

RWTH Aachen
Fachgruppe Informatik
Lehrstuhl für Informatik 4
Dozent: Dr. Dirk Thißen

Proseminar
Internet-Technologie

GSM/GPRS/UMTS

Eingereicht von:
André Bräkling

Aachen, 18. Februar 2008

Vorwort

„GSM/GPRS/UMTS“ wurde ursprünglich als Seminararbeit im Proseminar „Internet Technologie“ des Lehrstuhls für Informatik IV erstellt, am 17. Dezember 2007 in einer endgültigen Version eingereicht und im Zusammenhang mit einem Vortrag als „bestanden“ gewertet. Bei der hier veröffentlichten Version handelt es sich um eben diese Abgabeverision ohne weitere Korrekturen. Das Dokument erhebt weder einen Anspruch auf Vollständigkeit, noch auf absolute Fehlerfreiheit.

Ich stelle dieses Dokument hiermit für die private und wissenschaftliche Verwendung frei zur Verfügung. Beachten Sie bitte, dass das Urheberrecht zu diesem Werk weiterhin bei mir als Autor liegt. Eine Veröffentlichung jedweder Art (z.B. im Internet, auf Datenträgern, in gedruckter Form) sowie eine kommerzielle Nutzung ist ohne mein Einverständnis nicht gestattet. Ausgenommen ist hiervon eine Veröffentlichung für einen eingeschränkten Personenkreis zu unkommerziellen Lehrzwecken, beispielsweise auf einer passwortgeschützten Internetseite für Seminarteilnehmer.

Grundsätzlich würde ich mich über Rückmeldungen zu dieser Arbeit (insbesondere Fehlerkorrekturen u.ä.) sehr freuen. Kontaktmöglichkeiten finden Sie auf meiner Internetseite:

<http://www.braekling.de>

Ansonsten hoffe ich, dass Ihnen „GSM/GPRS/UMTS“ gefällt und wünsche viel Spaß beim Lesen.

André Bräkling

Aachen, den 18. Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Analoge Systeme	1
3	Die 2. Generation: GSM	2
3.1	Verbreitung und Nutzung	3
3.2	Systemarchitektur	3
3.2.1	Radio Subsystem (RSS)	4
3.2.2	Network and Switching Subsystem (NSS)	5
3.2.3	Operation Subsystem (OSS)	6
3.2.4	Radio Interface - FDMA/TDMA	7
3.3	Sicherheit	10
3.4	Datenübertragung	11
3.4.1	HSCSD	12
3.4.2	GPRS	12
4	Die 3. Generation: UMTS	15
4.1	Verbreitung und Nutzung	16
4.2	Systemarchitektur	17
4.2.1	UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)	17
4.2.2	Core Network (CN)	17
4.3	Radio Interface	18
4.3.1	Code Division Multiple Access (CDMA)	18
4.3.2	Frequency Division Duplex (FDD)	19
4.3.3	Time Division Duplex (TDD)	20
4.3.4	HSDPA & HSUPA	20
5	Ausblick	21
	Abbildungsverzeichnis	i
	Literaturverzeichnis	ii

1 Einführung

Mobiltelefone sind in der heutigen Gesellschaft kaum noch wegzudenken. Zwar beschränkt sich die Hauptnutzung derzeit noch auf die mobile Telefonie, doch lässt sich schon durch die Entwicklung der Endgeräte absehen, dass auch der Informationszugriff an jedem Ort zu jeder Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnt. So ermöglichen große Displays die Darstellung komplexer Webseiten, und Minitastaturen erlauben bequemes Verfassen von Emails, Blogtexten und Office-Dokumenten.

Die neuen Anwendungen stellen natürlich auch größere Anforderungen an die zu Grunde liegende Übertragungstechnik. Bereits für die Telefonie ist es enorm wichtig, dass eine Verbindung nicht abbricht, falls sich der Anwender zu weit von der verwendeten Basisstation entfernt. Mit den Datendiensten gewinnt jedoch auch die Datenkompression sowie der Energieverbrauch zunehmend an Bedeutung. Weiter darf auch die Sicherheit der Datenübertragung sowie die Kapazität nicht vernachlässigt werden.

In dieser Arbeit soll die Funktionsweise des Mobilfunks und seiner Möglichkeiten zur Datenübertragung genauer betrachtet werden. Zunächst erfolgt in Kapitel 2 ein kurzer Rückblick auf frühere analoge Systeme, bevor dann die Protokolle der 2. (GSM) und 3. (UMTS) Generation vorgestellt werden (Kapitel 3 und 4). Dies soll insbesondere durch eine Einführung in die GSM Systemarchitektur und eine folgende Herausstellung der Unterschiede zu den nachfolgenden Systemen geschehen. Abschließend folgt ein Ausblick auf die kommenden Systeme und Möglichkeiten der mobilen Datenübertragung.

2 Analoge Systeme

Bereits im Jahr 1958 startete das erste analoge Mobilfunknetz der Bundesrepublik Deutschland. Das sogenannte A-Netz bot eine Kapazität für 11000 Nutzer und erforderte eine Vermittlung per Hand. Zusätzlich nahmen die Geräte den ganzen Kofferraum einer Limousine ein und der Anrufer musste den Standort, d.h. die Landesfunkstelle, in deren Reichweite sich der gewünschte Gesprächspartner aufhielt, kennen.

3 Die 2. Generation: GSM

Trotz aller Unzulänglichkeiten wurde das A-Netz erst 1977 abgeschaltet und durch das 1972 eröffnete B-Netz ersetzt. Immerhin ermöglichte dieses die direkte Anwahl des Gesprächspartners, auch wenn weiterhin die Kenntnis seines Aufenthaltsortes notwendig war. Immerhin wurden die Mobiltelefone in Koffergröße 1986 von 27000 Teilnehmern genutzt.

Doch den ersten aus heutiger Sicht nennenswerten Meilenstein verzeichnete die mobile Kommunikation mit der Einführung des teilweise digitalen C-Netzes. 90 Prozent Netzabdeckung, die automatische Ermittlung des Aufenthaltsortes unter einer einheitlichen Vorwahl, die deutliche Verkleinerung der Endgeräte und natürlich auch die auf ein markttaugliches Niveau gesenkten Kosten trugen dazu bei, dass 1993 knapp 850000 Teilnehmer das C-Netz verwendeten - eine Steigerung um mehr als das dreißigfache im Vergleich zum B-Netz¹. Erst zur Jahrtausendwende wurde das C-Netz abgeschaltet².

Neben den erwähnten Problemen dieser obsoleten Netze handelte es sich dabei meist um landesspezifische Systeme, so dass eine mobile Kommunikation im oder mit dem Ausland nicht möglich war.

Mit der zweiten und voll digitalisierten Generation des Mobilfunks sollten die Probleme der voll oder überwiegend analogen Netze gelöst werden. Zu diesem Zweck wurde 1982 die Groupe Spéciale Mobile (GSM) gegründet, die es zur Aufgabe hatte, einen internationalen und mit herkömmlichen Telefonnetzen (wie ISDN) kompatiblen Standard zu schaffen.

