

Überblick zu Kapitel 3 von „Mobile Kommunikation“

Nachfolgend werden die wichtigsten Vertreter der momentan (2011) aktuellen Mobilfunksysteme kurz vorgestellt:

- **GSM** – *Global System for Mobile Communications*: zweite Mobilfunkgeneration (2G); ausführliche Beschreibung im **Kapitel 3** des Buches „Beispiele von Nachrichtensystemen“.
- **UMTS** – *Universal Mobile Telecommunications System*: dritte Mobilfunkgeneration (3G); ausführliche Beschreibung im **Kapitel 4** des Buches „Beispiele von Nachrichtensystemen“.

Im Einzelnen werden behandelt:

- Charakteristika und Beispiele der verschiedenen *Mobilfunkgenerationen* (1G, 2G, 3G),
- einige *Statistiken* über die Steigerung der Teilnehmerzahlen im Mobilfunk,
- grundlegende *Gemeinsamkeiten* und *Unterschiede* zwischen GSM und UMTS,
- wichtige *Systemkomponenten*: Sprach- und Kanalcodierung, Interleaving, Verschlüsselung,
- die Vielfachzugriffsverfahren *FDMA/TDMA* (GSM) und *CDMA* (UMTS),
- die Modulationsverfahren *GMSK* (GSM) und *OFDM* (UMTS),
- die Weiterentwicklungen *HSCSD*, *GPRS*, *EDGE* (GSM) sowie *HSDPA*, *HSUPA* (UMTS).

Geeignete Literatur: [Dre06] – [EVB01] – [Göt08] – [Hin08] – [HT03] – [Jun97] – [Kai05] – [Kra15] – [MP92] – [Rie02] – [Ste05] – [Ste92] – [Vie16] – [Waa10] – [Wer06] – [WSA02]

Der Theorieteil umfasst 30 Seiten. Daneben beinhaltet das Kapitel 34 Grafiken, zehn Aufgaben und vier Zusatzaufgaben mit insgesamt 71 Teilaufgaben, sowie sechs Interaktionsmodule (IM):

- **Handover bei UMTS** (Flash-Animation zu Kapitel 3.2)
- **Qualität verschiedener Sprach-Codecs** (IM zu Kapitel 3.2)
- **OVFS-Codes** (IM zu Kapitel 3.4)
- **Quaternary Phase Shift Keying – QPSK** (IM zu Kapitel 3.4)
- **Prinzip der QAM** (IM zu Kapitel 3.4)
- **Zur Erzeugung von Walsh-Funktionen** (IM zu Kapitel 3.4)

Vorläufer der heutigen Mobilfunknetze

Heutzutage (2011) weiß jedes Kind, was Mobilfunk ist, und nur wenige Jugendliche können sich heute vorstellen, dass auch ein Leben ohne Handy, SMS und die unzähligen Mobilfunk-Features möglich ist. Noch vor zwanzig Jahren war das völlig anders: Nur einige wenige wussten von der Existenz solcher Systeme und noch weniger hatten jemals ein solches Gerät in der Hand.

Wichtige Voraussetzung für die Realisierung mobiler Kommunikationssysteme ist die Theorie der elektromagnetischen Wellen, die **James C. Maxwell** 1864 entwickelt hat und von **Heinrich Hertz** entscheidend weiterentwickelt wurde. Ein weiterer großartiger Pionier der Funktechnik war **Guglielmo M. Marconi**, der 1896 die drahtlose Telegrafie erstmals öffentlich demonstrierte und dem 1901 die erste Transatlantik-Funkübertragung gelang. 1909 erhielt er für seine Erfindungen den Nobelpreis.

Da die Marconi-Technik auch in der Transatlantik-Schiffahrt intensive Anwendung fand und deren Nutzung nach dem Untergang der Titanic (1912) sogar vorgeschrieben wurde, kann man die Entstehung mobiler Kommunikationssysteme etwa auf den Beginn des 20. Jahrhunderts datieren.

Das erste Mobilfunknetz in Deutschland war das 1958 in Betrieb genommene und 1977 stillgelegte **A-Netz**, das im Frequenzbereich von 156 MHz bis 174 MHz mit analoger Frequenzmodulation (FM) arbeitete und bundesweit von bis zu 11000 Teilnehmern (aber sicher nicht gleichzeitig) genutzt wurde. Die Sendetechnik füllte den Kofferraum großer Limousinen.

Auch das von 1972 bis 1994 betriebene **B-Netz** basierte auf analoger FM um 150 MHz. Dieses wurde zu seiner Blütezeit um 1985 von 27000 Teilnehmern genutzt und stellte 850 Funkkanäle zur Verfügung, wobei die Wiederverwendung gleicher Frequenzen in genügend weit voneinander entfernten Funkzellen berücksichtigt ist. Das Volumen der Sende- und Empfangseinrichtungen war aufgrund der zwischenzeitlichen Fortschritte auf dem Gebiet der Mikroelektronik deutlich kleiner als beim A-Netz.

Als letztes Vorgängermodell der heutigen Systeme ist das noch ebenfalls analog aufgebaute **C-Netz** in einem Frequenzbereich um 450 MHz zu nennen, das in Deutschland in den Jahren zwischen 1986 und 2000 von der Deutschen Bundespost betrieben wurde. Es hatte 1993 seine maximale Teilnehmerzahl von 850000, bot eine Flächenabdeckung von immerhin 98% und stellte mit „Handover“ und „Roaming“ auch schon einige Features bereit, die bei den nachfolgenden Mobilfunkgenerationen zum Standard wurden.

Das C-Netz rechnet man zur **ersten Mobilfunkgeneration** wie auch einige andere nahezu zeitgleich entstandene zellulare Systeme in anderen Ländern:

- AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), Bell Labs, USA, 1979,
- ACS (*Advanced Cellular System*), Fa. Comvik, Schweden, 1981,
- NMT (*Nordic Mobile Telephone*), Schweden-Norwegen-Dänemark, 1981 und 1986,
- TACS (*Total Access Communication Standard*), Großbritannien, 1985,
- RTMS (*Radio Telephone Mobile System*), Italien, 1985,
- RC 2000 (*Radio Com 2000*), Frankreich, 1986.

Mobilfunksysteme der zweiten Generation

Alle vorne genannten Mobilfunksysteme der ersten Generation (1G) waren nationale Lösungen mit folgender Konsequenz:

- Es war nicht möglich, zwischen den einzelnen Systemen zu kommunizieren.
- Die Endgeräte (von „Handy“ sollte man noch nicht reden) ließen sich nur im jeweiligen Netz einsetzen, wodurch der Markt sehr eingeschränkt war und der wirtschaftliche Erfolg ausblieb.

Anfang der 1980er Jahre gab es schon erste Bestrebungen zu einer Systemvereinheitlichung. Es entstand die **zweite Generation (2G)** von Mobilfunksystemen, gekennzeichnet durch

- eine durchgehend digitale Sprachübertragung,
- die Bereitstellung von Datendiensten.

Bei den Mobilfunksystemen der zweiten Generation ist die **Sprachübertragung** die zentrale Aufgabe und die Datenübertragung eher sekundär, wohingegen ein Kennzeichen der dritten Generation – zum Beispiel von UMTS – das so genannte „mobile Internet“ ist.

Der bedeutendste 2G–Mobilfunkstandard ist **GSM** – *Global System for Mobile Communications*. Dieses im **Kapitel 3.3** vorgestellte System ist nicht nur in Europa weit verbreitet, sondern es haben sich diesem Standard auch viele Regionen weltweit angeschlossen. GSM war und ist die am schnellsten wachsende Kommunikationstechnologie aller Zeiten.

Die derzeit (2011) eingesetzten GSM–Systeme sind

- **GSM 900**: Frequenzen um 900 MHz (D–Netze; in Deutschland TD1 und Vodafone D2),
- **GSM/DCS 1800**: Frequenzbereich um 1.8 GHz (E–Netze; in Deutschland alle Betreiber),
- **GSM/PCS 1900**: Frequenzbereich um 1.9 GHz (vorwiegend in den USA eingesetzt).

Daneben werden zu den Mobilfunksystemen der zweiten Generation auch gezählt:

- das 1993 in Japan in Betrieb gegangene **PDC–Netz** (*Personal Digital Cellular*),
- der „Schnurlos–Standard“ **DECT** (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*),
- die Satellitensystemstandards **LEO** (*Low Earth Orbit*) und **MEO** (*Medium Earth Orbit*),
- terrestrische Flugfunknetze ⇒ **TFTS** (*Terrestrial Flight Telephone System*),
- Versuchsnetze in den USA wie **D–AMPS** und **Qualcomm–CDMA**.

Schließlich zählt man zu den 2G–Mobilfunksystemen auch „Drahtlose Teilnehmeranschlüsse“ mit sehr begrenzter Mobilität wie **WLL** (*Wireless Local Loop*) und **RLL** (*Radio in the Local Loop*).

Die Entstehungsgeschichte von GSM

Der GSM-Standard wurde um 1990 mit dem Ziel eingeführt, ein einheitliches paneuropäisches mobiles Telefonsystem und -netz anbieten zu können. Die Nutzung zur Datenübertragung stand zunächst nicht im Mittelpunkt, wurde aber seitdem durch Zusatzspezifikationen hinsichtlich Datenrate stetig verbessert.

Nachfolgend einige Daten zur **historischen Entwicklung** von GSM:

1982 Bei der „Conférence Européenne des Postes et Télécommunications“ (CEPT) wird die *Groupe Spécial Mobile* – abgekürzt GSM – eingerichtet.

1987 Es wird eine Kooperation zwischen 17 zukünftigen Betreibern aus 15 europäischen Ländern gebildet und mit der GSM-Spezifikation begonnen.

1990 Die Phase 1 der GSM 900-Spezifikation (für 900 MHz) wird abgeschlossen. Es beginnt die Anpassung für das System GSM/DCS 1800 (*Digital Cellular System*) um die Frequenz 1.8 GHz.

1992 Die meisten europäischen GSM-Netzbetreiber beginnen den kommerziellen Betrieb mit Sprachdiensten. Ende 1992 sind bereits dreizehn Netze in sieben Ländern „on air“.

1995 Die Phase 2 der Standardisierung beginnt und beinhaltet Fax, Daten und SMS-Roaming sowie Anpassungen für GSM/PCS1900, das im selben Jahr in den USA in Betrieb geht.

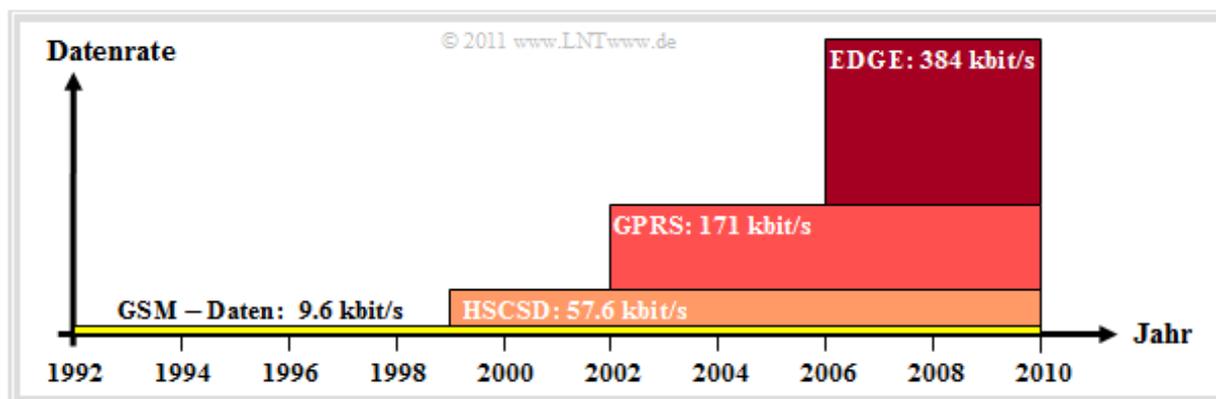
1999 Mit der Einführung von WAP (*Wireless Application Protocol*) wird es erstmals möglich, Inhalte des Internets und andere interaktive Dienstangebote auf Mobilgeräte zu übertragen.

1999 Durch die Einführung von HSCSD (*High Speed Circuit-Switched Data*) wird die Datenrate von 9.6 auf 14.4 kbit/s erhöht; durch Bündelung von vier TDMA-Kanälen weiter auf 57.6 kbit/s.

2000 Die Erweiterung GPRS (*General Packet Radio Service*) vereinfacht den drahtlosen Zugang zu paketvermittelten Datennetzen. Die maximale Datenrate beträgt (theoretisch) 171 kbit/s.

2000 Mit der Phase 2+ wird EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) definiert, womit die GPRS-Rate theoretisch verdreifacht werden könnte. Tatsächlich erreicht man nur 384 kbit/s.

2006 T-Mobile beginnt als erster deutscher Mobilfunkanbieter mit der Bereitstellung von EDGE. In den nächsten Jahren ziehen in Deutschland die Betreiber Vodafone, O2 und E-Plus nach.



Die Grafik zeigt die Entwicklung der GSM-Datenübertragungsrate in linearem Maßstab. Die Abszisse bezeichnet das Jahr der Markteinführung (in Deutschland), nicht die Standardisierung.

Mobilfunksysteme der dritten Generation (1)

Schon kurz nach der GSM-Standardisierung zeigte sich, dass damit der Bandbreitenbedarf zur Nutzung multimedialer Dienste nicht gedeckt werden kann. Die nächste, dritte Generation von Mobilfunksystemen sollte auf **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) basieren.

Wesentliche Vorarbeiten waren:

- **1949** Erste Ideen zum CDMA-Verfahren durch **Claude E. Shannon** und **John R. Pierce**.
- **1970** Verschiedene CDMA-Entwicklungen für militärische Systeme, beispielsweise GPS.
- **1989–1992** Grundlagenforschung zu den Eigenschaften zukünftiger Mobilfunksysteme im Rahmen des EU-Programms RACE-1 (*Research, Analysis, Communication, Evaluation*).
- **1992–1995** EU-Programm RACE-2. Schwerpunkt „Entwicklung von Systemkonzepten“, basierend auf den Ergebnissen von RACE-1.

