Cosine*). Die Summe $f_1 + f_2$ ist gleich dem Kehrwert der Chipdauer $T_C = 260$ ns, also gleich 3.84 MHz. Der **Rolloff-Faktor**

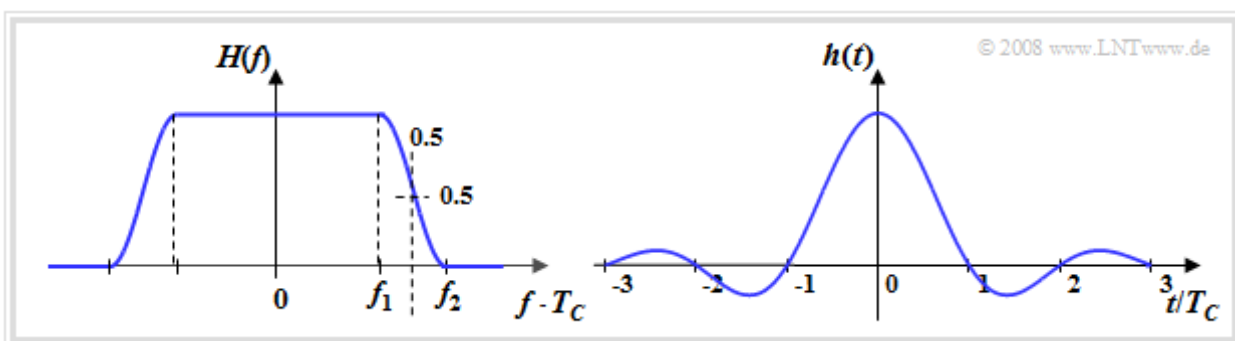
$$r = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$$

wurde bei UMTS zu $r = 0.22$ festgelegt. Wir bleiben bei der in *LNTwww* gewählten Bezeichnung „ r “, im UMTS-Standard wird hierfür „ α “ verwendet.

Die beiden Eckfrequenzen sind somit

$$f_1 = 1/(2T_C) \cdot (1 - r) \approx 1.5 \text{ MHz}, \quad f_2 = 1/(2T_C) \cdot (1 + r) \approx 2.35 \text{ MHz},$$

und die theoretische Bandbreite beträgt $B = 2 \cdot f_2 = 4.7$ MHz. Für jeden UMTS-Kanal steht mit 5 MHz somit ausreichend Bandbreite zur Verfügung.



Die Grafik zeigt links das (normierte) Nyquistspektrum $H(f)$ und rechts den dazugehörigen Nyquistimpuls $h(t)$ mit äquidistanten Nulldurchgängen im Abstand T_C . Sende filter $H_S(f)$ und Matched-Filter $H_E(f)$ sind jeweils für sich allein **Wurzel-Cosinus-Rolloff**-förmig (englisch: *Root Raised Cosine*).

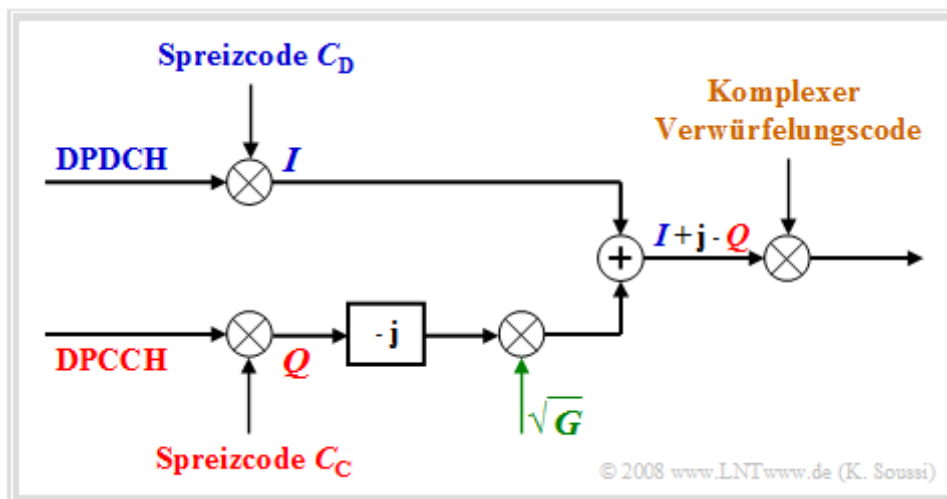
- Das bedeutet gleichzeitig: Die Impulsantworten $h_S(t)$ und $h_E(t)$ für sich allein erfüllen die erste Nyquistbedingung nicht. Erst die Kombination aus beiden (also im Zeitbereich die Faltung) führt zu den gewünschten äquidistanten Nulldurchgängen.

Pulsformung und Modulation in UMTS (2)

Die bei UMTS eingesetzten **Modulationsverfahren** können wie folgt zusammengefasst werden:

- In der Abwärtsrichtung (*Downlink*) wird zur Modulation sowohl bei *FDD* als auch bei *TDD* *Quaternary Phase Shift Keying* (QPSK) verwendet. Dabei werden Nutzdaten (DPDCH–Kanal) und Kontrolldaten (DPCCH–Kanal) zeitlich gemultiplext.
- Ebenso wird bei der *TDD* in Aufwärtsrichtung (*Uplink*) das Signal mittels QPSK moduliert, nicht aber bei *FDD*. Hier wird vielmehr eine **zweifache binäre PSK** (englisch: *Dual Channel–BPSK*) verwendet.

Bei *Dual–Channel BPSK* wird zwar ebenfalls der QPSK–Signalraum genutzt, aber in *Inphase–* und *Quadratur–Komponente* werden unterschiedliche Kanäle übertragen. Pro Modulationsschritt werden also zwei Chips übertragen und die Brutto–Chiprate ist daher doppelt so groß wie die Modulationsrate von 3.84 Mchip pro Sekunde.



Die Grafik zeigt dieses I/Q–Multiplexing–Verfahren, wie es auch bezeichnet wird, im äquivalenten Tiefpassbereich:

- Die gespreizten Nutzdaten des DPDCH–Kanals werden auf die Inphase–Komponente und die gespreizten Kontrolldaten des DPCCH–Kanals auf die Quadratur–Komponente moduliert und übertragen.
- Nach der Modulation wird die Quadratur–Komponente mit der Wurzel des Leistungsverhältnisses G zwischen den beiden Kanälen gewichtet, um den Einfluss des Leistungsunterschieds zwischen I und Q zu minimieren.
- Abschließend wird das komplexe Summensignal $(I + j \cdot Q)$ mit einem ebenfalls komplexen Verwürfelungscode multipliziert.

Ein Vorteil der zweifachen BPSK–Modulation ist die Möglichkeit der Verwendung stromsparender Verstärker. Ein Zeitmultiplex von Nutz– und Kontrolldaten wie im *Uplink* ist im *Downlink* nicht möglich. Ein Grund hierfür ist der Einsatz von *Discontinuous Transmission* (DTX) und die damit verbundenen zeitlichen Einschränkungen.