3 Die 2. Generation: GSM

Das neue digitale System wurde, angelehnt an die Groupe Spéciale Mobile, „Global System for Mobile Communications“ (GSM) genannt, während die Ausarbeitung der Spezifikation dem Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) übertragen wurde. Bereits die Spezifikation des Ursprungssystems umfasste hierbei mehr als 5000 Seiten, worin sich auch die scherzhafte Bezeichnung „Great Signalling Monster“ begründet. In Deutschland fand das neue System 1993 im sogenannten D-Netz sowie im ein Jahr später gestarteten

¹Vgl. zum Thema A-, B- und C-Netz Wilke (2004, 24f).

²<http://www.heise.de/newsticker/meldung/14196>



Abbildung 1: Überblick über die GSM-Systemarchitektur

E-Netz erstmals Verwendung.

3.1 Verbreitung und Nutzung

Mit GSM gelang dem Mobilfunk der endgültige Durchbruch. Im Jahr 2005 kamen in Deutschland auf 1000 Einwohner mehr als 900 Mobilfunknutzer³, die Tendenz ist deutlich steigend.

Überwiegend wird GSM für sogenannte Tele Services verwendet. Hier sind neben der herkömmlichen Telefonie und mobilen Notrufen auch die Kurzmitteilungen (Short Message Service, SMS), der Enhanced Message Service (EMS) und der Multimedia Message Service (MMS) zu nennen. Außerdem stehen Trägerdienste zur Datenübertragung mit 14400 bit/s zur Verfügung. Ergänzt werden die Funktionen durch zusätzliche Dienste wie Forwarding, Redirection, Konferenzgespräche und ähnliche, wie sie überwiegend schon durch ISDN bekannt sind⁴.

3.2 Systemarchitektur

Die Architektur des GSM lässt sich gemäß ihrer Spezifikation in drei Teilsysteme aufteilen (Abb. 1). So wird zwischen dem Funkteilsystem (Radio Subsystem, RSS), dem Vermittlungsteilsystem (Network and Switching Subsystem, NSS) und dem Betreibersteilsystem (Operation Subsystem, OSS) unterschieden, die über standardisierte Schnittstellen miteinander verbunden sind⁵. Diese Schnitt-

³Vgl. Häring (2007, 20).

⁴Vgl. Schiller (2003, 98ff).

⁵Vgl. Walke (1998, 139ff).

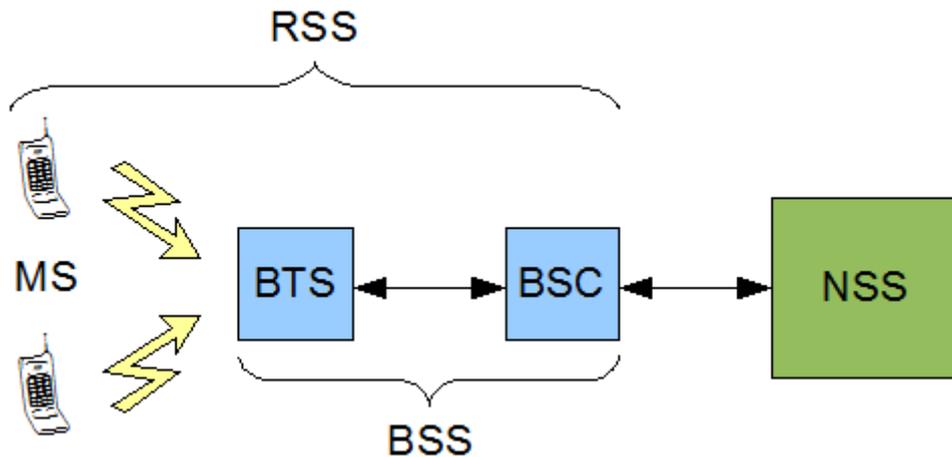


Abbildung 2: Radio Subsystem

stellen sollen allen Herstellern und Netzbetreibern eigene Entwicklungen und Flexibilität beim Netzaufbau ermöglichen.

3.2.1 Radio Subsystem (RSS)

Unter dem Radio Subsystem versteht man, wie der Name bereits vermuten lässt, alle für den Funk notwendigen Elemente (Abb. 2). Zunächst sind dies natürlich die mobilen Endgeräte⁶ der Teilnehmer, Mobile Stations (MS) genannt. Diese lassen sich in zwei Teilen betrachten: Erstens die für den Funk benötigte Hard- und Software, zweitens das Subscriber Identity Module (SIM). Während die Hard- und Software unabhängig vom Teilnehmer ist⁷, enthält das SIM alle benutzerspezifischen Daten, die zur Verwaltung der Mobilfunkstation innerhalb des Netzes benötigt werden. Insbesondere sind hier die International Mobile Station Identity (IMSI), die Temporary Mobile Station Identity (TMSI), die Mobile Station International ISDN Number (MSISDN, die Rufnummer) und die Mobile Station Roaming Number (MSRN) zu nennen⁸, da sie für die Identifizierung der Teilnehmer notwendig sind.

⁶Also beispielsweise Mobiltelefone, Notebooks, Messsysteme, PDAs und alle anderen Geräte, die für eine Teilnahme am GSM-Netz ausgerüstet sind.

⁷Dennoch kann eine MS durch ihre International Mobile Equipment Identity (IMEI) identifiziert werden, was aber keinen Rückschluss auf den Benutzer erlaubt.

⁸Natürlich sind auf einer SIM-Karte noch viel mehr Informationen gespeichert, z.B. die Personal Identity Number (PIN) zur Aktivierung der MS oder auch das Adressbuch des Teilnehmers.

tifikation und Lokalisierung des Teilnehmers unabdingbar sind.

Außerdem ist das Base Station Subsystem (BSS), das wiederum aus den Base Transceiver Stations (BTS) und Base Station Controllern (BSC) besteht, ein Bestandteil des RSS. Unter dem Begriff BTS versteht man die gesamten Funkanlagen - von der Antenne bis hin zur Signalverarbeitung, wie z.B. Sprachcodierung und -decodierung. Die BSC übernehmen die Verwaltung von jeweils mehreren BTS und sind damit für die Reservierung von Funkfrequenzen und die Abwicklung des Handovers⁹ zuständig.