Erste Überlegungen zum Standard **IMT-2000** (*International Mobile Telecommunications at 2000 MHz*) wurden von der ITU 1992 angestellt. Daraus entwickelte sich mit UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*) das bekannteste Mobilfunksystem der **dritten Generation (3G)**. Bis zur Markteinführung in Deutschland (2004) waren aber noch einige Zwischenschritte nötig:

- **1996** Gründung des UMTS-Forums in Zürich – Umbenennung des geplanten europäischen Standards „W-CDMA“ in „UMTS“.
- **1998** Übernahme der 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** UMTS Release 4 als Weiterentwicklung von UMTS-R99: *Quality of Service* (QoS) wird nun nicht nur an der Funkschnittstelle, sondern auch im Festnetz unterstützt.
- **2001** Erstes kommerzielle UMTS-Netz des norwegischen Unternehmens TELENOR.
- **2002** UMTS Release 5: Die an das GSM-Festnetz angelehnte Architektur wird durch ein vollständig IP-basiertes Netz ersetzt. Zusätzlich erfolgt die Definition von HSDPA.
- **2002** Erste UMTS-Sprach- und Datenverbindung von Nortel Networks und Qualcomm. Damit gelten diese beiden Firmen als Vorreiter bei der Umsetzung der UMTS-Technologie.
- **2005** UMTS Release 6, womit dem Nutzer ein verbesserter QoS und dem Anbieter eine effektivere Ressourcenverwaltung geboten wird. Daneben Definition von HSUPA.
- **2007** UMTS Release 7. Berücksichtigung von Realzeitapplikationen wie VoIP (*Voice over IP*) und *Evolved EDGE* (nur kurz nach der Markteinführung von 2G-EDGE).

Mobilfunksysteme der dritten Generation (2)

Die Jahreszahlen auf der letzten Seite beziehen sich jeweils auf die Spezifizierung. Bis zur tatsächlichen Nutzung einer Weiterentwicklung hat es meist noch zwei bis vier Jahre gedauert.

Fassen wir die bisherige Aufzählung kurz zusammen, wobei wir uns vorwiegend auf die Situation in Europa und insbesondere in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt (2011) beziehen:

Zu den **Mobilfunksystemen der dritten Generation (3G)** zählt man:

- **UTRA–FDD** (UMTS *Terrestrial Radio Access–Frequency Division Duplex*) nach den UMTS–Spezifikationen bis einschließlich Release 7.
- Hierin enthalten sind **HSDPA** (*High Speed Downlink Packet Access*) gemäß UMTS Release 5 und **HSUPA** (*High–Speed Uplink Packet Access*) nach UMTS Release 6.
- **EDGE**: Diese GSM–Weiterentwicklung (in höheren Modi mit 8–PSK–Modulation) wird „3G“ zugeordnet, während man zum Beispiel **GPRS** zu den 2G–Systemen zählt.

Mit den genannten Standards ist die Entwicklung von UMTS noch lange nicht abgeschlossen:

- Im Dezember 2008 wurde mit der Release 8 unter anderem die Variante E–UTRA (*evolved UTRA*) spezifiziert, besser bekannt als **Long Term Evolution** (LTE).
- Bereits im März 2011 wurde dann mit der UMTS Release 10 das bis dahin noch gar nicht eingeführte LTE zu **LTE Advanced** (LTE–A) weiterentwickelt.

Diese derzeit (2011) neuesten Mobilfunkstandards werden im **Kapitel 4** des Buches ausführlich behandelt. Man zählt sie zur *vierten Generation* der Mobilfunksysteme (**4G**). Bereits jetzt ist absehbar, dass noch weitere Generationen folgen werden.

Vorher beschäftigen wir uns aber in stark komprimierter Form mit

- den Gemeinsamkeiten zwischen GSM und UMTS (**Kapitel 3.2**),
- den Charakteristika von GSM (**Kapitel 3.3**), sowie
- den Charakteristika von UMTS (**Kapitel 3.4**).

Auf den beiden nächsten Seiten belegen wir mit einigen im Internet veröffentlichten Zahlen den Erfolg des digitalen Mobilfunks in den Jahren bis 2009. Für die Zeit danach wird es sicher einen Rückgang hinsichtlich GSM und einen überproportionalen Anstieg bei UMTS und LTE geben.

Die Erfolgsgeschichte des digitalen Mobilfunks (1)

Die folgenden Angaben stammen aus verschiedenen im Internet gefundenen Artikeln, zum Beispiel aus [Göt08], [Hin08] und [Waa10]. Kein einziger Eintrag in den nun folgenden Tabellen geht auf eigene Recherchen der LNTwww–Autoren zurück.

	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
Zahl der mobilen Endgeräte in Millionen	1.0	2.5	5.6	13.9	48.2	59.1	71.3	82.8	107.2
Steigerung gegenüber dem Vorjahr in Prozent	100	40	50	67	106	5	10	5	10
Versendete SMS-Nachrichten in Milliarden				0.6	11.6	17.0	20.6	22.4	29.1

Die Zahlen der obigen Tabelle mit den **Steigerungsraten der deutschen Mobilfunknetze** (als die Summe aller Anbieter) werden von den Autoren wie folgt interpretiert:

- In den Jahren von 1992 bis 2008 stieg die Anzahl der registrierten mobilen Endgeräte von einer Million auf mehr als 100 Millionen (erste Zeile). Seit Ende 2005 übersteigt die Anzahl der mobilen Teilnehmeranschlüsse bereits die Einwohnerzahl Deutschlands.
- Die größten Zuwachsraten gab es 1992 direkt nach der GSM–Einführung (allerdings noch auf niedrigem Niveau) sowie um die Jahrtausendwende (dunklere Hinterlegungen in der Zeile 2). Wir erinnern uns an die Euphorie dieser Zeit kurz vor „Platzen der Internetblase“, als die Versteigerung der deutschen UMTS–Lizenzen für insgesamt 20 Jahre Laufzeit und 120 MHz Bandbreite mehr als 100.000.000.000 DM (\approx 50.8 Milliarden Euro) einbrachte.
- Aber auch die Zuwachsraten im neuen Jahrtausend (zwischen 5% und 10%) waren beachtlich, wenn man berücksichtigt, dass 2008 jeder in Deutschland Lebende inklusive Säuglingen und Greisen im Mittel schon 1.3 Mobiltelefone besessen hat.
- Eine ganz besondere Erfolgsgeschichte war die Einführung der Kurzmitteilungen (englisch: *Short Message Services*, SMS). Beispielsweise wurden 2008 in deutschen Mobilfunknetzen fast 30 Milliarden solcher Kurznachrichten verschickt (dunklere Hinterlegung in Zeile 4).

Die Erfolgsgeschichte des digitalen Mobilfunks (2)

Betrachten wir nun die **Entwicklung der Mobilkommunikation weltweit**. Die Tabellen auf dieser Seite sind meist der URL-Seite von **GSMworld** entnommen.

	Mobilteilnehmer weltweit	davon GSM incl GPRS & EDGE	davon UMTS incl. HSDPA	Andere (PDC, cdma2000, usw.)
1. Quartal 2007	2.83 Mrd.	80.5%	4.0%	15.5%
2. Quartal 2008	3.66 Mrd.	80.8%	7.1%	12.1%
2. Quartal 2009	4.31 Mrd.	80.0%	9.0%	11.0%

Die Aussagen der oberen Tabelle lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 2009 gab es weltweit mehr als 4.3 Milliarden mobile Teilnehmer. Zum Vergleich: Die Anzahl der Festnetzanschlüsse lag seit 2005 jeweils knapp unter einer Milliarde (wohl auch, weil eine Telefonanlage nur als ein Anschluss zählt), und nahm seitdem geringfügig, aber stetig ab.
- Die jährlichen Steigerungsraten weltweit lagen zuletzt durchaus über 20% und damit über dem für Deutschland geltenden Wert. Dies lässt sich sicher damit erklären, dass in manchen Ländern 2009 noch keine solche Sättigung festzustellen war wie in Mitteleuropa.
- Der GSM-Anteil lag zwischen 2006 und 2009 stabil bei etwa 80%. Der UMTS-Anteil (inkl. HSDPA) stieg von 2007 bis 2009 von 4% auf 9%, im wesentlichen auf Kosten des japanischen „PDC“ und des amerikanischen Systems „cdma2000“.

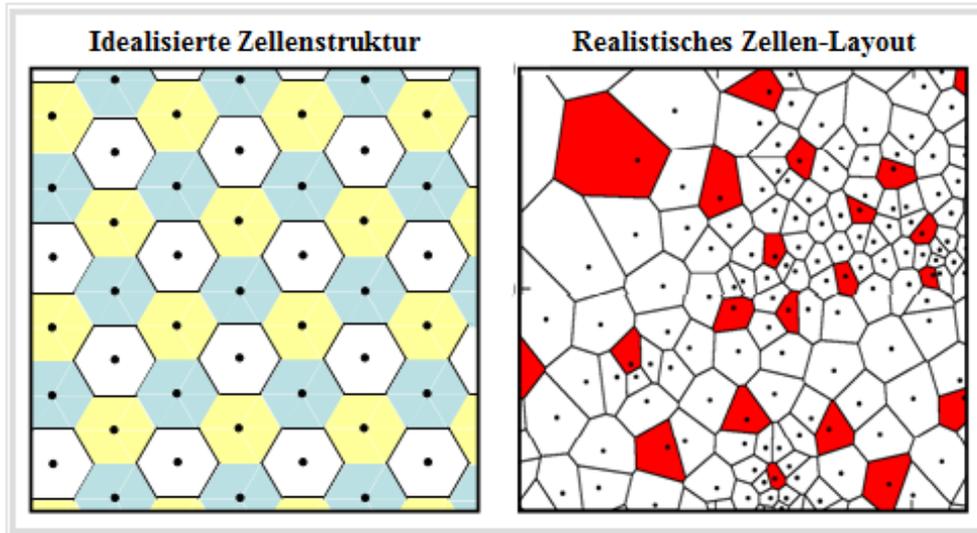
	Asien Pazifik	West-europa	Süd-amerika	Ost-europa	Afrika	USA - Kanada	Mittlerer Osten
Q2/2008	42.2%	13.4%	11.3%	11.3%	8.8%	7.7%	5.3%
Q2/2009	44.0%	11.8%	11.1%	10.7%	9.8%	7.0%	5.7%

Aus der unteren Tabelle geht hervor, wie sich die Anzahl mobiler Teilnehmeranschlüsse auf die einzelnen Kontinente verteilt. Diese Zahlen aus den Jahren 2008 und 2009 lassen sich nach unserer Auffassung wie folgt zusammenfassen:

- Der interessanteste Markt für mobile Kommunikationssysteme ist eindeutig Asien. 2009 waren bereits 44% aller Teilnehmer dort registriert und der prozentuale Anteil wird weiter zunehmen.
- Zu berücksichtigen ist auch, dass der prozentuale Anstieg des Asien-Anteils von 42.2% (2008) auf 44% (2009) in absoluten Zahlen einen Anstieg um 350 Millionen Anschlüsse bedeutet hat.
- Der relative Marktanteil von Westeuropa ist von 13.4% (2008) auf 11.8% (2009) gesunken, obwohl die absolute Zahl von 493 Millionen auf 510 Millionen gestiegen ist. Die gleiche Tendenz lässt sich auch bei anderen „Erste-Welt-Regionen“ wie USA/Kanada ablesen.

Zellulare Architektur

Charakteristisch für GSM und UMTS gleichermaßen ist die zellulare Netzstruktur, die man häufig durch Hexagone annähert (linke Grafik). Die Farben weiß, gelb und blau deuten unterschiedliche Frequenzen an (hier: Reuse-Faktor 3), wodurch Interzellinterferenzen vermieden werden. Die rechte Grafik zeigt ein realistischeres Layout mit nicht hexagonalen und auch unterschiedlich großen Zellen, je nach erwarteter Teilnehmerdichte und Geländetopologie. Die Basisstation liegt auch nicht immer in der Zellenmitte.

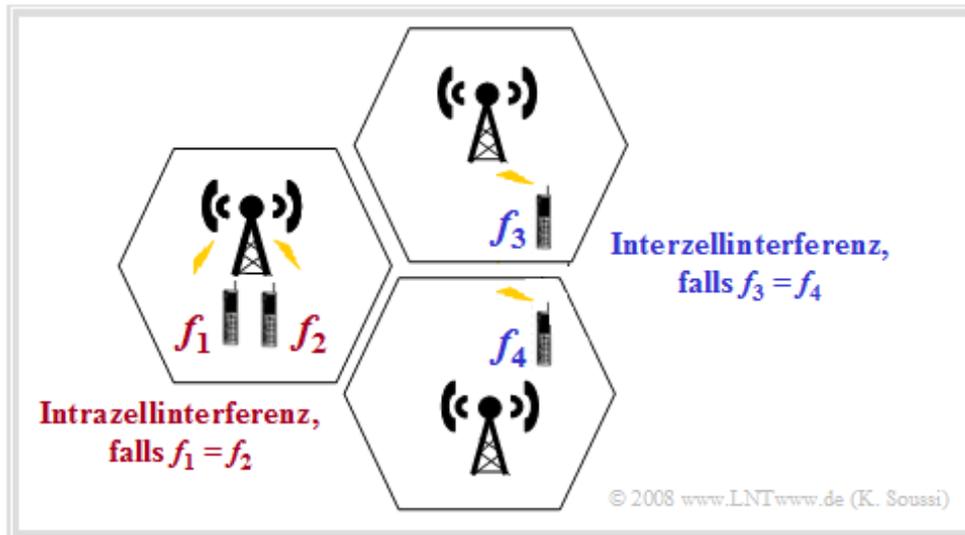


Beim GSM-D-Netz ($f_T = 900$ MHz) wird der Zellenradius mit maximal 35 km angegeben. Beim E-Netz ist der maximale Radius wegen der größeren Trägerfrequenz (1.8 GHz) halb so groß. Im UMTS-Netz ($f_T \approx 2$ GHz) gibt es verschiedene Typen von Funkzellen – siehe **Grafik** im Buch 9:

- **Makrozellen** decken das komplette Versorgungsgebiet ab und folgen dem klassischen Design. Sowohl Überlappungen als auch „Löcher“ zwischen den Zellen sollen minimiert werden. Eine Makrozelle hat meist viele Makro-Nachbarn: Bei exakt hexagonalen Zellen sechs, in Realität einige mehr. Die Basisstationen arbeiten mit hoher Leistung (20–40W), sind sehr hoch aufgehängt und verwenden sektorisierte Antennen. In dünn besiedelten Regionen haben Makrozellen Durchmesser bis zu einigen Kilometern. In Innenstädten werden aber auch die Makrozellen zur Kapazitätssteigerung sehr klein gehalten, oft nur mit wenigen Hundert Meter Durchmesser.
- **Mikrozellen** decken einen kleinen Teil einer Makrozelle ab und dienen in erster Linie zur lokalen Kapazitätssteigerung (Ausleuchtung von Löchern). Sie haben meist nur einen Makro-Nachbarn, können aber auch andere Micro/Pico/Femto-Nachbarn haben. Die Leistung ist mit 5–10W etwas niedriger und die Geräte sind kleiner als in einer Makrozelle. Die meist nicht sektorisierten Antennen müssen aber ebenfalls ausreichend hoch (an Mast oder Hauswand) positioniert werden.
- **Pikozellen** versorgen kleine Gebiete ($d \approx 100$ m) mit sehr hohem Datenaufkommen (z.B.: Flughäfen, Einkaufszentren, Stadien). Sie erlauben höhere Datenraten, allerdings zu Lasten der Bewegungsgeschwindigkeit. Die Geräte einer Pikozelle sind deutlich kleiner als in einer Mikrozelle und arbeiten mit kleinerer Leistung (1–5W), sind aber flexibler bei der Montage.
- **Femtozellen** werden oft privat und unkoordiniert administriert (Beispiel: *WLAN Access Point*), teilweise mit privatem Backhaul (eigene DSL-Leitung). Man spricht auch von einer „Home Base Station“. Sie werden „Indoor“ betrieben und arbeiten mit sehr geringer Leistung ($< 1W$).

