

Prototypische Bewertung und Implementierung von neuen Paket-Datendiensten für das GSM-Mobilfunksystem

Der Fakultät für Elektrotechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen vorgelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Diplom-Informatiker
Götz Philip Brasche
aus Köln

Referent:

Koreferent:

Tag der mündlichen Prüfung:

KURZFASSUNG

Zellulare digitale Mobilfunknetze, die auf den Standards des *Global System for Mobile Communications* (GSM) aufbauen, sind ihren Kinderschuhen längst entwachsen und haben seit ihrer Einführung 1991 eine weltweite Verbreitung erfahren.

Obzwar als mobile Erweiterung des diensteintegrierenden digitalen Nachrichtennetzes (*integrated services digital network*, ISDN) gedacht, können insbesondere Datendienste nur eingeschränkt mit ISDN-Funktionalität angeboten werden. Durch die aus Gründen der Frequenzökonomie gewählte Struktur der GSM-Funk-Schnittstelle werden Datendienste von GSM-Mobilfunknetzen nur mit vergleichsweise geringen Übertragungsraten von maximal 9.6 kbit/s unterstützt, die zudem die Funkbetriebsmittel nur suboptimal ausnutzen. Steigende Benutzerzahlen und -ansprüche sowie verstärkter Wettbewerbsdruck im rasant expandierenden Mobilfunkmarkt erfordern jedoch erweiterte Sprach- und neue Datendienste, die sich durch flexible und effiziente Funkbetriebsmittelverwaltung und eine variable Dienstgüte auszeichnen.

Die vorliegende Arbeit gibt eine Übersicht über mögliche Konzepte zur Integration neuer Dienste in GSM-Mobilfunknetze.

Mit dem zur Zeit in der Normung befindlichen allgemeinen Paket-Datenfunkdienst (*general packet radio service*, GPRS) und dem aus dem ISDN bekannten „Frame Mode Bearer Service“ (FMBS) werden zwei dieser Konzepte durch eine detaillierte Modellierung und computergestützte Simulation bewertet.

Während der GPRS auf einem paketerorientierten Übertragungskonzept basiert, das neue logische Komponenten und Protokolle erfordert, baut der FMBS auf dem Prinzip einer schnellen Verbindungsaufbaustrategie in Kombination mit virtuellen Verbindungen auf und erfordert nur geringe Modifikationen innerhalb der Software der GSM-Systemkomponenten.

Eine Schlüsselrolle bei der Bewertung beider Konzepte spielen die Protokolle der Sicherungsschicht, da die Effizienz der Dienste maßgeblich von der in diesen Schichten angesiedelten Verwaltung der Kanalvergabe und Fehlerbehandlung beeinflusst ist.

Zur simulativen Analyse wurde eine neue Softwareentwicklungsmethodik entwickelt und angewandt, die auf der Kombination formaler Beschreibungstechniken und objekt-orientierter Programmierung fußt und die Verwendung integrierter Werkzeuge zur Validierung der funktionalen Korrektheit und detaillierten simulativen Leistungsbewertung ermöglicht.

Damit leistet diese Arbeit einen grundlegenden Beitrag im Bereich fortschrittlicher Softwareentwicklung. Zudem trägt sie in wesentlichen Punkten zur notwendigen Analyse der Leistungsfähigkeit des neuen Paket-Datenfunkdienstes vor seiner Einführung bei und stellt mit dem FMBS ein alternatives, preisgünstig in das GSM-Mobilfunksystem zu integrierendes Dienstkonzept vor.

ABSTRACT

Cellular digital mobile radio systems based on the standards of the *global system for mobile communications* (GSM) are no longer in its infancy and have been disseminated all over the world since their introduction in 1991.

Although GSM has been designed as mobile extension of the *integrated services digital network* (ISDN), the structure of the air interface does not allow support of the complete range of ISDN data services.

The steadily growing number of users and their increasing requirements as well as the tough competition within the rapidly expanding mobile communications market require extended speech and new data services that accomodate both an efficient ressource management and flexible quality of service.

This thesis gives a survey of possible concepts for the integration of new services into the GSM.

With the *general packet radio service* (GPRS) that is still under standardization and the *frame mode bearer service* (FMBS) that originates from the ISDN two of these concepts are evaluated by computer based simulation.

While the GPRS is based on packet oriented data transmission and requires new logical components and protocols, the FMBS makes use of virtual connections in combination with fast connection set-up and release procedures and requires only slight software modifications.

A key role in the evaluation of both concepts is played by the protocols of the data link layer of the ISO/OSI reference model, since performance and efficiency of the services are strongly influenced by error handling and medium access control that are located in the data link layer.

For the purpose of simulation a new software engineering method was applied. Based upon a combination of formal description methods and object-oriented programming this method allows the use of integrated CASE-tools encompassing proof of functional correctness and detailed performance evaluation.

This thesis gives new impulses to advanced software engineering. Moreover, it substantially contributes to the necessary performance analysis of the new packet radio service prior to its introduction and allows a comparison to an alternative service concept that can be integrated into the GSM at low cost.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	i
Abstract	ii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Das GSM-Mobilfunksystem	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Funktionale Architektur	6
2.2.1 Funk-Teilsystem	6
2.2.2 Vermittlungs-Teilsystem	6
2.2.3 Betreiber-Teilsystem	6
2.3 Kommunikationsprinzip	7
2.4 Signalisierung	8
2.4.1 Vermittlungsschicht	8
2.4.2 Sicherungsschicht	10
2.4.3 Bitübertragungsschicht	10
2.4.4 Verbindungsaufbau	10
2.5 Übertragung der Teilnehmerdaten	12
2.5.1 Schicht-1-Ratenanpassung	12
2.5.2 Sicherungsschicht	13
2.6 Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m	13
2.6.1 Physikalische Kanäle	13
2.6.2 Logische Kanäle	14
2.6.3 Fehlerbehandlung und Fehlersicherung	16
3 Zukünftige Sprach- und Datendienste im GSM	20
3.1 Motivation	20
3.2 Anwendungsfelder und Dienstgüteanforderungen	21
3.3 Modellierung von Datenverkehr	23
3.3.1 Elektronische Post	25
3.3.2 Flottenmanagement	26
3.3.3 Zugbeeinflussungssystem	26
3.4 Realisierungsansätze zukünftiger Dienste	26

3.4.1	UUS – „Teilnehmer-zu-Teilnehmer“-Signalisierung	27
3.4.2	PDS – Paket-Datenübertragung auf Signalisierkanälen	27
3.4.3	FMBS – Nutzung virtueller Verbindungen	29
3.4.4	GPRS – Paket-Datenübertragung auf dedizierten Kanälen	29
3.4.5	ASCI - die erweiterten GSM-Sprachdienste	29
3.4.6	HSCSD - der hoch-bitratige kanalvermittelte Datendienst	34
3.5	Qualitative Bewertung der Dienste	39
4	GPRS — der zukünftige Paketdatendienst im GSM	41
4.1	Allgemeine Dienstmerkmale	41
4.1.1	Diensttypen	43
4.1.2	Parallele Dienstbenutzung und Kompatibilitätsaspekte	45
4.1.3	Dienstgüte	45
4.1.4	Sicherheitsaspekte	47
4.2	Logische Architektur	48
4.2.1	Funktionaler Aufbau	48
4.2.2	Schnittstellen und Referenzpunkte	48
4.3	Wegewahl und Mobilitätsverwaltung	50
4.3.1	Routing für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation	50
4.3.2	Mobilitätsverwaltung	50
4.4	Protokollarchitektur	52
4.4.1	Übertragung der Teilnehmerdaten	53
4.4.2	Signalisierung	55
5	Der Frame Mode Bearer Service	57
5.1	Der FMBS im ISDN	57
5.2	Der FMBS im GSM	59
5.3	Übertragung der Teilnehmerdaten	60
5.3.1	Sicherungsschicht	61
5.3.2	Vermittlungsschicht	62
5.4	Signalisierung	62
5.4.1	Sicherungsschicht	63
5.4.2	Vermittlungsschicht	63
6	Softwareentwurfs- und -bewertungsmethodik	67
6.1	Entwurf von Kommunikationsprotokollen	67
6.1.1	Formale Beschreibungstechniken zur Softwareentwicklung	67
6.2	Verkehrsleistung von Kommunikationsprotokollen	69
6.2.1	Ansätze zur Leistungsbewertung	69
6.3	Entwurfs- und Bewertungsmethodik	70

6.4	SDL2CNCL – Transformation einer SDL-Spezifikation in die C++-Klassenbibliothek CNCL	72
6.4.1	Analyse des strukturellen Aufbaus einer SDL-Spezifikation	72
6.4.2	Allgemeine Entwurfskriterien	74
6.4.3	Das SDL2CNCL-Klassenkonzept	75
6.4.4	Entwicklung des Übersetzers	77
6.4.5	Funktionsweise des Übersetzers	82
6.5	Das Simulationswerkzeug GPRSsim	85
6.5.1	Modul <i>Simulationssteuerung</i>	86
6.5.2	Modul <i>Funkkanal</i>	87
6.5.3	Die Moduln <i>MS</i> , <i>BS</i> und <i>SGSN</i>	88
6.5.4	Modul <i>Verkehrslasterzeugung</i>	88
6.5.5	Benutzeroberfläche	89
6.5.6	SDL-Schnittstelle	90
7	Modellierung des GSM-Funkkanals	91
7.1	Fehlermuster für Normal-Bursts	91
7.1.1	Beschreibung der Fehlermusterdateien	91
7.1.2	Auswertung der Fehlermusterdateien	92
7.2	Fehlermuster für Schicht-2-Rahmen	99
7.2.1	RLP-Fehlermuster	99
7.2.2	Auswertung der RLP-Fehlermuster	100
7.2.3	MSDRA-Fehlermuster	100
7.2.4	Auswertung der MSDRA-Fehlermuster	100
8	Leistungsbewertung des FMBS	102
8.1	Formale Spezifikation	102
8.1.1	Spezifikation der Mobilstation	103
8.1.2	Spezifikation der Basisstation	105
8.1.3	Spezifikation der Funkschnittstelle	105
8.1.4	Spezifikation des <i>LAPF_m</i> -Protokolls	106
8.2	Einbettung der Systeme in die Simulationsumgebung	108
8.3	Simulation	109
8.3.1	Leistungskenngrößen	109
8.3.2	Simulationsparameter	110
8.3.3	Simulationsszenarien	111
8.3.4	Simulationsergebnisse	111
8.3.5	Bewertung	117
9	Leistungsbewertung des GPRS	119
9.1	Überblick über die implementierten Protokolle	119

9.1.1	Verbindungssteuerung	119
9.1.2	Vielfachzugriff	120
9.2	Grundlagen zum Vielfachzugriff	120
9.2.1	Allgemeines Zugriffsprinzip	121
9.2.2	Erforderliche Kapazität des Zugriffskanals	122
9.2.3	Zuteilungsstrategie für den Paketdatenkanal	125
9.2.4	Kollisionsauflösung beim Zugriffskanal	129
9.3	Das Sicherungsprotokoll GRLP für den GPRS	130
9.3.1	Integration des GRLP in den Simulator	131
9.4	Das MSDRA-Protokoll	133
9.4.1	Zugriffs- und Kanalkonzept	133
9.4.2	Fehlerbehandlung und Fehlersicherung	138
9.4.3	Rahmenformate	140
9.4.4	Uplink-Transfer	143
9.4.5	Downlink-Transfer	144
9.5	Das VRRP-Protokoll	145
9.5.1	Zugriffs- und Kanalkonzept	145
9.5.2	Fehlerbehandlung und Fehlersicherung	146
9.5.3	Rahmenformate	148
9.5.4	Uplink-Transfer	151
9.5.5	Downlink-Transfer	152
9.6	Simulationsergebnisse	152
9.6.1	Leistungskenngrößen	152
9.6.2	Simulationsparameter und Simulationsszenarien	153
9.6.3	Simulationsergebnisse für das MSDRA-Protokoll	156
9.6.4	Simulationsergebnisse für das VRRP-Protokoll	161
9.6.5	Bewertung	164
10	Zusammenfassung	166
	Bibliographie	169
A	Abkürzungen	183
B	Das Simulationswerkzeug SPEET	192
B.0.6	Die Simulationssteuerung <i>SimCtrl</i>	192
B.0.7	Der Lastgenerator <i>MultiGen</i>	193
B.0.8	Das Modul zur statistischen Auswertung <i>SimEval</i>	194
C	Übersicht über die GPRS-Standards	195

Einleitung

Im aufkommenden Zeitalter der Informationsgesellschaft werden globale Informationssysteme eine zentrale Bedeutung für den Menschen einnehmen. Bis zu den Zeiten der industriellen Revolution war das menschliche Zusammenleben von örtlich gebundener Kommunikation geprägt. Erste handvermittelte Telefonsysteme kamen um 1870 auf, und „Telekommunikation“ bzw. „Datenfernverarbeitung“ sind Begriffe, die erst im zwanzigsten Jahrhundert entstanden.

Trotz rapidem Fortschritt im Bereich der Kommunikations- und Funktechnologie war auch in der jüngeren Vergangenheit die Verbreitung globaler Kommunikationssysteme insbesondere gesellschaftsstrukturellen Schranken unterworfen. Heutzutage jedoch führen die einsetzende Liberalisierung und Öffnung der nationalen Telekommunikationsmärkte zu einer steigenden Zahl von international konkurrierenden Dienst- und Netzanbietern.

Noch manifestieren sich die Ansprüche der Teilnehmer hauptsächlich in dem Wunsch nach Kommunikation mit immer höherer Übertragungsgeschwindigkeit und komfortablen grafischen Schnittstellen, den die Betreiber durch Einsatz moderner Technologien und sogenannter Mehrwertdienste (*value added services*, VAS) mit flexiblem Dienstprofil (*multiple subscriber profile*, MSP) befriedigen.

Mit fortschreitender Mobilität der Teilnehmer verstärkt sich jedoch der Bedarf nach einer „ortsungebundenen“ Kommunikation. Als logische Konsequenz steht das Zeitalter der Neunziger ganz im Zeichen der Mobilkommunikation. Schätzungen zufolge wird die Tendenz zur mobilen Kommunikation innerhalb der nächsten zehn Jahre um weitere 35% steigen und sich somit zu einem hartumkämpften Massenmarkt entwickeln.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Der prognostizierte stetige Zuwachs an Mobilfunk-Teilnehmern bei gleichzeitig steigenden qualitativen wie quantitativen Ansprüchen an das Dienstspektrum und die Dienstgüte stellen Anforderungen an die bestehenden Mobilfunknetze, die mit den vorhandenen Systemstrukturen und Technologien nicht erfüllt werden können.

Dies trifft auch für die digitalen zellularen Mobilfunknetze zu, die gemäß den Standards des *Global System for Mobile Communications*, kurz GSM, aufgebaut sind. GSM stellt derzeit den populärsten Mobilfunksystem-Standard dar. Überall in der Welt haben Netzbetreiber enorme Investitionen vorgenommen, um ihre GSM-Mobilfunknetze flächendeckend auszubauen. Bisher lag die Hauptanwendung in den GSM-Mobilfunknetzen in der mobilen Telefonie zwischen zwei Teilnehmern. Die ein-

gangs erwähnte Entwicklung hin zum Massenmarkt „Telekommunikation“ erfordert jedoch, in Zukunft auch mobil kostengünstige Daten- bzw. sogar Mehrwertdienste mit flexiblem Dienstprofil unterstützen zu können.

Um die bisher getätigten Investitionen zu schützen und GSM-Mobilfunknetze angesichts der wachsenden Konkurrenz bis hin zur dritten Generation von Mobilfunksystemen (*universal mobile telecommunications system*, UMTS) wettbewerbsfähig zu gestalten, wird der GSM-Standard seit dem Beginn der GSM-Ausbauphase 2 1994 kontinuierlich in seinem Dienstspektrum erweitert.

Die restriktiven Faktoren sind das zur Verfügung stehende Frequenzband und die pro Trägerfrequenz realisierbare Nutzdatenrate, die sich aufgrund des verwendeten Modulationsverfahrens und der eingesetzten Kanalcodierung ergeben. Aus Kostengesichtspunkten kommen Änderungen der Funkkanalstruktur nicht in Frage. Grundlegende Anforderungen für den Entwurf neuer Dienste liegen somit in einem wirtschaftlichen Umgang mit der vorhandenen Bandbreite in Zusammenspiel mit einer flexiblen Anpassung der Ressourcen an das aktuelle Verkehrsaufkommen.

In der hier vorliegenden Arbeit wird eine Übersicht über mögliche Realisierungskonzepte neuer Sprach- und Datendienste für GSM-Mobilfunknetze und deren Berücksichtigung in der aktuellen GSM-Standardisierung gegeben. Zwei der Konzepte werden detailliert vorgestellt und im Kontext einer prototypischen Implementierung simulativ bezüglich ihrer Verkehrsleistung bewertet.

Mit dem zur Zeit noch in der Normung befindlichen allgemeinen Paketdatenfunkdienst (*general packet radio service*, GPRS) wird ein Ansatz vorgestellt und analysiert, welcher zwar an grundlegenden, in der Struktur der bestehenden GSM-Funkschnittstelle begründeten, systemimmanenten Einschränkungen festhält, aber auf einer funktional erweiterten Architektur und vorwiegend neuen Protokollen aufbaut.

Im Gegensatz dazu wird mit dem aus dem diensteintegrierenden digitalen Nachrichtennetz (*integrated services digital network*, ISDN) bekannten „Frame Mode Bearer Service“, kurz FMBS¹, eine Möglichkeit aufgezeigt, einen preiswert in das GSM zu integrierenden Datendienst zu verwirklichen.

Die Effizienz neuer paketerientierter Datendienste ist maßgeblich von der Verwaltung der Kanalvergabe und Fehlerbehandlung beeinflusst. Diese Funktionalität wird von den Protokollen der Sicherungsschicht des Referenzmodells zur Kommunikation offener Systeme (*open systems interconnection*, OSI) der Internationalen Organisation für Normen (*international organisation for standardization*, ISO) wahrgenommen.

Kerngegenstand der Untersuchung der Dienstkonzepte ist daher - aufbauend auf einer Analyse der existierenden GSM-Protokolle bezüglich ihrer Eignung bzw. Adaptionsmöglichkeit - die Entwicklung neuer Protokolle der Sicherungsschicht.

Zur Softwareentwicklung und simulativen Bewertung obiger Konzepte wird eine neue

¹Offizielle bzw. präzise deutsche Bezeichnungen für die im Umfeld des FMBS gebräuchlichen Begriffe existieren nur in eingeschränktem Maße; dementsprechend werden an gegebener Stelle die englischen Termini verwendet.

Methodik eingeführt, welche auf der Kombination einer formaler Beschreibungsmethode und objekt-orientierter Softwareentwicklung beruht. Der Einsatz der funktionalen Spezifikations- und Beschreibungssprache SDL (*specification and description language*) verfolgt die Zielsetzung, den bei Verwendung konventioneller Programmiersprachen oftmals umgangen notwendigen Schritt eines gründlichen funktionalen Konzeptentwurfs mit klar definierten Schnittstellen zwischen den Softwaremoduln zu gewährleisten. Die 1988 von dem damaligen Standardisierungsgremium für Telegrafie und Telefonie (*Comité Consultatif International des Télégraphique et Téléphonique*, CCITT)² standardisierte Beschreibungssprache erlaubt, die Komplexität eines zu implementierenden Protokolls während des Entwicklungsprozesses durch die implizite Modularisierung auf wesentliche Komponenten zu reduzieren. Im Wartungsfall bzw. bei einer Weiterentwicklung dient die Spezifikation als eindeutige Dokumentationsgrundlage und erleichtert aufgrund der von SDL unterstützten grafischen Darstellung das Verständnis signifikant.

Solche formalen Beschreibungsmethoden (*formal description technique*, FDT) stellen ein probates Mittel zur Effizienzsteigerung im Softwarelebenszyklus dar und sind prinzipiell konventionellen Softwareerstellungsmethoden vorzuziehen. In Bezug auf eine Leistungsanalyse sind mit dem Einsatz von SDL aber Einschränkungen verbunden, da der Sprachumfang adäquate Analysefunktionen nicht umfaßt.

Parallel zu SDL wurde die lehrstuhleigene C++-Klassenbibliothek (*communication networks class library*, CNCL) zur objekt-orientierten Softwareerstellung verwendet. Zur Leistungsanalyse der GPRS-Protokolle wurde der CNCL-basierte, OSI-konforme Simulator *GPRSim* entwickelt.

Um die durch die CNCL gegebenen Auswertemöglichkeiten mit den Vorteilen einer formalen Spezifikationsmethode zu kombinieren, wurde ein Prototyp zur automatischen Umsetzung SDL-spezifizierter Protokolle in CNCL-basierte C++-Klassen entwickelt.

Damit leistet die vorliegende Arbeit unter Verwendung integrierter Softwareentwurfsmethoden einen wesentlichen Beitrag zur notwendigen Analyse der Leistungsfähigkeit des neuen Paketdatenfunkdienstes vor seiner Einführung.

1.2 Gliederung der Arbeit

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Thematik und Zielsetzung der Arbeit umrissen wurde, werden im folgenden Kapitel 2 die zum Verständnis notwendigen Grundlagen des GSM erläutert. Im Mittelpunkt steht die Beschreibung der Architektur und Funktionalität der Kommunikationsprotokolle, die ausgehend von der im GSM vorgenommenen Zweiteilung in die Signalisierungsebene und Übertragungsebene sukzessive eingeführt werden.

²Seit November 1992 ist die CCITT dem Bereich für Telekommunikationsstandardisierung der Internationalen Fernmeldeunion (*international telecommunications union - telecommunication standardization sector*, ITU-T) angegliedert.

In Kapitel 3 wird dann ein Überblick über zukünftige Dienstkonzepte des GSM in dessen Entwicklungsstufe 2+ gegeben. Neben einer einführenden Betrachtung der angestrebten bzw. denkbaren Anwendungsbereiche werden die resultierenden Anforderungen der Dienste abgeleitet und diskutiert. Diesem Überblick schließt sich eine Beschreibung der einzelnen Konzepte an. Dazu zählen insbesondere:

- Der hoch-bitratige kanalvermittelte Datendienst (*high speed circuit switched data service*, HSCSD), der auf einer parallelen Nutzung mehrerer Verkehrskanäle aufbaut und Datenraten bis zu $76,8 \text{ kbit/s}$ unterstützen kann.
- Der Paketdatendienst PDS (*packet data on signalling channels*), der auf Signalisierungskanälen realisiert wird. Dieser Dienst ist aufgrund der beschränkten Kapazität der Signalisierungskanäle nur zur Übertragung kurzer Nachrichten geeignet.
- Die erweiterten Sprachdienste (*advanced speech call items*, ASCI), die priorisierte Gruppenruf- und Rundfunk-Dienste umfassen.