3.2.2 Network and Switching Subsystem (NSS)

Die BSC des RSS sind über die Mobile Services Switching Center (MSC) mit dem Network & Switching Subsystem verbunden. Dabei handelt es sich um digitale ISDN-Vermittlungsstellen zur Vermittlung der Teilnehmer und zur Verwaltung des Netzes. Hierzu sind sie meist mehreren BSC ihrer geographischen Region zugeordnet und vermitteln Teilnehmer ihres und fremder Mobilfunknetze. Des Weiteren bilden sie das Bindeglied zwischen dem Mobilfunknetz und drahtgebundenen Telekommunikationsnetzen. Zur Erledigung dieser Aufgaben wird das Standard Signaling System No. 7 (SS7) verwendet, welches alle Signalisierungsaufgaben eines digitalen Netzwerks abdeckt, z.B. Verbindungsauf- und abbau, Zuteilung von Funkkanälen, Handover, Verbindungsumschaltung bei starken Störungen und ähnliches. Ergänzt werden diese Funktionen durch typische ISDN-Zusatzdienste wie Rufweiterleitung, Telefonkonferenzen, Rufsperrung usw.

Ein weiterer Bestandteil des NSS sind zwei Datenbanken: das Home Location Register (HLR) sowie das Visitor Location Register (VLR). Beim HLR handelt es sich um die wichtigste Datenbank des gesamten GSM, da hier zum einen die statischen Daten eines Teilnehmers (Rufnummer, Geräteart, abonnierte Dienste, Authentifikationsschlüssel, etc.), als auch die dynamischen Teilnehmerdaten (Aufenthaltort, MSRN) abgelegt werden, die wiederum zum Verbindungsaufbau dringend benötigt werden. Sobald der Aufenthaltsort der Mobil-

Benutzers.

⁹Unbemerkte Weitervermittlung des Teilnehmers an eine andere BTS des BSS, sobald er die Reichweite der aktuellen BTS zu verlassen scheint.

station verändert wird, erfolgt eine sofortige Aktualisierung der Daten im HLR. Grundsätzlich ist genau ein HLR je GSM-Netz vorgesehen, jedoch wird das HLR mittlerweile über mehrere Instanzen verteilt, um Überlastungen zu vermeiden. Dabei ist eine Instanz des HLR jeweils einem MSC zugeordnet. Ferner erfolgt im HLR auch die Verwaltung und Gebührenerfassung der Teilnehmer.

Zur weiteren Entlastung des HLR dienen die VLR, die jeweils einem MSC zugeordnet sind. Befindet sich die Mobilstation eines Teilnehmers im Zuständigkeitsbereich eines MSC, werden die zur Verbindung notwendigen Daten (z.B. Rufnummer und IMSI) vom HLR in die jeweilige VLR kopiert und stehen dem MSC dort zur Verfügung. Außerdem teilt sie den MS die temporären Identifikationsdaten (MSRN, TMSI) zu.

3.2.3 Operation Subsystem (OSS)

Die Funktionen des Operating Subsystem nimmt der Teilnehmer nur insofern wahr, dass sich eine möglichst ständige Verfügbarkeit des Systems feststellen lässt, da diese dem Betrieb und der Wartung des Systems dienen. Als Netzelemente des OSS werden das Operations & Maintenance Center (OMC), das Authentication Centre (AuC) und das Equipment Identity Register (EIR) angesehen. Das OMC ist mit allen Netzkomponenten verbunden und bietet umfassende Verwaltungs- und Wartungsfunktionen wie Traffic Monitoring, Status Reports, Verwaltung der Teilnehmer und Endgeräte oder auch die Verwaltung der Gebührenerfassung. Außerdem lassen sich über das OMC Eingriffe in alle Netzelemente vornehmen um beispielsweise Störungen zu beseitigen.

Um die Sicherheit des Netzes zu gewährleisten, werden Authentifizierungsdaten wie Algorithmen und Codes im AuC ausgelagert und nur nach festen Regelungen verfügbar gemacht, damit der Teilnehmer über das HLR identifiziert werden kann. Das EIR speichert hingegen die Gerätekennungsnummern (IMEI), die im jeweiligen Netz registriert sind. Über eine Black List können gestohlene Geräte registriert und gesperrt werden, während eine White List gültige Gerätekennungen und eine Gray List die Kennungen defekter Geräte speichert. Leider bietet die Black List nur einen minimalen Schutz gegen den Missbrauch gestohlener Geräte, da das Gerät zwar im zugehörigen Netz gesperrt, jedoch

3 Die 2. Generation: GSM



Abbildung 3: GSM Frequenzbänder

auf Grund normalerweise nicht stattfindender Synchronisierung zwischen verschiedenen Netzbetreibern, jederzeit in einem anderen Netz verwendet werden kann.

3.2.4 Radio Interface - FDMA/TDMA

Betrachtet man die GSM-Systemarchitektur, ist natürlich das Interface zwischen den Mobilstationen und den BTS, welches mit U_m bezeichnet wird, besonders interessant. Diese Funkschnittstelle muss nun das zur Verfügung stehende Frequenzband optimal ausnutzen. Um dies zu erreichen, wurde eine Kombination aus Frequenz- und Zeitmultiplex (FDM¹⁰ und TDM¹¹) standardisiert. Wichtig ist natürlich die Möglichkeit des Multiple Access (MA) durch viele verschiedene Mobilstationen, weshalb man auch von Frequency Division Multiple Access (FDMA) und Time Division Multiple Access (TDMA) spricht. Europaweit wurden zwei 25 MHz breite Frequenzbänder reserviert, die in Uplink (MS zu BTS) von 890 bis 915 MHz und Downlink (BTS zur MS) von 935 bis 960 MHz unterteilt sind¹². Diese sind wiederum in Kanäle von 200 kHz Bandbreite unterteilt, wodurch für Up- und Downlink jeweils 124 FDM-Kanäle zur Verfügung stehen (Abb. 3).

Diese FDM-Kanäle werden nun durch ein TDM-Verfahren in 8 Time Slots

¹⁰Frequency Division Multiplex

¹¹Time Division Multiplex

¹²Die allgemeine Bezeichnung lautet hierfür GSM-900, wobei dieses Frequenzband noch erweitert wurde, so dass man auch von Extended GSM (E-GSM) spricht. Außerdem wurden noch niedrigere Frequenzen zur Verwendung von Eisenbahngesellschaften reserviert (z.B. zur Signalsteuerung). Mittlerweile wird auch der Frequenzbereich um 1800 MHz (GSM-1800) verwendet, während in Amerika insbesondere der Bereich um 1900 MHz (GSM-1900) Verwendung findet.