Interferenzleistung und Zellatmung

Benutzen mehrere Teilnehmer den gleichen Frequenzkanal, so kann es zu Interferenzen und damit zu einem sehr niedrigen Träger-zu-Interferenzabstand (englisch: *Carrier-to-Interference Ratio*, CIR) kommen, wodurch die Übertragungsqualität erheblich beeinträchtigt wird. Gravierend ist das Problem bei UMTS, das auf dem Vielfachzugriffsverfahren **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) basiert, da hier alle Teilnehmer den gleichen Frequenzkanal nutzen.



Man unterscheidet entsprechend der Grafik zwischen zwei Arten von Interferenzen:

- **Intrazellinterferenz** entsteht durch die Verwendung des gleichen Frequenzkanals von mehreren Teilnehmern innerhalb der gleichen Zelle. Im obigen Beispiel ergibt sich dieser Fall für $f_1 = f_2$.
- Dagegen kommt es zu **Interzellinterferenz**, wenn Teilnehmer benachbarter Zellen die gleiche Frequenz nutzen, im dargestellten Szenario beispielsweise dann, wenn $f_3 = f_4$ gilt.

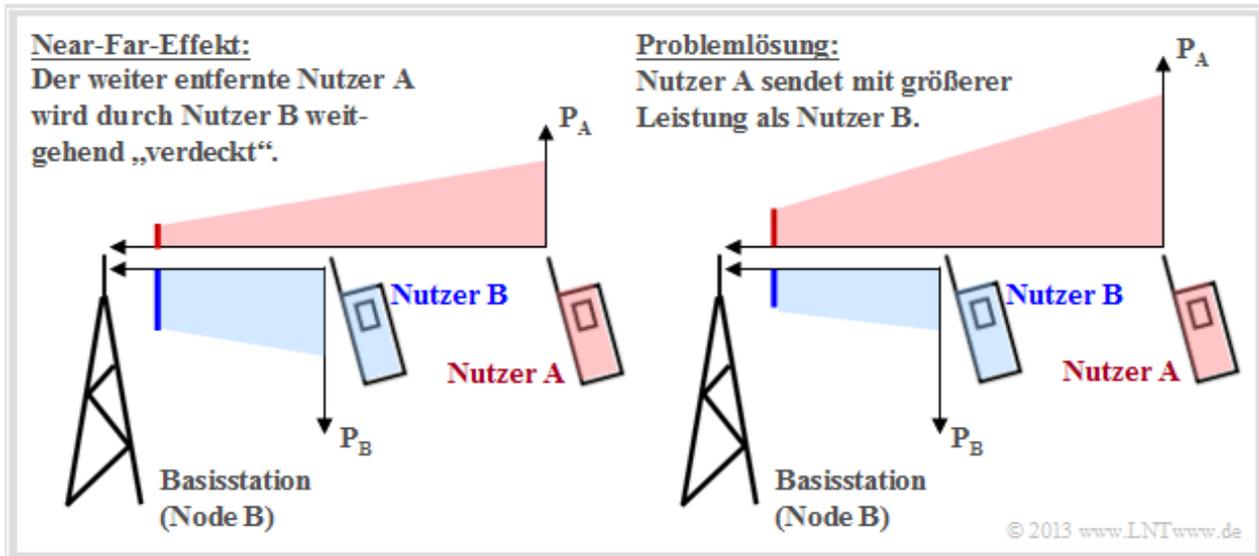
Sowohl Intra- als auch Interzellinterferenz führen zu einer Minderung der Übertragungsqualität. Bei Interzellinterferenz (gleicher Frequenzkanal in benachbarten Zellen) lässt sich der störende Einfluss der Interferenzleistung auf die Übertragungsqualität begrenzen durch

- **Zellatmung:** Nimmt bei UMTS die Anzahl der aktiven Teilnehmer signifikant zu, so wird der Zellenradius und damit auch die aktuelle Interferenzleistung verkleinert. Für die Versorgung der Teilnehmer am Rande einer ausgelasteten Zelle springt eine weniger belastete Nachbarzelle ein.
- **Leistungsregelung:** Überschreitet die Gesamtinterferenzleistung innerhalb einer Funkzelle einen vorgegebenen Grenzwert, so wird die Sendeleistung aller Teilnehmer entsprechend herabgesetzt, was aber ebenfalls eine schlechtere Übertragungsqualität zur Folge hat.

Dagegen muss bei Intrazellinterferenz jeder Nutzer individuell geregelt werden, zum Beispiel durch eine Reduzierung von Sendeleistung und/oder Datenrate.

Near-Far-Effekt und Leistungsregelung (1)

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.



- 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 (Einwegkanal, 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 GSM aufgrund der Mehrfachzugriffsverfahren FDMA und TDMA, aber auch für UMTS (CDMA) und für das 4G-System LTE (TDMA/OFDMA).

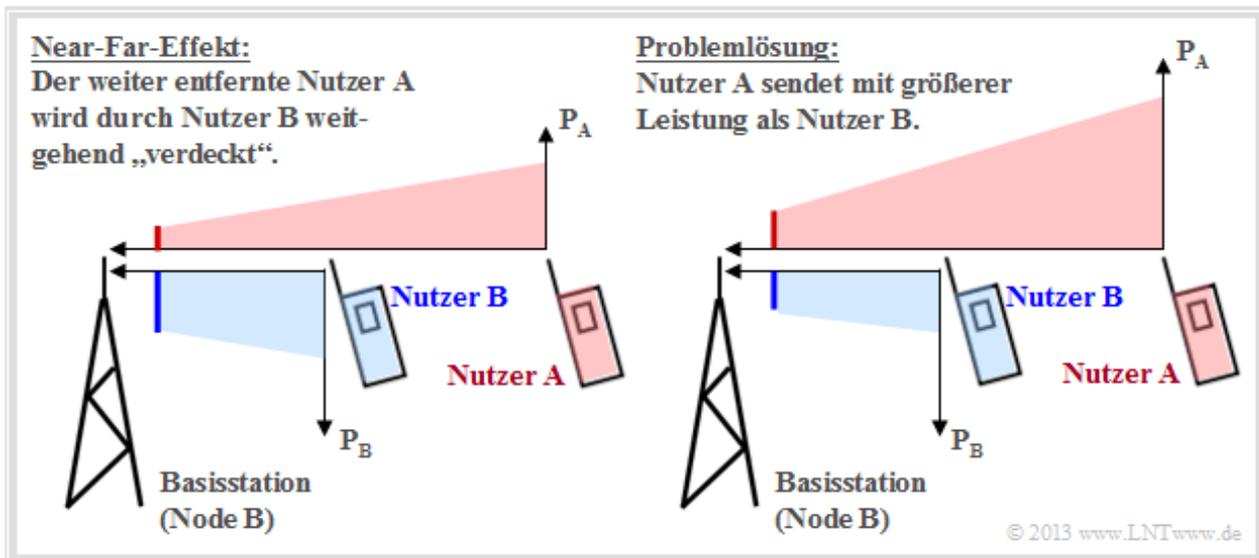
In der Realität ist jedoch die Orthogonalität aufgrund folgender Ursachen nicht immer gegeben:

- 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 etwas weniger.

Near-Far-Effekt und Leistungsregelung (2)

Um den Near-Far-Effekt entsprechend der rechten Grafik zu vermeiden, ist allerdings eine ausreichend gute Leistungsregelung erforderlich.



Hierzu ist anzumerken:

- Bei allen Systemen (GSM, UMTS und LTE) muss von einem Dynamikbereich an der Basisstation von 80 dB ausgegangen werden, wobei die Änderungen bezüglich Pfadverlust und Abschattung eher langsam erfolgen und für diese eine Regelung im Sekundenbereich um ± 5 dB ausreicht.
- Bei GSM und LTE ist eine Regelung im Sekundenbereich ausreichend, da der Störabstand des zu detektierenden Nutzers zu den anderen Nutzern aufgrund der guten Eigenschaften von FDMA/OFDMA 25 dB und mehr ist. Sehr schnelle Schwankungen des Fast-Fadings (Dynamikbereich zwischen 10 dB und 20 dB) müssen nicht ausgeglichen werden.
- Bei UMTS muss dagegen auch das Fast-Fading zu kompensiert werden, da der Störabstand der Nutzer zueinander geringer ist als die Schwankungen des Fast-Fadings. Für UMTS spezifiziert wurde *Fast Power Control*, wodurch die Sendeleistung alle 0.67 ms mit einer initialen Verzögerung von 2 ms um ± 1 dB verändert werden kann.
- Andernfalls würde die Basisstation von einem Nutzer, der bei Fast-Fading innerhalb von etwa 10 ms von sehr schlechten auf eher gute Fadingbedingungen wechselt, plötzlich um 10 bis 20 dB mehr Leistung empfangen. Alle anderen Nutzer in der Zelle würden dadurch extrem gestört.

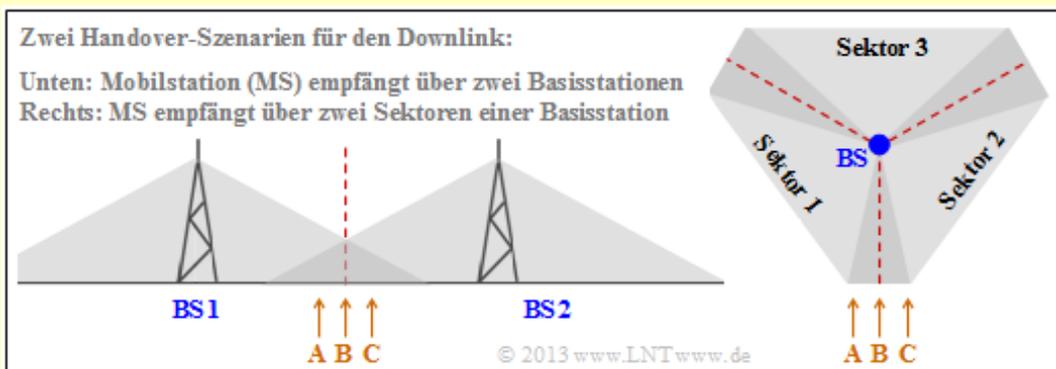
Wie bereits erwähnt ist der Near-Far-Effekt ausschließlich ein Problem des Uplinks. Für den Downlink ist eine ausgeklügelte Leistungsregelung weniger essentiell. Versorgt man aber die Nutzer nahe der Basisstation mit einer geringeren Leistung, so verringert sich dadurch auch die *Interzellinterferenz*. Das heißt, alle anderen Nutzer in der betrachteten Zelle werden durch den Datenverkehr zu dem nahen Nutzer weniger beeinträchtigt.

Verschiedene Handover-Strategien

Ein zweites Problem neben dem Near-Far-Effekt tritt auf, wenn ein Mobilfunkteilnehmer von einer Zelle in eine andere wechselt. Um den Übergang zwischen verschiedenen Zellen für die Nutzer als möglichst unterbrechungsfrei erscheinen zu lassen, wird bei leitungsvermittelten UMTS-Diensten und bei GSM ein **Handover**, eingesetzt. Man unterscheidet zwei Arten:

- **Hard Handover:** Hierbei wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die Verbindung schlagartig von der aktuellen Basisstation zu einer anderen Basisstation umgeleitet.
- **Soft Handover:** Die Übergabe eines Teilnehmers von einer Basisstation zu einer anderen erfolgt allmählich, bis dieser die erste Zelle endgültig verlassen hat. Durch die Kombination mehrerer Links – bei UMTS bis zu drei – lässt sich sogar ein Diversitätsgewinn erzielen.

Beispiel: Die untere Grafik zeigt ein Downlink-Szenarien, wobei eine Mobilstation an gewissen Orten sein Signal von zwei verschiedenen Basisstationen (BS1 und BS2) empfangen kann. Bei *Hard Handover* wertet die Mobilstation an Punkt A nur das Signal von BS1 aus und an Punkt C nur das Signal von BS2. Die Umschaltung erfolgt schlagartig, wenn sich der Teilnehmer am Punkt B befindet.



Verwendet man *Soft Handover* und *Soft Combining*, so profitiert die Mobilstation von beiden Signalen. An jedem Ort (A, B, C) erhöht sich die Empfangsleistung, und es ergibt sich so ein vom Kanal-SNR abhängiger Diversitätsgewinn und zusätzlich ein Kohärenzgewinn von 3 dB.