Obzwar Sprachdienste im Rahmen dieser Arbeit nicht eingehend untersucht wurden, zeigen die Grundgedanken zur Realisierung der ASCI das grundsätzliche Entwicklungspotential des GSM auf. Auf konzeptioneller Ebene der Mehrpunkt-Kommunikation bestehen Ähnlichkeiten zu dem in Kapitel 4 eingehend diskutierten Paketdatenfunkdienst GPRS. Mit der Beschreibung des FMBS in Kapitel 5 wird die Erörterung der Konzepte abgeschlossen.

Gegenstand des restlichen Teils der Arbeit ist die simulative Untersuchung des FMBS und des GPRS. In Kapitel 6 wird die zugrunde liegende Softwareentwurfsmethodik erläutert und das zur Leistungsbewertung konzipierte Simulationstool präsentiert. Im Anschluß daran wird in Kapitel 7 die Modellierung des GSM-Funkkanals vorgestellt, bevor in den Kapiteln 8 und 9 die entwickelten und implementierten Protokolle erörtert werden. Weiterhin werden in diesen Kapiteln die Simulationsannahmen erläutert und die erzielten Ergebnisse anhand vorab definierter Leistungskenngrößen diskutiert und bewertet.

Die abschließende Betrachtung in Kapitel 10 rekapituliert die dargestellten Ausführungen und faßt die durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse zusammen. In einem Fazit werden die gewonnenen Erkenntnisse bewertet und zu einer Einschätzung der zukünftigen Entwicklung des GSM herangezogen.

Das GSM-Mobilfunksystem

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen eines GSM-Mobilfunksystems, im folgenden kurz mit GSM bezeichnet, vorgestellt. Im Mittelpunkt steht die Beschreibung des Kommunikationsprinzips und der Protokollarchitektur. Für eine ausführliche Beschreibung des GSM sei an dieser Stelle auf [40, 72] und [121] verwiesen.

2.1 Einleitung

Als Anfang 1992 nach über 9jähriger, intensiver Entwicklungs- und Standardisierungsarbeit die ersten Betreiber ihre digitalen zellularen Mobilfunknetze gemäß dem pan-europäischen Mobilfunksystem-Standard GSM der Europäischen Standardisierungsorganisation für Telekommunikation (*European telecommunications standards institute*, ETSI) in Betrieb nahmen, war nicht abzusehen, daß damit der Grundstein für eine rasante Verbreitung der Mobilkommunikation gelegt worden war.

Entgegen der ursprünglichen Intention, „lediglich“ europaweit eine einheitliche, flächendeckende mobile Kommunikation zu ermöglichen, zeichnete sich bald ab, daß der GSM-Standard eine weltweite Akzeptanz erfahren würde: Ende 1995 wurden bereits 156 GSM-Mobilfunknetze in 86 Ländern, von Osteuropa über den Nahen Osten bis hin zu Australien, betrieben. Diese Tendenz ist ungebrochen, und bis zum Jahre 2000 ist mit einer weiteren Steigerungsrate von 30% zu rechnen.

Ein Faktor für diesen Erfolg ist, daß ein GSM-Mobilfunknetz konzeptionell eine mobile Erweiterung des diensteintegrierenden digitalen Nachrichtennetzes ISDN darstellt. Obwohl es aus Gründen der Frequenzökonomie nicht möglich war, die schmalbandige ISDN-Standardübertragungskapazität von insgesamt 144 kbit/s bereitzustellen, wurde dennoch von Anfang an daraufhin gearbeitet, eine dem ISDN vergleichbare Palette von Diensten anzubieten. Die GSM-Standards beinhalten zudem einen gewissen Spielraum, die Übertragungskapazität zu erhöhen. Die wichtigsten Eigenschaften eines GSM-Mobilfunknetzes sind nachfolgend zusammengefaßt:

GSM-Mobilfunknetze beruhen auf einer *Zellstruktur* mit Zellradien von wenigen 100 m bis 35 km . An der Funkschnittstelle wird ein *digitales Übertragungsverfahren* verwendet, wobei ein abhörsicherer, weil verschlüsselter, Nachrichtenaustausch gewährleistet ist. Es werden sowohl Sprach- als auch Datendienste mit *ISDN-Funktionalität* bei Nutzdatenraten von 13 kbit/s (6.5 kbit/s) bzw. 9.6 kbit/s bereitgestellt.

Für alle mobilen Teilnehmer wird ein *Übergang zu den Sprach- und Datendiensten der öffentlichen Telefon- und Datennetze* (PSTN¹, PSDN², ISDN) bei einem länder- und betreiberunabhängigen Systemzugang angeboten. Die Übertragungsrate an der Funkschnittstelle beträgt $\approx 270 \text{ kbit/s}$.

2.2 Funktionale Architektur

Die funktionale Architektur des GSM beruht auf einer Unterteilung in drei Teilsysteme, deren Aufbau nachfolgend zusammengefaßt ist, vgl. [152].

2.2.1 Funk-Teilsystem

Unter dem Begriff Funk-Teilsystem (*radio subsystem*, RSS) wird das aus Feststationssystem (*base station subsystem*, BSS) und Mobilstationen (*mobile station*, MS) bestehende Funknetz bis zur Schnittstelle zu den Vermittlungsstellen zusammengefaßt. Während eine MS die komplette physikalische Ausrüstung eines GSM-Teilnehmers verkörpert, übernimmt das BSS die funktechnische Versorgung eines Bereichs eines GSM-Netzes mittels zweier Komponenten: die Funkfeststation (*base transceiver station*, BTS) ist die eigentliche Sende- und Empfangseinrichtung einer Zelle; die Feststationssteuerung (*base station controller*, BSC) verwaltet in der Regel mehrere BTS und verhält sich wie eine Multiplexeinrichtung als Zugangsknoten zum Vermittlungssystem.

2.2.2 Vermittlungs-Teilsystem

Das Vermittlungs-Teilsystem (*network and switching subsystem*, NSS) umfaßt die in der Mobilvermittlungstelle (*mobile services switching centre*, MSC) integrierten Vermittlungsfunktionen des Systems, die zur Verwaltung der Teilnehmerdaten benötigten Datenbanken, die als Heimatort-Datei (*home location register*, HLR) und Besucher-Datei (*visitor location register*, VLR) bezeichnet werden und das verbindende Festnetz.

Die MSC verwaltet die Verbindungen zu und von Teilnehmern im GSM-Netz und steuert typischerweise mehrere BSCs. Der Übergang zum Festnetz wird durch eine Übergangs-MSC, die *gateway MSC* (GMSC), gewährleistet.

2.2.3 Betreiber-Teilsystem

Das Betreiber-Teilsystem (*operation subsystem*, OSS) ist im wesentlichen für das Netzmanagement zuständig. Für die in dieser Arbeit untersuchten Aspekte der neuen Dienstkonzepte spielen dessen Funktionalität und Zusammensetzung keine primäre Rolle, so daß diese hier nicht weiter ausgeführt werden.

¹Public Switched Telephone Network

²Public Switched Data Network

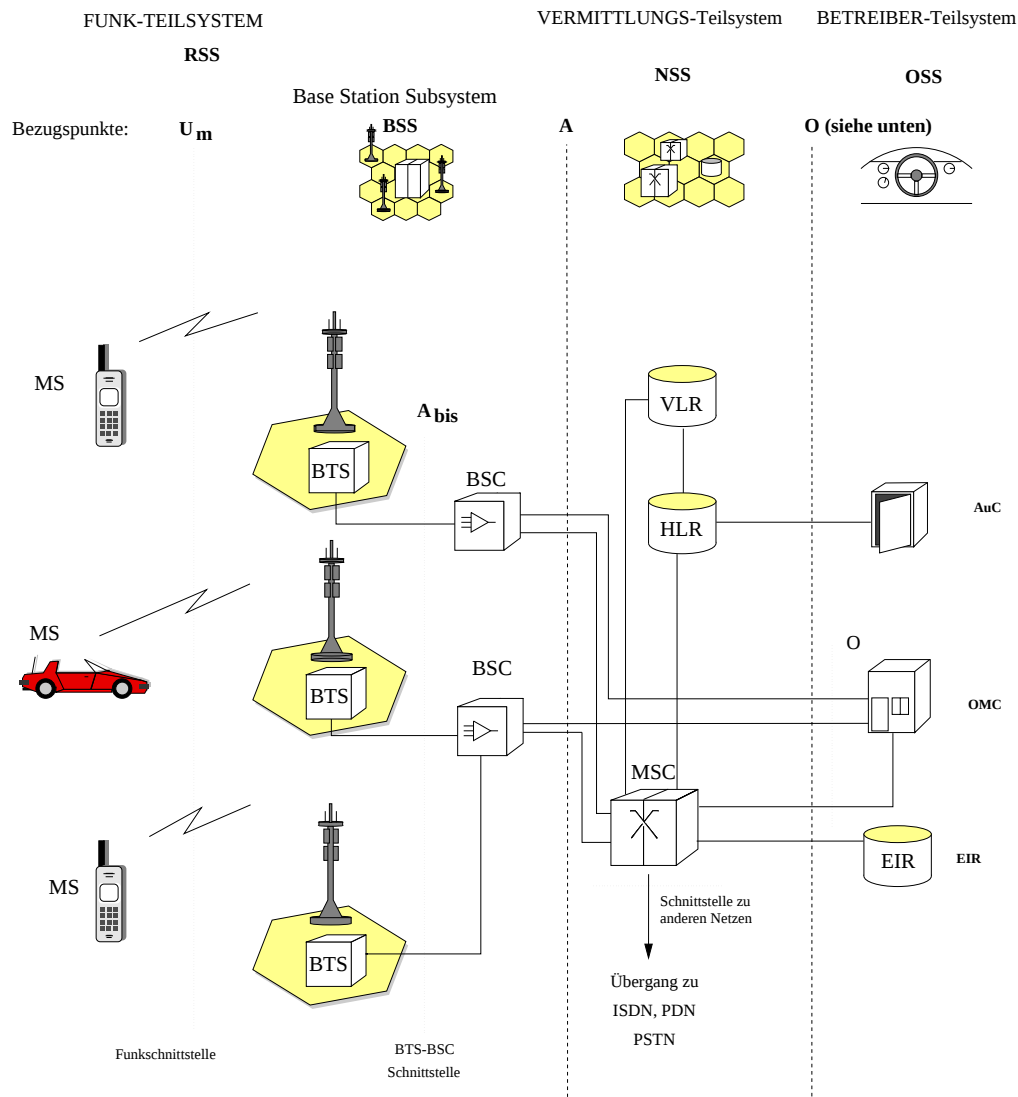


Abbildung 2.1: Netzarchitektur des GSM-Mobilfunknetzes

Einzelheiten zum OSS und zu den definierten Schnittstellen zwischen den Netzkomponenten sind in der eingangs erwähnten Literatur erläutert. Die resultierende logische Architektur bzw. das systematische Zusammenwirken der Teilsysteme ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

2.3 Kommunikationsprinzip

Als mobiles Pendant des ISDN basiert die Kommunikation in GSM-Netzen auf einer getrennten Übermittlung von Signalisierungsinformation und Teilnehmerdaten. Die Protokollarchitektur ist dementsprechend zweigeteilt in eine Signalisierungsebene (*control plane*, C-plane) und eine Übertragungsebene (*user plane*, U-plane). Die Signalisierungsprotokolle stellen alle Funktionen zur Verfügung, die zum Verbindungsaufbau, zur Aufrechterhaltung einer Verbindung und zum Verbindungsabbau

erforderlich sind, während die Funktionalität zur Übermittlung der Nutzdaten in den Protokollen der Übertragungsebene angesiedelt ist.

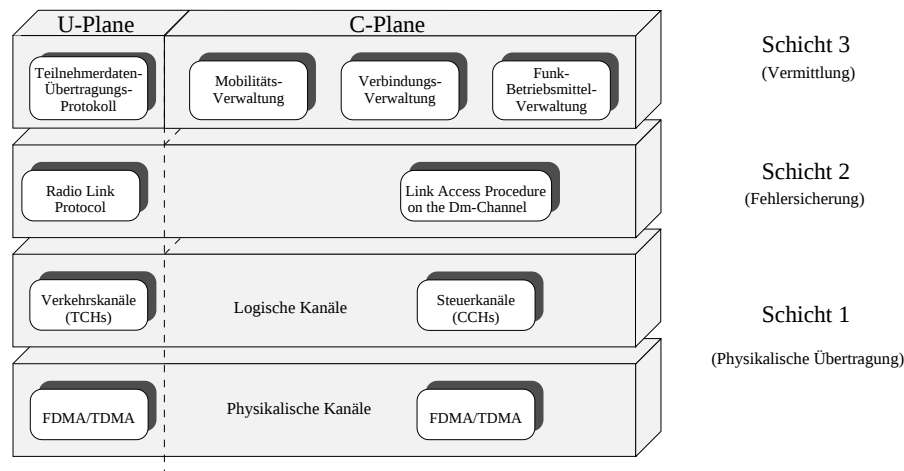


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Schichtenmodell des GSM

Obzwar die Protokollarchitektur des GSM nicht uneingeschränkt dem ISO-OSI-Referenzmodell folgt, kann die in Abbildung 2.2 dargestellte Zuordnung zu den drei unteren OSI-Schichten vorgenommen werden.

2.4 Signalisierung

Im GSM wird das Zentralzeichenkanal-Signalisierungssystem Nr. 7 (*signalling system no. 7*, SS.7) [145] der ITU-T zur netzinternen Signalisierung und zum Austausch von Daten zwischen verschiedenen Netzbetreibern verwendet. An der Funkchnittstelle wird ein dem EDSS1³ des ISDN entsprechendes Signalisierungsprotokoll benutzt.

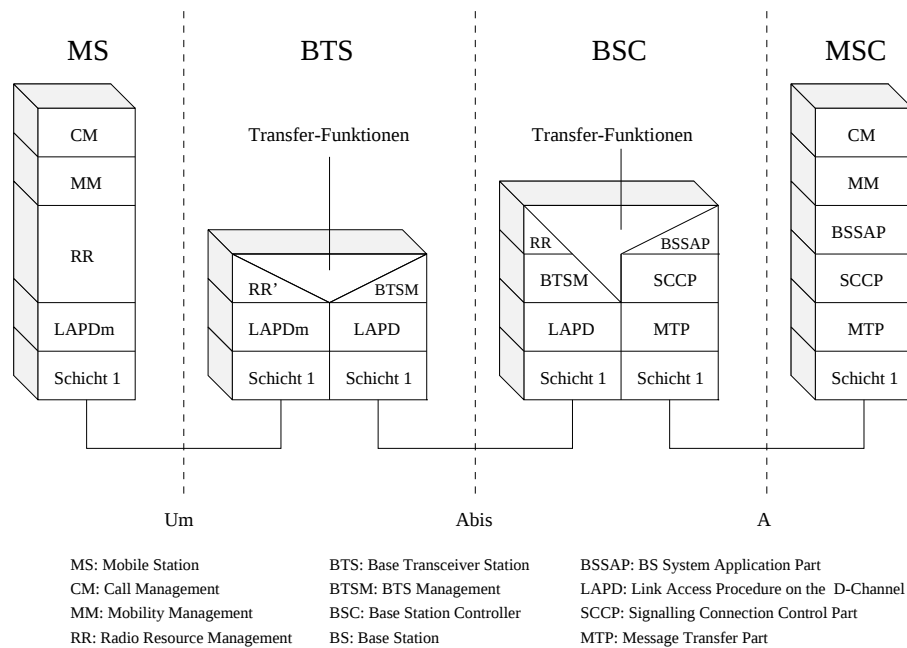
Die Mobilität der Teilnehmer einerseits und die Kommunikation über Funk andererseits bedingen zusätzliche Funktionen, die von dem nur für Festnetzsysteme ausgelegten SS.7 nicht bewältigt werden können. Zur Verwaltung des zusätzlichen Signalisierungsaufwands in GSM-Mobilfunknetzen wurde das SS.7 um den Mobilfunk-Anwendungsteil (*mobile application part*, MAP) erweitert.

2.4.1 Vermittlungsschicht

Die Vermittlungsschicht des GSM ist in drei eigenständige Teilschichten unterteilt:

- Verbindungsverwaltung (*connection management*, CM)
- Mobilitätsverwaltung (*mobility management*, MM)
- Funkbetriebsmittelverwaltung (*radio resource management*, RR)

³European Digital Signalling System No. 1

Abbildung 2.3: *Signalisierungsprotokolle im GSM*

Angepaßt an die Netzarchitektur und die unterschiedlichen mobilfunk-spezifischen Aufgaben sind die Teilschichten auf die in Abbildung 2.3 gezeigten Netzkomponenten verteilt.

2.4.1.1 Verbindungsverwaltung

Die wesentliche Aufgabe der CM-Teilschicht besteht darin, eine dienst- und endgerätebezogene Punkt-zu-Punkt Verbindung zwischen zwei Teilnehmern einzurichten/auszulösen sowie bei aufgebauter Verbindung Rufparameter zu ändern.

2.4.1.2 Mobilitätsverwaltung

Diese Teilschicht beinhaltet mobilitäts-unterstützende Funktionen wie Identifizierung und Authentifizierung der Mobilstation, Aktualisierung des Aufenthaltsbereiches und Unterstützung des Kanalwechsels (*handover*).

2.4.1.3 Funkbetriebsmittelverwaltung

Während sich die o. g. Teilschichten auf die Verbindung zwischen der MS und MSC beziehen, findet sich die RR-Teilschicht nur im RSS. Sie setzt auf den physikalischen und logischen Kanälen auf und stellt den anderen Teilschichten eine dedizierte Funkkanalverbindung zur Verfügung.

2.4.2 Sicherungsschicht

Zur Sicherung der Schicht-3-Signalisierungsdaten stützen sich die GSM-Spezifikationen auf bewährte Sicherungsschichtprotokolle. Im BSS wird an der Funkschnittstelle die aus dem ISDN bekannte Prozedur zur Verbindungssteuerung im D-Kanal (*link access procedure on the D-Channel*, LAPD) nach ITU-T Standard Q.921 [149] verwendet. Das LAPD-Protokoll wurde an die GSM-Funkkanalstrukturen angepaßt und trägt daher den abgeleiteten Namen $\text{LAPD}_{\text{mobile}}$ bzw. LAPD_m . Am Übergang vom BSS zum NSS kommen Protokolle des SS.7 (*message transfer part*, MTP) zum Einsatz.

Die Funktionalität der genannten Protokolle umfaßt die Verwaltung mehrerer logischer Schicht-2 Verbindungen sowie Flußkontrolle und Fehlerbehandlung anhand von fenstergesteuerten Wiederanforderungsmechanismen (*automatic repeat request*, ARQ) für fehlerhaft empfangene Daten in Kombination mit Vorwärtsfehlerkorrektur-Verfahren (*forward error correction*, FEC) der Schicht 1, vgl. Abschnitt 2.6.3.

2.4.3 Bitübertragungsschicht

Während für die Übertragung im Festnetzteil des GSM, d.h. an den Bezugspunkten A_{bis} und A, auf PCM-30 bzw. 64 kbit/s -Schnittstellen gemäß ITU-T Standard G.732 [144] zurückgegriffen wird, mußte für die Funkschnittstelle eine eigenständige Struktur erarbeitet werden. Die Funkkanalstruktur hat entscheidenden Einfluß auf den Entwurf der in dieser Arbeit betrachteten Protokolle des Paketdatendienstes und wird daher separat im Anschluß an die Beschreibung der Übertragungsprotokolle vorgestellt.

2.4.4 Verbindungsaufbau

Zum Verbindungsaufbau werden im GSM die nachfolgend zusammengefaßten Prozeduren chronologisch durchlaufen, vgl. Abbildung 2.4. Einen kommenden Ruf teilt die Basisstation der Mobilstation anhand eines Funkrufs (*paging*, 1) mit. Daraufhin fordert die Mobilstation auf dem Zufallszugriffskanal im Wettbewerb mit anderen Mobilstationen von der Basisstation eine Kanalzuweisung an (*channel request*, 2). Hat die Basisstation diese Kanalreservierungsanforderung empfangen, sendet sie Informationen über einen freien Kanal und weitere Steuerparameter wie z. B. die Beschreibung des Zeitschlitzes, in dem der Zugriffsburst empfangen wurde oder den Rahmen- und Bittakt (*immediate assignment*, 3). Im Anschluß daran teilt die Mobilstation der Basisstation ihre Kennung und technischen Daten mit sowie Parameter zur Beschreibung des geforderten Dienstes (*paging response*, 4). Nach der in jedem Fall durchzuführenden Authentifikation (*authentication*, 5) und Verschlüsselung (*ciphering*, 6), werden Informationen über die Verbindung wie z. B. die Beschreibung des Trägerdienstes ausgetauscht (*set-up*, 7). Dann erfolgt die Zuweisung eines Verkehrskanals (*assignment*, 8). Die Verbindung kann nun durchgeschaltet werden (*alerting*

9); es klingelt bis der Angerufene den Ruf z.B. durch Abnahme des Hörers entgegennimmt (*connect*, 10).

Bei einem gehenden Ruf entfällt der Funkruf der Basisstation. Außerdem wird anstelle der „Paging-Response“-Nachricht eine „Service-Request“-Nachricht mit gleichem Informationsgehalt gesendet.