3 Die 2. Generation: GSM

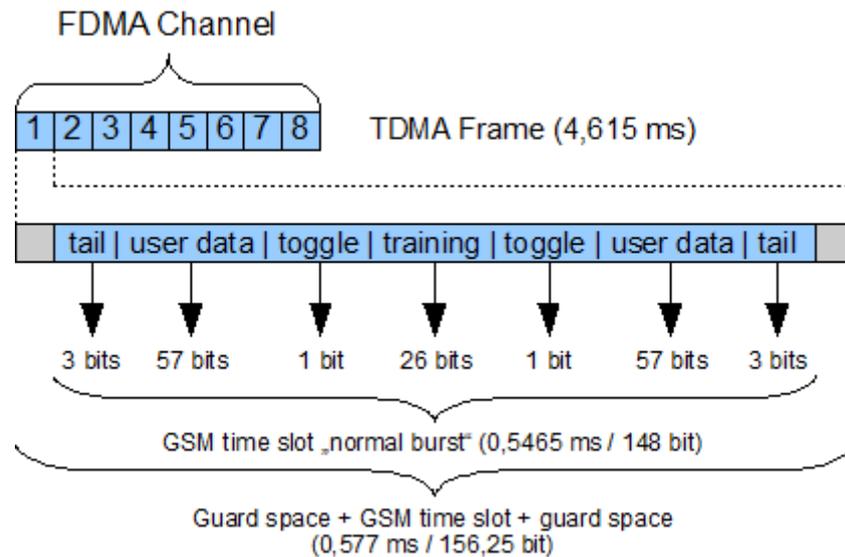


Abbildung 4: Aufbau eines TDMA Frames

von je $0,577 \text{ ms}^{13}$ unterteilt. Zusammengefasst werden die 8 Time Slots als ein TDMA Frame mit einer Länge von 4,614 ms. Ein Gesprächskanal entspricht dabei genau einem Timeslot je Frame. Genutzt wird solch ein Slot in Form von Bursts, die nur eine Länge von 148 bit haben. Die restlichen 8,25 bit werden als Guard Space verwendet, der dazu dient, eine Überlappung mit dem vorhergehenden und nachfolgenden Burst zu vermeiden. Wie die Bursts selbst aufgeteilt sind, hängt von der verwendeten Art ab. In Abbildung 4 ist der gesamte Aufbau eines TDMA Frames mit Blick auf einen sogenannten Normal Burst dargestellt, der zur Nachrichtenübertragung dient. Weiter existiert ein Access Burst zum Verbindungsaufbau, ein Synchronisation Burst, ein Frequency Correction Burst zur Frequenzkorrektur im Störfall und ein Dummy Burst zur Belegung freier Slots¹⁴. Hier soll nur der Normal Burst genauer betrachtet werden:

Tail: Je drei Modulationsbits zur Synchronisation des Empfängers auf den Sender, beispielsweise um durch Bewegung entstehende Zeitverschiebungen zu korrigieren. Diese sind im Normalfall auf 0 gesetzt.

¹³Dies entspricht 156,25 bit.

¹⁴Weitere Details finden sich bei Walke (1998, 156).

3 Die 2. Generation: GSM

Data: Zu übertragende Daten, entweder Userdaten oder Daten zur Netzwerksteuerung.

Toggle: Flag, der angibt, ob im jeweiligen Datenbereich Teilnehmer- oder Steuerungsdaten enthalten sind.

Training: Diese Bits ermöglichen es dem Empfänger, die Parameter des Entzerrers einzustellen und bei einer Mehrwegausbreitung der Funkwellen¹⁵ durch Zählen der Bitfehler den Weg mit dem stärksten Signal zu wählen.

Außerdem ist noch zu erwähnen, dass die Uplink-Frames mit einer Verzögerung von drei Time Slots gesendet werden, damit die MS nicht gleichzeitig senden und empfangen müssen.

Den so durch die Kombination von FDMA und TDMA entstandenen $8 * 124$ physikalischen Duplex-Kanälen lassen sich nun logische Kanäle zuordnen. Während sich ein physikalischer Kanal alle 4,615ms wiederholt, muss dies nicht zwingend für logische Kanäle gelten, wodurch mehrere logische Kanäle auf einem physikalischen Kanal übertragen werden können. Nutzt beispielsweise ein logischer Kanal nur jeden vierten Slot des zugehörigen physikalischen Kanals, können die drei dazwischen freibleibenden Slots für einen anderen logischen Kanal verwendet werden.

Die logischen Kanäle werden in der GSM-Spezifikation in zwei Hauptgruppen unterteilt. Die Traffic Channel (TCH) dienen dem Austausch von Nutzerdaten zwischen zwei Teilnehmern, also Sprache oder Daten. Hier wird nochmals zwischen full-rate TCH (TCH/F) und half-rate TCH (TCH/H) unterschieden. TCH/F verfügt über eine Datenrate von 22,8 kbit/s, während TCH/H entsprechend nur über 11,4 kbit/s verfügt. Die ursprünglich verwendeten Voice Codecs benötigten 13 kbit/s, wodurch ein TCH/F verwendet muss, dessen restliche Kapazität für die Fehlerkorrektur verwendet wird. Alternativ kann ein half-rate Codec verwendet werden, der nur 5,6 kBit/s verwendet, aber über eine entsprechend schlechtere Qualität verfügt. Der neuere Enhanced Full Rate Codec ermöglicht hingegen die Übertragung mit 12,2 kBit/s, sofern die Verbindungsqualität gut ist. Für die Datenübertragung in GSM stehen auch verschiedene

¹⁵Diese wird durch Reflektion an Hindernissen wie Gebäuden, Gebirgen, usw. verursacht.

3 Die 2. Generation: GSM

Raten zur Verfügung, z.B. TCH/F4.8 für 4,8 kbit/s, TCH/F9.6 für 9,6 kbit/s oder auch TCH/F14.4 für 14,4 kbit/s.

Als zweite Hauptgruppe müssen noch die Control Channels (CCH) genannt werden. Diese dienen nicht dem Austausch zwischen zwei Teilnehmern, sondern zur Steuerung des Systems, beispielsweise zur Vermittlung von Verkehrskanälen oder zur Zugriffssteuerung für die Funkkanäle. Die Gruppe der CCH ist wieder in drei Untergruppen unterteilt, welche wieder in Subchannels unterteilt werden:

Broadcast Control Channel (BCCH): Über diesen Kanal werden Informationen über das Netz als solches übertragen, wie die Netzkennzeichnung, die Verfügbarkeit verschiedener Optionen, oder auch die innerhalb der aktuellen und der benachbarten Zelle verfügbaren Frequenzen.

Common Control Channel (CCCH): Die CCCH dienen der Verbindungsaufnahme zwischen Netz und MS.

Dedicated Control Channel (DCCH): Diese Kanäle werden zur Verbindungssteuerung verwendet, beispielsweise, sofern kein TCH aufgebaut wurde, zur Registrierung der MS oder zur Übertragung von Messdaten während ein zugehöriger TCH besteht. Weiter werden die CCCH auch zur Vorbereitung eines Handovers genutzt.

3.3 Sicherheit

Ein besonderes Thema bei der Datenübertragung per Funk ist natürlich die Sicherheit, da die mit einer MS ausgetauschten Daten innerhalb der verwendeten Funkzelle problemlos abgefangen werden könnten. Des Weiteren muss auch sichergestellt sein, dass das Netz nur von authentifizierten Nutzern verwendet werden kann, um so die Abrechnung zu ermöglichen und Missbrauch zu vermeiden. Hierzu werden die Informationen des AuC und des SIM verwendet. Letzteres ist durch die PIN vor unberechtigten Zugriffen geschützt und speichert unter anderem den Schlüssel K_i , der für Authentifikations- und Verschlüsselungsvorgänge verwendet wird.