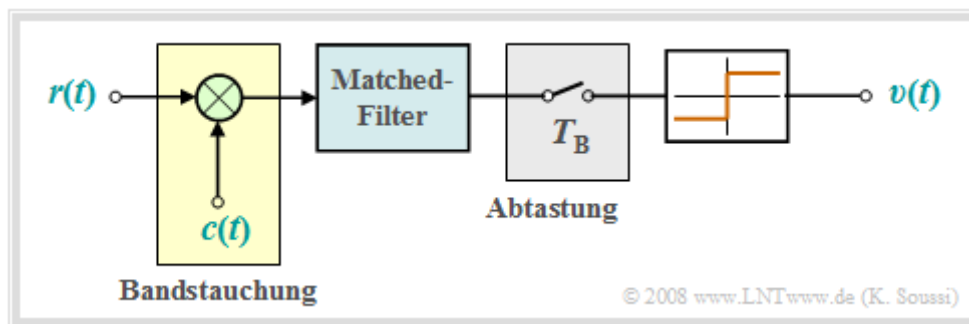
CDMA–Empfänger (1)

Aufgabe eines CDMA–Empfängers ist es, aus der Summe der gespreizten Datenströme die gesendeten Daten der einzelnen Teilnehmer zu separieren und zu rekonstruieren. Dabei unterscheidet man zwischen den *Single–User–Empfängern* und den *Multi–User–Empfängern*.

Im Downlink von UMTS wird stets ein **Single–User–Empfänger** verwendet, da in der Mobilstation eine gemeinsame Detektion aller Teilnehmer wegen der Vielzahl aktiver Teilnehmer sowie der Länge der Verwürfelungscodes und des asynchronen Betriebs zu aufwändig wäre.

Ein solcher Empfänger besteht aus einer Bank unabhängiger Korrelatoren. Jeder einzelne der insgesamt J Korrelatoren gehört zu einer spezifischen Spreizfolge. Die Korrelation wird meist in einer so genannten *Korrelatordatenbank* softwaremäßig gebildet. Dabei erhält man am Korrelatorausgang die Summe aus

- der *Autokorrelationsfunktion* des Spreizcodes und
- der *Kreuzkorrelationsfunktion* aller anderen Teilnehmer mit dem teilnehmereigenen Spreizcode.



Die Grafik zeigt die einfachste Realisierung eines solchen Empfängers mit Matched–Filter.

- Das Empfangssignal $r(t)$ wird zunächst mit dem Spreizcode $c(t)$ des betrachteten Teilnehmers multipliziert, was als *Bandstauchung* oder *Entspreizung* bezeichnet wird (gelbe Hinterlegung).
- Danach folgt die Faltung mit der Impulsantwort des Matched–Filters (*Root Raised Cosine*), um das SNR zu maximieren, und die Abtastung im Bittakt (T_B).
- Abschließend erfolgt die Schwellenwertentscheidung, die das Sinkensignal $v(t)$ und damit die Datenbits des betrachteten Teilnehmers liefert.

Beim AWGN–Kanal haben die Bandspreizung beim Sender und die daran angepasste Bandstauchung beim Empfänger wegen $c(t)^2 = 1$ keinen Einfluss auf die Bitfehlerwahrscheinlichkeit. Wie in **Aufgabe A4.5** gezeigt, gilt auch mit Bandspreizung/Bandstauchung bei optimalem Empfänger unabhängig vom Spreizgrad J :

$$p_B = Q\left(\sqrt{2 \cdot E_B/N_0}\right).$$

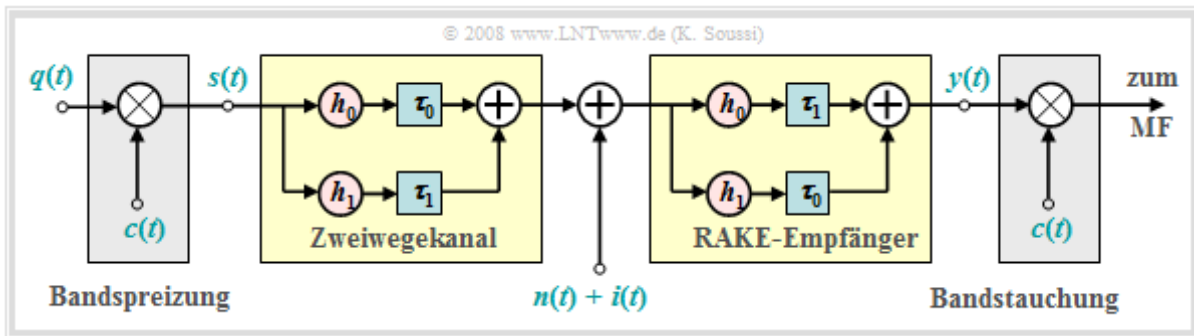
Dieses Ergebnis lässt sich wie folgt begründen: Die statistischen Eigenschaften von weißem Rauschen $n(t)$ werden durch die Multiplikation mit dem ± 1 Signal $c(t)$ nicht verändert.

CDMA–Empfänger (2)

Ein weiterer Empfänger für die Single–User–Detektion ist der so genannte **RAKE–Empfänger**, der bei einem Mehrwegekanal zu deutlichen Verbesserungen führt. Die Grafik zeigt seinen Aufbau für einen Zweivegekanal mit

- einem direkten Pfad mit Koeffizient h_0 und Verzögerungszeit τ_0 , und
- einem Echo mit Koeffizient h_1 und Verzögerungszeit τ_1 .

Zur Vereinfachung werden beide Amplitudenkoeffizienten h_0 und h_1 als reell angenommen.



Aufgabe des RAKE–Empfängers ist es, die Signalenergien aller Pfade (in diesem Beispiel nur zwei) auf einen einzigen Zeitpunkt zu konzentrieren. Er arbeitet demnach wie eine *Harke* für den Garten, was auch die deutsche Übersetzung für „RAKE“ ist.

Legt man einen Diracimpuls zur Zeit $t = 0$ an den Kanaleingang an, so gibt es am Ausgang des RAKE–Empfängers drei Diracimpulse entsprechend der Gleichung

$$s(t) = \delta(t) \Rightarrow y(t) = h_0 \cdot h_1 \cdot \delta(t - 2\tau_0) + (h_0^2 + h_1^2) \cdot \delta(t - \tau_0 - \tau_1) + h_0 \cdot h_1 \cdot \delta(t - 2\tau_1).$$

Die Signalenergie konzentriert sich auf den Zeitpunkt $\tau_0 + \tau_1$. Von den insgesamt vier Wegen tragen zwei dazu bei. Die Diracfunktionen bei $2\tau_0$ und $2\tau_1$ bewirken zwar Impulsinterferenzen. Ihre Gewichte sind aber deutlich kleiner als die des Hauptpfades.

Beispiel: Mit den Kanalparametern $h_0 = 0.8$ und $h_1 = 0.6$ beinhaltet der Hauptpfad (mit Gewicht h_0) nur $0.8^2/(0.8^2 + 0.6^2) = 64\%$ der gesamten Signalenergie. Mit RAKE–Empfänger und den gleichen Gewichten lautet die obige Gleichung

$$y(t) = 0.48 \cdot \delta(t - 2\tau_0) + 1.0 \cdot \delta(t - \tau_0 - \tau_1) + 0.48 \cdot \delta(t - 2\tau_1).$$

Der Anteil des Hauptpfades an der Gesamtenergie beträgt nun $1^2/(1^2 + 0.48^2 + 0.48^2) \approx 68\%$.