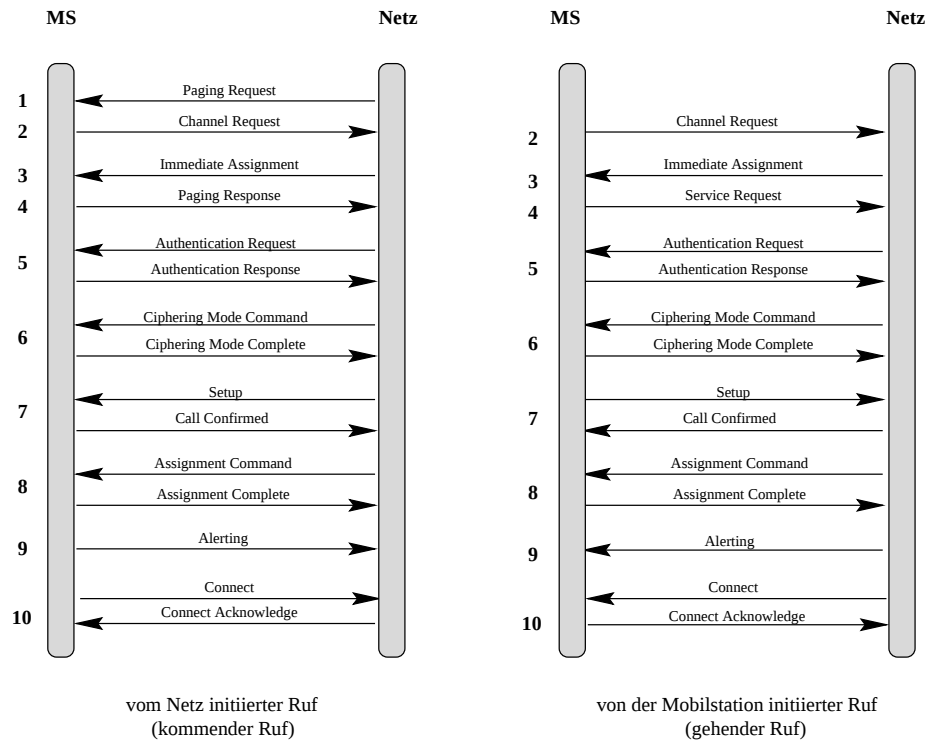


Abbildung 2.4: Nachrichtenfluß beim Verbindungsaufbau im GSM

Zur Verwaltung der Funkbetriebsmittel stellt der GSM-Standard drei verschiedene Verbindungsaufbaumechanismen zur Verfügung:

- *off air call set-up* (OACSU)
- *non-off air call set-up* (Non-OACSU)
- *very early assignment* (VEA)

In Abbildung 2.5 ist illustriert, inwieweit sich die Strategien im Zeitpunkt der Zuweisung des Verkehrskanals (*traffic channel*, TCH) unterscheiden.

Den schnellsten Verbindungsaufbau gewährleistet die VEA-Strategie. Der TCH wird direkt nach dem Zugriff über den Zufallszugriffskanal (*random access channel*, RACH) vergeben. Die Signalisierung läuft im Gegensatz zu den anderen beiden Strategien nicht auf dem „langsamen“ beigeordneten Steuerkanal (*slow dedicated control channel*, SDCCH) ab, sondern auf dem TCH. Der Nachteil liegt in einer schlechteren Ressourcenausnutzung, da Verbindungsaufbauversuche, die nicht beantwortet werden, unnötigerweise einen TCH blockieren. Dies gilt auch für Mobilstationen, die bedingt durch einen Handover die Prozedur zur Aktualisierung ihres Aufenthaltsbereiches durchlaufen.

Laut Standard darf in einer Zelle nur eine Verbindungsaufbaustrategie für alle Teilnehmer benutzt werden. Bei der Funkbetriebsmittelplanung ist daher die aus der VEA-Strategie resultierende erhöhte Blockierwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen.

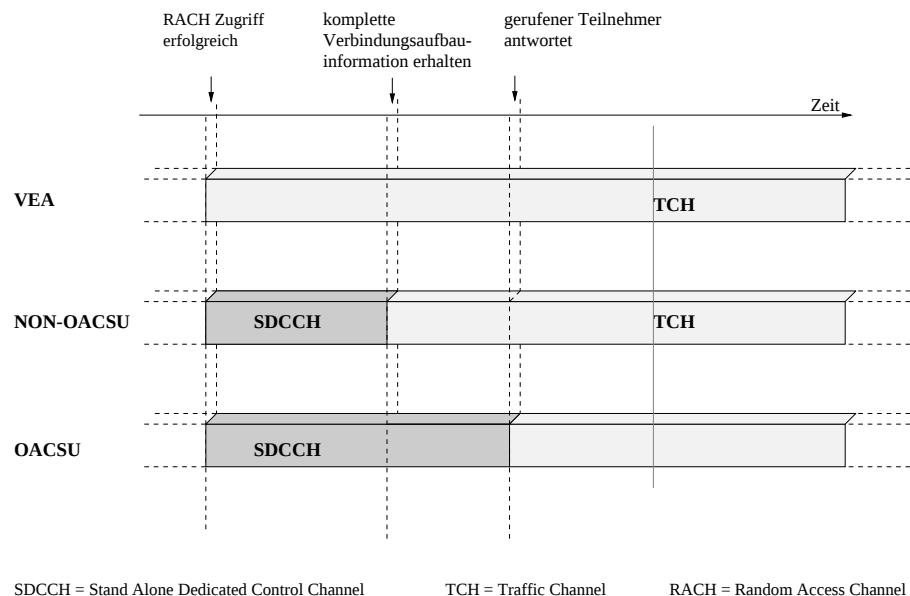


Abbildung 2.5: Mögliche Verbindungsaufbaustrategien im GSM

Beim Non-OACSU wird der TCH zugewiesen, bevor der Verbindungsaufbau im Netz initiiert wird. Handelt es sich um das OACSU-Verfahren, wird der TCH zugewiesen, nachdem der Verbindungsaufbau im Netz veranlaßt wurde. Dabei ist dem Netzbetreiber freigestellt, wann die Zuweisung erfolgt. Sie kann auch erst nach dem Antworten des gerufenen Teilnehmers (z.B. Abnahme des Telefonhörers) durchgeführt werden.

2.5 Übertragung der Teilnehmerdaten

Zur Datenübertragung stehen zwei Modi zur Verfügung, die sich in Durchsatz und Fehlerhäufigkeit unterscheiden. Beide Modi basieren auf einer Ratenanpassung (*rate adaptation*, RA), die zur Angleichung des asynchronen Datenstromes der ISDN-basierten Teilnehmerschnittstelle an die unterstützten Datenraten in den GSM-Netzknotten notwendig ist.

Der transparente Modus nimmt nur Dienste der Bitübertragungsschicht in Anspruch und bietet außer den dort definierten FEC-Verfahren keinen weiteren Schutz gegen Übertragungsfehler. Der nicht-transparente Modus sieht zur Fehlerreduktion zusätzlich den Einsatz eines Sicherungsschichtprotokolls vor.

2.5.1 Schicht-1-Ratenanpassung

Die Ratenanpassung setzt auf dem ITU-T X.30/V.110-Protokoll [174] auf, welches eine 3-stufige Anpassung der Datenströme an der Teilnehmerschnittstelle

(R- und S-Schnittstelle) vorsieht. Der asynchrone Eingangsstrom wird dabei synchronisiert (*RA 0*) und durch Multiplexen der 80 *bit* langen V.110-Rahmen in einen 16 *kbit/s* Ausgangsstrom, die ISDN-Zwischendatenrate, umgesetzt (*RA 1*). Die erforderliche Ratenadaption von der ISDN-Zwischendatenrate auf die GSM-Zwischendatenrate an der Funkschnittstelle (*RA 1'*) wird realisiert, indem die 20 *bit* langen Synchronisations- und Steuerdaten des V.110-Rahmens entfernt werden. Nach der Rückanpassung der GSM-Zwischendatenrate an die ISDN-Zwischendatenrate in der BTS wird diese an die Vermittlungsrate der MSC von 64 *kbit/s* angeglichen. Der Übergang zu den verschiedenen Festnetztypen wird durch in der MSC implementierte Netzübergangsfunktionen (*interworking functions*, IWF) realisiert.

2.5.2 Sicherungsschicht

Im nicht-transparenten Dienst wird zusätzlich zur FEC das Funkverbindung-Sicherungsschichtprotokoll (*radio link protocol*, RLP) gemäß GSM-Empfehlung 4.22 [23] eingesetzt. Durch dessen ARQ-Mechanismus wird die Restbitfehlerhäufigkeit gegenüber 10^{-3} auf 10^{-7} reduziert; dabei ist allerdings die Datenrate Schwankungen in Abhängigkeit von der Kanalqualität unterworfen. Das RLP ist wie das LAPD_m ein an die Besonderheiten der Funkkommunikation angepaßtes voll duplexfähiges Derivat des in Festnetzumgebungen weitverbreiteten Sicherungsschichtprotokolls HDLC (*high level data link control*) gemäß ISO-Standard ISO 4335 [155]. Das HDLC-Protokoll gehört zur Familie der bitorientierten Protokolle, verwendet dementsprechend sogenannte *Rahmen* einheitlicher Struktur, um Benutzerdaten und Steuerinformation zu übertragen und genügt weitgehend den OSI Schicht-2 Dienstspezifikationen [168]. Die Hauptunterschiede zwischen RLP und HDLC liegen in der festen Rahmenlänge des RLP von 240 *bit* gegenüber einer variablen Rahmenlänge beim HDLC, einer längeren Rahmenprüfsumme (*frame check sequence*, FCS) von 24 *bit* beim RLP gegenüber 16 *bit* beim HDLC und der Möglichkeit, beim RLP Steuerinformation zusammen mit Nutzdaten in einem Rahmen zu versenden. Zudem ist beim RLP die Fenstergröße auf 61 beschränkt, wohingegen beim HDLC optional eine Fenstergröße von 7 oder 128 eingestellt werden kann. Ferner unterstützt das RLP nur Punkt-zu-Punkt Verbindungen: das beim HDLC-Protokoll zur Spezifikation des Empfängers notwendige Adreßfeld entfällt.

2.6 Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m

2.6.1 Physikalische Kanäle

Im GSM wird an der Funkschnittstelle U_m eine Kombination von Frequenzvielfach (*frequency division multiplexing*, FDM) und Zeitvielfach (*time division multiplexing*, TDM) mit wahlfreiem Zugriff auf Frequenz- bzw. Zeitkanäle (*frequency/time division multiple access*, FDMA/TDMA) mit Richtungstrennung im Frequenzbereich (*frequency division duplexing*, FDD) verwendet.

2.6.1.1 Frequenzmultiplex-Struktur

Die Daten von der Mobilstation in Richtung zum Feststationssystem (*uplink*, UL) werden im Frequenzbereich von 890 MHz bis 915 MHz gesendet. In der umgekehrten Richtung (*downlink*, DL) werden Frequenzen von 935 MHz bis 960 MHz genutzt.

Beide Frequenzbänder sind in Kanäle von 200 kHz Bandbreite unterteilt, so daß sich für Uplink und Downlink je 124 nutzbare Kanäle ergeben. Die verbleibenden 200 kHz Bandbreite werden als Schutzband zu im Frequenzspektrum benachbarten Systemen nicht genutzt. Bezeichnet man die Trägerfrequenzen des Uplinks mit F_u und die des Downlinks mit F_d , so ergeben sich folgende Frequenzen:

$$\begin{aligned} F_u(n) &= 890,2 \text{ MHz} + 0,2 \cdot (n - 1) \text{ MHz}, & (1 \leq n \leq 124) \\ F_d(n) &= 935,2 \text{ MHz} + 0,2 \cdot (n - 1) \text{ MHz}, & (1 \leq n \leq 124) \end{aligned}$$

2.6.1.2 Zeitmultiplex-Struktur

Durch den Einsatz des Zeitmultiplex-Verfahrens werden auf einem Frequenzkanal insgesamt acht physikalische Zeitkanäle realisiert, indem die Zeitachse in ungefähr 0,577 ms lange Zeitschlitze (*time slots*) geteilt wird. 8 Zeitschlitze werden zu einem TDMA-Rahmen der Dauer 4,615 ms zusammengefaßt. Die Länge eines Zeitschlitzes ergibt sich aus der Übertragungsrate des verwendeten Modulationsverfahrens und der Zahl der in einem Zeitschlitz zu übertragenden Bits.

Als Modulationsverfahren wird das „Gaussian Minimum Shift Keying“ (GMSK) mit der normalisierten Bandbreite $B \cdot T = 0,3$ und einer Modulationsrate von 1625/6 kbit/s ($\approx 270,833 \text{ kbit/s}$) verwendet. Die Zeitschlitzdauer entspricht somit der Dauer von 156,25 bit.

Innerhalb eines Zeitschlitzes werden die Daten in sogenannten „Bursts“ übertragen, für die funktionsbedingt, z. B. zur Frequenzkorrektur oder Datenübertragung, verschiedene Typen definiert sind.

Der Übertragung von Daten dient der sogenannte „Normal-Burst“ mit 114 bit Nutzdaten. In Abbildung 2.6 ist der Aufbau des Bursts dargestellt.

2.6.2 Logische Kanäle

Im GSM wird zwischen physikalischen und logischen Kanälen unterschieden. Mehrere logische Kanäle können zeitlich versetzt in einem physikalischen Kanal auftreten. Ihre Auftrittsreihenfolge ist in sogenannten Mehrfachrahmen festgelegt. Zur Optimierung der spektralen Effizienz wird ein Mehrfachrahmen auf einen einzigen physikalischen Kanal abgebildet, der aus einem im TDMA-Rahmentakt periodisch genutzten Zeitschlitz besteht. Die logischen Kanäle lassen sich in Verkehrskanäle (*traffic channel*, TCH) und Steuerkanäle (*control channel*, CCH) unterteilen.

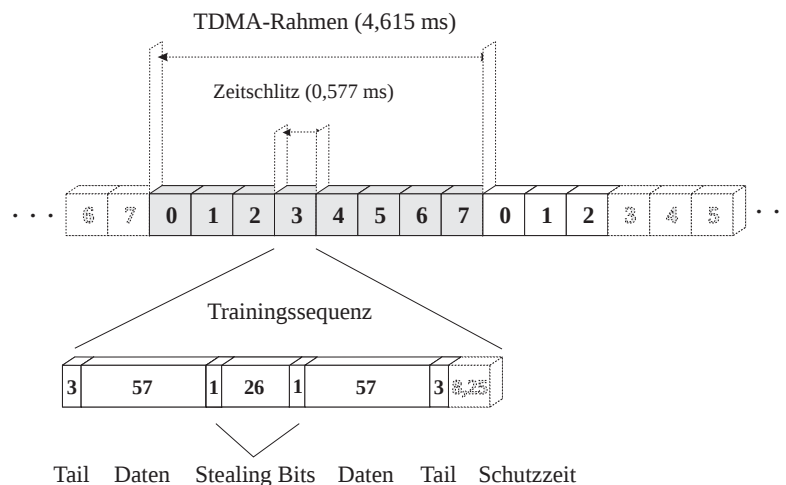


Abbildung 2.6: Aufbau des Normal-Bursts

2.6.2.1 Verkehrskanäle

Die Verkehrskanäle dienen der Übertragung von Sprache bzw. Daten zwischen den kommunizierenden Teilnehmern. Man unterscheidet Vollraten-Verkehrskanäle (*full-rate TCH*, TCH/F) und Halbraten-Verkehrskanäle (*half-rate TCH*, TCH/H). Über den TCH/F wird mit einer Brutto-Datenrate von $22,8 \text{ kbit/s}$ übertragen, wobei für die Übertragung der digitalisierten und codierten Sprachinformation 13 kbit/s benötigt werden; die restliche Kapazität wird zur Fehlerkorrektur genutzt. Datenübertragung ist mit Netto-Datenraten von $2,4 \text{ kbit/s}$, $4,8 \text{ kbit/s}$ und $9,6 \text{ kbit/s}$ möglich. Halbraten-Kanäle verfügen über eine Übertragungskapazität von $11,4 \text{ kbit/s}$. Durch ihre Verwendung wird, den Einsatz geeigneter Sprachcoders vorausgesetzt, eine Verdoppelung der Kanalzahl bei unverändertem Frequenzbedarf erreicht. Datenübertragung ist mit Bitraten von $2,4 \text{ kbit/s}$ bzw. $4,8 \text{ kbit/s}$ möglich.

2.6.2.2 Steuerkanäle

Die Steuerkanäle gewährleisten den Transport der Signalisierungsinformation zwischen der Mobilstation und dem Festnetz. Verbindungsaufbau und -abbau, Rufen einer Mobilstation (*paging*), Übergeben eines Gespräches an die Nachbarzelle (*hand-over*) oder Aktualisieren des Aufenthaltsbereichs (*location updating*) sind die wichtigsten Beispiele. Tabelle 2.1 zeigt die in GSM-Empfehlung 04.08 [18] definierten Steuerkanäle. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionen der einzelnen Steuerkanäle findet sich z. B. in [169].

2.6.2.3 Rahmenhierarchie

Zur Informationsübertragung werden logische Kanäle auf die physikalischen Kanäle abgebildet. Dies geschieht mit Hilfe von sich zyklisch wiederholenden Mehrfachrah-

<i>Gruppe</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Richtung</i>
BCCH	Frequency Correction Channel (FCCH)	MS $\leftarrow$ BS
	Synchronisation Channel (SCH)	MS $\leftarrow$ BS
	Broadcast Control Channel (BCCH)	MS $\leftarrow$ BS
CCCH	Random Access Channel (RACH)	MS $\Rightarrow$ BS
	Paging Channel (PCH)	MS $\leftarrow$ BS
	Access Grant Channel (AGCH)	MS $\leftarrow$ BS
DCCH	Stand-Alone Dedicated Control Ch. (SDCCH)	MS $\Leftrightarrow$ BS
	Slow Associated Control Channel (SACCH)	MS $\Leftrightarrow$ BS
	Fast Associated Control Channel (FACCH)	MS $\Leftrightarrow$ BS

Tabelle 2.1: Die Steuerkanäle im GSM

menmustern. Die zeitlich korrekte Positionierung der Zyklen wird durch eine Synchronisierung von Mobilstation und Feststation erreicht.

Es gibt zwei unterschiedliche Mehrfachrahmen, die entweder 26 oder 51 TDMA-Rahmen zusammenfassen. Sprache und Daten (und die beigeordneten Steuerkanäle SACCH und FACCH) werden in 26er Mehrfachrahmen gesendet, vgl. Abbildung 2.7, während Signalisierungsinformation in 51er Mehrfachrahmen übertragen wird.

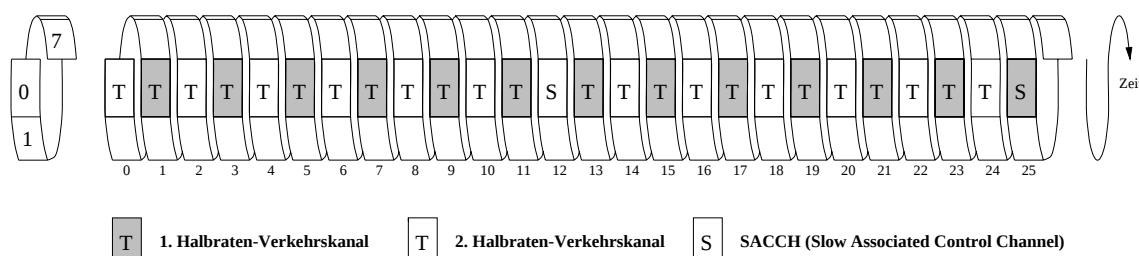


Abbildung 2.7: Aufbau des 26er Mehrfachrahmens

26 51er Mehrfachrahmen und 51 26er Mehrfachrahmen bilden einen Superrahmen (*superframe*). 2048 Superrahmen ergeben einen Hyperrahmen (*hyperframe*), zu dessen Übertragung fast dreieinhalb Stunden benötigt werden.

2.6.3 Fehlerbehandlung und Fehlersicherung

Ziel der im GSM eingesetzten Fehlerbehandlungs- und -korrekturverfahren ist die Sicherung der gesendeten Daten gegen eine fehlerhafte Übertragung. Aufgrund der charakteristischen Pegelbrüche im Frequenzbereich des GSM schwankt die Bitfehlerhäufigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Entfernung der kommunizierenden Endgeräte. Drei unterschiedliche Verfahren werden eingesetzt, vgl. [169]:

- Fehlererkennung
- Fehlerkorrektur
- Fehlerbehandlung

2.6.3.1 Fehlererkennung

Durch Verfahren zur Fehlererkennung kann festgestellt werden, ob ein empfangenes Datenwort fehlerhaft ist. Dazu werden Prüfsummen zyklischer Codes (*cyclic redundancy check*, CRC) eingesetzt, vgl. z.B. [42].

2.6.3.2 Fehlerkorrektur

Fehlerkorrektur (*forward error correction*, FEC) ermöglicht durch Hinzufügen von Redundanz zu einem Datenwort die Korrektur einer vom verwendeten Code abhängigen Anzahl von Fehlern. Im GSM werden zur FEC nicht-systematische Codes, die sogenannten „Faltungscodes“ eingesetzt, vgl. [126].

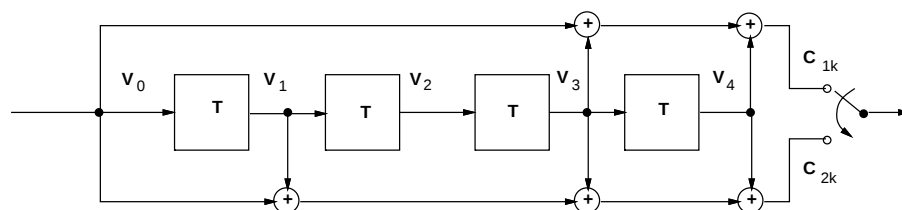


Abbildung 2.8: Aufbau des GSM-96 Faltungscodierers

Das Verhältnis der Länge des Datenwortes k zur Länge des Codewortes n wird durch die Codierate R ausgedrückt. Abbildung 2.8 zeigt den schematischen Aufbau des im GSM eingesetzten Faltungscodierers mit Codierate $1/2$, welcher aus vier internen Schieberegistern besteht. Faltungscodierer eignen sich sehr gut zur Korrektur unkorrelierter Fehler, sind aber empfindlich gegen büschelhaft auftretende Fehler.