Zur Authentifizierung generiert zunächst das AuC einen Zufallswert RAND, die darauf basierende Signed Response (SRES) und einen Schlüssel K_c für jede

3 Die 2. Generation: GSM

IMSI. Diese Daten werden zunächst an das HLR übertragen, während das aktuell für die MS zuständige VLR diese Daten beim HLR anfragt. Nun sendet das VLR den Wert RAND an die MS, genauer gesagt an das SIM. Dort wird an Hand von RAND und K_i mit einem Algorithmus, A3 genannt, eine SRES generiert und an das VLR zurückgeliefert. Dort können dann die Werte von SRES verglichen und somit der Nutzer akzeptiert oder abgelehnt werden.

Um die Sicherheit der übertragenen Daten zu gewährleisten, werden alle nutzerspezifischen Daten verschlüsselt übertragen. Zur Verschlüsselung wird der Key K_c verwendet, der durch den Algorithmus A8 aus dem individuellen Schlüssel K_i und dem Zufallswert RAND berechnet wird. Sowohl das Netzwerk als auch das SIM errechnet den gleichen Schlüssel K_c , so dass dieser zu keinem Zeitpunkt übertragen werden muss. Mit diesem Schlüssel können nun MS und BTS die Daten ver- und entschlüsseln, wozu ein dritter Algorithmus mit der Bezeichnung A5 verwendet wird.

Mittlerweile sind die Algorithmen A3 und A8 publiziert worden¹⁶. Somit ist es durch Ermittlung des Schlüssels K_i möglich, den Schlüssel K_c zu ermitteln und Daten abzuhören. Hinzu kommt, dass der Schlüssel K_c zwar theoretisch 64 bit lang ist, doch durch die Bekanntwerdung von A3 und A8 konnte herausgefunden werden, dass nur 54 bit verwendet werden, was A5 auch deutlich anfälliger gegen Brute-force-Attacken macht. Die Sicherheit des GSM-Netzes kann somit nicht als hoch eingeschätzt werden.

Ein letzter Aspekt der Sicherheit ist die Anonymität der Benutzer. Würde man die IMSI als Identifier verwenden, könnte der Teilnehmer zu allen Daten eindeutig zugeordnet werden. Dies wird dadurch vermieden, dass nur der temporäre Identifier TMSI verwendet wird, der durch das VLR erzeugt wird und jederzeit geändert werden kann.

3.4 Datenübertragung

Die ursprünglich vorgesehen 9,6 kbit/s (bzw. mittlerweile 14.4 kbit/s) erschienen zum Entwicklungszeitpunkt der GSM-Spezifikation als ausreichend, da dies immerhin für Standard-Faxgeräte ausreichend war. Mittlerweile ist jedoch klar,

¹⁶Vgl. Schiller (2003, 120).

dass eine solche Bandbreite für moderne Datenanwendungen, wie Webbrowsing oder Multimedia, zu gering ist. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurden verschiedene Erweiterungen entwickelt, wovon an dieser Stelle HSCSD und GPRS genauer betrachtet werden sollen.

3.4.1 HSCSD

Ein Ansatz zur Erhöhung der GSM-Bandbreite ist die Kanalbündelung per High Speed Circuit Switched Data (HSCSD). Dazu werden mehrere TCH gebündelt, indem die MS mehrere TCH in Form von Time Slots eines Time Frames anfordert. Um dies zu ermöglichen, sind Software-Updates bei den MS und MSC notwendig, damit sie einen Traffic Stream in mehrere TCH-taugliche Streams aufteilen und wieder zusammenfügen können. Theoretisch könnten so acht¹⁷ TCH/F14.4 gebündelt werden, um eine Datenrate von 115,2 kbit/s zu erreichen. Jedoch ist eine solche Verwendung in der GSM-Spezifikation nicht vorgesehen, da dies voraussetzen würde, dass die MS gleichzeitig senden und empfangen können¹⁸. Deswegen wurde eine Air Interface User Rate (AIUR) von 57,6 kbit/s (für je Up- und Downlink) spezifiziert, was die Nutzung von je vier Slots als TCH/F14.4 bedeutet.

Auch wenn diese Lösung auf den ersten Blick gut aussieht, hat sie doch deutliche Schwächen. Zum Einen basiert das System weiter auf den verbindungsorientierten GSM-Mechanismen, zum Anderen führt die Duplex-Kanalreservierung dazu, dass immer einige Kanäle unbenutzt bleiben, was wiederum Kapazität verschwendet und somit zu unnötigen Kosten führt.

3.4.2 GPRS

Im Rahmen der Weiterentwicklung des GSM wurde ein paketorientiertes Dienstkonzept zur Datenübertragung eingeführt, welches mit General Packet Radio Service (GPRS) bezeichnet wird. Der Grundgedanke dieses Dienstes ist es, möglichst kostengünstig und mit möglichst hoher Bandbreite Daten über bisherige GSM-Netze zu übertragen. Ermöglicht wird dies durch die Einführung eines

¹⁷Entsprechend der verfügbaren Slots eines Time Frames.

¹⁸Was durch die Verschiebung zwischen Up- und Downlink um 3 Slots auch nicht notwendig ist.

3 Die 2. Generation: GSM

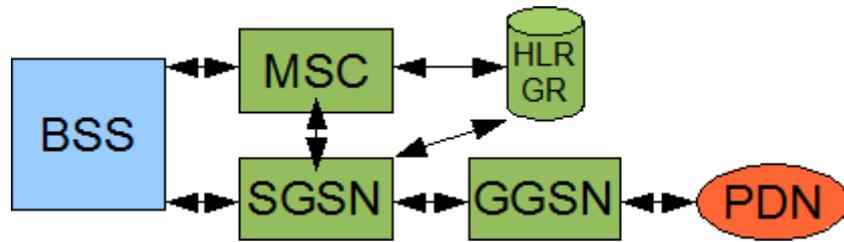


Abbildung 5: Schema des NSS mit GPRS-Elementen

neuen Typs von logischen Kanälen, die unabhängig von den bisherigen TCH und CCH existieren. Diese können von allen aktiven Nutzern gleichzeitig verwendet werden und setzen keine Abhängigkeit zwischen Up- und Downlink voraus. So eignet sich GPRS insbesondere für häufige, regelmäßige Übertragungen kleiner Datenmengen (Web-Requests) und für unregelmäßige Übertragungen kleiner bis mittlerer Datenmengen (Web-Responses), ist also für typische Webanwendungen optimiert. Im Gegensatz zu HSCSD ist für die Nutzung des GPRS nicht nur ein einfaches Software-Update nötig, da sowohl die MS als auch das System um Hardwarekomponenten erweitert werden müssen. So gesehen handelt es sich beim GPRS um den ersten großen Schritt Richtung UMTS.