RAKE–Empfänger werden zur Implementierung in mobilen Geräten bevorzugt, haben aber bei vielen aktiven Teilnehmern nur eine begrenzte Leistungsfähigkeit. Bei einem Mehrwegekanal mit vielen (M) Pfaden hat auch der RAKE M Finger. Der Hauptfinger (*Main Finger*) – auch *Searcher* genannt – ist dafür verantwortlich, die individuellen Pfade der Mehrfachausbreitung zu identifizieren und einzuordnen. Er sucht die stärksten Pfade und weist diese zusammen mit ihren Steuerinformationen anderen Fingern zu. Dabei wird die Zeit– und Frequenzsynchronisation aller Finger kontinuierlich mit den Kontrolldaten des empfangenen Signals verglichen.

CDMA–Empfänger (3)

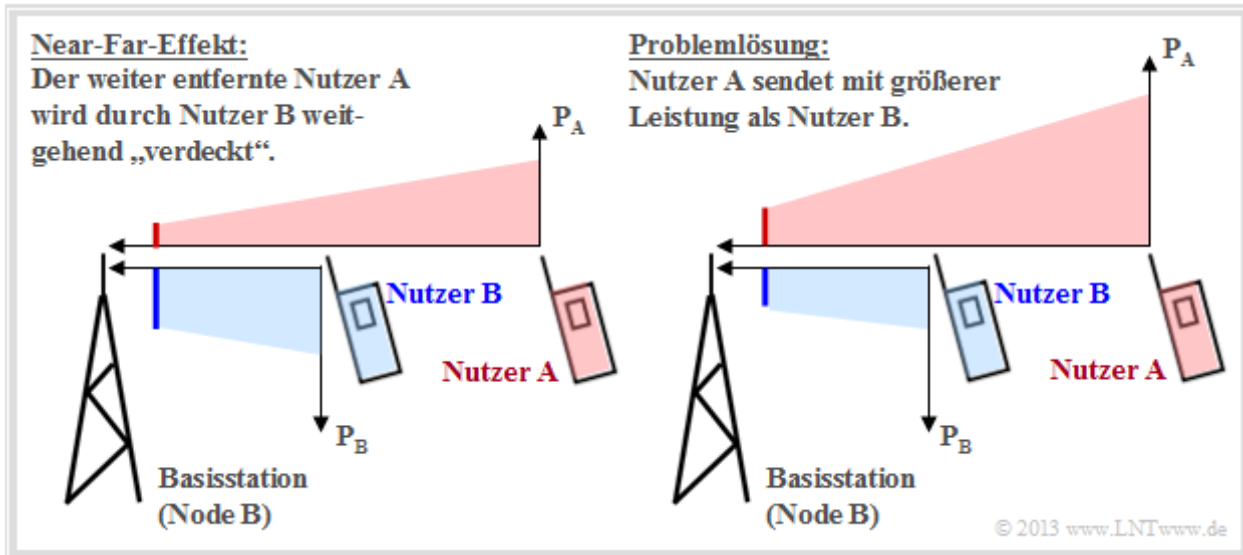
Bei einem Single–User–Empfänger wird nur das Datensignal eines Teilnehmers entschieden, während alle anderen Teilnehmersignale als zusätzliches Rauschen betrachtet werden. Die Fehlerrate eines solchen Detektors wird jedoch dann sehr groß sein, wenn große *Intrazellinterferenzen* (viele Teilnehmer in der betrachteten Funkzelle) oder *Interzellinterferenzen* (störende Teilnehmer in Nachbarzellen) vorliegen.

Dagegen treffen **Multi–User–Empfänger** eine gemeinsame Entscheidung für alle aktiven Teilnehmer. Die Eigenschaften solcher Mehrbenutzerempfänger können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ein Multi–User–Empfänger betrachtet die Interferenzen anderer Teilnehmer nicht als Rauschen, sondern nutzt auch die in den Interferenzsignalen enthaltenen Informationen zur Detektion.
- Der Empfänger ist sehr aufwändig zu realisieren und die Algorithmen sind äußerst rechenintensiv. Er beinhaltet eine extrem große Korrelatordatenbank gefolgt von einem gemeinsamen Detektor.
- Dem Multi–User–Empfänger müssen die Spreizcodes aller aktiven Teilnehmer bekannt sein. Diese Voraussetzung schließt einen Einsatz im UMTS–Downlink (also bei der Mobilstation) aus.
- Dagegen sind den Basisstationen alle teilnehmerspezifischen Spreizcodes a priori bekannt, so dass im Uplink die Mehrbenutzerdetektion tatsächlich zur Anwendung kommt.
- Manche Detektionsalgorithmen verlangen zusätzlich die Kenntnis anderer Signalparameter wie Energien und Verzögerungszeiten. Der gemeinsame Detektor – das Herzstück des Empfängers – ist dafür verantwortlich, den jeweiligen passenden Detektionsalgorithmus anzuwenden. Beispiele für die Mehrbenutzerdetektion sind *Decorrelating Detection* und *Interference Cancellation*.

Near-Far-Effekt

Der Near-Far-Effekt ist ausschließlich ein Problem des Uplinks, also der Übertragung von mobilen Teilnehmern zu einer Basisstation. Wir betrachten ein Szenario mit zwei unterschiedlich weit von der Basisstation (*Node B*) entfernten Nutzern entsprechend der folgenden Grafik.



Die Grafik kann man wie folgt interpretieren:

- Senden beide Mobilstationen mit gleicher Leistung, so ist die Empfangsleistung des roten Nutzers A an der Basisstation aufgrund des Pfadverlustes deutlich kleiner als die des blauen Nutzers B (linkes Szenario). In großen Makrozellen kann der Unterschied bis zu 100 dB ausmachen. Dadurch wird das rote Signal weitgehend durch das blaue verdeckt.
- Man kann den Near-Far-Effekt weitgehend vermeiden, wenn der weiter entfernte Nutzer A mit höherer Leistung sendet als Nutzer B, wie im rechten Szenario angedeutet. An der Basisstation ist dann die Empfangsleistung beider Mobilstationen gleich.

Anmerkung: Bei einem idealisierten System (Einwegekanal, ideale A/D-Wandler, vollständig lineare Verstärker) sind die übertragenen Daten der Nutzer orthogonal zueinander und man könnte die Nutzer auch bei sehr unterschiedlichen Empfangsleistungen einzeln detektieren. Diese Aussage gilt für UMTS (Mehrfachzugriffsverfahren: CDMA) ebenso wie für das 2G-System GSM (FDMA/TDMA) und für das 4G-System LTE (TDMA/OFDMA).

In der Realität ist jedoch die Orthogonalität aufgrund folgender Ursachen nicht immer gegeben:

- verschiedene Empfangspfade \Rightarrow Mehrwegekanal,
- nicht ideale Eigenschaften der Spreiz- und Scramblingcodes bei CDMA,
- Asynchronität der Nutzer im Zeitbereich (Grundlaufzeit der Pfade) und im Frequenzbereich (nicht ideale Oszillatoren und Dopplerverschiebung aufgrund der Mobilität der Nutzer).