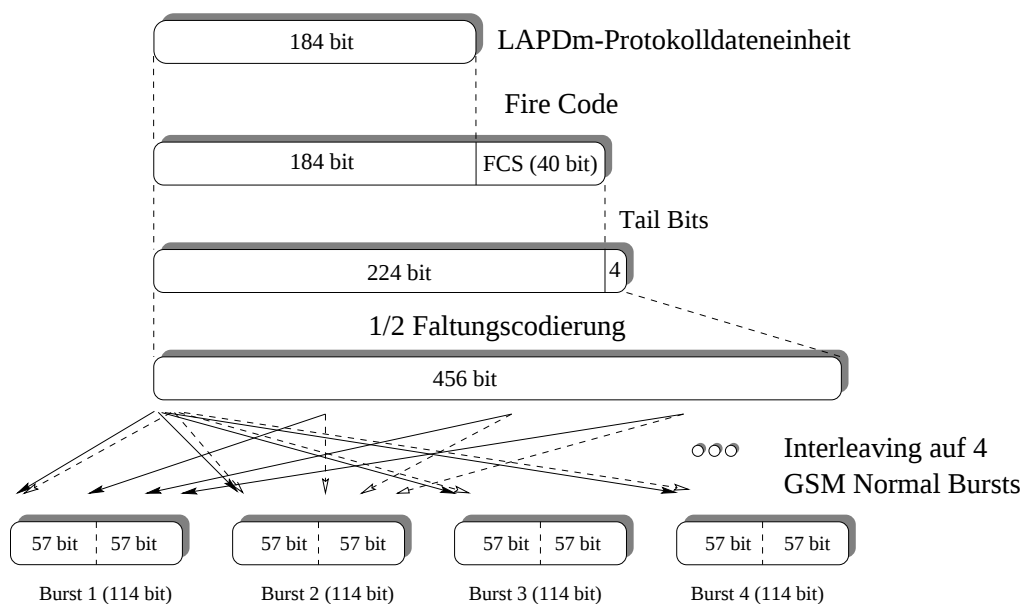


Abbildung 2.9: Codierung am Beispiel des SDCCH

Daher werden im GSM benachbarte Bits nach der Faltungscodierung durch Bitverschachtelung (*interleaving*) systematisch umgeordnet. Abbildung 2.9 zeigt die für den SDCCCH verwendete Codierung im GSM. Die Decodierung erfolgt mit Hilfe des Viterbi-Algorithmus und der „Maximum Likelihood Decision“, vgl. [79]. Im Trellis-Diagramm wird derjenige Pfad herausgesucht, dessen erzeugte Bitsequenz die größte Übereinstimmung mit der Empfangssequenz hat, vgl. [115, 126].

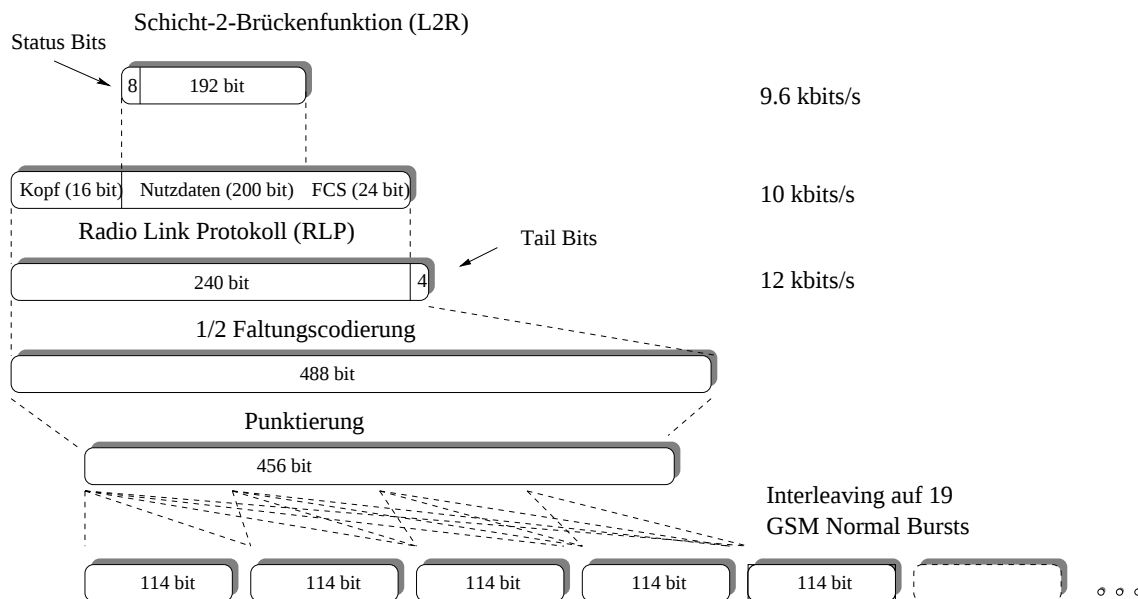


Abbildung 2.10: Teilnehmerdatencodierung im nicht-transparenten Trägerdienst

Durch Punktierung können Faltungscodes verkürzt werden. Aus dem Ausgangsbitstrom werden mehrere Bits anhand eines festen Punktierungsschemas herausgestrichen. Durch diese Abschwächung können Faltungscodes mit höherer Codiertrate, aber auch höherer Restbitfehlerhäufigkeit realisiert werden. Abbildung 2.10 zeigt das Codierungsschema, welches für die Datenübertragung beim nicht-transparenten Dienst benutzt wird.

2.6.3.3 Fehlerbehandelnde Verfahren

Fehlerbehandelnde Verfahren (*automatic repeat request*, ARQ) verwenden einen fehlererkennenden Code, um nicht korrigierbare Datenworte erneut anzufordern. Die übertragenen Datenworte werden in Paketen übertragen, die mit einer Laufnummer versehen sind. Der Empfänger bestätigt den Empfang mit einer positiven bzw. negativen Quittung als korrekt bzw. fehlerhaft.

Zur Wiederanforderung können unterschiedliche Mechanismen verwendet werden, vgl. [90]:

- send-and-wait
- go-back-N (REJ)
- selective-reject (SREJ)

Beim „Send-and-Wait“-Verfahren wartet der Sender auf eine Quittung für das übertragene Paket, bevor er ein weiteres Paket absendet. Bei einer negativen Quittung wird das Paket wiederholt. Beim *REJ*-Verfahren werden kontinuierlich⁴ Pakete übertragen, bis der Sender eine negative Quittung für ein vom Empfänger fehlerhaft empfangenes Paket erhält. Ab diesem Paket werden alle Pakete wiederholt. Mit einer positiven Quittung gelten alle Pakete mit einer kleineren Laufnummer und das quittierte Paket als korrekt übertragen. Ebenso wie beim *REJ*-Verfahren werden beim *SREJ*-Verfahren fortlaufend Pakete zwischen Sender und Empfänger übertragen. Eine negative Quittung bewirkt jedoch nur die *selektive* Wiederholung des als fehlerhaft gekennzeichneten Paketes, vgl. [138].

⁴Zumeist ist die Zahl zulässiger nicht beim Sender quittierter Pakete beschränkt.

Zukünftige Sprach- und Datendienste im GSM

Eine wesentliche Entwurfsvorgabe bei der Spezifikation der GSM-Standards war, ISDN-Dienste mobil verfügbar zu machen.

Diese Vorgabe konnte aufgrund der aus frequenzökonomischen Gründen gewählten Funkkanalstruktur nur eingeschränkt erfüllt werden: Anstelle der zwei ISDN-Nutzdatenkanäle pro Teilnehmer steht nur einer zur Verfügung, der zudem nur eine erheblich kleinere maximale Nutzdatenrate von 13 kbit/s für Sprach- bzw. 9.6 kbit/s für Datenübertragung aufweist. Zwar wird im GSM wie im ISDN zwischen der Übertragung von Nutzdaten und dem Austausch von Signalisierungsinformationen zur Verbindungssteuerung unterschieden, der ISDN-Signalisierkanal, kurz D-Kanal, ist in den zur Zeit betriebenen GSM-Mobilfunknetzen aber nur unvollständig abgebildet. So ist ein X.25-Paketdienst auf den GSM-Signalisierungskanälen (D_{mobile} - oder D_m -Kanal) gar nicht vorgesehen. Letztendlich ist eine Zuordnung mehrerer B-Kanäle für eine Teilnehmerverbindung, die dem im ISDN definierten Primärratenanschluß vergleichbar ist, bisher nicht vorhanden.

3.1 Motivation

Die Kommunikationsanforderungen wichtiger Anwendungen wie der mobilen Sprachübertragung zwischen zwei Teilnehmern oder der modemgestützten Datenübermittlung können durch die bestehenden GSM-Basisdienste erfüllt werden.

Der in Kapitel 1 angesprochene Zuwachs der Teilnehmerzahlen kann durch den Einsatz eines Halbratensprachcodecs vorerst aufgefangen werden, da dadurch nahezu eine Verdoppelung der Zahl der Verkehrskanäle pro Zelle erreichbar ist. Jedoch fehlen z.B. Dienste für die Gruppenkommunikation.

Die in GSM-Mobilfunknetzen Mitte 1994 eingeführten Datendienste (z.B. zum Fernkopieren) basieren auf kanalvermittelter „Punkt-zu-Punkt“-Übertragung. Jedem Teilnehmer wird wie bei der Sprachübertragung eine exklusive Verbindung zur Verfügung gestellt.

Bei Datenübertragungs-Anwendungen wird jedoch ein schwankendes Lastaufkommen mit büschelartiger Charakteristik erzeugt. Eine permanent durchgeschaltete Verbindung ist im Prinzip nicht notwendig. Im Gegenteil, diese für Sprache optimale Vermittlungsmethode führt zu einer ineffizienten Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Funkkanalressourcen.

Besser geeignet sind hier paketerorientierte Übertragungsmethoden, die den Funkkanal nur dann belegen, wenn tatsächlich Daten übertragen werden, vgl. [138]. Durch

statistisches Multiplexen der Daten mehrerer Teilnehmer auf einen Kanal kann ein signifikanter Bündelungsgewinn realisiert werden.

Von den existierenden GSM-Datendiensten werden lediglich fest abgestufte Übertragungsraten von $2,4\text{ kbit/s}$ über $4,8\text{ kbit/s}$ zu den angesprochenen $9,6\text{ kbit/s}$ unterstützt. Die Anforderungen vieler bisher nur im Festnetz angebotener Anwendungen können damit nicht erfüllt werden; eine dynamische Anpassung an ein schwankendes Lastaufkommen ist nicht möglich. Aus Sicht der Mobilfunkteilnehmer kommt hinzu, daß die Gebührenabrechnung für die Dauer der Übertragung und nicht für die Menge der übermittelten Daten erfolgt.

Dies begründet die Motivation der Netzbetreiber, schnellstmöglich neue Dienste in das GSM zu integrieren, um so für den von multi-medialen Anwendungen geprägten zukünftigen Mobilfunkmarkt gewappnet zu sein.

3.2 Anwendungsfelder und Dienstgüteanforderungen

Vergegenwärtigt man sich die Bereiche, in denen die rechnergestützte Kommunikation im Zusammenspiel mit Teilnehmermobilität eine wesentliche Rolle spielt, läßt sich das zukünftige Anwendungsspektrum von GSM-Mobilfunknetzen in ein „horizontales“ und ein „vertikales“ Marktsegment unterteilen, wie nachfolgend exemplarisch veranschaulicht ist:

• horizontale Märkte

- drahtlose persönliche Computer
- mobiles Büro
- elektronischer Geldtransfer

• vertikale Märkte

- Verkehrstelematik
- Waren-/Versorgungs-Logistik

Das horizontale Segment vertritt alle Anwendungsfelder, in denen eine Kommunikation zwischen zwei oder mehreren gleichgestellten Kommunikationspartnern in einer dialog-orientierten bzw. interaktiven Form stattfindet. Das vertikale Segment steht dagegen stellvertretend für die Anwendungen, deren Kommunikationsfluß von einer zentralen übergeordneten Instanz verwaltet wird. Vereinfacht ausgedrückt werden hierbei relevante Informationen gesammelt, ausgewertet und an eine vordefinierte Zielgruppe verteilt.

In Tabelle 3.1 sind denkbare Anwendungen eines zukünftigen GSM-Mobilfunknetzes aufgelistet. Aus der Tabelle wird ersichtlich, daß ein wesentlicher zukünftiger Anwendungsbereich unter dem Begriff „mobiles Internet“ zusammengefaßt werden kann. Eine Hauptanforderung der Teilnehmer an neue Dienste in diesem Umfeld ist, Anwendungen, die sie üblicherweise in ihrer Festnetzumgebung nutzen, zu moderaten Kosten und ohne wesentliche Einschränkungen in der Bedienung und bezüglich der Leistungsmerkmale unterstützt zu sehen. Die Sicht der mobilen Endnutzer auf einen Paket-Datendienst ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das Netz stellt dem Teilnehmer anhand von Internetadressen prinzipiell die gleichen Zugangsfunktionen zu Datennetzen zur Verfügung, die im Festnetz existieren.

<i>Anwendung</i>	<i>Marktsegment</i>	<i>Dienststart</i>
<i>World Wide Web</i>	Mobiles Büro	Datenbankdienst
<i>Datei-Transfer</i>	Mobiles Büro	Datenbankdienst
<i>E-Mail</i>	Mobiles Büro	Speicher-/Weiterleitungsdienst
<i>Telnet</i>	Mobiles Büro	Konversationsdienst
<i>Video</i>	Mobiles Büro	Konferenzdienst
<i>Geldtransfer</i>	Telematik	Teleaktionsdienst
<i>Alarm-Benachrichtigung</i>	Telematik	Teleaktionsdienst
<i>Auto. Gebührenerfassung</i>	RTTI	Telematikdienst
<i>Verkehrsleitung</i>	RTTI	Verteildienst
<i>Flottenmanagement</i>	RTTI	Telematikdienst

Tabelle 3.1: Mögliche zukünftige Anwendungsfelder des GSM

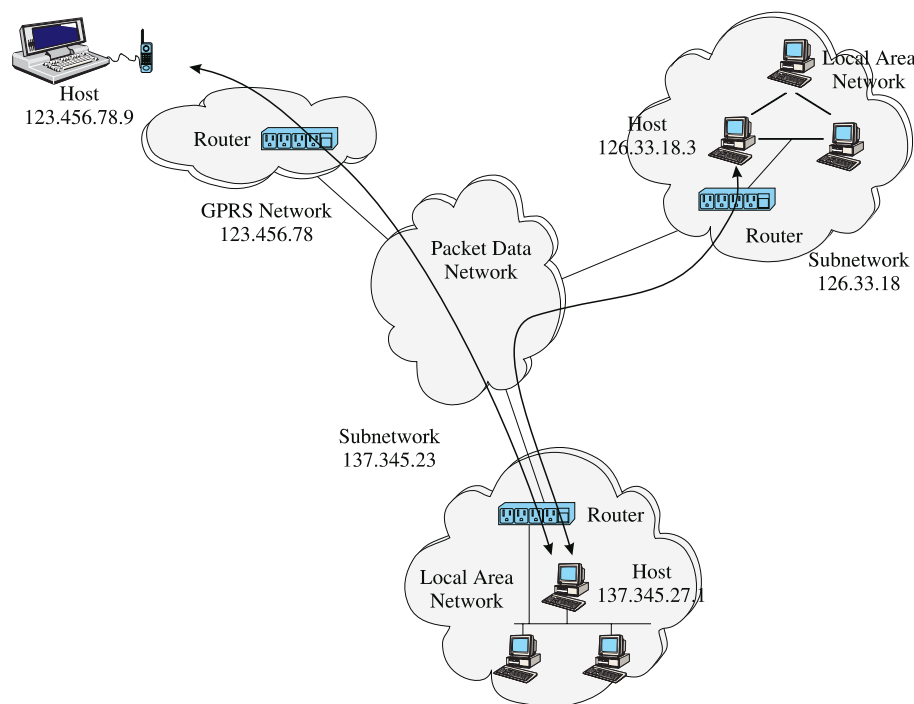


Abbildung 3.1: Sicht mobiler Teilnehmer auf einen Paket-Datendienst

Ein anderes zukünftiges Marktsegment stellen Verkehrstelematik-Anwendungen (*road traffic and transport informatics*, RTTI) dar. GSM/GPS¹-basierte Gebührenerfassungssysteme sind unlängst in einem internationalen Feldversuch im Vergleich mit baken-basierten Kommunikationssystemen getestet worden, vgl. [172]. Bisher ist für die GSM/GPS-Systeme vorgesehen, den GSM-Kurznachrichtendienst (*short message service*, SMS) zum Informationsaustausch zu nutzen. In Zukunft ist es wünschenswert, hierfür effiziente Datendienste anzubieten.

¹Global Positioning System

Weitere Anwendungen liegen im Bereich des Geldtransfers wie z.B. „Electronic Cash“ oder auch in Teleaktionsdiensten wie der Alarm-Benachrichtigung. Hier sei als Beispiel genannt, daß namhafte deutsche Pkw-Hersteller planen, Fahrzeuge mit einem GSM-Sender auszustatten, der an das Airbag-System gekoppelt ist. Das Auslösen des Airbags führt zu einer automatischen Unfall- und Positionsmeldung an die jeweilige Servicezentrale des Herstellers.

Die möglichen Anwendungen beruhen somit auf einfachen *Verteil-* und *Speicherdiensten* und auf komplexen *Konferenzdiensten*, die eine multi-direktionale Kommunikation mit einem Informationsaustausch in Echtzeit zwischen mehreren Teilnehmern ermöglichen. Das Quellenverhalten der Anwendungen variiert zwischen einer regelmäßigen Übertragung kleiner Datenmengen in geringen Zeitabständen bis hin zu einer unregelmäßigen Übertragung großer Datenmengen.² Offensichtlich sind damit sehr unterschiedliche Anforderungen an die erforderliche bzw. gewünschte Dienstgüte neuer GSM-Dienste bezüglich der notwendigen Bandbreite, tolerierbaren Fehlerrate und Verzögerungszeit verbunden.

3.3 Modellierung von Datenverkehr

Zur simulativen Untersuchung eines Systems hinsichtlich verschiedener Leistungskenngrößen ist es notwendig, das mit einer Anwendung verknüpfte Quellenverhalten nachzubilden. Zur Modellierung werden in der Regel die Ankunftsrate und Größe der erzeugten Dateneinheiten verwendet.

Die Ankunftszeitpunkte können durch die Verteilung der *Zwischenankunftszeiten* beschrieben werden. Die Zwischenankunftszeit τ_i ist definiert als die Differenz zwischen dem Ankunftszeitpunkt eines Ereignisses und dem Ankunftszeitpunkt des vorherigen Ereignisses. Hierbei wird keine Aussage über die Kanalbelegungsdauer eines Ereignisses gemacht, d.h. ein vorheriges Ereignis kann bei der Ankunft eines neuen Ereignisses durchaus noch andauern. Der reziproke Wert des Erwartungswerts der Zwischenankunftszeit $\lambda = 1/\bar{\tau}$ wird als *Ankunftsrate* bezeichnet. Sie gibt an, wieviele Ereignisse innerhalb eines Zeitraums im Mittel auftreten. Kanalbelegungsdauern ergeben sich aus den jeweiligen Anwendungen und werden durch die zu übertragende Datenmenge je Ereignis definiert.

Repräsentativ für mögliche zukünftige Anwendungen wurde in dieser Arbeit auf drei durch geeignete Ankunfts- und Bedienprozesse verkehrstheoretisch modellierte Anwendungen zurückgeriffen:

- elektronische Post
- Flottenmanagement
- Zugbeeinflussungssystem

Neben diesen aus der GPRS-Standardisierung stammenden Modellen wurden FTP- und WWW-Sitzungen modelliert und implementiert und eine Lastquelle mit negativ

²Bezüglich einer Zusammenstellung der Dienstgütemerkmale charakteristischer Sprach- und Datenanwendungen sei z.B. auf [66] verwiesen.

exponentiell verteilten Ankunftszeiten und fester parametrisierbarer Paketlänge zur Erzeugung gemischter Lastszenarien verwendet, vgl. [61].

In der Literatur finden sich weitere umfangreiche Untersuchungen zur Modellierung von Sprach- und Datenanwendungen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden kann, vgl. z.B. [62, 82, 118, 165].

Zur Modellierung des Quellenverhaltens von Internet-Anwendungen wurde ein spezieller Ansatz verfolgt, der das stark büschelhafte Verhalten der Paketankünfte auf Grundlage empirischer Messungen des Verkehrsaufkommens in einem Ethernet berücksichtigt. Aufbauend auf dem „Packet-Train“-Modell, vgl. [104], wurde ein erweitertes „Client-Server“-Modell entwickelt, welches eine genauere Modellierung der Korrelation aufeinanderfolgender Dateneinheiten ermöglicht.

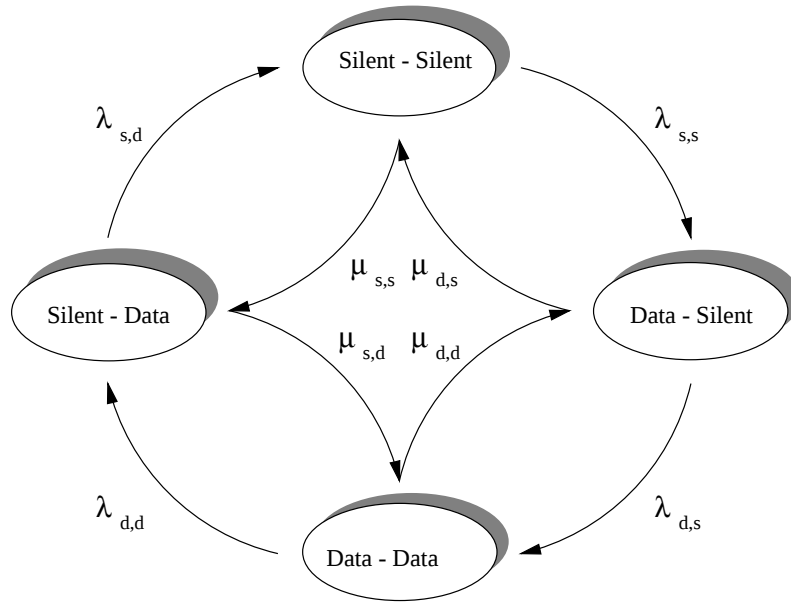


Abbildung 3.2: Das „Client-Server“-Zustandsmodell

Zusätzlich zu den aus dem „Packet-Train“-Modell bekannten Zuständen Train und Gap wird in diesem Modell die Unterscheidung getroffen, welcher der an einer Verbindung beteiligten Rechner momentan Pakete verschickt, beziehungsweise empfängt. Somit kann die Asymmetrie einer Verbindung erfaßt werden. Es entsteht ein Modell mit vier möglichen Zuständen, die sich durch 2-Tupel (x,y) beschreiben lassen. Data steht für einen sendenden Rechner, Silent für einen Rechner im Ruhezustand. Der erste Eintrag (x) gibt jeweils den Zustand des Client-Rechners an, der zweite (y) den des Servers. Damit ergeben sich die in Abbildung 3.2 dargestellten vier Zustände mit acht möglichen Zustandsübergängen und den Übergangswahrscheinlichkeiten $\lambda_{x,y}$ und $\mu_{x,y}$.