Die gleichen Aussagen lassen sich auch auf das rechte Szenario übertragen, bei der die Basisstation mit gerichteten Antennen in drei Sektoren abstrahlt. Hierbei ist angenommen, dass der Abstrahlwinkel etwas größer ist als 120° , wovon in der Praxis ausgegangen werden kann.

Im UMTS-Downlink werden die Daten im *Radio Network Controller* (RNC) gesplittet, über verschiedene Basisstationen ausgestrahlt und in der Mobilstation wieder zusammengesetzt (*Rake Processing*). Im *Uplink* werden 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 hierbei:

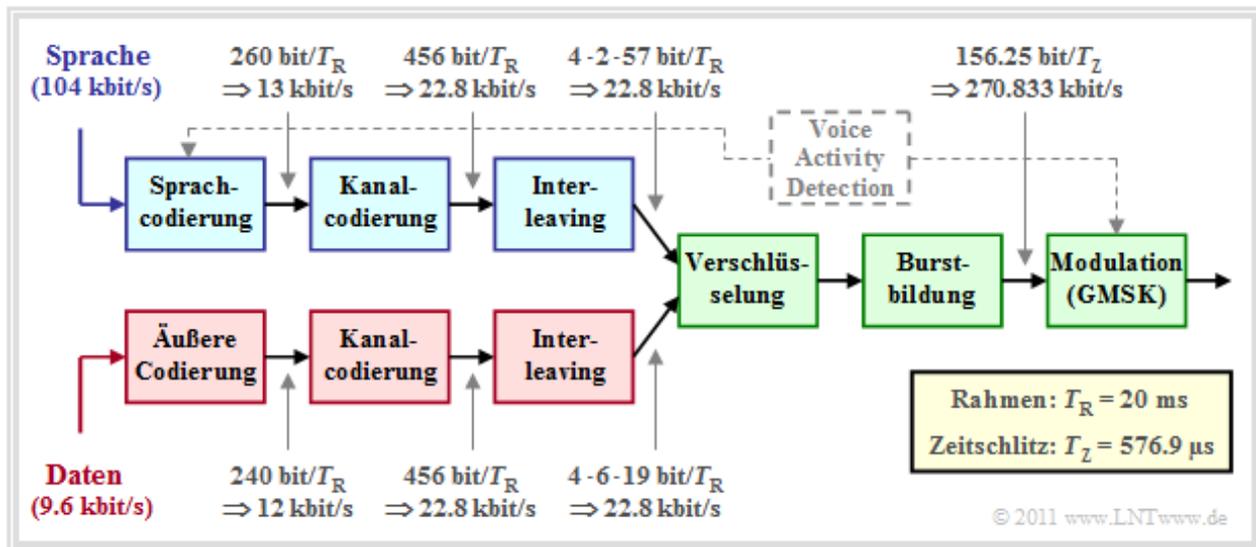
Softer Handover: Ein Node B empfängt das Signal eines Teilnehmers über zwei Sektoren und macht *Soft Combining*. Es gibt einen Diversitätsgewinn sowie einen Kohärenzgewinn von 3 dB.

Intra-RNC Handover: Zwei Node Bs decodieren das Signal, machen einen CRC-Check und melden ihr Ergebnis an den RNC (oder melden einen CRC-Fehler). Meldet nur ein Node B einen CRC-Fehler, so werden die Daten des anderen verwendet. – Hier gibt es keinen Kohärenzgewinn und der Diversitätsgewinn ist geringer als bei *Softer Handover*.

Typisches Mobilfunkübertragungssystem (1)

Es sollen nun einige Komponenten eines Mobilfunksystems erklärt werden, die sowohl bei GSM als auch bei UMTS nötig sind. Die Grafik zeigt die Komponenten des GSM-Senders und die angegebenen Raten gelten ebenfalls nur für GSM. Für die GSM-Erweiterung GPRS erhält man andere Zahlenwerte.

Für UMTS ergibt sich eine ähnliche Struktur, wenn auch nicht die exakt gleiche. Zudem sind die Bitraten der UMTS-Datenübertragung deutlich höher, während für die Sprachübertragung von vergleichbaren Raten wie für GSM ausgegangen werden kann.



Betrachten wir zunächst die Sprachübertragung, also den oberen Zweig der Grafik:

- Die Datenrate eines auf 4 kHz begrenzten PCM-Sprachsignals ergibt sich bei Abtastung mit 8 kHz und Quantisierung mit 13 Bit zu 104 kbit/s. Durch die Sprachcodierung werden bei GSM für jeden 20 ms-Rahmen genau 260 Bit extrahiert. Es wird also ein Bitstrom mit 13 kbit/s erzeugt.
- Aufgabe der gestrichelt eingezeichneten *Voice Activity Detection* ist es zu entscheiden, ob der aktuelle Sprachrahmen tatsächlich ein Sprachsignal enthält oder eine Sprachpause, während der die Leistung des Sendeverstärkers heruntergefahren werden kann.
- Durch **Kanalcodierung** (CRC und Faltungscodes) wird gezielt Redundanz hinzugefügt, um eine Fehlerkorrektur beim Empfänger zu ermöglichen. Dadurch erhöht sich die Brutto-Datenrate auf 22.8 kbit/s, wobei die wichtigeren Bits des Sprachcoders besonders geschützt werden.
- Der **Interleaver** verwirft die Bitfolge des Kanalcoders und vermindert so den Einfluss von Bündelfehlern. Hierzu werden die 456 Eingangsbit auf vier Zeitrahmen zu je 114 Bit aufgeteilt und verschachtelt. Aufeinanderfolgende Bits werden immer in 8 verschiedenen Bursts übertragen.
- Bei der GSM-Datenübertragung (unterer Zweig der Grafik) ist die Nutzdatenrate auf 9.6 kbit/s beschränkt, um der Kanalcodierung mehr Raum zu geben. Hier ist die resultierende Coderate mit $192/456 = 0.421$ kleiner als im oberen Zweig ($260/456 = 0.57$).
- Auch das Interleaving ist für Daten anders organisiert als bei der Sprachübertragung. Einheitlich für beide Zweige ist aber die effektive Datenrate von 22.8 kbit/s nach dem Interleaver.

Die Bildbeschreibung wird auf der nächsten Seiten fortgesetzt.

Typisches Mobilfunkübertragungssystem (2)

Die Beschreibung des **GSM–Senders** wird fortgesetzt:

- Nach dem Interleaving folgt – für Sprache und Daten gleichermaßen – die Verschlüsselung zum Zwecke der Authentifizierung der Teilnehmer und zur Sicherung der Funkschnittstelle gegenüber „Abhören“. UMTS bietet noch einige weitere **Sicherheitsmaßnahmen**.
- Der nächste Block ist die **Burstbildung**. Hierzu werden die 456 Bit nach Kanalcodierung, *Interleaving* und Verschlüsselung durch Hinzufügen von Signalisierungsbits, *Guard Period*, usw. auf 625 Bit erweitert, die innerhalb von vier Zeitschlitzten ($4 \cdot T_Z$) übertragen werden.
- Daraus resultiert die Gesamtdatenrate von $625/(4 \cdot 5769 \mu\text{s}) \approx 270.833 \text{ kbit/s}$, so dass für jeden der acht per TDMA verschalteten GSM–Nutzer eine Bruttodatenrate von etwa 33.854 kbit/s zur Verfügung steht. Bei Sprachübertragung sind davon allerdings nur 38.5% Nutzdaten und bei der Datenübertragung sogar nur 28.4%.
- Ein wesentlicher Unterschied zwischen GSM und UMTS sind die unterschiedlichen Modulations– und Vielfachzugriffsverfahren, zum einen *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) zusammen mit FDMA und TDMA, bei UMTS *Quaternary Phase Shift Keying* sowie CDMA und TDMA. Hierauf wird in **Kapitel 3.3** bzw. **Kapitel 3.4** noch genauer eingegangen.
- Das auf CDMA basierende UMTS ist durch die Chiprate von $R_C = 3.84 \text{ Mchip/s}$ gekennzeichnet, woraus die Bitrate $R_B = R_C/J$ gemäß dem gewählten Spreizfaktor J berechnet werden kann. Mit $J = 4, \dots, 512$ ergeben sich Bruttodatenraten zwischen 7.5 und 960 kbit/s, die abhängig von den vorherrschenden Kanalbedingungen ausgewählt werden.

Aufgrund der verschiedenartigen Übertragungstechnik ist bei UMTS der Block „Burstbildung“ völlig anders organisiert. Sie basiert auf dem *Transmission Time Interval* (TTI). Ein solches TTI hatte in der ursprünglichen UMTS–Spezifikation eine Dauer zwischen 10 ms und 80 ms. Um den Zeitverlust bei den erforderlichen Blockwiederholungen bei schlechten Kanalbedingungen zu verringern, wurde dieser TTI–Wert in späteren Releases bis auf 2 ms (für HSDPA) herabgesetzt.

Gemeinsam sind jedoch bei GSM und UMTS folgende Probleme zu lösen:

- eine geeignete Kanalschätzung und Rückmeldung an den Sender,
- eine funktionierende Trägerphasen– und Systemtakterkennung,
- die Rahmensynchronisation.

Geläufige Sprachcodierverfahren (1)

Für die GSM–Sprachübertragung steht jedem Teilnehmer nur eine Netto–Datenrate von 13 kbit/s zur Verfügung (mit Kanalcodierung 22.8 kbit/s), während die PCM–Übertragung mit 8 kHz Abtastung und 13 Bit Quantisierung eine Datenrate von 104 kbit/s erfordern würde. Um das Abtasttheorem mit einem gewissen Sicherheitsabstand einzuhalten, wird das Audiosignal durch Filterung auf den Frequenzbereich von 300 Hz bis 3.4 kHz begrenzt.

Die nötige Komprimierung um den Faktor 8 ist Aufgabe der **Sprachcodierung** (hierunter versteht man eine Sonderform der Quellencodierung), wofür in den 1990er Jahren mehrere Standards definiert wurden:

- Der **GSM Fullrate Vocoder** (zu deutsch: *GSM–Vollraten–Sprachcoder*) basiert auf den drei Kompressionsverfahren **LPC** (*Linear Predictive Coding*), **LTP** (*Long Term Prediction*) und **RPE** (*Regular Pulse Excitation*). Dieser Coder extrahiert aus jedem Sprachrahmen (20 ms) 74 Parameter mit einem Gesamtumfang von 260 Bit, woraus sich die Datenrate 13 kbit/s ergibt. Beim Empfänger muss aus diesen 260 Bit das Sprachsignal wieder synthetisiert werden.
- Der **GSM Halfrate Vocoder** (deutsch: *GSM–Halbraten–Sprachcoder*) wurde 1994 spezifiziert und bietet die Möglichkeit, ein auf 4 kHz begrenztes Audiosignal bei nahezu gleicher Qualität in einem halben Verkehrskanal zu übertragen. Heutzutage spielt dieser Sprachcodec nur noch eine untergeordnete Rolle.
- Der **Enhanced Fullrate Codec** (kurz EFR–Codec) wurde 1995 für das US–amerikanische DCS 1900–System entwickelt. Er arbeitet nach dem Codierungsverfahren *Algebraic Code Excited Linear Prediction* (ACELP) und bietet gegenüber dem herkömmlichen FR–Codec aufgrund des ACELP–Prinzips, aber auch wegen der verbesserten Fehlererkennung und –verschleierung, eine deutlich höhere Sprachqualität.

Aus dem **ACELP–Blockschaltbild** im Buch „Beispiele von Nachrichtensystemen“ erkennt man

- die Segmentierung des digitalisierten Sprachsignals in Rahmen und Subblöcke,
- die LPC–Analyse durch ein digitales Filter $A(z)$ im rot hinterlegten Block,
- die Langzeitprädiktion (LTP) mit Hilfe des adaptiven Codebuchs (blau umrahmt), und
- die Suche nach dem besten Eintrag im festen Codebuch (grün hervorgehoben).

Im **Kapitel 3.3** des Buches „Beispiele von Nachrichtensystemen“ wird unter anderem der EFR–Codec im Detail beschrieben. Die Datenrate von 12.2 kbit/s ist identisch mit dem höchsten Modus des AMR–Codecs, der auf der nächsten Seite kurz vorgestellt wird.

Geläufige Sprachcodierverfahren (2)

Der aufgrund seiner Flexibilität am weitesten verbreitete Sprachcoder ist der **AMR-Codec** (*Adaptive Multi-Rate*), der niederfrequente Signale (im Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 3.4 kHz) nach dem ACELP-Prinzip verarbeitet. Dieser Codierer stellt acht verschiedene Modi mit Datenraten zwischen 12.2 kbit/s (244 Bit pro 20 ms-Sprachrahmen) und 4.75 kbit/s (95 Bit pro Sprachrahmen) zur Verfügung. Drei Modi spielen eine Sonderrolle, nämlich

- **12.2 kbit/s** – der verbesserte GSM-Vollraten-Codec (EFR-Codec),
- **7.4 kbit/s** – die Sprachkompression gemäß dem US-amerikanischen Standard IS-641, und
- **6.7 kbit/s** – die EFR-Sprachübertragung des japanischen PDC-Mobilfunkstandards.

Diese häufig verwendeten Modi sind in der ersten Zeile der folgenden Tabelle dunkler hinterlegt.

© 2011 www.LNTwww.de

AMR-Codec (300 – 3400 Hz)	4.75	5.15	5.90	6.70	7.40	7.95	10.20	12.20	
Wideband-AMR (200 – 7000 Hz)	6.60	8.85	12.65	14.25	15.85	18.25	19.85	23.05	23.85

Der AMR-Codec zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Er passt sich flexibel an die aktuellen Gegebenheiten des Funkkanals und an die jeweilige Netzauslastung an, indem er entweder im Vollraten-Modus (höhere Sprachqualität ⇒ Modus ≥ 7.4 kbit/s) oder im Halbraten-Modus (also mit geringerer Datenrate ⇒ Modus ≤ 6.7 kbit/s) arbeitet. Daneben gibt es noch etliche Zwischenstufen.
- Er bietet sowohl für den Vollraten- als auch für den Halbratenverkehrs kanal eine verbesserte Sprachqualität, was insbesondere auf die flexibel handhabbare Aufteilung der zur Verfügung stehenden Brutto-Kanaldatenrate zwischen Sprach- und Kanalcodierung zurückzuführen ist.