Dazu wurden dem NSS zwei neue Elemente sowie eine neue Datenbank hinzugefügt: die GPRS Support Nodes (GSN) und das GPRS Register (GR) (Abb. 5). Außerdem wurden die BSC um die Möglichkeit erweitert, Daten und Sprache voneinander trennen zu können.

Die GSN übernehmen Routing-Aufgaben, wobei diese in zwei Typen unterteilt sind. Als Schnittstelle zu externen Packet Data Networks (PDN), wie zum Beispiel IP-Netze, fungieren die Gateway GSN (GGSN). Netzinternes Routing wird hingegen von den Serving GSN (SGSN) übernommen, die den MSC gleichgestellt sind und entsprechende Aufgaben für GPRS, wie Authentifizierung, Abrechnung und Lokalisierung der MS, übernehmen. Die hierzu relevanten Daten werden im GR gespeichert, das im Normalfall einen Teil des HLR bildet.

Der Teilnehmer ist bei Nutzung des GPRS ständig online, zahlt jedoch im Normalfall nur die übertragene Datenmenge, da er im Gegensatz zu früheren Modellen keinen Time Slot dauerhaft belegt, sondern diese wie schon erwähnt von vielen Nutzern gleichzeitig in Anspruch genommen werden können. Um die

3 Die 2. Generation: GSM

Datenrate zu optimieren, ist es auch beim GPRS möglich, bis zu 8 Time Slots zu kombinieren, wobei dies von verschiedenen Faktoren wie der Netzauslastung und der MS abhängig ist. Damit eine Mindestverfügbarkeit des GPRS gegeben ist, reservieren viele Netzbetreiber einen Time Slot grundsätzlich für GPRS-Übertragungen.

Möchte man die tatsächlich mögliche Datenrate ermitteln, muss man die Anzahl der verwendeten Slots in Abhängigkeit der Kodierung betrachten. Es stehen vier Coding Schemes (CS-1 bis CS-4) zur Verfügung, wobei CS-4 keine Kapazitäten zur Fehlerkorrektur bereitstellt. Die Bandbreite bei Verwendung von CS-1 liegt zwischen 9,05 kbit/s (1 Slot) und 72,4 kbit/s (8 Slots), bei Verwendung von CS-4 sogar zwischen 21,4 kbit/s (1 Slot) und 171,2 kbit/s (8 Slots). An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich um theoretisch mögliche Bandbreiten handelt, die je nach Netzauslastung stark beeinflusst werden, da GPRS im Normalfall nur Idle Slots verwendet¹⁹. Weiter müssen natürlich auch die Möglichkeiten der MS betrachtet werden, denn abhängig von der Geräteklasse können diese nur eine bestimmte Anzahl Slots zeitgleich verwenden. Eine Class 1 MS kann sowohl einen Eingangs- als auch einen Ausgangslot verwenden und dies sogar zeitgleich. Dahingegen kann eine Class 12 MS vier Eingangs- und vier Ausgangslot verwenden, davon jedoch max. fünf gleichzeitig. Im Jahr 2003 waren Class 10 MS unter Verwendung von CS-2 üblich, was zu einer Eingangsdatenrate von 53,6 kbit/s (4 Slots) bzw. einer Ausgangsdatenrate von 26,8 kbit/s (2 Slots) führte²⁰.

Innerhalb des GPRS sind verschiedene Quality of Service-Profile (QoS-Profile) vorgesehen, die es ermöglichen sollen, verschiedene Parameter gezielt auf die Anforderungen einer Anwendung anzupassen. Diese Profile setzen sich aus drei Parametern zusammen:

Service Precedence: Über die Werte „high“, „normal“ und „low“ wird die Priorität des verwendeten Dienstes festgelegt.

Reliability Class: Dieser Parameter legt die notwendige Zuverlässigkeit für den verwendeten Dienst an Hand von drei Klassen fest. Klasse 1 weist die

¹⁹Sofern man an dieser Stelle von dem zuvor erwähnten reservierten Slot absieht.

²⁰Vollständige Tabellen hierzu finden sich bei Schiller (2003, 125).

4 Die 3. Generation: UMTS

geringsten Restfehlerwahrscheinlichkeiten²¹ auf und eignet sich damit für fehlerempfindliche Anwendungen, während Klasse 3 die höchsten Restfehlerwahrscheinlichkeiten aufweist und entsprechend für Anwendungen mit eigenen Möglichkeiten der Fehlerkorrektur geeignet ist²².

Delay Class: Hierdurch wird festgelegt, welche Zeitverzögerungen zu erwarten sind. Der Wert kann zwischen 1 und 4 liegen, wobei Klasse 4 nicht spezifiziert ist. In Bezug auf eine SDU von 128 byte ist bei Klasse 1 eine durchschnittliche Verzögerung von unter 0,5s (95%-Quantil unter 1,5s), bei Klasse 3 von unter 50s (95%-Quantil unter 250s) zu erwarten²³.

4 Die 3. Generation: UMTS

Bereits 1985 wurde durch die CCIR, einer Unterorganisation der International Telecommunication Union (ITU), eine Arbeitsgruppe gegründet, die die Anforderungen an ein internationales Mobilfunksystem, genannt Future Public Land Mobile Telecommunication System (FPLMTS), festlegen sollte²⁴. Im Jahr 1997 wurde dieses Projekt in International Mobile Telecommunications-2000²⁵ (IMT-2000) umbenannt und sollte einen internationalen Standard für Mobilfunksystem der 3. Generation definieren. Doch dieses Vorhaben scheiterte bereits an der Tatsache, dass viele Länder andere oder vergleichbare Systeme im vorgesehenen Frequenzbereich angesiedelt haben und nicht bereit waren, diesbezüglich Kompromisse einzugehen. Somit umschreibt der Begriff IMT-2000 heute nur noch eine Familie von hochkompatiblen Systemen mit der garantierten Möglichkeit des internationalen Roamings, wofür natürlich auch entsprechend flexible MS notwendig sind.

Der europäische Beitrag zur IMT-2000-Familie, der 1998 vom ETSI standardisiert wurde, nennt sich Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

²¹In Bezug auf verlorene, doppelte, fehlerhafte oder außerhalb der vorgesehen Sequenz gesendete Service Data Units (SDU).

²²Eine Tabelle hierzu findet sich bei Schiller (2003, 126).

²³Eine Tabelle hierzu findet sich bei Schiller (2003, 127).

²⁴Vgl. Walke (1998, 356).

²⁵Die Zahl 2000 ergibt sich aus dem geplanten Start des Systems (Jahr 2000+x) und aus dem vorgesehenen Frequenzspektrum (um 2000 MHz).