Analog zu [66] wurden Messungen des TCP-Verkehrs in einem Ethernet ausgewertet und zur Parametrisierung des Client-Server-Modells verwendet. Dabei konnten die in [66] getroffenen Aussagen nur teilweise verifiziert werden. Die an einigen TCP-

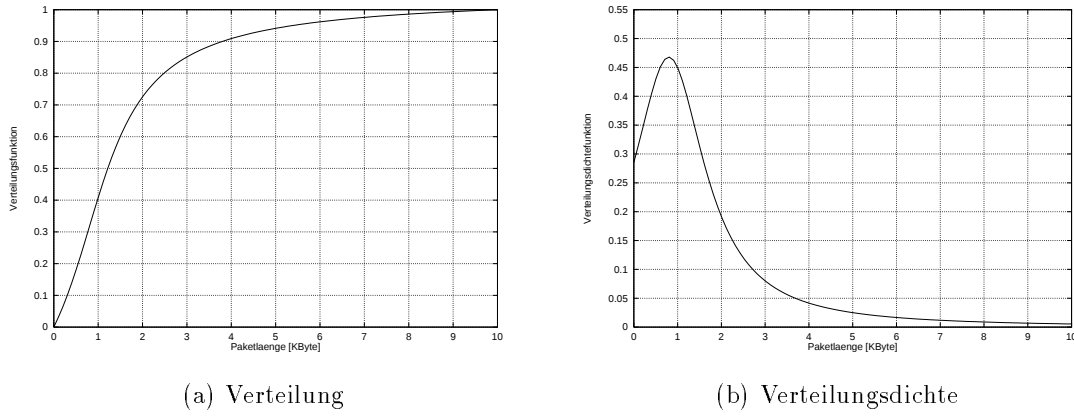


Abbildung 3.3: Verteilungs- und Verteilungsdichtefunktion des FUNET-Modells

Ports gemessenen Datenraten lagen zum Teil deutlich über den in [66] angegebenen Werten, vgl. [55]. Setzt man voraus, daß sich Teilnehmer im Mobilfunknetz ähnlich verhalten wie im Festnetz, lassen sich die entsprechenden Verkehre nur mit eingeschränkter Dienstgüte realisieren.

Bei der Analyse der Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten $\lambda_{x,y}$ und $\mu_{x,y}$ mußte festgestellt werden, daß das parametrisierte Modell nur eingeschränkt zur Abbildung des Verkehrs auf dem GSM-Mobilfunkkanal verwendet werden kann, vgl. [55]. Es hat sich gezeigt, daß die spezifischen Eigenschaften des Funkkanals (Zugriffssteuerung, Fehlerbehandlung, Kanalqualität, etc) eine eigenständige Parametrisierung auf der Basis von Messungen des Datenverkehrs am Bezugspunkt U_m erfordern.

3.3.1 Elektronische Post

Dieses Modell basiert auf einer statistischen Auswertung der finnischen Akademie für Netzentwicklung (*Finish university and research network*, FUNET). Das Modell approximiert die statistische Verteilung der Länge von E-Mails durch eine Cauchy-Verteilungsdichtefunktion mit einer oberen Grenze von 10 *kbyte* und einem Erwartungswert von 1 *kbyte*, vgl. Abbildung 3.3. Für die Verteilungs- bzw. Verteilungsdichtefunktion gilt:

$$F(x) = \arctan(x - 0.8) + \arctan(0.8) \quad (3.1)$$

bzw.

$$f(x) = \text{Cauchy}(0.8, 1) = \frac{1}{\pi (1 + (x - 0.8)^2)} \quad (3.2)$$

3.3.2 Flottenmanagement

Dieses Modell basiert auf einer statistischen Auswertung des Flottenmanagements mit Mobitex-Funkdatenübertragung in Schweden. Auf dem Uplink werden Daten mit einem zufällig gleichverteilten Anteil der Länge

$$30 \pm 15 \text{ byte} \quad (3.3)$$

versendet. Die Paketlängen auf dem Downlink liegen bei

$$115 \pm 57 \text{ byte} \quad (3.4)$$

3.3.3 Zugbeeinflussungssystem

Dieses Kanalbelegungsmodell beschreibt die erwartete Verteilung der Paketlängen bei Anwendungen zur Steuerung von Zügen im Kontext des geplanten europäischen Zugbeeinflussungssystem (*European train control system*, ETCS). Die mittlere Paketlänge beträgt 256 byte und ist negativ exponentiell verteilt. Als maximale Paketlänge wird $M = 1000 \text{ byte}$ angenommen. Die Verteilungsfunktion lautet:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{256}} \quad (3.5)$$

3.4 Realisierungsansätze zukünftiger Dienste

In diesem Abschnitt wird unter Berücksichtigung der Standardisierungsarbeiten der ETSI eine Übersicht über mögliche Realisierungsansätze neuer Dienste im GSM gegeben. Damit soll die Entwicklungsrichtung des GSM aufgezeigt und eine Einordnung der in dieser Arbeit entwickelten und untersuchten Dienste FMBS und GPRS ermöglicht werden.

Prinzipiell lassen sich zwei unterschiedliche Ansätze betrachten, neue Dienste mit erweiterter Funktionalität im GSM zu realisieren:

- modifizierte bzw. erweiterte Nutzung kanalvermittelter Übertragung
- Integration paketvermittelter Übertragungsmethoden

In Tabelle 3.2 ist gezeigt, welche Kanalkonzepte sich bei beiden Ansätzen unterscheiden lassen und welche maximal erzielbaren Datenraten daraus resultieren. Der kleine Buchstabe hinter der Bezeichnung in der dritten Spalte gibt an, welchen Status die Standardisierungsaktivitäten haben. In der ersten Phase der Standardisierung (GSM TS 01.xx) wird eine Anforderungsspezifikation erstellt. Analog zur ITU-T Empfehlung I.130 werden daraufhin drei Stufen durchlaufen. Die erste Stufe (*stage 1*, GSM TS 02.xx), die eine allgemeine Dienstbeschreibung umfaßt, ist bei allen betrachteten Diensten abgeschlossen. In der zweiten Phase (*stage 2*, GSM TS 03.xx) wird die funktionale Dienstbeschreibung und der Informationsfluß festgelegt, während sich die dritte Phase (*stage 3*, z.B. GSM TS 04.xx) mit den Signalisierprotokollen und Vermittlungsfunktionen unter implementierungstechnischen Gesichtspunkten auseinandersetzt.

<i>Vermittlungs- technik</i>	<i>Kanalkonzept</i>		<i>Be- zeichnung</i>	<i>Max. Datenrate</i>
kanal- gebunden	Dedizierte Kanäle	NCCH, TCH	ASCI ^b	13 kbit/s
	Parallele Kanäle	1-4 TCH	HSCSD ^b	38,4 kbit/s
	Signalisierkanäle	DCCH	UUS ^b	$\leq 1 \text{ kbit/s}$
paket- orientiert	Signalisierkanäle	DCCH	PDS ^a	9,2 kbit/s
	Virtuelle Verbindungen	TCH	FMBS ^c	36,8 kbit/s
	Dedizierte Kanäle	PDCH	GPRS ^b	120 kbit/s

Tabelle 3.2: *Konzepte im Überblick*

a: Phase-2+-Standardisierungsaktivität (stage 3)

NCCH: Notification Control Channel

b: Phase-2+-Standardisierungsaktivität (stage 2)

DCCH: Dedicated Control Channel

c: keine Standardisierungsaktivität

PDCH: Packet Data Channel

3.4.1 UUS – „Teilnehmer-zu-Teilnehmer“-Signalisierung

Die sogenannte „Teilnehmer-zu-Teilnehmer“-Signalisierung (*user-to-user signalling*, UUS) ist ein bereits 1996 standardisierter GSM-Zusatzdienst, der eine unidirektionale Datenübertragung ermöglicht, die direkt an einen kanalvermittelten Ruf gekoppelt ist. In Abhängigkeit der drei Dienstklassen UUS1-UUS3 können die mit „User-to-User“ bezeichneten Daten entweder nur in der Verbindungsaufbau- bzw. -abbauphase oder während der Rufdauer übertragen werden. Nur der UUS3-Diensttyp sieht vor, daß der gerufene Teilnehmer eine Datenübertragung initiieren kann.

Der UUS-Dienst ist in den GSM-Empfehlungen 02.87 und 03.87 [6, 3] beschrieben. Er ermöglicht die Übertragung sehr kurzer Nachrichten, deckt damit nur ein kleines Anwendungsspektrum ab und wird nicht weiter erläutert.

3.4.2 PDS – Paket-Datenübertragung auf Signalisierkanälen

Unterstellt man die Entwicklung der Mobilkommunikation hin zum Massenmarkt, führt die leitungsvermittelte Übertragung kleiner Datenmengen auf Verkehrskanälen zu einem signifikanten Anstieg des Signalisierverkehrs. Dies impliziert eine SCCP³-Überlast an der A-Schnittstelle.

Daher ist es sinnvoll, bereits die eigentliche Verbindungsaufbauphase zur Datenübertragung zu nutzen und keinen Verkehrskanal zu belegen. Somit realisiert man einen Trägerdienst, der unter Verwendung eines Signalisierungskanals einen Punkt-zu-Punkt-Datenaustausch kurzer Datenpakete ermöglicht.

³Signalling Connection Control Point

Ein solcher Dienst ist hauptsächlich für Anwendungen gedacht, die durch kurze Dialoge mit einer Datenrate von $9,2\text{ kbit/s}$ charakterisiert sind. Die Dauer des Dialoges liegt im Bereich weniger Sekunden. Der Dienst kann somit zum Datentransfer zwischen einem mobilen X.25-Teilnehmer und dem assoziierten Paketdatennetz benutzt werden. Eine andere Einsatzmöglichkeit liegt in der Datenübermittlung von einer Mobilstation zu einem Rechner mit direktem Zugriff auf die MSC. Die Datenübertragung über die Funkschnittstelle erfolgt durch Nutzung der Funktionen der CM-Teilschicht. Dieses Konzept ist unter dem Namen „Packet Data on Signalling Channels“ (PDS) in die Liste der Arbeitspunkte der GSM-Phase-2+-Ausbaustufe aufgenommen worden und in den Empfehlungen 02.63, 03.63 und 04.63 [1, 2, 11] im „Release 96“ bereits als Phase-2+-Standard verabschiedet.

Das Dienstkonzept des PDS bedingt nur geringfügige Erweiterungen der GSM-Vermittlungsschichtprotokolle. Die Protokolle der Sicherungs- bzw. Bitübertragungsschicht können unverändert übernommen werden.

Somit verwenden beide PDS-Dienstvarianten an der Funkschnittstelle U_m das im GSM üblicherweise zur gesicherten Übertragung der Signalisierinformation eingesetzte LAPD_m-Sicherheitsschichtprotokoll, vgl. Kapitel 2. Die Verbindungen werden über die Dienstzugangspunktkennung „0“ abgewickelt, die auch für die GSM-Signalisierung verwendet wird, wobei die Dienstvarianten jeweils durch einen spezifischen Protokolldiskriminator gekennzeichnet sind.⁴

Parallel ablaufende PDS-Transaktionen innerhalb einer Mobilstation werden anhand der Transaktionskennung eindeutig zugeordnet. Der Verbindungsaufbau bzw. -abbau im BSC am A_{bis} -Bezugspunkt zwischen BTS und BSS folgt dem in der GSM-Empfehlung 08.58 [12] beschriebenen transparenten bestätigten Modus zur Übertragung von Vermittlungsschichtinformationen zwischen BTS und BSC. Für den PDSS2-Dienst ist ein neuer logischer Dienstknoten definiert. Zur Übertragung zwischen BSC und MSC bzw. BSC und diesem Knoten wird das DTAP-Protokoll verwendet.

Entscheidend für die Datenrate des PDS ist die Wahl des Signalisierkanals. Wird ein Verkehrskanal im „Signalling Only“-Modus betrieben, muß der SDCCH zur Datenübertragung verwendet werden. Andernfalls wird anwendungsbezogen entschieden, ob der SACCH oder ein FACCH verwendet wird. Dies ist unabhängig vom Rufinitiator. Ein von der Mobilstation ausgehender Ruf kann vom Festnetz abgelehnt werden. In der entsprechenden Nachricht ist der alternativ zu verwendende Steuerkanal spezifiziert. Wird der SACCH als Datenübertragungskanal verwendet, muß gewährleistet sein, daß die MS ihre Meßwerte zumindest in jedem zweiten Block bzw. die BSS die Systeminformationen implementierungsabhängig in jedem n-ten Block übertragen kann.

⁴Hier bietet sich die Einführung eines neuen SAPI mit optimierter Fenstergröße des LAPD_m bei Nutzung eines FACCHs an.

3.4.3 FMBS – Nutzung virtueller Verbindungen

Eine andere Strategie, das Dienstspektrum des GSM zu erweitern, besteht darin, virtuelle Verbindungen zu nutzen. Liegen keine Daten zur Übertragung an, wird eine bestehende Verbindung zwischen MS und BSC ausgelöst, um den besetzten Verkehrskanal freizugeben. Die Verbindung zwischen dem Kommunikationspartner und dem MSC bleibt aber bestehen. Bei einem erneuten Verbindungsaufbau wird der Mobilstation ein Verkehrskanal zugewiesen und der noch bestehenden Verbindung zugeordnet. Zur Übertragung der Teilnehmerdaten können unterschiedliche Sicherungsschichtprotokolle eingesetzt werden. Dieses in dieser Arbeit entwickelte Konzept hat bisher keine Berücksichtigung bei der Standardisierung gefunden. In Kapitel 5 wird mit dem „Frame Mode Bearer Service“ (FMBS) eine mögliche Realisierung vorgestellt.

3.4.4 GPRS – Paket-Datenübertragung auf dedizierten Kanälen

Das skizzierte Konzept virtueller Verbindungen nutzt weiterhin die bestehenden leitungsvermittelten Prozeduren, wenn auch in modifizierter Form. Die Kanalressourcen sind nicht wie in dem nachfolgend beschriebenen Konzept ausschließlich der Paket-Datenübertragung zugewiesen.

Ruft man sich die Funktionen der GSM-Systemkomponenten in Erinnerung, stellt ein universell zu verwendender Paket-Datendienst völlig neue Anforderungen an das GSM in seiner bestehenden Form.

Neben der Netzzugangskontrolle, dem Routing und dem Mobilitätsmanagement müssen insbesondere neue Funktionen zur Verbindungssteuerung und Verwaltung der Funkbetriebsmittel entwickelt werden. Weiterhin stellt sich die Frage des Zusammenspiels mit kanalvermittelten Diensten.

Zur Zeit wird unter Federführung der ETSI ein als „General Packet Radio Service“ bezeichneter Paket-Datendienst spezifiziert, der ursprünglich bereits 1997 eingeführt werden sollte. Aufgrund der vielfältigen neu zu erstellenden Spezifikationen und Änderungen bestehender Standards ist abzusehen, daß eine Verabschiedung des GPRS nicht vor 1998 möglich sein wird, vgl. Anhang C. Dementsprechend wird GPRS-Funktionalität nicht vor dem Frühjahr 1999 in GSM-Mobilfunknetzen angeboten werden.

3.4.5 ASCI - die erweiterten GSM-Sprachdienste

Treibende Kraft hinter den Bestrebungen, die GSM-Sprachdienste zu erweitern, ist die internationale Eisenbahnvereinigung UIC (Union Internationale des Chemins de Fer). Zur Zeit werden allein in Deutschland im Bereich der Deutschen Bahn acht verschiedene Betriebsfunksysteme verwendet. Dies gilt für die europäischen Nachbarn in gleicher Form.

Der europäische Binnenmarkt und das Zusammenwachsen Europas bedingen einen steigenden internationalen Zugverkehr, der durch diese inkompatiblen Systeme be-

hindert wird. Die nationalen Triebwagen müssen mit mehreren Kommunikationssystemen ausgestattet sein. Daher wird unter Federführung der UIC die Entwicklung eines einheitlichen europäischen Betriebsfunksystems (*European train control system*, ETCS), vorangetrieben. Obwohl der GSM-Funkkanal nur für eine maximale Terminal-Geschwindigkeit von 250 km/h spezifiziert ist, haben Feldversuche gezeigt, daß auch bei Geschwindigkeiten von 300 km/h nicht mit nennenswerten Einschränkungen zu rechnen ist.⁵

Um den Anforderungen des UIC-Betriebsfunks zu genügen, müssen Gruppen- und Rundsenderufe mit schnellem Verbindungsaufbau in das GSM integriert werden. Ergänzt werden diese beiden Dienste durch eine aus dem ISDN abgeleitete Prioritätensteuerung. Die Spezifikationen der *Advanced Speech Call Items*, kurz ASCII, umfassen dementsprechend:

- *voice broadcast service* (VBS)
- *voice group call service* (VGCS)
- *enhanced multi-level precedence and pre-emption* (eMLPP)

Abbildung 3.4 zeigt das logische Konzept der Sprachdienste. Zur Verwaltung der Gruppen- bzw. Rundsenderufe werden spezielle Aufenthaltsbereiche (*group call area*, GCA) definiert. Die Speicherung der relevanten Daten Gruppenadresse, GCA und Entsender (*dispatcher*) übernimmt eine neu in das GSM integrierte Datenbank (*group call register*, GCR).

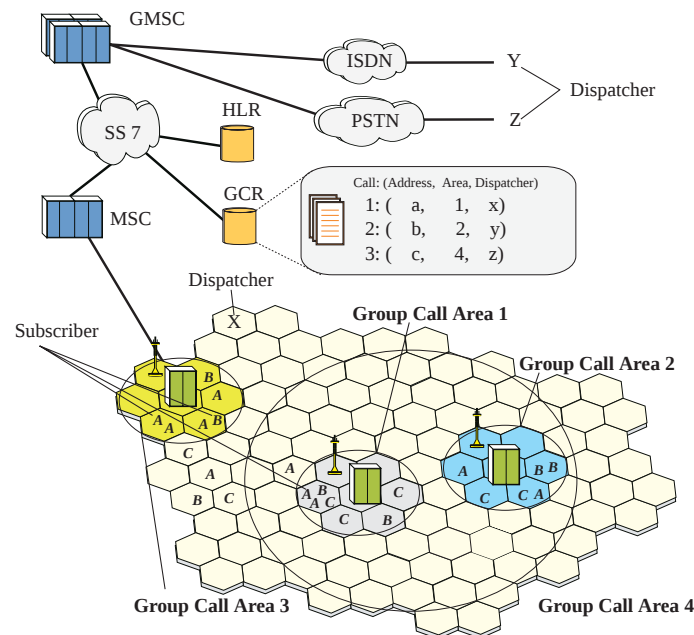


Abbildung 3.4: *Logisches Konzept der erweiterten Sprachdienste*

⁵Die Deutsche Bahn AG forciert Betriebsfunkaktivitäten unter dem Kürzel DIBMOF (dienstintegrierender Bahnmobilfunk) auf der sogenannten GSM-Rail Plattform, die $2 \times 4\text{ MHz}$ Spektrum bei 880 MHz europaweit zur Verfügung hat.

3.4.5.1 Voice Broadcast Service

Der Sprach-Rundsendedienst (*voice broadcast service*, VBS) ermöglicht Mobilfunk- und Festnetzteilnehmern, eine Nachricht an mehrere sogenannte „Zuhörer“ zu senden, vgl.[7, 20, 13]. Abbildung 3.5 zeigt den Verbindungsaufbau eines Rundsende-rufes, der von einer Mobilstation initiiert wird. Beim Aufbau werden die Identität der entsprechenden Zelle und die angeforderte Gruppenidentität zum GCR der zugehörigen MSC weitergeleitet.

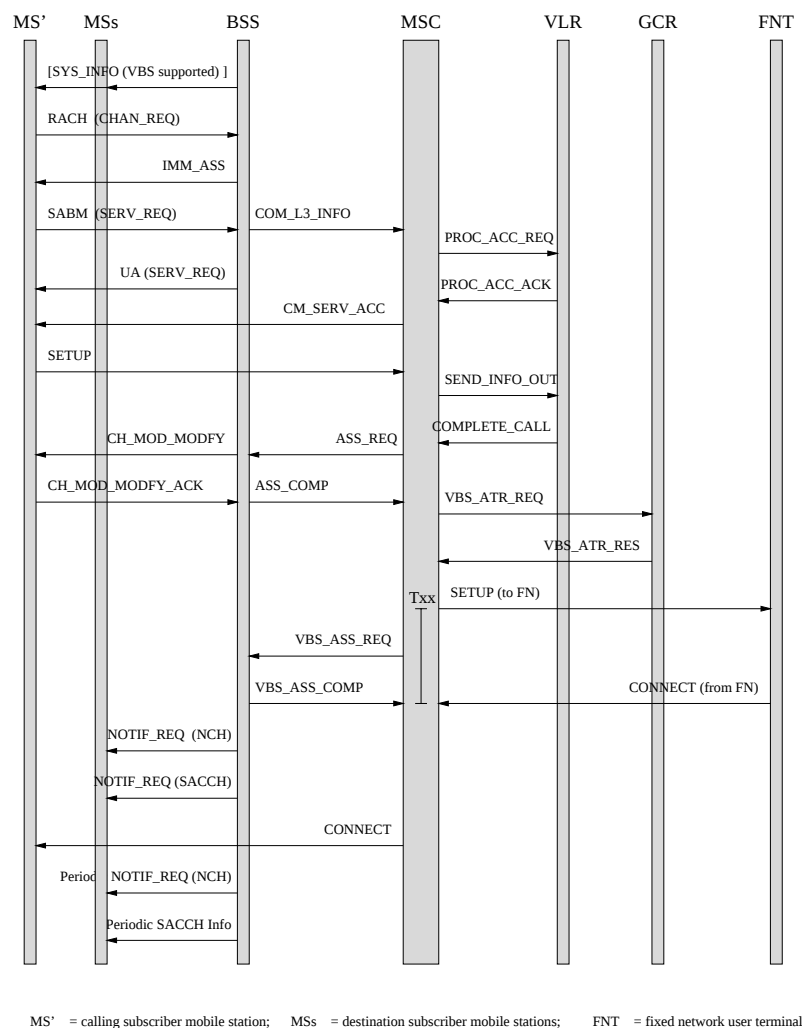


Abbildung 3.5: Verbindungsaufbau im Voice Broadcast Service

Bei einem aus dem Festnetz initiierten Ruf, vgl. Abbildung 3.5, wird die entsprechende Teilnehmer- und angeforderte Gruppenidentität zum GCR übertragen. Das GCR erzeugt für das verantwortliche MSC daraufhin eine Liste der Zellen, in denen der Ruf gemäß der Gruppenzusammensetzung und den Aufenthaltsorten der Gruppenmitglieder ausgestrahlt werden soll. Es leitet die Listen zu den betroffenen MSCs weiter. Diese instruieren die zugehörigen BSCs, einen „Rundsendekanal“ in jeder betroffenen Zelle einzurichten und auf einem neu definierten Signalisierkanal eine Rufbenachrichtigung (*notification*) auszusenden. Dieser Vorgang wird im Gegensatz

zum herkömmlichen GSM-Sprachgebrauch nicht als Funkruf (*paging*) bezeichnet, da die Mobilstationen nicht explizit angesprochen werden und auf die Rufbenachrichtigung nicht antworten. In der entsprechenden GSM-Empfehlung 08.58 [12] wurden die GSM-Steuerkanäle um diesen „Notification Common Control Channel“ (NCCH) erweitert.