Der AMR-Codec wird bei GSM und UMTS in gleicher Weise eingesetzt. Ausschließlich bei UMTS Anwendung findet der **Wideband-AMR** für breitbandigere Signale zwischen 50 Hz und 7 kHz, wobei mit 16 kHz abgetastet und mit 14 Bit quantisiert wird. Die neun definierten Modi des W-AMR sind in der unteren Zeile der obigen Tabelle angegeben, die häufiger genutzt sind wieder dunkel hinterlegt.

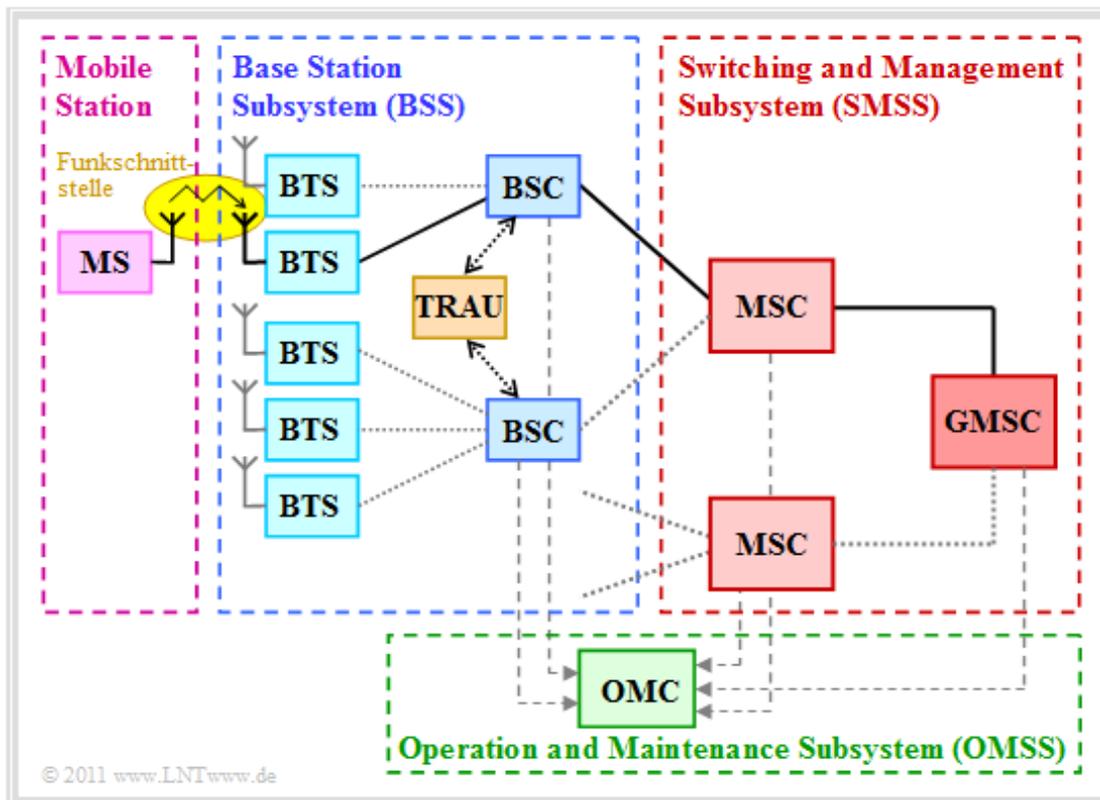
Das folgende Interaktionsmodul demonstriert akustisch die erreichbare Sprachqualität mit den hier beschriebenen Sprachcodecs:

Qualität verschiedener Sprachcodecs (Dateigröße 11.3 MB!)

Systemarchitektur und Basiseinheiten von GSM

GSM (*Global System for Mobile Communication*) ist ein stark hierarchisch gegliedertes System verschiedener Netzkomponenten. Aus der Grafik erkennt man:

- Die Mobilstation (MS) kommuniziert über die Funkschnittstelle mit der nächstgelegenen *Base Transceiver Station* (BTS, Sende- und Empfangsbasisstation).
- Mehrere solcher BTS werden gebietsweise zusammengefasst und sind gemeinsam einem *Base Station Controller* (BSC, Kontrollstation) unterstellt.
- Das *Base Station Subsystem* (BSS) besteht aus einer Vielzahl von BTS und mehreren BSC. In der Grafik ist ein solches BSS blau umrandet.
- Jeder BSC ist mit einem *Mobile Switching Center* (MSC, Vermittlungsrechner) verbunden, dessen Funktion mit einem Vermittlungsknoten im Festnetz vergleichbar ist.
- Das *Gateway Mobile Switching Center* (GMSC) ist für die Verbindung zwischen Fest- und Mobilfunknetz zuständig. Wird zum Beispiel ein Mobilfunkteilnehmer aus dem Festnetz angerufen, so ermittelt das GMSC das zuständige MSC und vermittelt den Ruf weiter.
- Das *Operation and Maintenance Center* (OMC) überwacht einen Teil des Mobilfunknetzes. Daneben übernimmt es auch organisatorische Aufgaben wie Steuerung des Verkehrsflusses, Gebührenerfassung, Sicherheitsmanagement, usw..

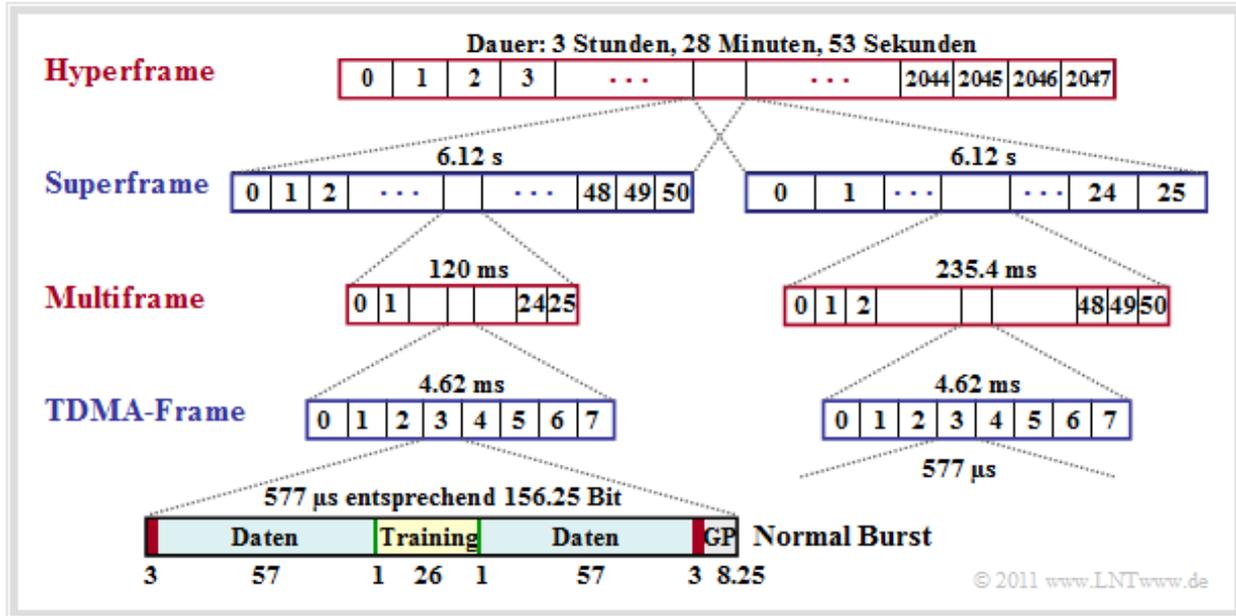


Genauere Informationen zur GSM-Systemarchitektur und zu den einzelnen Netzkomponenten finden Sie im **Kapitel 3.1** des Buches „Beispiele von Nachrichtensystemen“.

Vielfachzugriff bei GSM

Bei GSM werden zwei Vielfachzugriffsverfahren parallel verwendet:

- **Frequenzmultiplex** (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA), und
- **Zeitmultiplex** (*Time Division Multiple Access*, TDMA).

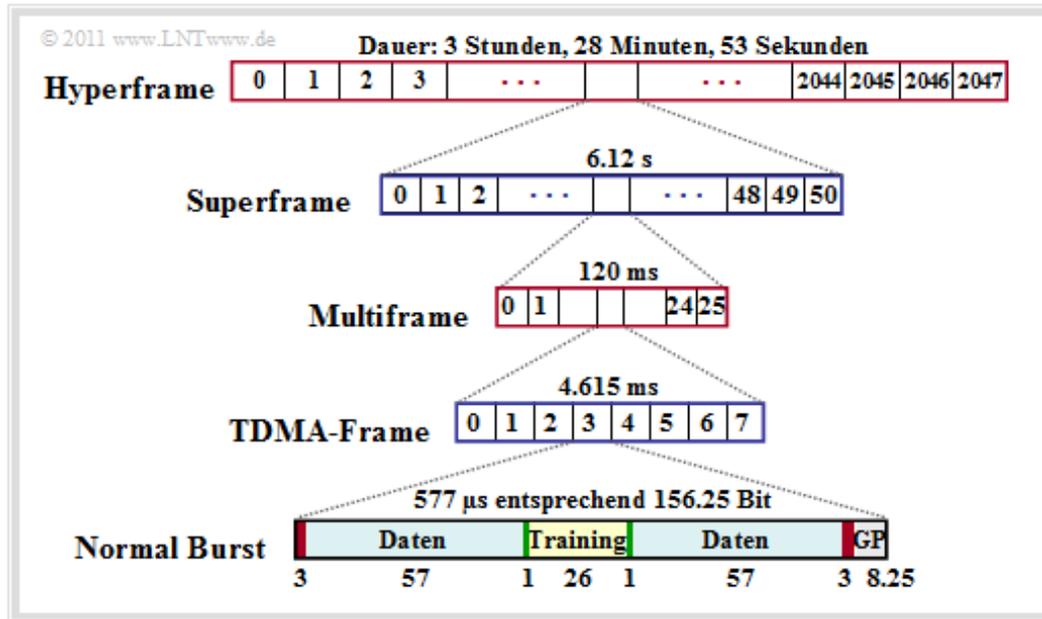


Die Grafik und die folgende Beschreibung gilt für das ursprüngliche System GSM 900 (D-Netz). Für GSM/DCS 1800 (E-Netz) gelten vergleichbare Aussagen.

- Im D-Netz werden für Uplink und Downlink jeweils eine Bandbreite von 25 MHz bereit gestellt (Duplexabstand: 45 MHz). Man spricht von *Frequency Division Duplex* (FDD). Beim E-Netz beträgt die Bandbreite jeweils 75 MHz und der Duplexabstand ist 95 MHz.
- Uplink- und Downlinkband werden in Frequenzbänder der Breite 200 kHz unterteilt. Unter Berücksichtigung von Schutzbereichen an den jeweiligen Rändern stehen somit $N_F = 124$ (D-Netz) bzw. $N = 374$ (E-Netz) Frequenzkanäle zur Verfügung.
- Jeder Zelle wird eine Teilmenge dieser Frequenzen zugewiesen \Rightarrow *Cell Allocation*. Benachbarte Zellen arbeiten meist bei unterschiedlichen Frequenzen, zum Beispiel mit dem Reuse-Faktor 3, wie im **Kapitel 3.2** durch die Farben Weiß, Gelb und Blau angedeutet.
- Die 124 GSM-Frequenzkanäle werden durch Zeitmultiplex (TDMA) weiter unterteilt. Jeder FDMA-Kanal wird in so genannte TDMA-Rahmen aufgeteilt, die ihrerseits jeweils $N_T = 8$ Zeitschlitz (*Time-Slots*) umfassen.
- Die Slots werden periodisch den einzelnen GSM-Nutzern zugeordnet und beinhalten jeweils einen sog. **Burst**. Jedem Nutzer steht in jedem TDMA-Rahmen ein Zeitschlitz zur Verfügung. Eine Bündelung (maximal 6 pro User) ist nur bei GPRS/EDGE möglich.
- Die TDMA-Rahmen des Uplinks werden gegenüber denen des Downlinks um drei Slots verzögert gesendet: *Time Division Duplex* (TDD). Die Hardware der Mobilstation kann somit gleichermaßen zum Senden und Empfangen einer Nachricht verwendet werden.

Daten- und Rahmenstruktur bei GSM

Durch die GSM-Rahmenstruktur erfolgt die Abbildung der logischen Kanäle auf physikalische Kanäle. Hier beschränken wir uns auf Verkehrskanäle und auf die Abbildung in der Zeit. In diesem Fall wird jeder Multiframe von 120 ms Dauer in 26 TDMA-Rahmen (davon zwei für Kontrollkanäle) der Dauer 4.615 ms unterteilt. Damit ergibt sich für die Dauer eines Zeitschlitzes näherungsweise $T_Z = 577 \mu\text{s}$.



Weiter erkennt man aus der Grafik:

- In jedem Zeitschlitz wird ein so genannter *Burst* übertragen, dessen Zeitdauer einheitlich 156.25 Bitdauern entspricht. Daraus folgt für die **Bitdauer** $T_B = 576.9 \mu\text{s}/156.25 \approx 3.692 \mu\text{s}$ und für die Gesamt-Bruttodatenrate

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{T_B} = 270.833 \text{ kbit/s.}$$

- Die **Bruttodatenrate** eines jeden Nutzers beträgt somit $R_{\text{Brutto}} = 33.854 \text{ kbit/s}$. Da in jedem *Normal Burst* aber nur $2 \cdot 57 = 114$ Datenbit (in der Grafik blau hinterlegt) übertragen werden, ergibt sich für die **Nettodatenrate** mit $R_{\text{Netto}} = 22.8 \text{ kbit/s}$ ein kleinerer Wert.
- Diese Nettodatenrate berücksichtigt auch die Kanalcodierung. Bei einem Sprachsignal werden pro Sprachrahmen von 20 ms Dauer 456 Bit übertragen, woraus sich genau die Rate 22.8 kbit/s ergibt. Ohne Kanalcodierung wäre die Datenrate nur 13 kbit/s.
- Neben den Verkehrsdaten enthält ein *Normal Burst* noch zweimal drei Tailbits (rot, in dieser Zeit wird der Kanal neu vermessen), zwei Signalisierungsbits (grün), 26 Bit für die Trainingssequenz (erforderlich für die Kanalschätzung und Synchronisation) sowie die *Guard Period* (GP) mit 8.25 Bitdauern (grau, ca. 30.5 μs), wodurch sich die Datenrate von 22.8 auf 33.854 kbit/s erhöht.