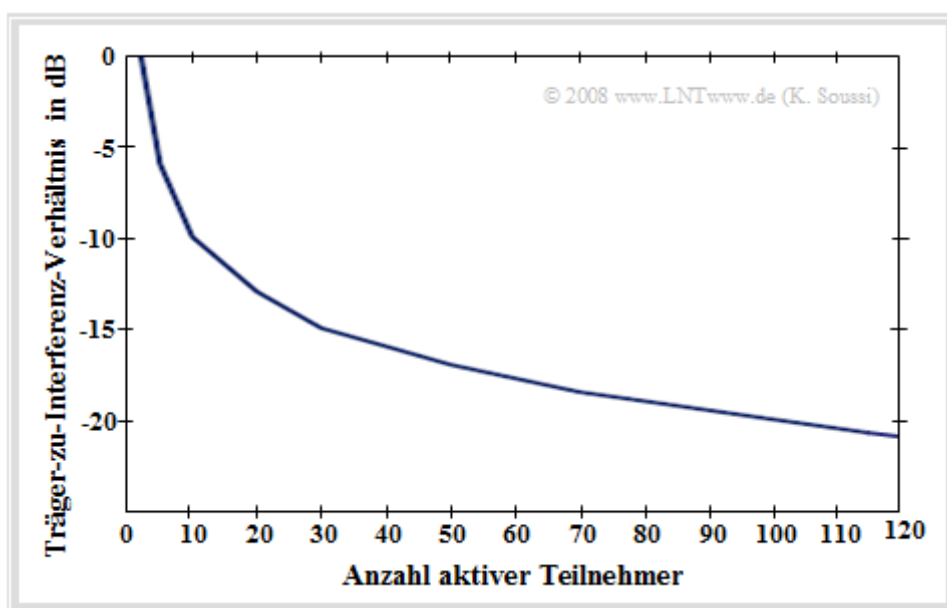
Folglich sind die Nutzer nicht mehr orthogonal zueinander und der Störabstand des zu detektierenden Nutzers gegenüber den anderen Teilnehmern ist nicht beliebig hoch. Bei GSM und LTE kann man von Störabständen von 25 dB und mehr ausgehen, bei CDMA jedoch nur von ca. 15 dB, bei hochratiger Datenübertragung eher noch von etwas weniger.

Träger-zu-Interferenz-Leistungsverhältnis (CIR) – Zellatmung

Unter **Kapazität** wird allgemein die Anzahl der verfügbaren Übertragungskanäle pro Zelle verstanden werden. Da aber bei UMTS die Teilnehmerzahl im Gegensatz zum GSM nicht streng begrenzt ist, lässt sich hier keine feste Kapazität angeben.

- Bei perfekten Codes stören sich die Teilnehmer gegenseitig nicht. Dadurch wird die maximale Nutzerzahl allein durch den Spreizfaktor J und die verfügbare Anzahl der zueinander orthogonalen Codes bestimmt, die aber ebenfalls limitiert ist.
- Praxisnäher sind nichtperfekte, nur quasi-orthogonale Codes. Hier wird die „Kapazität“ einer Funkzelle vorwiegend durch die entstehenden Interferenzen bzw. das *Träger-zu-Interferenz-Leistungsverhältnis* (englisch: *Carrier-to-Interference Ratio*, CIR) bestimmt.

Wie aus folgender Grafik zu ersehen ist, hängt das CIR direkt von der Anzahl der aktiven Teilnehmer ab.



Je mehr Teilnehmer aktiv sind, desto mehr Interferenzleistung entsteht und desto kleiner wird das CIR. Desweiteren hängt dieses für UMTS entscheidende Kriterium auch von folgenden Größen ab:

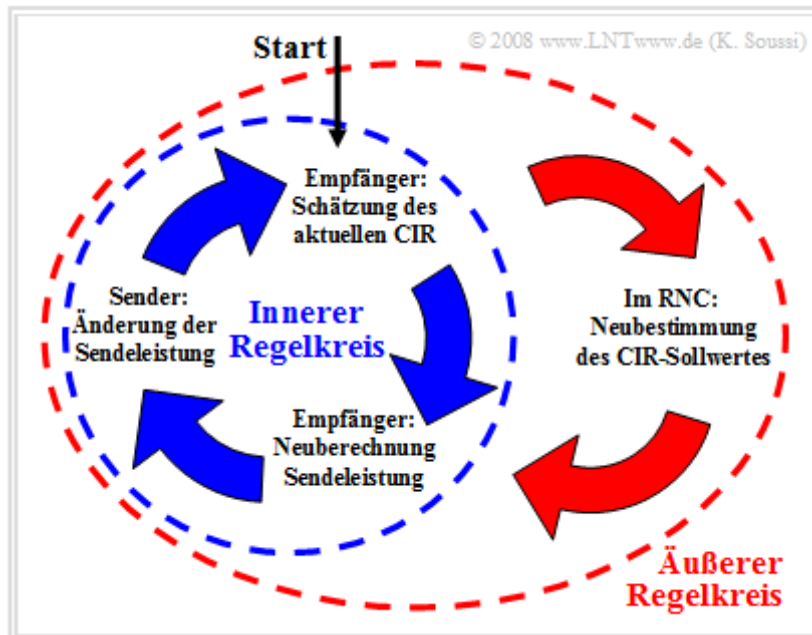
- der Topologie und dem Nutzerverhalten (aufgerufene Dienste),
- dem Spreizfaktor J und der Orthogonalität des verwendeten Spreizcodes.

Um den störenden Einfluss der Interferenzleistung auf die Übertragungsqualität zu begrenzen, gibt es zwei Möglichkriterien:

- **Zellatmung:** Nimmt bei UMTS die Anzahl der aktiven Teilnehmer signifikant zu, so wird der Zellenradius verkleinert und (wegen der nun weniger Teilnehmer in der Zelle) auch die aktuelle Interferenzleistung geringer. Für die Versorgung der Teilnehmer am Rande der verkleinerten Zelle springt dann eine weniger belastete Nachbarzelle ein.
- **Leistungsregelung:** Überschreitet die Gesamtinterferenzleistung innerhalb einer Funkzelle einen vorgegebenen Grenzwert, so wird die Sendeleistung aller Teilnehmer entsprechend herabgesetzt und/oder die Datenrate reduziert, was eine schlechtere Übertragungsqualität für alle zur Folge hat. Hierzu mehr auf der folgenden Seite.

Leistung und Leistungsregelung in UMTS

Als Regelgröße bei der Leistungsregelung in UMTS wird das Verhältnis zwischen der Signalleistung und der Interferenzleistung verwendet. Dabei gibt es Unterschiede zwischen dem FDD- und TDD-Modus.



Wir betrachten die *Leistungsregelung im FDD-Modus* genauer. In der Grafik erkennt man zwei verschiedene Regelkreise:

- Der **innere Regelkreis** steuert die Sendeleistung auf der Basis von Zeitschlitz, wobei in jedem Zeitschlitz ein Leistungskommando übertragen wird. Die Leistung des Senders wird mit Hilfe der CIR-Schätzungen im Empfänger und den Vorgaben des *Radio Network Controllers (RNC)* aus dem äußeren Regelkreis bestimmt und verändert.
- Der **äußere Regelkreis** regelt auf Basis von Rahmen mit 10 Millisekunden Dauer. Er wird im RNC realisiert und ist dafür zuständig, den Soll-Wert für den inneren Regelkreis zu bestimmen.

Der Ablauf der FDD-Leistungsregelung sieht folgendermaßen aus:

- Der RNC gibt einen Sollwert für das Träger-zu-Interferenz-Verhältnis (CIR-Sollwert) vor.
- Der Empfänger schätzt den CIR-Istwert und generiert Steuerkommandos für den Sender.
- Der Sender ändert entsprechend dieser Steuerkommandos die Sendeleistung.

Das Prinzip der *Leistungsregelung im TDD-Modus* ähnelt der oben vorgestellten Regelung für den FDD-Modus, in der Abwärtsrichtung sind sie sogar praktisch identisch.