Die Benachrichtigung wird in periodischen Abständen ausgesendet, bis der Ruf beendet worden ist. Mobilstationen, die die Rufbenachrichtigung erhalten, wechseln auf den angegebenen Rundsendekanal und hören den entsprechenden Downlink ab. Der Rufinitiator verweilt während des Rufes auf seinem dedizierten Kanal und beendet den Ruf, nachdem er seine Nachricht übermittelt hat.

Dementsprechend kann ein Rundsenderuf wie eine herkömmliche GSM-Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut und verwaltet werden, sieht man von der zusätzlichen Signalisierung zur Weiterleitung ab. Das bedeutet, daß im Falle eines anstehenden Zellwechsels keine zusätzlichen Handoverprozeduren erforderlich sind.

Dies gilt nicht für die am Rundsenderuf teilnehmenden Mobilstationen, für die jedoch die sogenannten „Idle Mode Cell Reselection“-Algorithmen verwendet werden können, vgl. [121].

Damit gewährleistet werden kann, daß eine Mobilstation nicht in eine Zelle wechselt, in der der Rundsenderuf nicht ausgestrahlt wird, werden in die obig angesprochene Liste nur Zellen aufgenommen, in denen der Ruf ausgesendet wird. Der notwendige Signalisierungsaufwand wird dadurch minimiert, daß den Teilnehmern lediglich die Frequenz der Signalisierkanäle der umgebenden Zellen mitgeteilt wird, auf denen die Rufbenachrichtigung gesendet wird. Die Mobilstationen müssen dann die entsprechenden Signalisierkanäle (NCCH) abhören, um den eigentlichen Rundsendekanal ermitteln zu können.

3.4.5.2 Voice Group Call Service

Der vom ASCI unterstützte Gruppenruf wird als „Voice Group Call Service“ (VGCS) bezeichnet, vgl. [8, 21, 17]. Der VGCS stellt einen Dienst zur Verfügung, der es Festnetz- oder Mobilstationen ermöglicht, einen Gruppenruf-Kanal aufzubauen, auf dem die Gruppenmitglieder nur hören oder auch übertragen können.

Nachdem der Rufinitiator seine Nachricht übermittelt hat, gibt er den Kanal frei und wechselt in den „Zuhörermodus“. Die Adressatengruppe des VGCS teilt sich wie beim VBS ein in

- Mobilstationen, die der Gruppe angehören und sich in einem vordefinierten geographischen Gebiet aufhalten, sowie
- eine festdefinierte Gruppe von Festnetzstationen.

Sobald keiner der Gruppenrufteilnehmer spricht, kann jeder der Teilnehmer die Zuweisung des Kanals beantragen. Bei erfolgreicher Zuweisung erhält er das Senderecht, bis er den Kanal freigibt und wiederum in den „Zuhörermodus“ wechselt.

Ein Rundsenderuf wird in der Regel explizit durch den Initiator beendet. Eine durch Störung unterbrochene Verbindung zwischen Initiator und Netz kann nicht direkt erkannt werden, da der Initiator während des Rufes im Zuhörermodus verweilen kann. Dies wird nur offensichtlich, falls eine Sprachpause definierter Länge eintritt, nach der der Gruppenruf automatisch vom Netz abgebaut wird. Somit erfordert der Rufabbau beim Gruppenruf eine Funktion zur Detektion von Sprachaktivität (*voice activity detection*, VAD).

Beim VGCS dient die Basisstation als Verteilstation. Auf dem Uplink übertragene Sprache wird auf dem Downlink rundgesendet. Um lästige Echo-Effekte zu vermeiden, wird der Downlink von der Mobilstation stumm geschaltet, sobald der Uplink benutzt wird. Falls mehrere Teilnehmer (mit entsprechender Subskription) gleichzeitig sprechen, wird die Stummschaltung aufgehoben, so daß jeder Sprecher eine unverständliche Überlagerung seiner Stimme und der der anderen hört. Dies wird als ausreichend angesehen, um den Sprecher in seinem Redefluß zu stoppen und zum Zuhören zu veranlassen, so daß keine weiteren technischen Mittel, wie z.B. Entzug der Sendeberechtigung spezifiziert sind.

Die Kanalvergabe ist derart geregelt, daß der Uplink zu jedem Zeitpunkt ausschließlich einem Benutzer zugewiesen wird. Zuständig für die Vergabe ist die für den Ruf verantwortliche MSC. Es ist jedoch auch die Möglichkeit einer schnellen Kanalzweisung durch die BSC der jeweiligen Zelle vorgesehen. Glaubt die BSC, daß der Uplink frei ist, vergibt sie den Kanal, sendet aber gleichzeitig eine Zuweisungsanforderung an die MSC. Hat die MSC den Kanal tatsächlich noch nicht vergeben, bleibt der Kanal zugewiesen. Andernfalls wird die Anforderung der BSC von der MSC zurückgewiesen, und die BSC muß daraufhin der Mobilstation den Kanal entziehen.

3.4.5.3 Prioritätensteuerung

Die Prioritätenstrategie der ASCII ist von dem im SS.7 verwendeten „Multi-Level Precedence and Pre-Emption“-Schema (MLPP) [146] abgeleitet und wird unter dem Namen „enhanced Multi-Level Precedence and Pre-Emption“ (eMLPP) in das GSM eingeführt werden, vgl. [4, 14, 15]. Während MLPP eine 5stufige Priorität definiert, sind für das GSM sieben Prioritätsklassen vorgesehen, vgl. Tabelle 3.3. Die MLPP-Prioritäten 0-4 entsprechen dabei den eMLPP-Prioritäten 0-4.

Zusätzlich zu diesen fünf Klassen sind für das GSM zwei weitere Klassen A und B festgelegt worden. Sie sind ausschließlich netzinternen Vorgängen vorbehalten, z. B. zur Konfiguration der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Gruppen- und Rundsenderufe VGCS und VBS.

Rufe mit Priorität A oder B können nur lokal, das heißt innerhalb des Versorgungsbereiches einer MSC benutzt werden. Wird eine solche Priorität global verwendet bzw. ein GSM-Ruf über ein ISDN-Netz geroutet, werden die Prioritätsklassen A und B der Priorität 0 zugeordnet.

Die einem Teilnehmer zugewiesene maximale Priorität wird, abhängig von der zu zahlenden monatlichen Grundgebühr, mit dem Dienstanbieter bei Vertragsabschluß

<i>Klasse</i>	<i>Verwendung</i>	<i>Rufunterbrechung</i>	<i>Bemerkung</i>
A	Betreiber	ja	höchste Priorität
B	Betreiber	ja	
0	Teilnehmer	ja	
1	Teilnehmer	ja	
2	Teilnehmer	nein	Standard-Priorität
3	Teilnehmer	nein	
4	Teilnehmer	nein	
			niedrigste Priorität

Tabelle 3.3: Die Prioritätsklassen im *eMLPP*

ausgehandelt und auf der SIM-Karte gespeichert.

3.4.6 HSCSD - der hoch-bitratige kanalvermittelte Datendienst

Der hoch-bitratige kanalvermittelte Datendienst (*high speed circuit switched data service*, HSCSD) basiert auf dem Konzept, einer Mobilstation innerhalb eines 200 kHz Frequenzkanals für die Dauer der Übertragung gleichzeitig mehrere Vollraten-Verkehrskanäle (TCH/F9.6) zuzuweisen, vgl. [153, 53].

Bei paralleler Nutzung aller 8 Zeitschlitz sind damit in Abhängigkeit von dem verwendeten Trägerdienst unter Voraussetzung GSM-konformer TCH/F9.6-Codierung Datenraten bis zu $76,8 \text{ kbit/s}$ erreichbar. Da eine parallele Nutzung von mehr als vier Kanälen jedoch aufwendige Sende- und Empfangseinrichtungen in den Mobilstationen erfordert, wird sich die Datenrate zwischen $9,6 \text{ kbit/s}$ und $38,4 \text{ kbit/s}$ bewegen. Im Standardentwurf ist die Anzahl vorläufig sogar auf zwei Kanäle und damit $19,2 \text{ kbit/s}$ begrenzt.

Trotz dieser Einschränkung könnten mit dem HSCSD höhere Datenraten erreicht werden, wenn man verschiedene durch Punktierung erzielbare Codierraten in Betracht zieht, vgl. Kapitel 7.

3.4.6.1 Logische Architektur

Im GSM sind die zur Datenübertragung notwendigen Funktionen hauptsächlich in der sogenannten Endgeräte-Anpassungsfunktion (*terminal adaptation function*, TAF) der MS sowie der Netzübergangsfunktion (*interworking function*, IWF) der MSC angesiedelt. Prinzipiell wird im HSCSD-Dienst diese funktionale Aufteilung beibehalten, vgl. Abbildung 3.6. Eine gleichzeitige Nutzung mehrerer Verkehrskanäle erfordert im wesentlichen nur eine zusätzliche „Splitting/Combining“-Funktionalität in den obigen Komponenten der MS bzw. MSC.

Aus logischer Sicht besteht zwischen MS und MSC lediglich *eine* Verbindung. Das Segmentieren und Wiederherstellen basiert daher auf einer fortlaufenden Numerierung der einzelnen Datenrahmen.

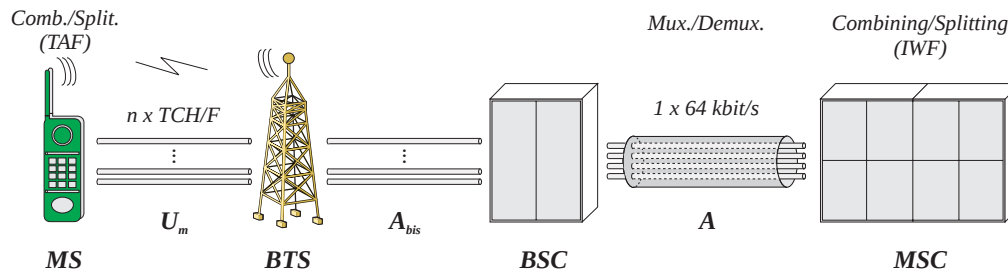


Abbildung 3.6: Architektur des HSCSD

Die an der Funkschnittstelle U_m verwendeten Zeitschlitz werden am A_{bis} -Bezugspunkt zwischen BTS und BSC transparent abgebildet. Am A-Bezugspunkt (bzw. E-Bezugspunkt zwischen zwei MSCs) werden die HSCSD-Kanäle dann auf eine oder mehrere 64 kbit/s Verbindungen gemultiplext. Ein Sub-Multiplexen vier 16 kbit/s Kanäle in einen 64 kbit/s Kanal) ist nicht vorgesehen.

3.4.6.2 Funkschnittstelle

An der Funkschnittstelle kann eine HSCSD-Verbindung konzeptionell aus bis zu 8 Verkehrskanälen bestehen (*multi-slot assignment*, MSA). Alle Kanäle einer HSCSD-Verbindung verwenden das gleiche Frequenzsprungverfahren und die gleiche Trainingssequenz. Aus Sicherheitsgründen ist jedoch eine separate Verschlüsselung pro Kanal vorgesehen. Wie erwähnt werden Kanalcodierung, Interleaving und Ratenadaptation der bestehenden Verkehrskanäle beibehalten, um den Implementierungsaufwand gering zu halten.

Jedem Teilkanal ist ein SACCH zugeordnet. Dies ermöglicht eine individuelle Sendeleistungssteuerung und verbessert den Interferenzpegel. Die zeitliche Ausrichtung erfolgt nach dem Zeitschlitz 0. Damit werden die *Idle*-TDMA-Rahmen im 26er Mehrfachrahmen nicht verwendet, so daß eine Synchronisierung mit den Nachbarzellen ermöglicht wird. Pro HSCSD-Verbindung existiert nur ein schneller beigeordneter Steuerkanal (*fast associated control channel*, FACCH). Dieser wird als Haupt-HSCSD-Teilkanal (*main HSCSD sub channel*, MHCH) bezeichnet.

3.4.6.3 Übertragung der Teilnehmerdaten

Im HSCSD-Dienst werden in Anlehnung an die bestehenden GSM-Trägerdienste sowohl ein transparenter als auch ein nicht-transparenter Trägerdienst unterstützt, vgl. Kapitel 2. Beim transparenten Dienst ist bei schwankender Bitfehlerhäufigkeit eine gleichbleibende Datenrate garantiert. Falls sie unter einen Schwellwert sinkt, kann die Anzahl der zugewiesenen Kanäle erhöht werden. Der nicht-transparente Trägerdienst garantiert im Gegensatz dazu eine gleichbleibende Bitfehlerhäufigkeit bei schwankendem Durchsatz.

3.4.6.4 Transparenter Trägerdienst

Der transparente Trägerdienst nutzt das ITU-T X.30/V.110-Protokoll [174], welches eine 3stufige Ratenanpassung an der Teilnehmerschnittstelle (R- und S-Schnittstelle) vorsieht.

Bezogen auf die Rahmenlänge ist die zeitliche Verschiebung der einzelnen HSCSD-Kanäle zwischen TAF und IWF unerheblich. In der Praxis können sich Datenrahmen, die auf unterschiedlichen Kanälen gesendet werden, nicht überholen. Dennoch muß sichergestellt werden, daß die richtige Reihenfolge der übertragenen Rahmen erkannt werden kann.

Der Status der am Netzübergang verwendeten V.24-Verbindung wird im GSM in den Statusbits SA, SB und X übertragen. Da im HSCSD-Dienst für eine logische Verbindung mehrere Teilkanäle verwendet werden, könnten die redundanten Statusbits zur Numerierung der Kanäle herangezogen werden, ohne die Wiederholrate des Statusbits pro Verbindung zu reduzieren. Ein extra Bit kann für eine „modulo 2“-Numerierung innerhalb der Teilkanäle verwendet werden, um Probleme, die durch die zeitliche Verschiebung der Teilkanäle entstehen können, zu vermeiden. Ratena-daption für Datenraten, die keine Vielfachen von 9.6 kbit/s sind, kann durch eine entsprechende Anzahl von Füllbits in den letzten vier V.110-Rahmen erfolgen.

3.4.6.5 Nicht-transparenter Trägerdienst

Der nicht-transparente HSCSD-Trägerdienst basiert wie der entsprechende GSM-Trägerdienst auf dem RLP-Protokoll, vgl. Kapitel 2. Das Konzept des Dienstes sieht vor, daß eine RLP-Instanz alle Teilkanäle verwaltet, vgl. Abbildung 3.7. Da dadurch die Numerierung auf nur einem Sende- und Empfangsfenster beruht, können auf den Teilkanälen beliebige RLP-Rahmen versendet werden.

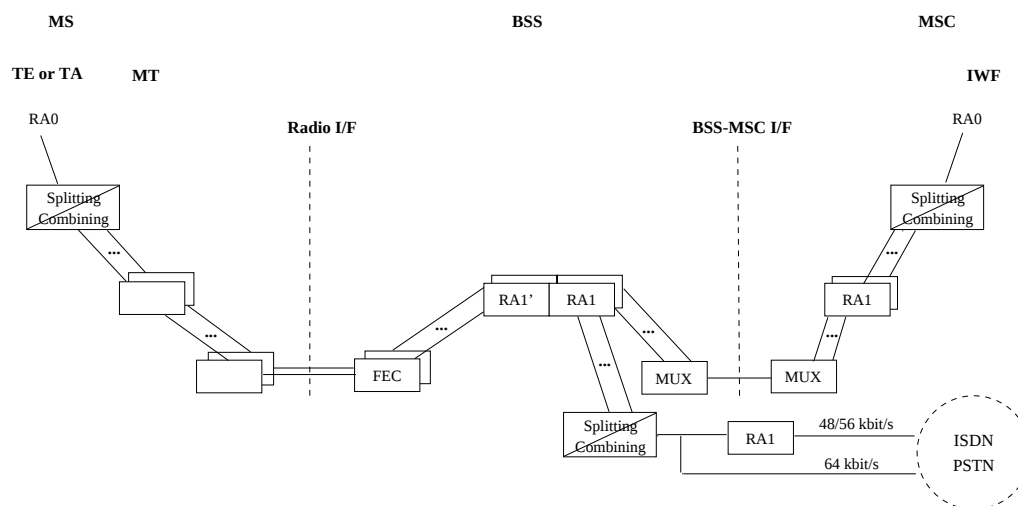


Abbildung 3.7: *Der nicht-transparente Trägerdienst im HSCSD*

Für das herkömmliche RLP ist eine maximale Fenstergröße von 61 vorgegeben. Zur Numerierung der Sende- bzw. Empfangs-Rahmen reichen jeweils 6 bit. Im nicht-transparenten HSCSD-Dienst können einer RLP-Instanz maximal 8 Verkehrskanäle zugeordnet werden. Zur Verwaltung des Sende- bzw. Empfangsfensters muß der mögliche Adreßraum entsprechend vergrößert werden. 6 zusätzliche Bits im RLP-Header werden zur Verwaltung des Sende-/Empfangsfensters benötigt. Dies impliziert eine Verringerung der Datenrate um 3%.⁶

3.4.6.6 Pseudo-asymmetrische Übertragung

Für den nicht-transparenten Trägerdienst ist ein pseudo-asymmetrischer Übertragungsmodus vorgesehen. Durch diesen Modus sind Mobilstationen mit halbduplexfähigen Sende-/Empfangseinrichtungen in der Lage, im Multi-Slot-Modus zu empfangen, aber im Single-Slot-Modus zu senden. Dadurch wird zumindest auf dem Downlink eine höhere Datenrate ermöglicht. Die Mobilstation entscheidet, welche der zugewiesenen Unterkanäle in Uplink-Richtung belegt werden und welche frei bleiben. Im Netz werden die Rahmen wie beim diskontinuierlichen Übertragungsmodus (*discontinuous transmission mode*, DTX) als ungenutzte Rahmen betrachtet und von der IWF verworfen. Im Standard zwar nicht spezifiziert, können die nicht-genutzten Zeitschlitzte dennoch - erweiterte Signalisierung vorausgesetzt - anderen Diensten zur Verfügung gestellt werden.

3.4.6.7 Signalisierung

Ein grundlegendes Problem des HSCSD-Dienstes liegt in der erhöhten Blockierwahrscheinlichkeit, die sich aufgrund der parallel genutzten Verkehrskanäle ergibt. Obzwar sich das Problem nicht beseitigen läßt, wird durch Einführung des sogenannten „Flexible Bearer Services“-Konzepts (FBS) versucht, der erhöhten Blockierwahrscheinlichkeit entgegenzuwirken.

Im bestehenden GSM existiert für jede Datenrate ein Trägerdienst. Mit der Einführung des HSCSD-Dienstes werden, je nach Konfiguration, verschiedene variable Datenraten realisierbar. Für jede mögliche Datenrate einen weiteren Trägerdienst zu definieren, ist nicht sinnvoll. Daher wird die Datenrate im HSCSD-Dienst lediglich als Dienstgüteparameter betrachtet. Das FBS sieht eine gewünschte und eine erforderliche Datenrate (*desired number of channels*, DNC, und *required number of channels*, RNC) vor. Die gewünschte Datenrate stellt das Maximum dar, wohingegen die erforderliche Datenrate die minimale Datenrate vorgibt, die notwendig ist, um die von der Anwendung vorgegebene Dienstgüte einzuhalten.

In Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Funkkanälen kann einer Mobilstation jede Datenrate zwischen gewünschter und erforderlicher Datenrate zugewie-

⁶Da nicht jeder RLP-Rahmen das Statusbyte der Schicht-2 Brückenfunktion (*layer 2 relay*, L2R) verwenden muß, könnte bei entsprechender Verwendung der ungenutzten Statusbytes als Datenbyte die maximale Datenrate eines Teilkanals von 9.6 kbit/s beibehalten werden.

sen werden. Insbesondere beim Handover verspricht dieses Konzept eine geringere Blockierrate.

Wenn während eines Handovers die Zielzelle nicht über genügend freie Kanäle verfügt, kann mit dem FBS-Konzept die Übertragung aufrechterhalten werden, solange Ressourcen zur Verfügung stehen, die über der erforderlichen Datenrate liegen. Im Überlastfall kann die Anzahl der Blockierungen verringert werden, da bis zur minimalen Datenrate Ressourcen freigegeben werden können. Die beiden Parameter werden bei der Verbindungseinrichtung in der Verbindungsaufbau-Nachricht (*set-up message*) übertragen. Dazu wird das sogenannte „Bearer Capability Element“ (BCE) entsprechend erweitert. Bei einer Übertragung mit fester Datenrate haben die Parameter für gewünschte und maximale Datenrate den gleichen Wert. Zusätzlich zu diesen beiden neuen Parametern müssen im BCE die Eigenschaften der Mobilstation bzgl. ihrer MSA-Fähigkeit und der unterstützten Kanalcodierung übermittelt werden.