Anzumerken ist, dass bei GSM neben dem *Normal Burst* auch noch andere **Arten von Bursts** (*Frequency Correction Burst*, *Synchronization Burst*, *Dummy Burst*, *Access Burst*) eine Rolle spielen. Alle haben eine einheitliche Länge von 156.25 Bitdauern. Hierauf wird in der **Aufgabe A3.2** genauer eingegangen.

Modulationsverfahren bei GSM (1)

Bei GSM steht pro Frequenzkanal lediglich eine Bandbreite von $B = 200$ kHz zur Verfügung, worin eine Gesamtdatenrate (für 8 Nutzer) von $R_{\text{ges}} \approx 270$ kbit/s übertragen werden muss. Man benötigt deshalb ein Modulationsverfahren mit einer Bandbreiteneffizienz

$$\beta \geq \frac{R_{\text{ges}}}{B} \approx 1.35 \text{ bit/s/Hz.}$$

GSM verwendet das sehr bandbreiteneffiziente Modulationsverfahren **Gaussian Minimum Shift Keying** (GMSK). Es sei nochmals ausdrücklich erwähnt, dass sich dieses Modulationsverfahren ebenso wie der FDMA/TDMA–Vielfachzugriff ausschließlich auf die Funkschnittstelle zwischen der *Mobile Station* (MS) und der *Base Transceiver Station* (BTS) bezieht, die in der **Systemarchitektur–Grafik** zu Beginn des Kapitels durch gelbe Hinterlegung hervorgehoben ist.

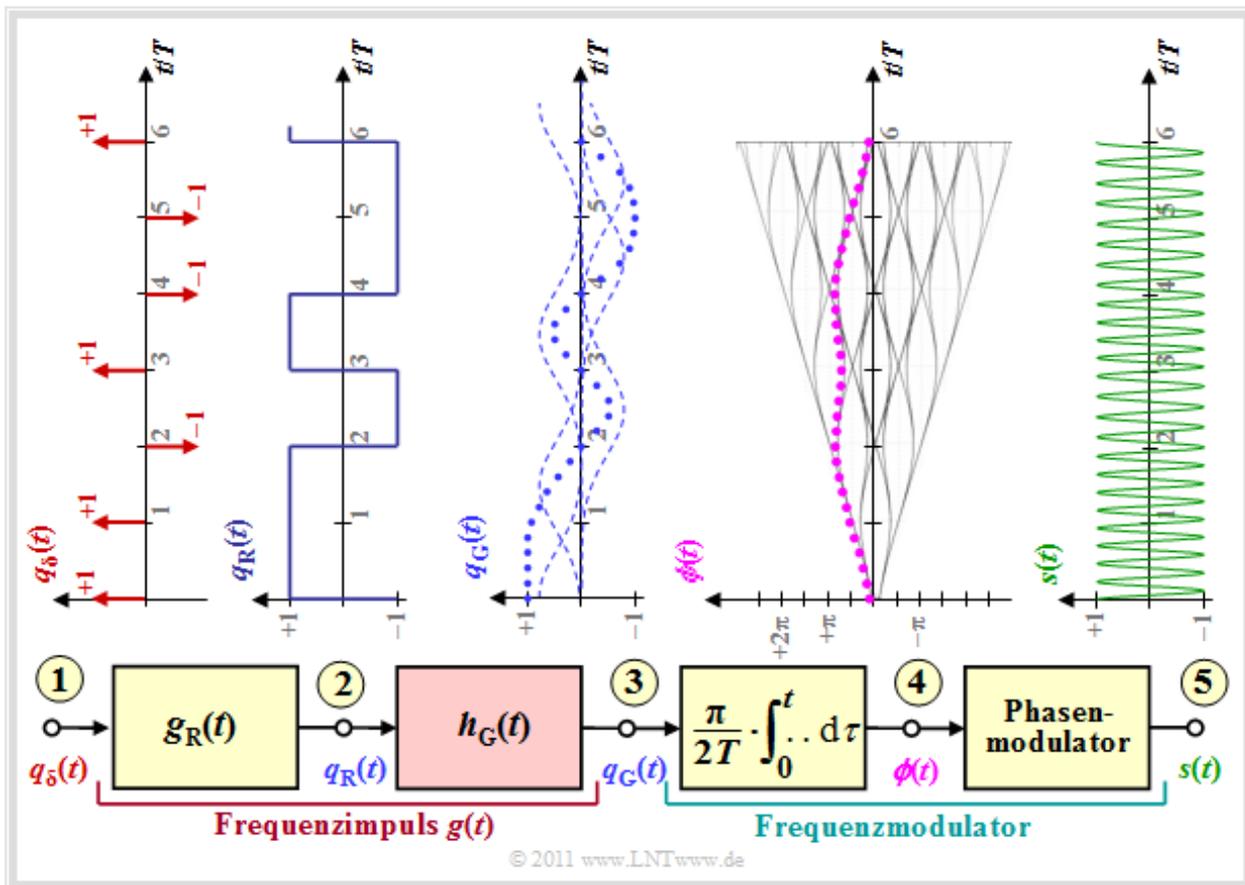
GMSK wurde bereits im **Kapitel 4.4** des Buches „Modulationsverfahren“ beschrieben. Hier werden nur die wesentlichen Eigenschaften kurz zusammengefasst.

- GMSK ist eine Sonderform von binärem **Frequency Shift Keying** (FSK). Voraussetzung für die Orthogonalität zwischen den beiden Signalformen ist, dass der Modulationsindex h ein Vielfaches von 0.5 ist. Für ganzzahlige Werte von h kann die Demodulation auch nichtkohärent erfolgen.
- Bei GSM verwendet man den kleinstmöglichen Modulationsindex $h = 0.5$. Ein größerer Wert würde eine deutlich größere Bandbreite beanspruchen. Eine solche FSK mit $h = 0.5$ nennt man auch **Minimum Shift Keying** (MSK). Allerdings ist dann eine kohärente Demodulation erforderlich.
- Ein sehr schmales Spektrum ergibt sich allerdings erst dann, wenn die Phasenwerte an den Symbolgrenzen aneinander angepasst und dadurch Phasensprünge vermieden werden, was bei MSK gegeben ist. Man bezeichnet solche Verfahren als **Continuous Phase Frequency Shift Keying** (CP–FSK).
- Bei GSM wird vor dem Frequenzmodulator noch ein Tiefpass mit Gauß–Charakteristik eingefügt \Rightarrow *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK), wodurch die Bandbreite weiter verringert und die Bandbreiteneffizienz verbessert wird.

Hinsichtlich der hier behandelten Thematik (kohärente bzw. nichtkohärente Demodulation von FSK) verweisen wir auf folgende Aufgaben im Buch „Digitalsignalübertragung“:

- Aufgabe **A4.16: Binary Frequency Shift Keying** (Kapitel 4.4),
- Aufgabe **Z4.18: FSK kohärent/nichtkohärent** (Kapitel 4.5).

Modulationsverfahren bei GSM (2)



Die obige Grafik soll die Aussagen der letzten Seite verdeutlichen.

- Ausgehend von einem diracförmigen Quellensignal $q_\delta(t)$ am Punkt (1) kommt man durch ein Filter mit der rechteckförmigen Impulsantwort $g_R(t)$ zum Rechtecksignal $q_R(t)$ am Punkt (2).
- Würde man auf den Gaußtieffpass mit der Impulsantwort $h_G(t)$ verzichten $\Rightarrow q_G(t) = q_R(t)$, so ergäbe sich am Punkt (4) eine abschnittsweise lineare Phasenfunktion $\phi(t)$. Bei allen Vielfachen der Symboldauer T wären damit alle Phasenwerte Vielfache von $\pi/2$.
- Nach dem Phasenmodulator würde dann am Punkt (5) ein binäres FSK-Signal $s(t)$ mit nur zwei Frequenzen auftreten. Aufgrund des bei Orthogonalität minimalen Modulationsindex $h = 0.5$ ist $s(t)$ gleichzeitig ein MSK-Signal.
- Durch den Gaußtieffpass $H_G(f)$ mit der Grenzfrequenz $f_G = 0.45/T$ (gültig für GSM) ist der Frequenzimpuls $g(t)$ nicht mehr rechteckförmig, sondern entspricht der Rechteckantwort von $H_G(f)$. Nach den Gesetzen der Fouriertransformation gilt $g(t) = g_R(t) * h_G(t)$.
- Somit steigt die Phasenfunktion $\phi(t)$ nicht mehr abschnittsweise linear an oder fällt linear ab, sondern die Ecken sind abgerundet, wie aus dem Signalverlauf am Punkt (4) zu ersehen ist. Die violett-gepunktete Kurve gilt für die am Punkt (1) angenommene Datenfolge.
- Das GMSK-Signal $s(t)$ beinhaltet nun deutlich mehr als nur zwei diskrete Frequenzen und das Leistungsdichtespektrum fällt schneller ab, wie das **Diagramm** im Buch „Beispiele von Nachrichtensystemen“ zeigt. Aus der obigen Zeitdarstellung des Sendesignals $s(t)$ am Punkt (5) des Blockschaltbildes ist dieser Sachverhalt allerdings nur schwer zu erkennen.

GSM–Erweiterungen

GSM wurde als europäisches Mobilfunksystem für Telefongespräche konzipiert und entwickelt mit der Zusatzoption der Datenübertragung, aber nur mit geringer Datenrate (9.6 kbit/s). Die Standardisierung der GSM–Phase 2 ab 1995 beinhalteten aber bereits erste Weiterentwicklungen und einige neue, bereits von ISDN bekannte und von den Nutzern geschätzte Zusatzdienste.

In den Jahren von 1997 bis 2000 wurden neue Datendienste mit höheren Bitraten entwickelt, die man der **GSM–Phase 2+** (bzw. 2.5) zurechnet:

- **High–Speed Circuit–Switched Data (HSCSD)** bietet bei ausreichend gutem Kanal durch eine höhere Coderate (Punktierung des Faltungscodes) eine leitungsorientierte Übertragung mit 14.4 kbit/s (gegenüber 9.6 kbit/s). Es ermöglicht zudem eine Kanalbündelung durch die Kombination mehrerer Zeitschlitze \Rightarrow „*Multislot Capability*“. Bei einer Bündelung von vier Zeitschlitzen kommt man so auf eine maximale Übertragungsrate von 57.6 kbit/s.
- **General Packet Radio Service (GPRS)** ermöglicht die Kommunikation mit anderen Netzen wie etwa dem Internet oder firmeninternen Intranets. Es ist paketorientiert (statt leitungsorientiert) und unterstützt viele Datenübertragungsprotokolle, zum Beispiel das Internet Protocol (IP), X.25 und Datex–P. Die Gebühren ergeben sich bei GPRS nicht aus der Verbindungsdauer, sondern aus der übertragenen Datenmenge. Ein GPRS–Nutzer profitiert von den kürzeren Zugriffszeiten und der höheren Datenrate bis 21.4 kbit/s. Durch die Bündelung von sechs Zeitschlitzen erreicht man so maximal 128.4 kbit/s.
- **Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)** benutzt neben dem GSM–Standard GMSK als weiteres Modulationsverfahren **8–PSK**, so dass mit jedem Symbol drei Datenbits übertragen werden und auf diese Weise die Datenrate (theoretisch) verdreifacht werden kann.

Bei der Kombination aus GPRS und EDGE – man spricht dann von **E–GPRS** – gibt es neun verschiedene **Modulation and Coding Schemes (MCS)**, zwischen denen der Betreiber wählen kann:

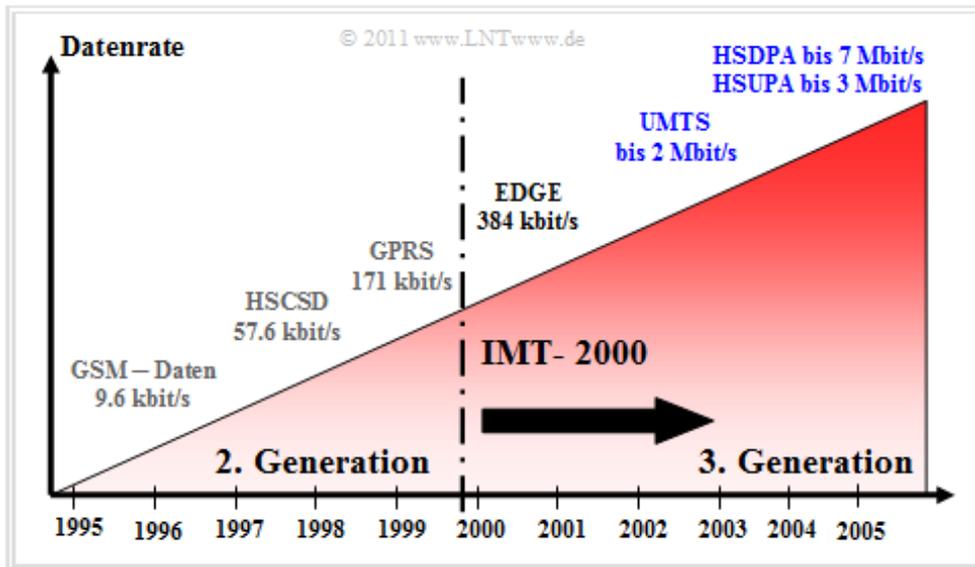
- mit GMSK– oder 8–PSK–Modulation,
- resultierende Coderaten zwischen 0.37 und 1, sowie
- Datenraten zwischen 8.8 (für MCS–1) und 59.2 kbit/s (für MCS–9).

In der Praxis maximal anwendbar sind allerdings MCS–8 (54.4 kbit/s) und sieben Zeitschlitze. Damit erreicht man immerhin 380.8 kbit/s und damit die Größenordnung von UMTS (384 kbit/s).