- Die TDD-Leistungsregelung ist jedoch viel langsamer und dadurch auch unpräziser als bei FDD. Eine schnelle Leistungsregelung ist in diesem Fall aber auch gar nicht möglich, da jeder Teilnehmer jeweils nur einen Bruchteil des Zeitrahmens zur Verfügung hat.

Link-Budget

Bei der Planung von UMTS-Netzen ist die Berechnung des Link-Budgets ein wichtiger Schritt. Die Kenntnis des Link-Budgets ist sowohl bei der Dimensionierung der Versorgungsgebiete als auch für die Bestimmung der Kapazität und der Dienstgüte-Anforderungen erforderlich. Ziel des Link-Budgets ist die Berechnung der **maximalen Zellgröße** unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Art und Datenrate der Services,
- Topologie der Umgebung,
- Systemkonfiguration (Lage und Leistung der Node Bs, Handover-Gewinn),
- Service-Anforderungen (Verfügbarkeit),
- Art der Mobilstation (Geschwindigkeit, Leistung),
- finanzielle und wirtschaftliche Aspekte.

Beispiel: Die Berechnung des Link-Budgets wird am Beispiel eines Sprachübertragungskanal im UMTS-Downlink dargestellt. Zu den beispielhaften Zahlenwerten ist zu bemerken:

- Die **Sendeleistung** P_S beträgt 19 dBm, was ca. 79 mW entspricht. Hierbei ist der Antennenverlust mit 2 dB berücksichtigt.
- Die **Rauschleistung** $P_R = 5 \cdot 10^{-11}$ mW ist das Produkt aus UMTS-Bandbreite und Rauschleistungsdichte ($P_R = -103$ dBm).
- Die **Interferenzleistung** ist $P_I = -99$ dBm ($1.25 \cdot 10^{-10}$ mW). Damit ergibt sich die gesamte Störleistung zu $P_{R+I} = P_R + P_I = 1.75 \cdot 10^{-10}$ mW (-97.5 dBm).
- Die **Antennenempfindlichkeit** ergibt sich zu $-97.5 - 27 + 5 - 17 + 3.5 = -133$ dBm. Ein großer negativer Wert ist hierbei „gut“.
- Der **maximal zulässige Pfadverlust** soll einen möglichst großen Wert besitzen. Man erhält im Beispiel $19 - (-133) = 152$ dBm.
- Das **Link-Budget** beinhaltet den Margin für Fading und den Handover-Gewinn und beträgt im Beispiel 140 dBm.
- Der **maximale Zellradius** lässt sich aus dem Link-Budget mit einer empirischen Formel von Okumura-Hata bestimmen. Es gilt:

$$\frac{r}{\text{km}} = 10^{(\text{LinkBudget} - 137)/35} = 10^{0.0857} \approx 1.22.$$

Sender		
Maximale Sendeleistung: $P_{S,max}$	dBm	21
- Antennenverluste am Sender	dB	2
Effektive Sendeleistung (P_S)	dBm	19
Empfänger		
Rauschleistung: $P_R = N_0 \cdot B$	dBm	-103
Interferenzleistung: P_I	dBm	-99
Gesamtstörleistung: P_{R+I}	dBm	-97.5
- Prozessgewinn	dB	27
Erforderliches SNR	dB	5
- Antennengewinn	dB	17
Gesamtverluste am Empfänger	dB	3.5
Empfindlichkeit der Antenne	dBm	-133
Maximal zulässiger Pfadverlust	dB	152
Margin des Fadings	dB	15
- Handover-Gewinn	dB	3
Link-Budget	dB	140
Maximaler Zellradius r	km	1.22

© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

UMTS–Funkressourcenverwaltung

Zentrale Aufgabe der **Funkressourcenverwaltung** (englisch: *Radio Resource Management*, RRM) ist die dynamische Anpassung der Funkübertragungsparameter an die aktuelle Situation (Fading, Bewegung der Mobilstation, Auslastung, usw.) mit dem Ziel,

- die Übertragungs– und Teilnehmerkapazitäten zu steigern,
- die individuelle Übertragungsqualität zu verbessern und
- die vorhandenen Funkressourcen ökonomisch zu nutzen.

Nachfolgend werden die im Schaubild zusammengestellten wichtigsten RRM–Mechanismen erläutert.



Sendeleistungsregelung – Das *Radio Resource Management* versucht, die Empfangsleistung und damit das Träger–zu–Interferenz–Verhältnis (CIR) am Empfänger konstant zu halten oder zumindest zu vermeiden, dass ein vorgegebener Grenzwert unterschritten wird. Ein Beispiel für die Notwendigkeit der Leistungsregelung ist der **Near–Far–Effekt**, der bekanntlich zu einem Verbindungsabbruch führen kann.

Die Schrittweite der Leistungsregelung beträgt 1 dB oder 2 dB, die Frequenz der Regelungskommandos 1500 Kommandos pro Sekunde.

Regelung der Datenrate – Bei UMTS ist ein Austausch zwischen Datenrate und Übertragungsqualität möglich, die sich über die Wahl des Spreizfaktors realisieren lässt. Eine Verdopplung des Spreizfaktors entspricht hierbei einer Halbierung der Datenrate und erhöht die Qualität um 3 dB (Spreizgewinn).

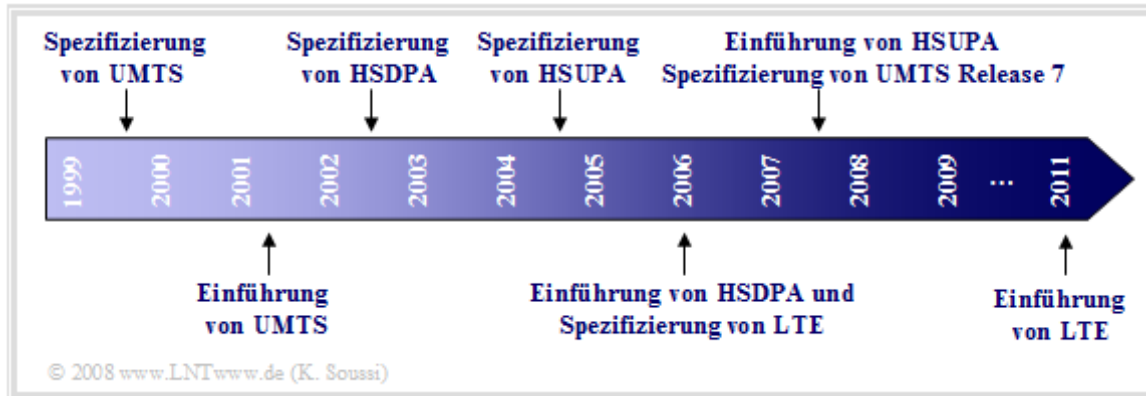
Zugangskontrolle – Um Überlastsituationen des gesamten Netzes zu vermeiden, wird vor dem Aufbau einer neuen Verbindung überprüft, ob die notwendigen Ressourcen vorhanden sind. Andernfalls wird die neue Verbindung abgewiesen. Diese Überprüfung wird durch Abschätzung der Sendeleistungsverteilung nach der Aufnahme der neuen Verbindung realisiert.

Lastregelung – Diese wird aktiv, wenn trotz Zugangskontrolle eine Überlast auftritt. In diesem Fall wird ein Handover zu einem anderen *Node B* initiiert und – falls dies nicht möglich ist – werden die Datenraten bestimmter Teilnehmer gesenkt.