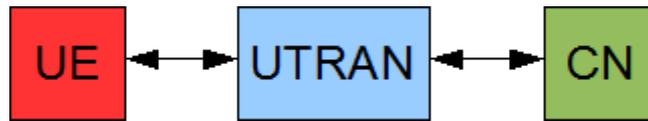


Abbildung 6: Hauptkomponenten der UMTS-Systemarchitektur

und sollte die bisherige GSM-Kommunikation dank eines erhöhten Leistungsspektrums ablösen. Um dieses Ziel zu erreichen, musste UMTS die Leitungsvermittlung der GSM-Technik mit der paketorientierten Datenübertragung des GPRS kombinieren und um die Möglichkeit des Datentransports per IP-Protokoll erweitern, um so mobilen Internetzugang zu ermöglichen. Dies wurde mit mehreren Releases erreicht, von denen Release 3 (ursprünglich auch Release 99 genannt) noch eine GSM/GPRS-Grundlage vorsah, während Release 5 bereits vorsieht, diese Grundlage durch ein reines IP-Netz zu ersetzen. Die folgenden Beschreibungen der Systemarchitektur, der Datenübertragung und der Dienste bezieht sich auf Release 3.

4.1 Verbreitung und Nutzung

Im Zusammenhang mit der im Jahr 2000 stattfindenden Versteigerung der UMTS-Frequenzband-Lizenzen durch die Bundesregierung, die ein hohes Medieninteresse hervorrief, verpflichteten sich die Netzbetreiber, bis zum Jahr 2006 eine Netzabdeckung von mindestens 50% der Gesamtbevölkerung zu gewährleisten. Dieses Ziel wurde laut Bundesnetzagentur mit einer Netzabdeckung von je nach Anbieter 55 bis 80% erreicht²⁶. Zudem beziffert die BNetzA die Zahl der Teilnehmer, die UMTS-Dienste nutzen, auf 4,5 Mio. zum Jahresende 2006.

Neben der herkömmlichen Sprachtelefonie soll UMTS auch moderne Kommunikationsmedien, wie z.B. Videokonferenzen und Internetnutzung, ermöglichen. Außerdem ist eine Integration des bisherigen Funkkommunikationssysteme, u.a. auch der Satellitenfunksysteme, definiert.

4.2 Systemarchitektur

UMTS lässt sich grundsätzlich in drei Hauptkomponenten unterteilen (Abb. 6): das User Equipment, also das Endgerät des Teilnehmers samt UMTS-SIM, das UTRAN und das CN. Auf die letzteren beiden Komponenten soll im folgenden genauer eingegangen werden.

4.2.1 UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)

Das UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) bezeichnet den Zusammenschluss vieler Radio Network Subsystems (RNS). Jedes RNS wird von einem Radio Network Controller (RNC) gesteuert, der vergleichbare Aufgaben wie die von GSM bekannten BSC übernimmt. Verbunden ist der RNC zum Einen mit dem Core Network, zum Anderen mit mehreren Node B, die sich mit den BTS aus GSM vergleichen lassen. Jeder Node B ist an mehrere Antennen angebunden, die eine Funkzelle bilden, in denen sich die UE mit dem Netzwerk verbinden können.

Eine Besonderheit im Vergleich zu GSM ist die Zellatmung. Dies bedeutet, dass die Zellen keine statische Reichweite besitzen, sondern sich bei wenigen eingebuchten UE vergrößern bzw. bei vielen UE entsprechend verkleinern. Zwar führt dies zu einer besseren Auslastung des Netzes und vereinfacht auch den Handover-Prozess²⁷, erschwert aber die Netzplanung ungemein. Des Weiteren muss beim Übertragungsverfahren berücksichtigt werden, dass sich mehrere Funkzellen auf den gleichen Frequenzbändern überlappen können.

4.2.2 Core Network (CN)

Mit Blick auf Release 3 hat sich am Core Network (CN) im Vergleich zum GSM mit GPRS nicht verändert. Die aus GSM und GPRS bekannten Komponenten werden in die Packet Switched Domain (PSD) für die GPRS-Elemente und die Circuit Switched Domain (CSD) für die GSM-Elemente unterteilt. Analog zu den BSC sind auch die RNC mit den MSC für Sprach- und den SGSN für Datendienste verbunden.

²⁶Vgl. BNetzA (2007, 72).

²⁷Insbesondere, da UMTS-Endgeräte mit mehr als einer Antenne verbunden sein können.

4.3 Radio Interface

Der größte Unterschied zu GSM findet sich bei Betrachtung der Übertragungsschnittstelle U_u . Immerhin sollte UMTS besonders in Bezug auf die Bitraten und das Uplink-Downlink-Verhältnis flexibler werden. Vergleichbar zwischen beiden System ist das vorhandensein von CCH und TCH, wobei die Zahl der Transportkanäle bei UMTS deutlich höher ist. Dies erklärt sich daraus, dass UMTS nicht mehr nur für einen Dienst optimiert wurde, wie es bei GSM mit dem Sprachdienst der Fall war.

4.3.1 Code Division Multiple Access (CDMA)

Code Division Multiple Access (CDMA) ist ein Verfahren, das mehrere verschiedene Signale auf einem Bitkanal ermöglicht. Dazu werden die einzelnen Signale mit einem jeweils eigenen Spreizcode verrechnet.

Solche Spreizcodes müssen so aufgebaut sein, dass das jeweils gewünschte Signal problemlos aus dem Signalgemisch herausgefiltert werden kann. Zunächst muss der als binäres Muster dargestellte Spreizcode in ein No-Return-to-Zero-Signal (NRZ-Signal) umgewandelt werden - bei UMTS bedeutet dies, dass das Bit 1 mit dem Symbol -1 und das Bit 0 mit dem Symbol 1 dargestellt wird. Außerdem müssen alle verwendeten Spreizcodes unabhängig voneinander sein, also orthogonal. Diese Eigenschaft kann sehr leicht festgestellt werden, wenn man die Bitmuster der Spreizcodes als Vektoren betrachtet, denn diese sind genau dann orthogonal zueinander, wenn ihr Skalarprodukt 0 ergibt.

Die Orthogonalität ermöglicht nun die gemeinsame Übertragung der Datensignale, die ebenso als NRZ-Signale vorliegen müssen. Überträgt man beispielsweise $(Signal1) * (Code1) + (Signal2) * (Code2)$, kann der Empfänger das für ihn bestimmte Signal durch Multiplikation mit dem passenden Code dekodieren. Für Signal 1 ergibt sich also: $(Signal1) * (Code1) * (Code1) + (Signal2) * (Code2) * (Code1) = (Signal1) * (Code1) * (Code1) + (Signal2) * 0$, d.h. Signal 1 kann eindeutig ermittelt werden.²⁸

Die Bits des Spreizcodes werden Chips genannt. Da UMTS eine konstante

²⁸Ein ausführliches Beispiel findet sich unter <http://www.braekling.de/2007/12/17/code-division-multiple-access-cdma>, abgerufen am 17.12.2007 um 14 Uhr.

Chipping Rate von 3,84 Mchips/s verwendet, ist die zu erzielende Datenrate von den Spreizfaktoren abhängig, also z.B. aus wievielen Chips der verwendete Spreizcode besteht.