Erwähnt werden soll noch **EDGE Evolution** oder „Evolved EDGE“, also die Weiterentwicklung der Weiterentwicklung von GSM. Hierfür werden von den Entwicklern Datenraten bis zu 1 Mbit/s und halbierte Latenzzeiten (10 ms statt 20 ms) angegeben. Man erreicht diese Werte unter Anderem durch 32–QAM– oder 16–QAM–Modulation anstelle von 8–PSK und eine verbesserte Fehlerkorrektur durch den Einsatz von **Turbo–Codes**. Außerdem wurde die Symbolrate von 270.833 ksymbol/s um 20% auf 325 ksymbol/s erhöht.

Anforderungen an Mobilfunksysteme der dritten Generation

Die wichtigste Motivation zur Entwicklung von **Mobilfunksystemen der dritten Generation** war die Erkenntnis, dass die 2G-Systeme den Bandbreitenbedarf zur Nutzung multimedialer Dienste nicht zufrieden stellen konnten. Die Grafik zeigt die Entwicklung der Mobilfunksysteme seit 1995 hinsichtlich der Leistungsfähigkeit. Die angegebenen Datenraten sind für heute (2011) realistisch, wenn nicht mehr als zwei Nutzer in einer Zelle aktiv sind. Die von Anbietern oft angegebenen Maximalwerte werden in der Praxis wahrscheinlich nicht erreicht.



Die Mobilfunksysteme der dritten Generation sollen über eine größere Bandbreite und eine genügende Reserve an Leistungsfähigkeit verfügen, um auch bei wachsenden Anforderungen eine hohe Dienstgüte (englisch: *Quality of Service*, QoS) gewährleisten zu können.

Vor der Entwicklung der 3G-Systeme hat die *International Telecommunication Union* (ITU) unter anderem einen Anforderungskatalog erstellt, der folgende Rahmenbedingungen umfasst:

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

Bei der Einführung von UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) als dem bekanntesten 3G-Standard war die Erweiterung und Diversifikation der angebotenen Dienste ein entscheidendes Motiv. Ein UMTS-fähiges Endgerät muss zusätzlich zu den klassischen Diensten (Sprachübertragung, Messaging, usw.) eine Reihe komplexer und multimedialer Anwendungen unterstützen, unter anderem

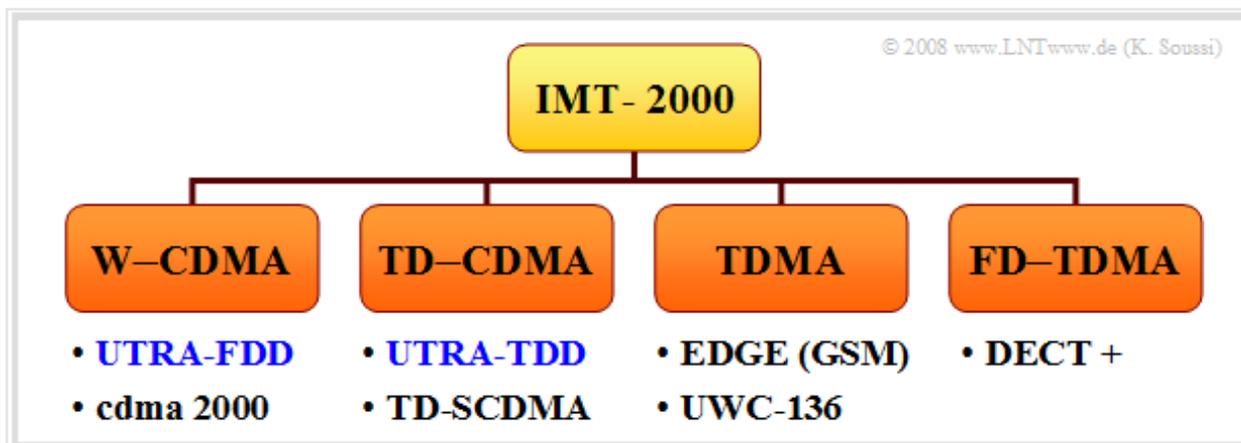
- hinsichtlich **Information**: Internet-Surfen (Info-on-demand), Online-Printmedien,
- hinsichtlich **Kommunikation**: Video- und Audiokonferenz, Fax, ISDN, Messaging,
- hinsichtlich **Unterhaltung**: Mobile TV, Video-on-Demand, Online-Gaming,
- im **geschäftlichen Bereich**: Interaktives Einkaufen, E-Commerce,
- im **technischen Bereich**: Online-Betreuung, Distributionsservice (Sprache und Daten),
- im **medizinischen Bereich**: Telemedizin.

Der IMT-2000-Standard

Um 1990 wurde von der *International Telecommunication Union* (ITU) der Standard **IMT-2000** (*International Mobile Telecommunications at the year 2000*) ins Leben gerufen, der die genannten Anforderungen ermöglichen sollte. IMT-2000 umfasst einige Mobilfunksysteme der dritten Generation, die im Laufe der Standardisierung einander angenähert wurden, um die Entwicklung von gemeinsamen Endgeräten für alle diese Standards zu ermöglichen.

Um unterschiedliche Vorarbeiten zu berücksichtigen und den Netzbetreibern die Möglichkeit zu geben, bereits bestehende 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 wurde.
- **TDMA:** Eine Weiterentwicklung des GSM-Ablegers EDGE und des amerikanischen Pendant UWC-136, auch bekannt als D-AMPS.
- **FD-TDMA:** Die Weiterentwicklung des europäischen Schnurlos-Telefonie-Standards DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunication*).



Wir konzentrieren uns hier auf das in Europa entwickelte Mobilfunksystem **UMTS**, das die beiden Standards W-CDMA und TD-CDMA der Systemfamilie IMT-2000 unterstützt, und zwar unter folgenden Bezeichnungen:

- **UTRA-FDD** ⇒ „UMTS Terrestrial Radio Access – Frequency Division Duplex“: Dieses besteht aus zwölf gepaarten Uplink- und Downlink-Frequenzbändern zu je 5 MHz Bandbreite. Diese liegen in Europa zwischen 1920 und 1980 MHz im Uplink sowie zwischen 2110 und 2170 MHz im Downlink. Im Sommer 2000 brachte die Versteigerung der Lizenzen für Deutschland mit 20 Jahren Laufzeit ca. 50 Milliarden Euro.
- **UTRA-TDD** ⇒ „UMTS Terrestrial Radio Access – Time Division Duplex“: Hierfür werden fünf Bänder zu je 5 MHz Bandbreite bereitgestellt, 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.

Systemarchitektur und Basiseinheiten bei UMTS

Die Netzwerk–Architektur kann man bei UMTS in zwei Hauptblöcke unterteilen.

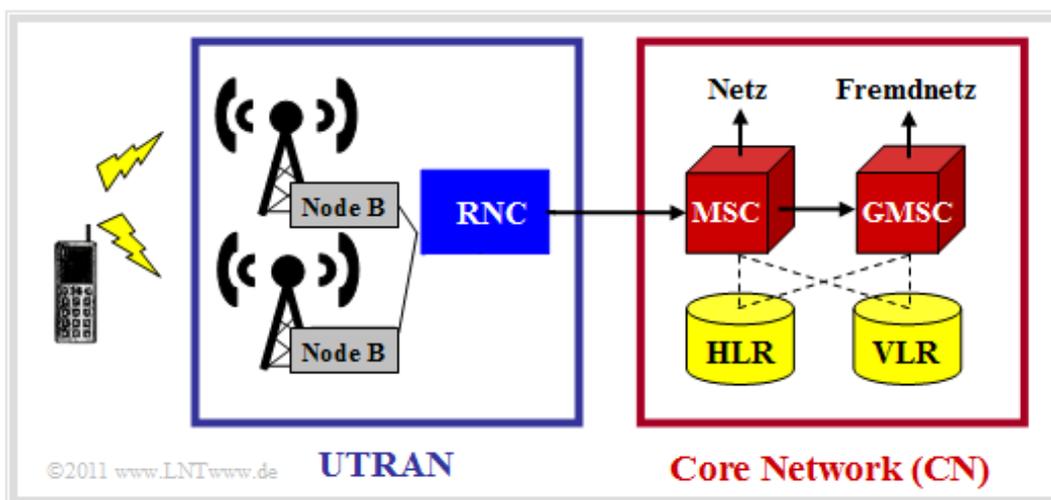
Das **UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)** sichert die Funkübertragung von Daten zwischen der Transportebene und der Funknetzebene. Dazu gehören die Basisstationen und die Kontrollknoten, deren Funktionen nachfolgend genannt werden:

- Ein **Node B** – wie eine UMTS–Basisstation genannt wird – umfasst die Antennenanlage sowie den CDMA–Empfänger und ist unmittelbar mit den Funkschnittstellen aller Teilnehmer in der Zelle verbunden. Zu den Aufgaben eines Node B gehören die Datenratenanpassung, Daten– und Kanal(de)codierung, Interleaving sowie Modulation bzw. Demodulation. Jede Basisstation kann eine oder mehrere Zellen(sektoren) 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, die Umsetzung auf ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), die Kanaluweisung, das Handover und die Leistungsregelung.

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

- Das **Mobile Switching Center (MSC)** ist zuständig für Lokalisierung/Authentifizierung, das Routing von Gesprächen, Handover und Verschlüsselung von Teilnehmerdaten.
- Das **Gateway Mobile Switching Center (GMSC)** organisiert die Verbindung zu anderen Netzen, zum Beispiel zum Festnetz.
- **MSC und GMSC** haben Zugriff auf verschiedene Datenbanken wie **Home Location Register (HLR)** und **Visitor Location Register (VLR)**.

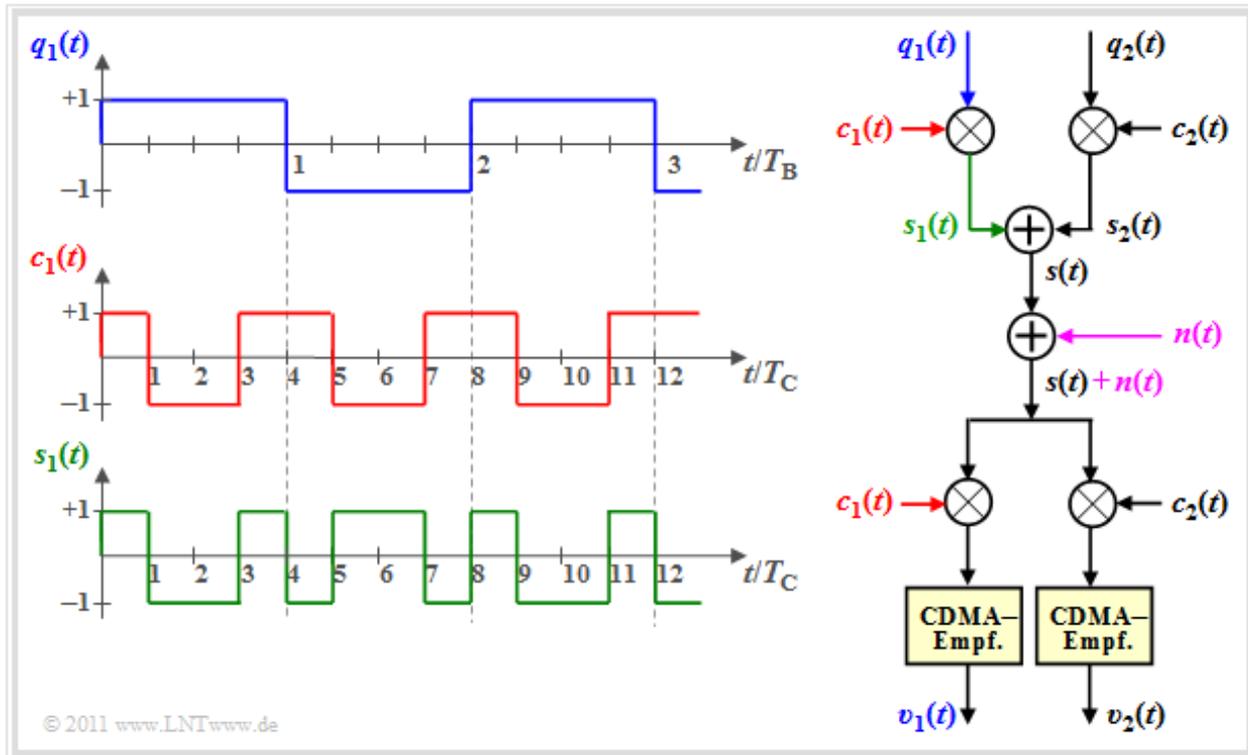
Die Grafik zeigt die UMTS–Architektur bei Leitungsvermittlung (englisch: *Circuit Switching*), wobei das *Core Network (CN)* ähnlich wie bei der GSM–Architektur organisiert ist.



Die **Systemarchitektur bei Paketvermittlung** (englisch: *Packet Switching*) unterscheidet sich demgegenüber grundlegend. Hier nutzen die Kommunikationspartner den ihnen zugewiesenen Kanal nicht exklusiv, sondern die Pakete sind mit denen anderer Teilnehmer vermischt. Man findet dort ähnliche Komponenten wie bei der GSM–Erweiterung **General Packet Radio Service (GPRS)**.

CDMA – Vielfachzugriff bei UMTS

UMTS verwendet das Vielfachzugriffsverfahren **Direct Sequence Code Division Multiple Access** (DS-SS-CDMA). Dieses Verfahren wird manchmal auch als „PN-Modulation“ bezeichnet.