Handover – Die Funkressourcenverwaltung ist schließlich auch für das Handover verantwortlich, um unterbrechungsfreie Verbindungen zu gewährleisten. Die Zuordnung der Mobilstationen zu den einzelnen Funkzellen erfolgt auf Grundlage von CIR–Messungen.

High-Speed Downlink Packet Access

Um dem ständig steigenden Bedarf an höheren Datenraten im Mobilfunk gerecht zu werden und um eine immer bessere Dienstgüte zu gewährleisten, wurde der Standard UMTS-Release 99 bis heute (2008) in fünf Phasen weiterentwickelt. In der Grafik sind die einzelnen Entwicklungsphasen zeitlich dargestellt.



Die wichtigsten Weiterentwicklungen waren

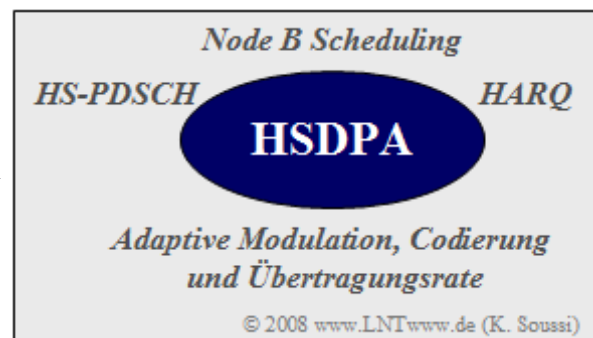
- das UMTS Release 5 mit **HSDPA** und
- das UMTS Release 6 mit **HSUPA**.

Für diese beiden Standards standen vor allem die Steigerung der zur Verfügung gestellten Datenraten für Downlink und Uplink sowie eine größere Bandbreiteneffizienz und Zellenkapazität im Vordergrund. Zusammen ergeben HSDPA und HSUPA den **HSPA-Standard**.

- Im Jahre 2002 wurde *High-Speed Downlink Packet Access* – abgekürzt **HSDPA** – im Rahmen von UMTS Release 5 spezifiziert und 2006 eingeführt, um Datenrate und Durchsatz gegenüber dem ursprünglichen UMTS-Standard zu steigern sowie die Antwortzeiten bei paketvermittelten Übertragungen zu verkürzen.
- In HSDPA betragen die zur Verfügung gestellten Datenraten zwischen 500 kbit/s und 3.6 Mbit/s – theoretisch sogar bis 14.4 Mbit/s. Im Vergleich zur Datenrate von UMTS R99 (144 kbit/s bis 2 Mbit/s) stellen diese Werte eine Verdoppelung bis Vervierfachung dar.

Folgende technische Verfahren tragen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von HSDPA gegenüber UMTS bei. Im Schaubild sind die Features zusammengestellt:

- Einführung eines zusätzlichen gemeinsam genutzten Kanals: **HS-PDSCH**,
- Verwendung des **Hybrid-ARQ-Verfahrens**,
- Minimierung der **Verzögerungszeiten**,
- Einführung eines **Node B Scheduling**,
- Verwendung von **adaptiver** Modulation, Codierung und Übertragungsrate.

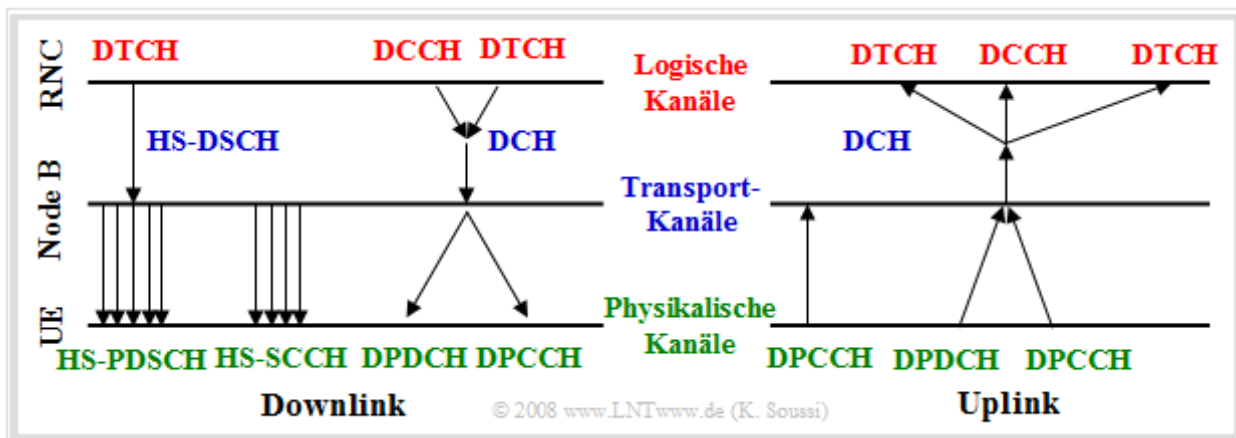


Im Folgenden werden diese Verfahren ausführlicher behandelt.

Zusätzliche Kanäle in HSDPA

Der *High-Speed Downlink Physical High Speed Channel* – Kurzbezeichnung **HS-PDCH** – ist ein Hochgeschwindigkeits-Transportkanal, der für die Übertragung von Teilnehmerdaten verwendet wird. Er vereint die Eigenschaften eines gemeinsam genutzten und eines dedizierten Kanals:

- Im Downlink können ein oder mehrere Kanäle von mehreren Teilnehmern gleichzeitig verwendet werden. Dies ermöglicht die simultane Übertragung gleicher Daten an unterschiedliche Teilnehmer sowie eine signifikante Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit durch Bündelung mehrerer Kanäle dieser Art.
- In einem jeden HS-PDCH beträgt der Spreizfaktor $J = 16$. Dies bedeutet, dass in einer Zelle theoretisch bis zu 15 solcher Kanäle gleichzeitig verwendet werden können. In der Praxis werden jedoch stets nur zwischen 5 und 10 Kanäle genutzt, da die restlichen Kanäle für den Betrieb anderer Dienste benötigt werden.



Die Ressourcenzuteilung für den *High-Speed Shared Data Channel* (**HS-DSCH**) erfolgt über so genannte *High-Speed Shared Control Channels* (**HS-SCCH**). Ein Empfänger muss daher in der Lage sein, bis zu vier solcher Kanäle gleichzeitig zu empfangen und zu decodieren.

Zusätzlich zu den oben vorgestellten Kanälen wird ein *Dedicated Physical Control Channel* (**DPCCH**) für die Übertragung von Kontrolldaten im Uplink und ein *Dedicated Control Channel* (**DCCH**) für die Lokalisierungsprozedur im Down- und Uplink genutzt. Für die Übertragung von IP-Nutzdaten in der Aufwärtsrichtung ist jeweils ein *Dedicated Traffic Channel* (**DTCH**) verantwortlich.