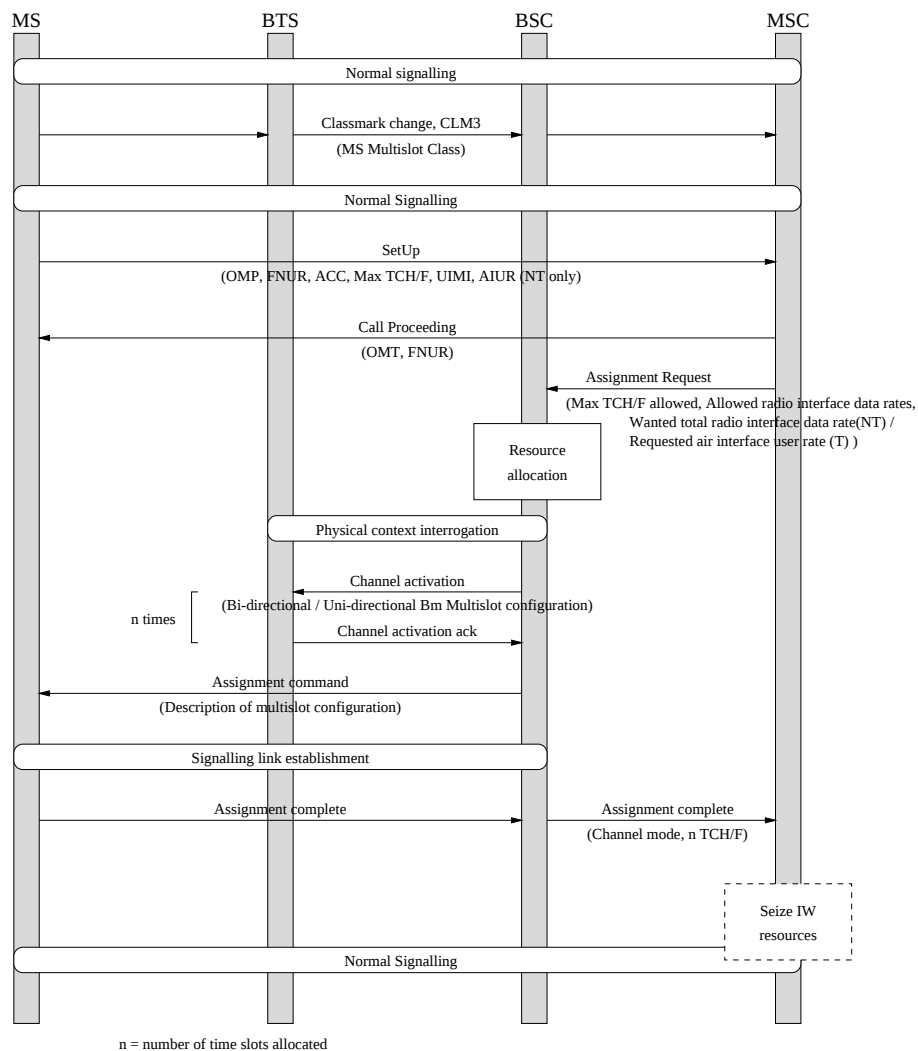


Abbildung 3.8: Verbindungsaufbauprozedur im HSCSD

In Abbildung 3.8 ist die Verbindungsaufbauprozedur dargestellt. Nach dem Emp-

fang der *Set-Up*-Nachricht wird von der MSC eine modifizierte *Assignment Request*-Nachricht zur BSC geschickt. Diese beinhaltet im *Message Content Element* eine Liste der Kanäle an der A-Schnittstelle. Die Parameter *DNC* und *RNC* werden zu dem *Channel Type Element* zugefügt. Bevor diese Nachricht abgeschickt wird, reserviert die MSC die erforderliche Kapazität. Falls die erwünschte Anzahl der Funkkanäle nicht zugewiesen werden kann, wird eine *Channel Update*-Prozedur zwischen MSC und BSC verwendet, um die Anzahl der Ressourcen an der A-Schnittstelle anzupassen.

Für alle Unterkanäle ist eine separate *Channel Activation*-Nachricht notwendig, bevor die ausgewählte Kanalkonfiguration und Information über die Kanalcodierung in der *Assignment Command*-Nachricht zur MS weitergeleitet werden. In dieser Nachricht zeigt der Zeitschlitz-Nummer-Parameter auf den ersten der aufeinanderfolgenden zugewiesenen Zeitschlitz. Das *Channel Description Element* nimmt die Anzahl der Zeitschlitz auf.

3.5 Qualitative Bewertung der Dienste

Die in diesem Kapitel im Überblick vorgestellten Konzepte zur Erweiterung des GSM-Dienstspektrums zeigen, daß vielfältige Ansätze bestehen, die sich in ihren Eigenschaften und möglichen Anwendungsgebieten stark unterscheiden.

Kriterien, die aus Betreibersicht für eine Bewertung herangezogen werden können, sind der Realisierungsaufwand, die Interaktion mit anderen im Mobilfunknetz angebotenen Diensten, der effiziente Umgang mit den Funkkanalressourcen sowie die mögliche Dienstgüte. Diese bestimmt letztendlich, welche Anwendungen unterstützt werden können. In Tabelle 3.4 sind die Eigenschaften der neuen Dienste zusammengetragen.

<i>Dienst</i>	<i>Aufwand</i>	<i>Effizienz</i>	<i>Spektrum</i>	<i>Dienstgüte</i>	<i>Kompatibilität</i>
ASCI	o	+	-	o	-
HSCSD	o	o	o	-	-
UUS	-	-	-	-	+
PDS	-	-	o	-	+
FMBS	o	o	o	+	-
GPRS	+	+	+	+	-

Tabelle 3.4: *Eigenschaften der Konzepte im Vergleich*

+: hoch *o*: mittel *-*: gering

Für die Endnutzer sind technischer Aufwand und andere systeminterne Gesichtspunkte dahingegen belanglos. Welche Dienste und Transitnetze zur Realisierung der gewünschten Anwendungen und Dienstgüte verwendet werden, bleibt dem End-

nutzer verborgen. Relevant sind die Kosten des Dienstes bzw. des Endgerätes in Abhängigkeit eines gewünschten flexiblen Dienstprofils und der Transparenz des Gebühren- und Abrechnungsmechanismus.

Mit den *UUS*- und *PDS*-Dienstern sind nur geringe Übertragungsraten möglich, die unterhalb der bisher im GSM definierten Datendienste liegen, vgl. Tabelle 3.2. Der Anwendungsbereich ist auf den sporadischen Austausch kleiner Datenmengen zwischen zwei Teilnehmern beschränkt. Zur Implementierung beider Dienste sind nur geringfügige Softwareänderungen notwendig.

Da der *HSCSD*-Dienst direkt auf den bestehenden kanalvermittelten GSM-Datendiensten aufbaut, liegen auch hier die primären Änderungen in einer Erweiterung der Software. Durch die dynamische Verwaltung der einer Mobilstation zugeordneten Kanäle ist zwar eine variable Datenrate möglich, die Nachteile liegen aber in einer unverändert schlechten Ausnutzung der Ressourcen. Zudem sind Prioritäten, Mehrpunkt-Kommunikation und datenvolumenabhängige Gebührenerfassung nicht vorgesehen.

Hardwareänderungen z. B. im Endgerät sind an die Anzahl der gleichzeitig nutzbaren logischen Kanäle gebunden und schränken die maximale Übertragungsrate ein. Die erwarteten Anwendungen sind Übertragung von Daten und Faximiles über Modems und der Transfer langer Datensätze (u. a. auch Bildübertragung).

Die Integration eines Paket-Datendienstes (*GPRS*) stellt den umfassendsten Ansatz dar, das Anwendungsspektrum zu erweitern. Die weitgehend neu zu implementierende Funktionalität bedingt weitreichende Systemänderungen, gewährleistet aber die beste Umsetzung der Dienstgüteanforderungen.

Das aus dem ISDN entlehnte Konzept, ein Frame-Relaying in Verbindung mit virtuellen Verbindungen in das GSM einzuführen, führt im wesentlichen zu Anpassungen in der Signalisierungssoftware. Ohne einen Mechanismus zum beschleunigten Verbindungsaufbau fallen die möglichen Vorteile der Paketvermittlung weg.

Durch die getrennte Behandlung von Signalisierung und Datenübertragung ist eine Prioritätensteuerung in Verbindung mit einer flexiblen Dienstprofil-Strategie und einer volumenabhängigen Abrechnung anwendbar. In diesem Zusammenhang können auch variable Datenraten mit effizienter Ausnutzung der Ressourcen durch Multiplexen unterstützt werden.

GPRS — der zukünftige Paketdatendienst im GSM

Die Hauptintention des zukünftigen GSM Paketdatenfunkdienstes GPRS ist, im Vergleich zu den existierenden *Phase-2*-Dienstern, durch eine effiziente Nutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes die Anzahl der tragbaren Verbindungen pro Träger zu erhöhen. Eine dynamische Zuweisung mehrerer Zeitschlitzte einer Trägerfrequenz soll variable Übertragungsraten ermöglichen, die deutlich über der maximalen Übertragungsrate der bisherigen Datendienste von 9.6 kbit/s liegen.

Zur Unterstützung neuer Anwendungen mit variablen Dienstgüteparametern sieht das Konzept theoretisch Datenraten von bis zu 170 kbit/s vor, die einer Kommunikationsbeziehung je nach Bedarf zugeordnet werden können. Beeinflußt wird diese Zuweisung von der aktuellen Lastsituation im Netz, der Signalqualität, dem Dienstprofil des Teilnehmers und der Ausführung der Mobilstation. In der Praxis wird die ISDN-Nutzdatenrate von 64 kbit/s bzw. allenfalls 128 kbit/s nicht überschritten werden und „High-End“-Geräten vorbehalten sein, vgl. [53].

4.1 Allgemeine Dienstmerkmale

Ein wesentlicher Gesichtspunkt für die Einführung des neuen Dienstes ist die erwartete Akzeptanz der Mobilfunkteilnehmer, die neben der Dienstgüte insbesondere von der Preisgestaltung der Dienstanbieter abhängt. Marktforschungen haben ergeben, daß Datenübertragungen mittelfristig nicht wesentlich mehr als 10 % des Gesamtvolumens einnehmen werden. Preiswert kann der Dienst aber nur dann angeboten werden, wenn die Entwicklungskosten in einem Rahmen bleiben, der einen absehbaren Amortisationszeitpunkt erlaubt.

Daher war eine Entwicklungsprämisse, die bestehenden GSM-Systemkomponenten so moderat wie möglich zu verändern und den neuen Dienst unter Berücksichtigung der Konzepte der vorhandenen Tele- und Trägerdienste zu entwickeln.

Aus marktpolitischen Gründen werden Dienstanbieter jedoch ungeachtet des Entwicklungsaufwandes und spezifischen Amortisationszeitpunktes nicht umhin können, einen leistungsstarken Paketdatendienst anzubieten. Die Präsenz im Markt ist unverzichtbar, um neue Kunden zu werben bzw. alte zu halten, die in den traditionellen Marktsegmenten einen Gewinn erwirtschaften.

Dies bedingt, daß mit GPRS ein Dienstspektrum realisiert wird, welches sich von den bestehenden GSM-Diensten abhebt und parallel zu diesen angeboten wird. Eine Duplizierung ist nur in Einzelfällen sinnvoll. Aus diesen Gründen wird auch die

Möglichkeit, mittels GPRS paketierte Sprache zu übertragen, vom Standardisierungsgremium ausgeschlossen und ist in der bisherigen Spezifikation nicht berücksichtigt.¹ Da die Übertragung langer Pakete in paketorientierten Systemen den effektiven Bündelungsgewinn reduziert und die Blockierrate erhöht, liegt der Arbeitsbereich des Dienstes primär in einer

- häufigen, regelmäßigen Übertragung kleiner Datenmengen bis zu 500 *byte* sowie
- einer unregelmäßigen Übertragung kleiner bis mittlerer Datenmengen bis zu mehreren kbyte.

Obwohl zur Übertragung größerer Datenmengen in den unteren Protokollschichten der GPRS-Funkschnittstelle Segmentierungsfunktionen unterstützt werden, sind solche Anwendungen eher in den Kontext des im vorherigen Kapitel vorgestellten HSCSD-Dienstes anzusiedeln.

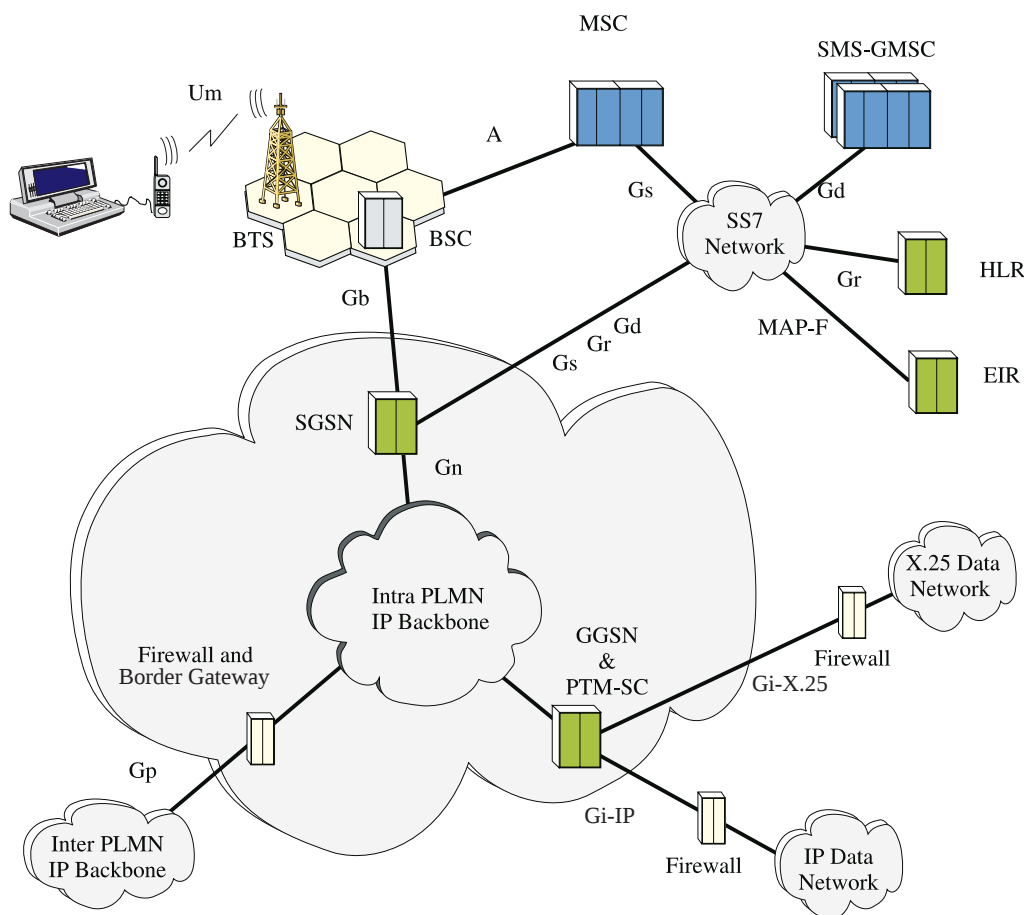


Abbildung 4.1: Die logische Architektur des GPRS

GPRS unterstützt eine rein paketorientierte Datenübertragung, d. h. keine der involvierten Netzressourcen wird in einem leitungvermittelten Modus betrieben. Dies

¹Grundsätzlich kann Sprache unter Qualitätseinbußen, die durch die immanente Zeitsensitivität der Sprachübertragungen bedingt sind, paketorientiert übertragen werden. Untersuchungen hierzu sind u. a. in Zusammenhang mit dem „Packet Reservation Multiple Access“-Protokoll (PRMA) durchgeführt worden [70, 86].

erlaubt einen weitgehend autonomen Betrieb des Dienstes und minimiert die Interaktionen mit den bestehenden GSM-Netzkomponenten. Die unabhängige Wegewahl und Paketweiterleitung innerhalb des GPRS-PLMN stützt sich auf neue logische Netzknoten (*GPRS support nodes*, GSN), vgl. Abbildung 4.1 und Abschnitt 4.2.

Durch GPRS-spezifische Gateways (*Border Gateways*, BG), die abhängig von der Existenz eines Roaming-Abkommens der Netzbetreiber zwischen zwei GSM-Mobilfunknetzen installiert werden, wird für die Endnutzer ein größtmöglicher Freiheitsgrad in Bezug auf die Dienste-Mobilität gewährleistet. Die Nutzung GPRS-basierter Anwendungen wird somit auf nationale und auch internationale Netze verschiedener Betreiber ausgedehnt.

Vor dem Hintergrund der geforderten Anpassungsfähigkeit an die aktuelle Lastsituation ist die eigentliche Datenübertragung logisch von der Art und Anzahl der physikalischen Kanäle entkoppelt. Der generelle Ansatz, den Paketdatendienst in den GSM-Standard zu integrieren, besteht darin, aus dem Pool der vorhandenen physikalischen GSM-Kanäle bestimmte Kanäle für den Paketdatendienst zu reservieren und diese logisch zu unterteilen. Die Anzahl der für GPRS reservierten Kanäle wird dynamisch an das Verkehrsaufkommen der jeweiligen Zelle angepaßt. Über den GSM-Rundsendesteuerkanal BCCH wird den mobilen Teilnehmern angezeigt, ob und auf welchen Trägerfrequenzen der GPRS-Dienst in einer Zelle angeboten wird. So können bis zu acht logische Verkehrskanäle pro Trägerfrequenz dem Endbenutzer für Paketdatenübertragung zur Verfügung gestellt werden.

Da Mobilstationen, die eine solche parallele Nutzung unterstützen, durch den höheren Aktivitätsanteil ihrer Sende-/Empfangseinrichtung mitunter einen höheren Leistungsverbrauch aufweisen, sieht das Mobilitätskonzept eine netzplangebundene Gruppierung der Mobilstationen vor. Die auf sogenannte „Routing Areas“ (RA) bezogene Einteilung bewirkt, daß die Anzahl der Kanäle reduziert werden kann, die die Mobilstationen auf für sie relevante Signalisierungsinformation abhören müssen. In zyklischen Abständen werden nur diese Kanäle abgehört, während in der restlichen Zeit die Mobilstationen in einer Art Schlafzustand verharren können. Die Einteilung des Netzes in RAs vereinfacht zudem die für die Effizienz des Dienstes wesentliche Aufenthaltsverwaltung und Paketweiterleitung. Zur Minimierung des Leistungsverbrauchs ist ferner eine Sendeleistungsanpassung vorgesehen, die sich günstig auf den Interferenzpegel auswirkt.

4.1.1 Diensttypen

Ein PLMN-Betreiber ist verantwortlich für die Datenübertragung zwischen dem jeweiligen Dienstzugangspunkt im Festnetz und dem in der Mobilstation. Zwei Dienstkategorien sind vorgesehen:

- Punkt-zu-Punkt (*point to point*, PTP)
- Punkt-zu-Mehrpunkt (*point to multipoint*, PTM)

Mit dem PTP-Dienst können einzelne Nachrichtenpakete zwischen zwei Teilnehmern übertragen werden. Der PTP-Dienst wird sowohl im verbindungsorientierten Modus

(*connection-oriented network service*, CONS) als auch verbindungslos (*connection-less network service*, CLNS) angeboten. Die auf den PTP-Dienst aufsetzenden Anwendungen können bezüglich ihrer Kommunikationseigenschaften klassifiziert werden in:

- *nicht-interaktiv*
- *interaktiv bzw. dialogorientiert*

Im ersten Falle besteht keine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Datenpaketen, wohingegen beim Dialogverkehr für eine bestimmte Zeitdauer eine logische Beziehung zwischen den dienstbenutzenden Teilnehmern existiert, die sich von einigen Sekunden bis zu mehreren Stunden erstrecken kann.

Der PTM-Dienst unterstützt die Übertragung von Datenpaketen zwischen einem Dienstbenutzer und einer von ihm spezifizierten Gruppe innerhalb einer bestimmten geographischen Region. Er ist unterteilt in einen

- Multicast-Ruf (*point to multipoint – multicast*, PTM-M) und einen
- Gruppenruf (*point to multipoint – group call*, PTM-G)

Unter der Multicast-Mehrpunktkommunikation werden Rufe zusammengefaßt, die im gesamten vom Rufinitiator definierten Gebiet ausgesendet werden, wobei entweder alle Teilnehmer oder nur eine Gruppe adressiert sind. Beim Gruppenruf sind die Nachrichten ausschließlich an eine spezifische Gruppe adressiert und werden nur in Gebieten ausgesendet, in denen sich Gruppenmitglieder aufhalten.

Zusätzlich zu diesen beiden Mehrpunktdiensten ist vorgesehen, den „Internet Multicast“-Dienst (*IP multicast*, IP-M) gemäß RFC 1458 zu unterstützen [100]. Der IP-M-Dienst unterscheidet sich vom PTM-M-Dienst darin, daß für den Aufenthaltsort der adressierten Gruppenmitglieder keine geographische Beschränkung existiert und die Kommunikation gesichert Ende-zu-Ende über TCP²-Verbindungen abläuft. Aus Tabelle 4.1 wird ersichtlich, daß die Dienste mit Ausnahme des PTM-M-Dienstes sowohl aus dem Mobilfunknetz (*mobile originated call*, MO-call) als auch vom Festnetz aus (*mobile terminated call*, MT-call) initiiert werden können.

<i>Informationsfluß</i> \ <i>Diensttyp</i>	<i>Punkt-zu-Punkt</i>		<i>Punkt-zu-Mehrpunkt</i>		
	PTP-CONS	PTP-CLNS	PTM-M	PTM-G	IP-M
<i>Festnetz – Mobilstation</i>	x	x	x	x	x
<i>Mobilstation – Mobilstation</i>	x	x	x	x	x
<i>Mobilstation – Festnetz</i>	x	x	–	x	x

Tabelle 4.1: *Beziehung zwischen Diensttyp und Dienstanforderer/-empfänger*

²Transmission Control Protocol

4.1.2 Parallele Dienstbenutzung und Kompatibilitätsaspekte

Durch das Einrichten von GPRS-Sitzungen können mehrere GPRS-Anwendungen parallel ablaufen, z. B. im Hintergrund und über einen längeren Zeitraum. Während dieser Sitzungen kann nur eingeschränkt parallel kommuniziert werden. Zum einen sind GPRS-Sitzungen nur für PTP-Kommunikation definiert, zum anderen können bei laufender Sitzungen zusätzlich nur nicht-dialogorientierte Anwendungen gestartet werden.

Parallel zu einer GPRS-Sitzung können kanalvermittelte Rufe (Sprache und Daten) initiiert und empfangen werden. Ebenso ist es umgekehrt möglich, z. B. während eines Telefongesprächs, GPRS-Daten zu senden bzw. zu empfangen. Die gleichzeitige Benutzung dieser Dienste bedingt aber je nach Lastaufkommen und Dienstgüte eine Reduktion der GPRS-Transferraten oder sogar eine Verbindungsauslösung.