4.3.2 Frequency Division Duplex (FDD)

UTRA-FDD ergänzt das bekannte FDMA um CDMA. Für den Uplink wird in Europa der Frequenzbereich von 1920-1980 MHz und für den Downlink von 2110-2170 MHz verwendet. Die Bandbreite eines Wideband-CDMA (W-CDMA) Kanals beträgt je nach Betreiber 4,4 bis 5 MHz. Ein Radioframe dauert 10ms und besteht aus 38400 Chips. Diese Radioframes lassen sich in 15 Timeslots von je 0,6666ms bzw. 2560 Chips unterteilen. Im folgenden sollen drei physikalische Kanäle erläutert werden, die so gebildet werden:

Dedicated Physical Data Channel (DPDCH): In diesem Uplink-Kanal werden Nutzer- und Signaldaten übertragen. Je nach Spreading Factor (4-256) lassen sich Datenraten von 960²⁹, 480, 240, 120, 60, 30 oder 15 kbit/s erzielen. Dies bedeutet aber auch, dass bei einer benötigten Datenrate von 250 kbit/s Spreading Factor 8 mit einer Datenrate von 480 kbit/s verwendet werden muss, wodurch natürlich Bandbreite verschwendet wird. Weil je Verbindungsebene bis zu 6 DPDCH verwendet werden können, führt dies zu einer theoretischen Datenrate von 5740 kbit/s, jedoch sind nur UE mit einer maximalen Datenrate von 1920 kbit/s spezifiziert.

Dedicated Physical Control Channel (DPCCH): Jede Uplink-Verbindung benötigt exakt einen DPCCH, der die Kontrolldaten für die physikalische Ebene überträgt. Dieser verwendet grundsätzlich den Spreading Factor 256.

Dedicated Physical Channel (DPCH): Hierbei handelt es sich um einen durch einen von 17 Bursts definierten Downlink-Channel, der DPDCH und DPCCH verbindet. Spreading Factors von 4 bis 512 sind verfügbar, die Da-

²⁹2560 Chips, Spreading Factor 4: 640 bits je Slot, 15 Slots je Frame, 100 Frames je Sekunde: $(2560/4) * 15 * 100 = 960000$ bit/s.

tenraten für die DPDCH innerhalb eines DPCH liegen bei 6, 24, 51, 90, 210, 432, 912 und 1872 kbit/s.

4.3.3 Time Division Duplex (TDD)

Im Gegensatz zu UTRA-FDD verwendet UTRA-TDD keine unterschiedlichen Frequenzbänder für Up- und Downlink, sondern sendet diese zeitversetzt in einem einzigen Band. Abhängig vom Spreading Factor 1, 2, 4, 8 oder 16 können Bandbreiten von bis zu 6624 kbit/s erreicht werden, sofern alle Slots zur Datenübertragung verwendet werden. Werden die Slots gleichmäßig auf Up- und Downlink verteilt, sind synchrone Anwendungen möglich, besonders geeignet ist das Verfahren jedoch für asynchrone Anwendungen. Da nur 5 MHz Bandbreite gebraucht werden, ist TDD vor allem eine günstige Alternative, jedoch ist die Zellabdeckung niedriger und die UE dürfen sich nicht zu schnell bewegen³⁰. In diesen Zusammenhängen ist TDD mit WLAN vergleichbar, das mittlerweile vielerorts verfügbar ist und auch in immer mehr mobile Endgeräte integriert wird.

4.3.4 HSDPA & HSUPA

Mit dem High Speed Downlink Package Access Standard, definiert in Release 5, wurde auch UMTS mittlerweile weiterentwickelt. Durch neue Software in den Basisstationen sollen die Datenpakete geschickter verteilt werden. Zudem soll ein neues Kodierungsverfahren die Datendichte enorm erhöhen. So seien unter Laborbedingungen 14,4 Mbit/s möglich, laut Experten sind zunächst rund 3 Mbit/s realistisch³¹. HSUPA nennt sich das vergleichbare Verfahren für den Uplink. Mittlerweile ist HSDPA schon teilweise in Deutschland verfügbar.

³⁰Vgl. Schiller (2003, 148f).

³¹Vgl. <http://www.telekom.com/dtag/cms/content/dt/de/82298>, abgerufen am 21.11.2007 um 18 Uhr.

5 Ausblick

Während HSDPA nur eine Erweiterung von UMTS darstellt, wird natürlich auch eifrig über die Systeme der 4. Generation spekuliert. Diese definiert sich über deutlich höhere Übertragungsraten und einen IP-gestützten Zugang. Um diese Entwicklung voranzutreiben, gründeten verschiedene, weltweit führende Netzbetreiber das Next Generation Mobile Network (NGMN).

Viele verschiedene Systeme schicken sich dazu an, diese 4. Generation einzuläuten, wodurch eine Erwähnung aller den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Zunächst kann man jedoch festhalten, dass sich insbesondere die deutschen Netzbetreiber durch die hohen Kosten für die UMTS-Frequenzband-Lizenzen zunächst für lange Zeit an UMTS gebunden haben. Ein Blick in die Zukunft von UMTS verrät, dass das gesamte System langfristig auf ein „All-IP-Netzwerk“ umgebaut werden soll. Release 8 sieht die umfassende Nutzung von TCP/IP bereits vor, zudem stehen natürlich auch weitere Erhöhungen der Datenraten bevor. Man darf also gespannt sein, was die Zukunft für den Mobilfunkmarkt bereithält - und bis dahin darauf warten, dass UMTS-Dienste von jedem Teilnehmer zu erschwinglichen Konditionen genutzt werden können.

Abbildungsverzeichnis

1	Überblick über die GSM-Systemarchitektur	3
2	Radio Subsystem	4
3	GSM Frequenzbänder	7
4	Aufbau eines TDMA Frames	8
5	Schema des NSS mit GPRS-Elementen	13
6	Hauptkomponenten der UMTS-Systemarchitektur	16

Literatur

BNetzA. *Jahresbericht der Bundesnetzagentur 2006*. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Online abgerufen unter <http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/9009.pdf> am 12.11.2007 um 21 Uhr, 2007.

Julia Häring. Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in Deutschland 2005. *Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 19 - 2007*. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online abgerufen unter <http://www.bmbf.de/de/7683.php> am 06.11.2007 um 15 Uhr, 2007.

Jochen Schiller. *Mobile Communications 2nd Edition*. Boston: Addison Wesley, 2003.

Bernhard Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle Band 1*. Stuttgart: Teubner, 1998.

Jürgen Wilke. Vom stationären zum mobilen Rezipienten. Entfesselung der Kommunikation von Raum und Zeit - Symptom fortschreitender Medialisierung. Böning, Holger; Kutsch, Arnulf; Stöber, Rudolf (Hrsg.): *Jahrbuch für Kommunikationsgeschichte 6. Jahrgang 2004*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag. Online abgerufen unter http://www.uni-leipzig.de/~hsk/pgs/jahrbuch/2004/nr_6.html am 18.10.2007 um 18 Uhr, 2004.