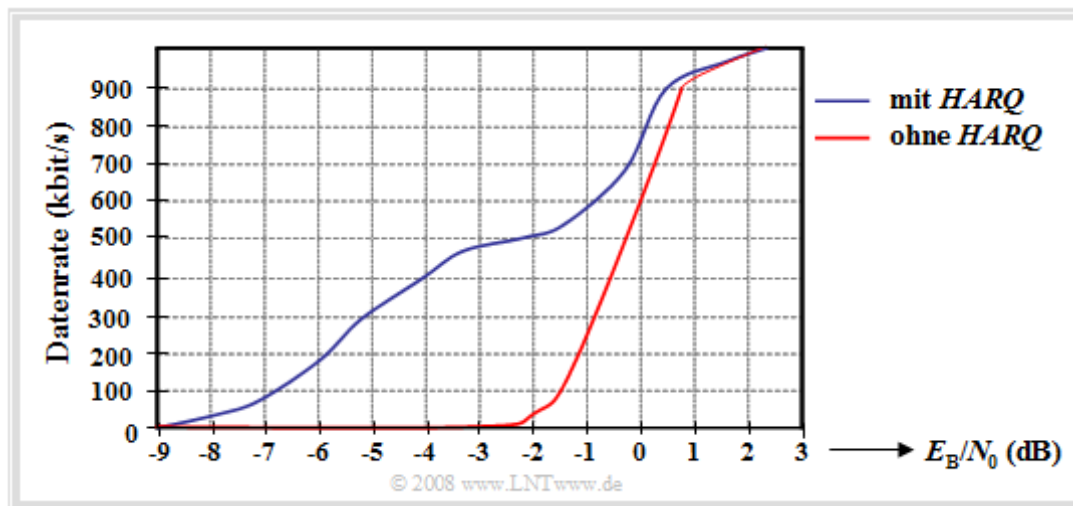
HARQ–Verfahren und Node B Scheduling (1)

Ein weiteres Merkmal von HSDPA ist die Reduzierung der Paketumlaufzeit (englisch: *Round–Trip Delay*, RTD) und die Verwendung des HARQ–Verfahrens:

- Die **Paketumlaufzeit** wurde durch HSDPA auf 70 ms gesenkt (gegenüber 160 ... 200 ms bei UMTS R99), was für einige Anwendungen (zum Beispiel Web–Browsing) von großer Bedeutung ist. Diese Reduzierung wurde durch Verringern der Transportblocklänge auf ca. 2 Millisekunden erreicht (vorher hatte diese 10 ms bzw. 20 ms betragen).
- In jedem Node B wurde ein **Hybrid Automatic Repeat Request** (HARQ) implementiert, um die Übertragungsverzögerungen zu minimieren. Dieser Mechanismus verhindert, dass es durch das erneute Übertragen von fehlerhaften Blöcken zu signifikanten Verzögerungen kommt. Solche Verzögerungen können nämlich vom TCP–Protokoll als Blockierungen interpretiert werden, was dann zu weiteren Verzögerungen führt.

Unter Verwendung des HARQ–Mechanismus und mit Transportblocklängen von 2 ms betragen die Übertragungsverzögerungen in HSDPA weniger als 10 ms. Dies stellt eine entscheidende Verbesserung im Vergleich zu UMTS dar, bei dem eine Fehlerdetektion (verbunden mit einer erneuten Übertragung) ca. 90 ms in Anspruch nimmt.

Beim HARQ–Verfahren wird bei jedem einzelnen Transportrahmen die Detektion eines bzw. keines Fehlers (englisch: *Acknowledgement*, ACK/NACK) quittiert. Dieses Verfahren wird als **Stop and Wait** (SAW) bezeichnet.

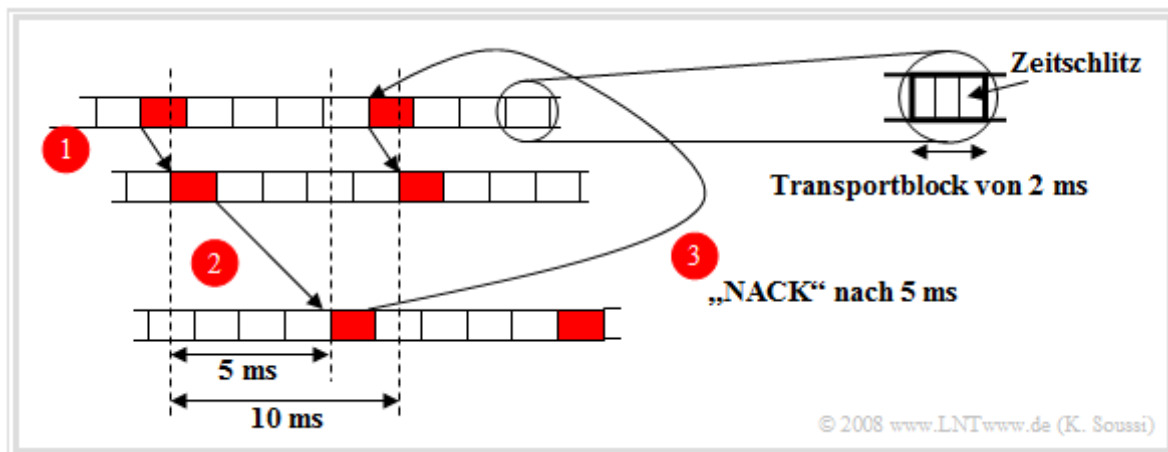


Die Grafik zeigt die erreichbare Datenrate in Abhängigkeit des Quotienten E_B/N_0 (in dB). Man erkennt entscheidende Verbesserungen durch den HARQ–Mechanismus, insbesondere bei kleinen Werten von E_B/N_0 . Dagegen wird mit HARQ die Datenrate nicht weiter vergrößert, wenn $10 \cdot \lg E_B/N_0 > 2$ dB ist.

HARQ–Verfahren und Node B Scheduling (2)

Die Grafik soll die **Funktionsweise des HARQ–Verfahrens** verdeutlichen. Es sind dabei folgende Schritte zu unterscheiden:

- Vor dem Senden informiert die Basisstation den Empfänger mit Hilfe des Kanals *HS–SCCH* über eine bevorstehende Übertragung, wobei ein *HS–SCCH*–Rahmen über drei Zeitschlitzte verfügt.
- Die Kontrolldaten kommen beim Empfänger an und werden unmittelbar nach Ankunft des ersten *SCCH*–Zeitschlitzes ausgewertet. Die Datenübertragung auf dem *HS–PDSCH* startet, sobald der Teilnehmer die ersten zwei Zeitschlitzte des Kontrolldatenblocks erhalten hat.
- Innerhalb von fünf Millisekunden nach Erhalt eines Datenrahmens muss der Empfänger den gesamten Rahmen decodiert und auf Fehler überprüft haben.
- Im Falle einer fehlerfreien Übertragung wird eine positive Quittierung (ACK) in Aufwärtsrichtung versendet, ansonsten wird dem Node B ein *Non Acknowledgement* (NACK) geschickt.



Da der HARQ einen neuen Rahmen erst versendet, wenn die Quittierung der bereits übertragenen Rahmen vorliegt, muss der Empfänger in der Lage sein, bis zu acht HARQs zu verwalten. Dies garantiert die richtige Reihenfolge und dadurch die richtige Verarbeitung der Daten in den höheren Ebenen.

Zusätzlich zum HARQ–Verfahren wurde in dem *UMTS Release 5* ein **Node B Scheduling** eingeführt, um auf Veränderungen der Übertragungsbedingungen einzelner Teilnehmer (zum Beispiel durch Fading) schnell reagieren zu können. Mit Hilfe dieses Scheduling wird entschieden, welche Rahmen welchem Übertragungskanal zugewiesen werden.

Bei dem Scheduling werden Prioritäten vergeben und ein Rahmen wird erst gesendet, wenn er über die höchste Priorität verfügt, was gleichbedeutend damit ist, dass er mit der größten Wahrscheinlichkeit richtig empfangen wird. Durch dieses Scheduling wird die zur Verfügung gestellte Bandbreite besser ausgenutzt und die Zellenkapazität signifikant gesteigert.