Die Grafik zeigt das Prinzip anhand eines vereinfachten Modells und beispielhafter Signale für den Nutzer 1. Zur Vereinfachung ist für die dargestellten Signale das Rauschsignal $n(t) = 0$ gesetzt. Es gilt:

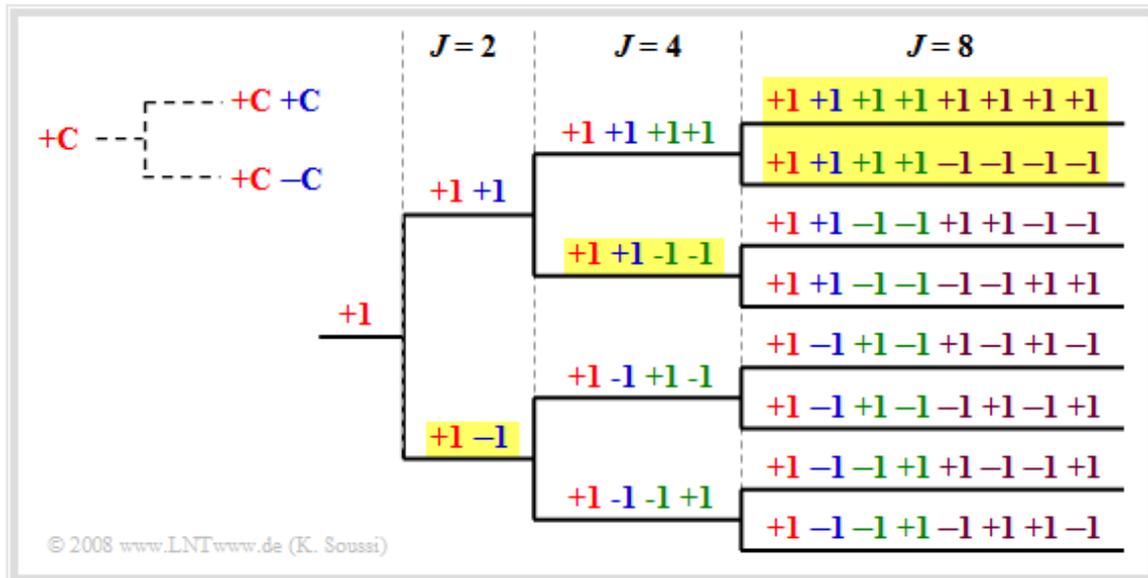
- Die beiden Quellensignale $q_1(t)$ und $q_2(t)$ benutzen den gleichen AWGN-Kanal, ohne sich gegenseitig zu stören. Die Bitdauer der Datensignale beträgt jeweils T_B .
- Jedes der Datensignale wird mit einem zugeordneten Spreizcode – $c_1(t)$ bzw. $c_2(t)$ – multipliziert. Übertragen wird das Summensignal $s(t) = q_1(t) \cdot c_1(t) + q_2(t) \cdot c_2(t)$.
- Die Bandbreiten von $s_1(t)$, $s_2(t)$ und Sendesignal $s(t)$ sind um den **Spreizfaktor** $J = T_B/T_C$ größer als die Bandbreiten von $q_1(t)$ bzw. $q_2(t)$. Für die Grafik wurde $J = 4$ gewählt.
- Beim Empfänger werden die gleichen Spreizcodes $c_1(t)$ bzw. $c_2(t)$ multiplikativ zugesetzt. Bei orthogonalen Codes und kleinem AWGN-Rauschen $n(t)$ können dann die Datensignale wieder voneinander getrennt werden. Das heißt, es gilt $v_1(t) = q_1(t)$, $v_2(t) = q_2(t)$.
- Bei vorhandenem AWGN-Rauschen unterscheiden sich zwar die digitalen Ausgangssignale von den Eingangssignalen, aber die Fehlerwahrscheinlichkeit wird durch die anderen Teilnehmer nicht erhöht, solange die verwendeten Spreizfolgen orthogonal sind.
- Man könnte somit im Beispiel $J = 4$ Teilnehmer ohne Beeinträchtigung über den gleichen Kanal übertragen, allerdings nur dann, wenn es J orthogonale Spreizcodes gibt.

Spreizcodes und Verwürfelung (1)

Die Spreizcodes für UMTS sollen

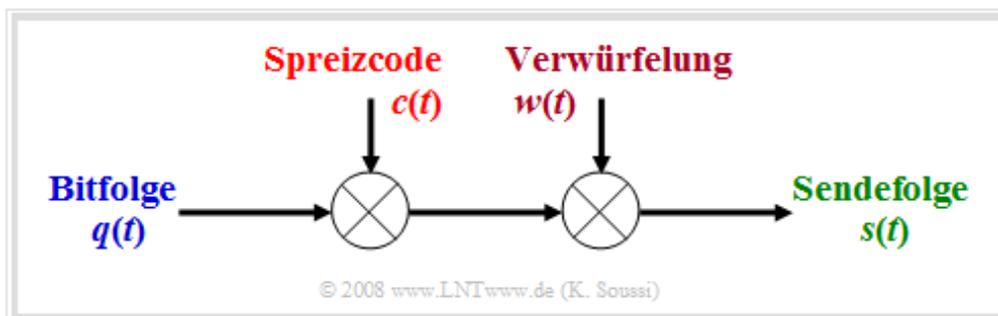
- zueinander orthogonal sein, um eine gegenseitige Beeinflussung der Teilnehmer zu vermeiden,
- eine flexible Realisierung unterschiedlicher Spreizfaktoren J ermöglichen.

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 $c(t)$.

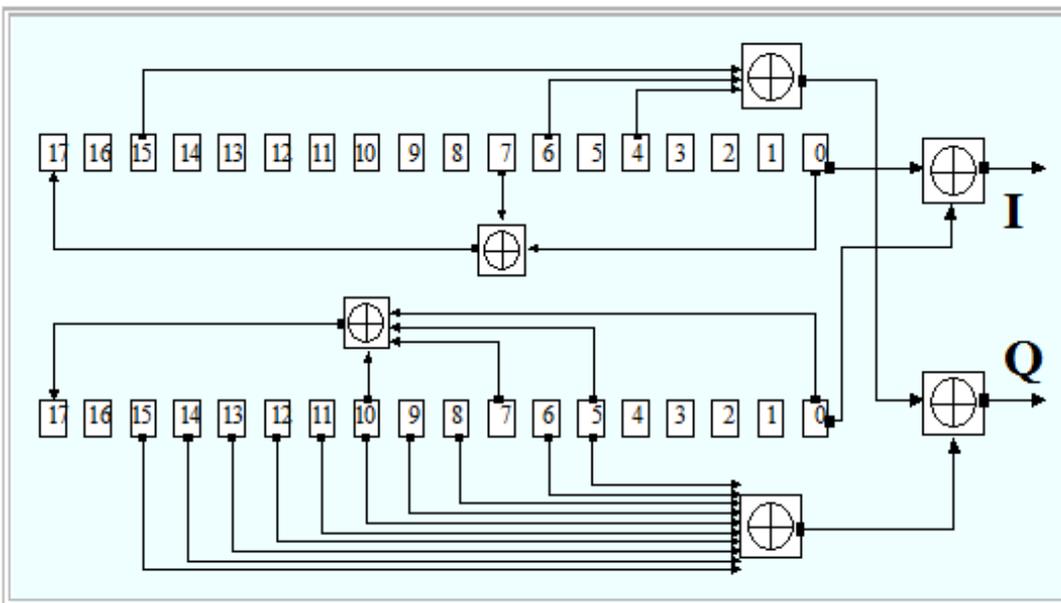


Durch die Verwürfelung (englisch: *Scrambling*) verlieren die Codes ihre vollständige Orthogonalität; man nennt sie *quasi-orthogonal*. Bei diesen Codes ist zwar die **Kreuzkorrelationsfunktion** (KKF) zwischen unterschiedlichen Spreizcodes ungleich null, sie zeichnen sich aber durch eine ausgeprägte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

Spreizcodes und Verwürfelung (2)

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

In UMTS werden für die Verwürfelung 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 Verwürfelungscode und die Trennung der einzelnen Kanäle erfolgt über den jeweils gleichen Code. Dagegen hat im Downlink jedes Versorgungsgebiet eines Node B einen gemeinsamen Verwürfelungscode.

©2008 www.LNTwww.de	Spreizcode		Verwürfelungscode	
	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

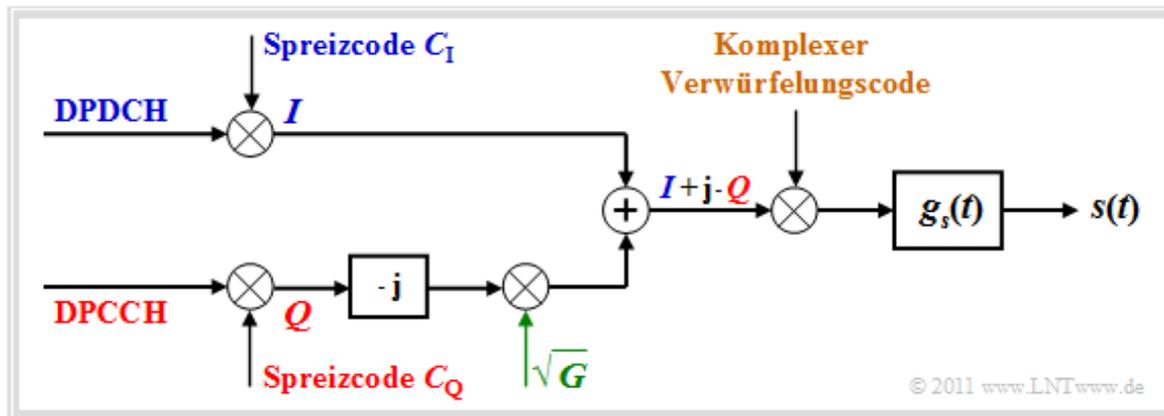
Die Tabelle fasst einige Daten der Spreiz- und Verwürfelungscodes zusammen.

Modulation und Pulsformung bei UMTS

Bei UMTS kommen im FDD-Modus folgende Modulationsverfahren zum Einsatz:

- Im Downlink findet **Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)** Anwendung. Dabei werden Nutzdaten (DPDCH-Kanal) und Kontrolldaten (DPCCH-Kanal) zeitlich gemultiplext.
- Im Uplink wird eine **zweifache binäre PSK** (englisch: *Dual-Channel BPSK*) verwendet. Diese besitzt zwar den gleichen Signalraum wie QPSK, aber die I- und Q-Komponenten übertragen hier die Informationen unterschiedlicher Kanäle.

Die Grafik zeigt das *I/Q-Multiplexing-Verfahren*, wie Dual-Channel BPSK auch genannt wird, im äquivalenten Tiefpassbereich.



Hierzu ist anzumerken:

- Die gespreizten Nutzdaten des DPDCH-Kanals werden auf die Inphase-Komponente (Realteil) und die Kontrolldaten des DPCCH-Kanals – ebenfalls mit einem Spreizcode beaufschlagt – auf die Quadratur-Komponente (Imaginärteil) moduliert und übertragen.
- Danach wird die Quadratur-Komponente mit der Wurzel des Leistungsverhältnisses G zwischen I und Q gewichtet, um deren Leistungsunterschiede auszugleichen. Anschließend wird das Summensignal $(I + j \cdot Q)$ mit einem komplexen Verwürfelungscode multipliziert.
- Abschließend erfolgt die Impulsformung mit $g_s(t)$ entsprechend der **Wurzel-Cosinus-Rolloff-Charakteristik** (englisch: *Root Raised Cosine*). Da das Empfangsfilter an $G_s(f)$ angepasst ist, erfüllt der Gesamtfrequenzgang das **erste Nyquistkriterium**.

Weitere Informationen zur Pulsformung gibt es im Buch **Beispiele von Nachrichtensystemen**. Dort finden Sie auch eine Grafik mit dem Nyquistfrequenzgang $H(f)$. Es handelt sich um einen **Cosinus-Rolloff-Tiefpass** (englisch *Raised Cosine*) mit folgender Dimensionierung:

- Die UMTS-Chiprate beträgt $R_C = 3.84$ Mbit/s. Um Impulsinterferenzen zu vermeiden, muss die Flankenmitte bei $f_N = R_C/2 = 1.92$ MHz liegen. Dann gilt $H(f = \pm f_N) = 0.5$.
- Für UMTS wurde der Rolloff-Faktor $r = 0.22$ festgelegt. Somit ergeben sich die beiden Eckfrequenzen zu $f_1 = 0.78 \cdot f_N \approx 1.498$ MHz und $f_2 = 1.22 \cdot f_N \approx 2.342$ MHz.
- Die erforderliche absolute Frequenzbandbreite beträgt somit $B = 2f_2 \approx 4.684$ MHz, so dass für jeden UMTS-Kanal mit 5 MHz ausreichend Bandbreite zur Verfügung steht.

UMTS–Erweiterungen HSDPA und HSUPA

Um dem ständig steigenden Bedarf an höheren Datenraten im Mobilfunk gerecht zu werden, wurde der UMTS–Standard stetig weiterentwickelt. Die wichtigsten Änderungen ergaben sich innerhalb der dritten Generation durch die Einführung von

- **HSDPA: High Speed Downlink Packet Access** (Release 5, 2002, Markteinführung 2006)
- **HSUPA: High Speed Uplink Packet Access** (Release 6, 2005, Markteinführung 2007).

Zusammen ergeben HSDPA und HSDUPA den **HSPA–Standard**.

Hauptmotivation dieser Weiterentwicklungen war die Steigerung von Datenrate/ Durchsatz sowie die Minimierung der Antwortzeiten bei paketvermittelter Übertragung. Für die Abwärtsstrecke sind heute (2011) mit HSDPA Datenraten bis 7 Mbit/s durchaus machbar. Angegeben werden aber auch (eher theoretische) *Best–Case–Raten* von bis zu 28.8 Mbit/s (bei 64–QAM und MIMO). Erreicht werden diese Steigerungen durch

- die Einführung zusätzlich **gemeinsam genutzter Kanäle** (zum Beispiel HS–DSCH),
- das **Hybrid–ARQ–Verfahren (HARQ)** und **Node B–Scheduling**,
- die Verwendung von **adaptiver M–QAM, Codierung und Übertragungsrate**.

Die wesentliche Verbesserung durch HSUPA ist neben der Verwendung von HARQ und Node–B–Scheduling durch die Einführung des zusätzlichen Aufwärtskanals E–DCH (*Enhanced Dedicated Channel*) zurückzuführen. Dieser minimiert unter anderem den Einfluss von Anwendungen mit stark unterschiedlichen und teilweise sehr intensivem Datenaufkommen (englisch: *Bursty Traffic*). Allerdings wird bei HSUPA im Gegensatz zu UMTS–R99 in Aufwärtsrichtung keine feste Bandbreite garantiert.

Diese flexible und effiziente Bandbreitenzuteilung in Abhängigkeit der Kanalbedingungen erlaubt eine wesentliche Steigerung der Zellenkapazität. In der Praxis werden heute (2011) auch bei Berücksichtigung vieler Nutzer Übertragungsraten bis zu 3 Mbit/s erreicht. Auch hier liegen die von Entwicklern für beste Bedingungen angegebenen Werte deutlich darüber.