Adaptive Modulation, Codierung und Übertragungsrate

In HSDPA werden die Signale *adaptiv moduliert*. Das bedeutet:

- Unter guten Übertragungsbedingungen wird **16-QAM** bzw. **64-QAM** verwendet.
- Bei schlechteren Bedingungen wird auf **QPSK** umgeschaltet.

Zusätzlich zur Modulation kann die Codierung sowie die Anzahl der von einem Teilnehmer gleichzeitig verwendeten *HS-DSCH-Kanäle* je nach Kanalqualität ziemlich flexibel und schnell (alle 2 ms) verändert werden. Trotz der gleichzeitigen Verwendung von *adaptiver Modulation* und *adaptiver Codierung* wird die Leistung stets konstant gehalten.

Die Leistungsregelung läuft in HSDPA unterschiedlich zu UMTS R99 ab:

- Die Sendeleistung wird stets an die Signalqualität angepasst, während die Bandbreite möglichst konstant gehalten werden sollte.
- Nur falls die Leistung nicht mehr erhöht werden kann, wird der Spreizfaktor vergrößert und damit die Datenrate herunter gesetzt.

Die maximal erreichbare Datenrate hängt vorwiegend von der *Leistungsfähigkeit des Empfängers* sowie vom *Transportformat und den Ressourcenkombinationen (TFRC)* ab.

TFRC	Modulation	Coderate	Bitrate in kbit/s
1	QPSK	1/4	120
2	QPSK	1/2	240
3	QPSK	3/4	360
4	16-QAM	1/2	480
5	16-QAM	2/3	640
6	16-QAM	3/4	720
7	64-QAM	1/2	720
8	64-QAM	3/4	1080
9	64-QAM	5/6	1200
10	64-QAM	1	1440

© 2008 www.LNTwww.de (K. Soussi)

In der Tabelle sind verschiedene Parameterkombinationen für Modulation und Coderate angegeben und die daraus resultierenden Bitraten zu ersehen. Nicht berücksichtigt ist der Overhead.

High-Speed Uplink Packet Access

Seit UMTS R99 wurden die Spezifikationen für den Uplink nicht mehr weiterentwickelt, obwohl die bidirektionalen symmetrischen Anwendungen immer mehr an Bedeutung gewonnen haben und immer größere Anforderungen an die Übertragungsgeschwindigkeiten gestellt wurden. Die Datenraten betragen bis zur Einführung von Release 6 zwischen 64 und 128 kbit/s, bei idealen Bedingungen bis zu 384 kbit/s.

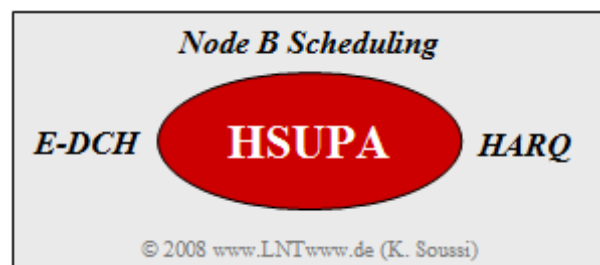
Mit dem UMTS Release 6 wurde 2004 **High-Speed Uplink Packet Access** (HSUPA) definiert und 2007 eingeführt. Dadurch wurden die Datenraten auf der Aufwärtsstrecke erheblich gesteigert. Diese betragen theoretisch bis zu 5.8 Mbit/s. In der Praxis werden – unter Berücksichtigung der gleichzeitigen Übertragung für mehrere Nutzer und der Empfängerkapazität – immerhin Übertragungsraten bis ca. 800 kbit/s erreicht.

Die wesentliche Verbesserung durch HSUPA ist auf die Einführung eines zusätzlichen Aufwärtskanals zurückzuführen, dem so genannten *Enhanced Dedicated Channel* (**E-DCH**). Dieser minimiert unter anderem in den dedizierten Uplink-Kanälen den Einfluss von Anwendungen mit stark unterschiedlichen und teilweise sehr intensiven Datenaufkommen (englisch: *Bursty Traffic*).

Obwohl der E-DCH ein dedizierter Transportkanal ist, garantiert er dem Teilnehmer allerdings keine feste Bandbreite in Aufwärtsrichtung, wie es bei UMTS R99 der Fall ist. Diese flexible und effiziente Zuteilung der Bandbreite in Abhängigkeit der Kanalbedingungen erlaubt eine wesentliche Steigerung der Zellenkapazität.

Neben dem neuen Transportkanal (E-DCH) wurden auch im Uplink (HSUPA) analog zum Downlink (HSDPA) zusätzlich folgende Verfahren eingeführt:

- *Node B Scheduling*,
- *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ).



Die Verwendung von HSUPA im Uplink ist nur dann sinnvoll, wenn es mit HSDPA im Downlink kombiniert wird. Ihr Zusammenwirken steigert die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems signifikant.

UTRAN Long Term Evolution

Long Term Evolution (LTE) stellt ein Mobilfunksystem der vierten Generation dar, das von der 3gpp parallel zu den unterschiedlichen Weiterentwicklungsphasen von UMTS entworfen und standardisiert wurde, um den stetig wachsenden Anforderungen an zukünftige Mobilfunksysteme gerecht zu werden. Dieses System wird auch als *High Speed OFDM Packet Access* (HSOPA) bezeichnet.

LTE stellt eine zukunftsweisende Alternative zu den aktuellen Mobilfunksystemen der dritten Generation dar. Die Grundzüge von LTE wurden 2004 definiert, konkrete Anforderungen wurden aber erst 2006 erstellt. Erste Systeme begannen 2011 mit dem Betrieb.

Nachfolgend sind einige Merkmale von UTRAN–LTE stichpunktartig und kommentarlos aufgelistet:

- Die für GSM und UMTS zugewiesenen *Frequenzbereiche* sollen weiterhin verwendet werden, allerdings ist eine Erweiterung in den Bereich um 2600 MHz geplant.
- Es sollen zwischen 200 und 400 aktive Teilnehmer gleichzeitig versorgt werden können, was eine Steigerung der *Zellenkapazität* gegenüber UMTS um den Faktor 2 bis 3 bedeutet.
- Die *Reichweite* soll von 5 km (bei optimaler Güte) bis zu 100 km (mit reduzierter Qualität) reichen. Die *maximalen Datenraten* sind 100 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink.
- Die *Verzögerungszeiten* sollen auf weniger als 5 ms bei größeren Bandbreitenzuweisungen und auf 10 ms bei kleineren Bandbreitenzuweisungen herabgesetzt werden.
- Die Bandbreiten sollen mit 1.25 MHz, 2.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz und 20 MHz in einem sehr weiten Bereich flexibel zugewiesen werden können.
- Vielfachzugriffsverfahren sind **Orthogonal Frequency Division Multiple Access** (OFDMA) im Downlink und *Single Carrier Frequency Division Multiple Muxplexing* (SC–FDMA) im Uplink.
- Trotz dieser vielfachen Neuerungen soll es Kompatibilität zu den Mobilfunksystemen vorheriger Generationen geben und ein nahtloser Übergang zu diesen möglich sein.

Das Schaubild fasst die Entwicklung der Mobilfunksysteme aus der Sicht des Jahres 2011 zusammen.