Kanal- und Paketvermittlung werden koordiniert, indem eine logische Assoziation zwischen der GSM-Mobilvermittlungsstelle und dem GPRS-dienstunterstützenden Netzknoten unterhalten wird: durch einen zyklischen Austausch mobilstationspezifischer Mobilitätsdaten werden Informationen über Aufenthaltsbereich und Wegwahlinformation abgeglichen. Dies ermöglicht eine kombinierte Einbuchung des Teilnehmers in das Netz für konventionelle GSM- und GPRS-Dienste. Weiterhin kann dadurch eine im GPRS eingebuchte MS über einen ankommenden kanalvermittelten Ruf informiert werden (sog. „Paging“).

Zusätzlich ist es möglich, den GSM-Kurznachrichtendienst SMS zu nutzen. Dazu ist die SMS-Dienstzentrale (*SMS service centre*, SMS-SC) über eine Signalisierungsleitung mit dem Netzknoten verbunden, der für die GPRS-Rufweiterleitung innerhalb eines PLMN zuständig ist. Die SMS-Nachricht wird jedoch je nach Lastsituation verzögert oder mit einer niedrigeren Datenrate übertragen. Im Rundsende-Modus darf der SMS dahingegen zwar gleichzeitig mit GPRS-Diensten, jedoch nicht mit einem kanalvermittelten Ruf genutzt werden.

4.1.3 Dienstgüte

Innerhalb des GPRS sind verschiedene Dienstprofile vorgesehen, die anhand der Dienstgüteparameter *QoS-Klasse* und *Durchsatz* bestimmt werden. Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die definierten Dienstgüteklassen und deren Verzögerungseigenschaften.

Die Verzögerung eines Paketes ist als die Zeitspanne der Übertragung zwischen den GPRS-Dienstzugangspunkten definiert. Verzögerungen, die außerhalb des Systems, z. B. durch Transitnetze, entstehen, bleiben unberücksichtigt. Neben der Dienstgütekategorie können der maximale Durchsatz (*peak bit rate*) sowie der mittlere Durchsatz (*mean bit rate*) in *bit/s* vereinbart werden.

Die Verwaltung dieser QoS-Parameter fällt in das Aufgabengebiet der Funkbetriebsmittelverwaltung und wird durch Einsatz von Kanalzuteilungsalgorithmen mit Prioritätensteuerung gelöst, vgl. Kapitel 9.

<i>Paketlänge</i> <i>QoS-Klasse</i>	<i>128 byte</i>		<i>1024 byte</i>	
	<i>Mittl. Verz.</i>	<i>95%</i>	<i>Mittl. Verz.</i>	<i>95%</i>
<i>1 (prädiktiv)</i>	0.5 s	1.5 s	2 s	7 s
<i>2 (prädiktiv)</i>	5 s	25 s	15 s	75 s
<i>3 (prädiktiv)</i>	50 s	250 s	75 s	375 s
<i>4 (best effort)</i>	<i>unbestimmt</i>			

Tabelle 4.2: *Dienstgüteparameter*

Datendienste verlangen generell eine geringe Restfehlerwahrscheinlichkeit. Fehlerhafte Daten sind in der Regel unbrauchbar, wohingegen sich fehlerhaft übertragene Sprache hauptsächlich in einem subjektiv schlechteren Empfangseindruck niederschlägt. Im Gegensatz zu den oben erwähnten Dienstgüteparametern sind die Anforderungen an die Restfehlerwahrscheinlichkeiten daher fest vorgegeben.

Beim Gruppenruf sind für doppelte, verlorengegangene oder in der falschen Reihenfolge ankommende Pakete Fehlerwahrscheinlichkeiten von 10^{-9} definiert. Als Grenze für die Restfehlerhäufigkeit des Multicast-Dienstes ist 10^{-5} festgelegt.

Gewährleistet werden die Fehlerwahrscheinlichkeiten durch Einsatz von Fehlerkorrektur- und Wiederanforderungsverfahren, die von den bestehenden Mechanismen des GSM abgeleitet sind, vgl. Kapitel 2.

Die variable Dienstgüte ist mit dem Dienstprofil eines Teilnehmers korreliert, welches sich aus den abonnierten Basis-, Zusatz- und Paketdatenfunkdiensten gemäß dreier Teilnehmerklassen zusammensetzt:

- *Klasse A*: Gleichzeitige Benutzung aller Dienste gemäß Dienstprofil bei gleichbleibender Sprachqualität
- *Klasse B*: Eingeschränkte gleichzeitige Benutzung von Diensten mit verminderter Durchsatz bei geringerer Sprachqualität
- *Klasse C*: Keine gleichzeitige Benutzung von Diensten³

Im Gegensatz zum bestehenden GSM basiert die Verwaltung des GPRS-Dienstprofils (*GPRS service profile*, GSP), vgl. Abbildung 4.2, auf dem Konzept des sogenannten „Multiple Subscriber Profile“ (MSP) und ist somit dienstspezifisch, d. h. ein Teilnehmer kann jeden abonnierten Dienst separat aktivieren.

Jeder Teilnehmer kann für verschiedene Betreiber unterschiedliche MSPs abonnieren, die über ein Paßwort geschützt sind und sich in Basisdienste und GPRS-Dienste unterteilen. Zusatzdienste werden über einen „Aktivierungsstatus für jeden MSP und

³Für die Teilnehmerklasse C ist jedoch die Möglichkeit vorgesehen, SMS-Nachrichten jederzeit empfangen zu können.

abonnierten Dienst getrennt verwaltet. Die Zuordnung des Dienstprofils und der abonnierten Zusatzdienste erfolgt anhand der IMSI.

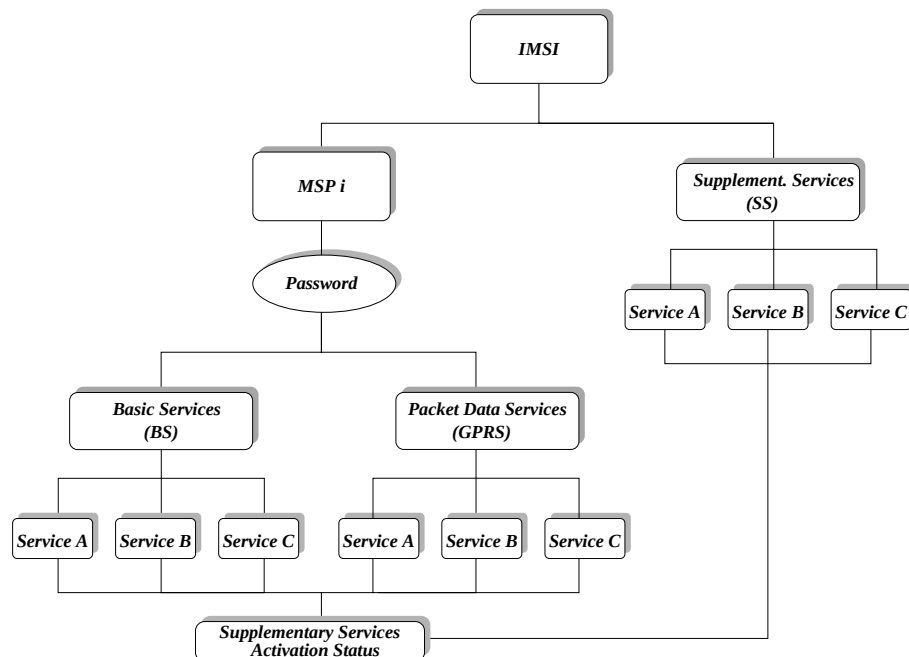


Abbildung 4.2: Konzept des Dienstprofils im GPRS

Die Gebühren setzen sich aus monatlichen Grundgebühren und verkehrsbezogenen Gebühren als Funktion der Datenmenge und des angeforderten Diensttyps zusammen. Die Methoden zur Gebührenerfassung sind bis dato nicht ausgearbeitet. Sie lassen sich aber von den in bestehenden Paketdatennetzen (*packet data network*, PDN) verwendeten Techniken ableiten, die einfache Zählverfahren und statistische Auswertemethoden umfassen.

4.1.4 Sicherheitsaspekte

Innerhalb eines GPRS-Netzes erwächst durch die große Anzahl der Zugangspunkte in Kombination mit der Anbindung an öffentliche Datennetze wie dem Internet ein höheres potentiell Sicherheitsrisiko in Bezug auf Lauschangriffe und nichtauthorisierten Netzzugang.

Um das Netz wirksam gegen Mißbrauch durch unbefugte Personen auf Kosten anderer Teilnehmer und gegen Abhören der Funkdaten zu schützen, verfolgt das GPRS-Konzept einen dem GSM vergleichbaren Ansatz.

Sicherheit zwischen den Netzkomponenten wird durch Authentifizierung, Verschlüsselung und den Einsatz von sogenannten „Firewalls“⁴ gewährleistet. Die Daten werden aber nicht wie im GSM nur zwischen MS und BSS sondern bis zum

⁴Als Firewall bezeichnet man einen Rechner, in dem spezielle Netzzugangskontrollfunktionen implementiert sind.

SGSN gesichert. Vertraulichkeit der Teilnehmerdaten fußt u. a. auf einer temporären Identität, die auf Ebene der logischen Verbindungssteuerung verwaltet wird.

4.2 Logische Architektur

4.2.1 Funktionaler Aufbau

Die existierenden GSM-Mobilfunknetze bieten keine ausreichende Funktionalität, mit der ein Paketdatendienst realisiert werden könnte. Die in Kapitel 2 eingeführte GSM-Struktur wird für den Paketdatendienst daher um mehrere logische Einheiten erweitert, vgl. [52].

- *gateway GPRS support node* (GGSN)
- *serving GPRS support node* (SGSN)
- *GPRS register* (GR)
- *point to multipoint service centre* (PTM-SC)

Obwohl das Konzept zur mobilen Erweiterung des Internet (*mobile IP*, M-IP) die Anforderungen des GPRS – hauptsächlich wegen der fehlenden Kompatibilität zu anderen Paketdatennetzen wie X.25 – nicht 100 %ig erfüllt, können GGSN und SGSN als funktionale Entsprechungen der „Home Agents“ und „Foreign Agents“ des M-IP angesehen werden, vgl. hierzu [125, 135].

Analog zur GMSC dient der GGSN als Zugangspunkt zu externen Netzen. Hier werden Vermittlungsfunktionen wahrgenommen, wie z. B. die Auswertung der Adressen der jeweiligen Paketdatenprotokolle (PDP) oder der Aufbau einer Relation zur Kennung der Mobilfunkteilnehmer (*international mobile subscriber identity*, IMSI). Die Datenpakete werden entkapselt und entsprechend der Optionen des auf der Vermittlungsschicht benutzten Protokolls an die nächste Instanz versendet.

Der SGSN stellt in Analogie zur MSC die GPRS-interne Vermittlungsstelle dar. Vom SGSN werden die Funktionen zur Verwaltung der Teilnehmermobilität und des Zuständigkeitsbereiches sowie zur Paketweiterleitung innerhalb des Paketdatenfunkenetzes übernommen, aber auch die Koordination mit kanalvermittelten Diensten durchgeführt.

Alle GPRS-bezogenen Daten werden in einem Datenkatalog (*GPRS register*, GR) gespeichert, der – logisch von den GSM-Datenbanken getrennt – als Teilbereich des HLR anzusehen ist. Im GR werden insbesondere die IMSI einem oder mehreren PDP zugeordnet. Ferner wird jedes PDP einem oder mehreren GGSN zugeordnet. Zur Unterstützung der Mehrpunktkommunikation ist das PTM-SC eingeführt worden, welches die Paketweiterleitung an die Gruppenmitglieder wahrnimmt.

4.2.2 Schnittstellen und Referenzpunkte

Mit der Erweiterung der bestehenden Systemstruktur des GSM um die GPRS-spezifischen Einheiten mußten auch neue Schnittstellen und Referenzpunkte definiert werden. Die definierten Schnittstellen sind in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt.

gerätefunktionen und eventuell eine notwendige Anpassung integriert. Ein Netzabschluß vom Typ MT 1 verfügt über eine externe ISDN S-Schnittstelle (4), an die ein ISDN-Endgerät (3) angeschlossen werden kann. Herkömmliche Endgeräte entsprechend der CCITT V-Serie (Ziffer 1) können über eine TA und eine ISDN R-Schnittstelle (Ziffer 2) angeschlossen werden. Zum Anschluß eines solchen Endgerätes über eine externe R-Schnittstelle ist der Netzabschluß MT2 definiert. Endgeräte (Ziffer 6) am Bezugspunkt G_i zwischen dem externen Paketdatennetz (PDN) und dem GGSN können direkt (8) oder über eine Schnittstelle zum jeweiligen PDN (7) angeschlossen werden.

4.3 Wegewahl und Mobilitätsverwaltung

Neben der Problematik, die Funkkanalkapazitäten effektiv ausnutzen zu müssen, liegen in der Realisierung der Mobilitätsverwaltung und der Wegewahl (*routing*) zentrale Entwurfsentscheidungen eines Paketdatenfunknetzes begründet.

4.3.1 Routing für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation

Bei einer Übertragung, die von einer MS initiiert wird, vgl. die durchgezogene Linie in Abbildung 4.5, entkapselt der SGSN die eingehenden Pakete (1), wertet die Adreßinformationen aus und routet sie zum entsprechenden GGSN (2), der seinerseits die Weiterleitung zum richtigen PDN initiiert (3). In den jeweiligen PDN werden dann die netzspezifischen Routing-Prozeduren verwendet, um die Pakete zur Partnerinstanz weiterzuleiten (4).

Pakete, die von der Partnerinstanz ausgesendet werden, vgl. die gestrichelte Linie in Abbildung 4.5 werden durch das PDN (5) zum GGSN anhand der Auswertung der Zieladresse geroutet (6). Der GGSN überprüft den Routing-Kontext, der dieser Zieladresse zugeordnet ist, und fragt den korrespondierenden SGSN und die zugehörige Tunnel-Information ab. Das Paket wird dann gekapselt und zum SGSN getunnelt (7), der es zur MS weiterleitet (8).

4.3.2 Mobilitätsverwaltung

Die bisherige Beschreibung läßt erkennen, daß zwei verschiedene Paketkapselungsschemata verwendet werden: zwischen den GSN werden die Pakete mit Hilfe eines GPRS-netzweit einheitlichen Tunnelprotokolls gekapselt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, PDP zu verwenden, auch wenn sie nicht von allen SGSN unterstützt werden. Die Kapselung zwischen MS und SGSN wird benutzt, um die Schicht-2- von den Vermittlungsschichtprotokollen zu entkoppeln.

Bevor eine MS Daten versenden kann, muß sie sich in den Paketdatendienst einbuchen. Mit dieser zwischen MS und SGSN ausgeführten sogenannten „Attachment Procedure“ wird ein logischer Verbindungs-Kontext aufgebaut. Als Resultat wird der MS eine eindeutige temporäre Verbindungskennung (*temporary logical link identity*, TLLI) zugewiesen. Nach erfolgreichem Einbuchen können mit der SGSN ein

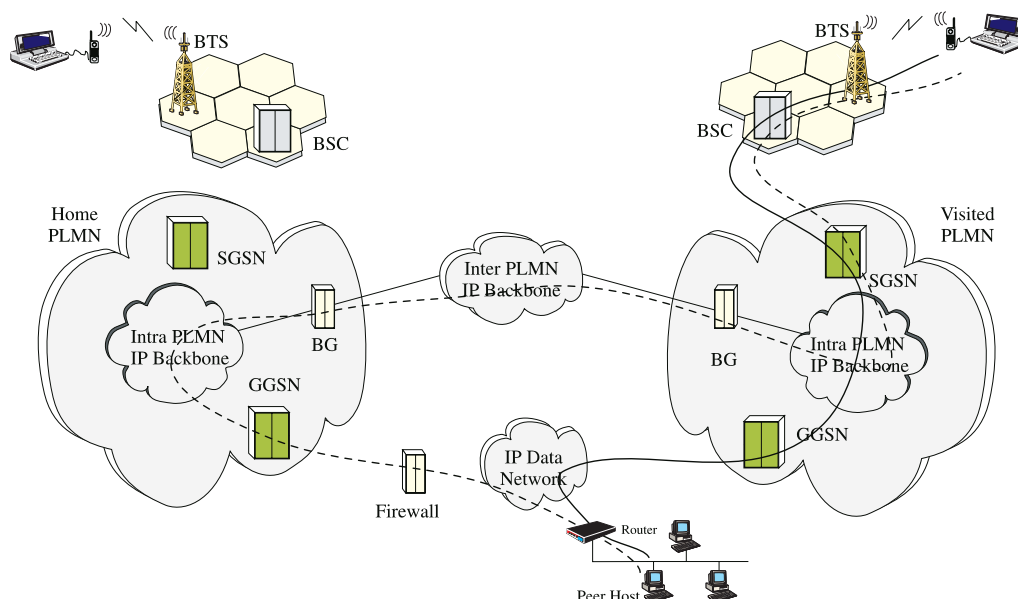


Abbildung 4.5: Vereinfachtes Routing-Beispiel

oder mehrere Routing-Kontexte für ein oder mehrere PDP ausgehandelt werden, vgl. Tab. 4.3. Äquivalent zum bestehenden GSM gibt eine Verschlüsselungssequenz-Nummer (*ciphering key sequence number*, CKSN) z. B. an, auf welche Art und Weise die Teilnehmerdaten verschlüsselt werden.

<i>Parameter</i>	<i>Speicher-Ort</i>
Status der Mobilstation (active, idle, standby)	MS + SGSN
Authentifizierung (Ciffrierungs-Schlüssel)	MS + SGSN
Kompressionsunterstützung (ja/nein)	MS + SGSN
Routing Daten (TLLI, RA, Cell ID, PDCH)	MS + SGSN
Identität der Mobilstation (IMSI, IMGI)	SGSN
Gateway GSN-Adresse (IP-Adresse)	SGSN
Gebührenerfassungsparameter (Byteanzahl)	SGSN

Tabelle 4.3: GPRS Routing-Kontext

Zur Überprüfung, ob die MS Zugang zum jeweiligen PDP hat, wird das GR abgefragt. Die Information über die abonnierten Dienste beinhaltet auch die passenden GGSN-Adressen. Ist der Zugang erlaubt, wird der GGSN aufgefordert, seinen Routing-Kontext zu aktualisieren. Alle funktionalen GPRS-Instanzen einigen sich somit, bevor ein Paketdatendienst angefordert werden kann, über jeden Eintrag des Kontextes.

Während einer GPRS-Sitzung werden die Vereinbarungen ständig aktualisiert. Aufbauend auf dem in Abbildung 4.6 gezeigten Zustandsautomaten wird der Aufent-

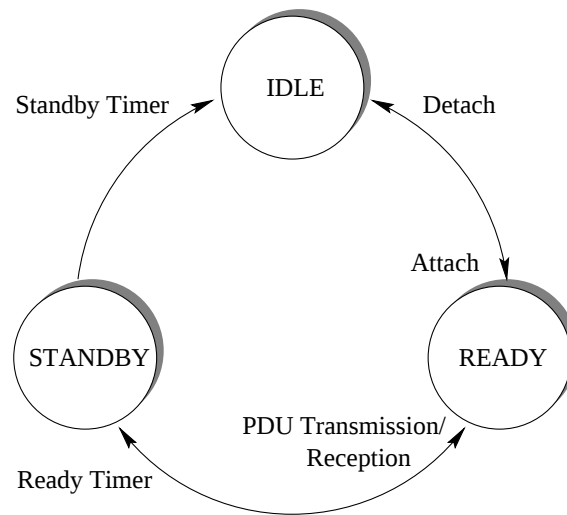


Abbildung 4.6: Zustandsmodell der Mobilitätsverwaltung

haltsbereich einer MS verwaltet. Während die MS den SGSN im Zustand „Ready“ über jeden Zellwechsel informiert, wird die Ortsinformation im Zustand „Standby“ nur dann aktualisiert, wenn die eingangs des Kapitels erwähnte „Routing Area“ (RA) gewechselt wird.

Ein eventueller Zellwechsel wird implizit auf Ebene der logischen Verbindungen verwaltet. Die Aktualisierung der Bereichsinformation wird eingeleitet, indem dem SGSN ein *Routing Update Request* übermittelt wird. Diese Meldung beinhaltet die Bezeichnungen der neuen und alten Zelle und die neue und alte RA.

Falls der SGSN die neue und alte RA verwaltet (*intra-RA-update*), besteht keine Notwendigkeit, andere Netzelemente (GGSN bzw. GR) zu informieren, weil der Routing-Kontext sich nicht verändert hat.

Wenn die alte RA einem anderen SGSN zugeordnet ist, muß ein *Inter-RA-Update* erfolgen: der neue SGSN fordert den alten SGSN auf, der MS die Mobilitätsinformationen und den Routing-Kontext zu übersenden. Nach erfolgreicher Aktualisierung veranlaßt der alte SGSN, daß die veralteten Kontextinformationen aus dem GR gelöscht werden. Dann erst kann der GGSN über den neuen Kontext informiert werden.

4.4 Protokollarchitektur

Die Architektur der Kommunikationsprotokolle des Paketdatendienstes orientiert sich am ISO/OSI-Referenzmodell. Entsprechend der aus dem GSM und ISDN bekannten Trennung von Signalisierung und Datenübertragung sind auch im GPRS zwei Protokollstapel definiert, vgl. [49].

4.4.1 Übertragung der Teilnehmerdaten

Zur Übertragung der Teilnehmerdaten werden die in Abbildung 4.7 gezeigten Protokolle verwendet.

4.4.1.1 Vermittlungsschicht

Als Vermittlungsschichtprotokoll in der Mobilstation bzw. dem SGSN wird in Abhängigkeit von der Festnetzumgebung auf existierenden Standardprotokolle zurückgegriffen:

- IP (internet protocol) [128]
- ISO CLNP (connectionless network protocol) [156]
- X.25 [147]

An der Schnittstelle G_n , zwischen SGSN und GGSN, werden die gekapselten Datenpakete und die anfallende Signalisierungsinformation mit Hilfe eines Tunnelprotokolls, dem „GPRS Tunnel Protocol“ (GTP) [25], übertragen. Die Interworking-Funktion zwischen den GSM- und festnetzspezifischen Netzprotokollen am Referenzpunkt G_i wird durch die GPRS-Interworking-Spezifikation [26] realisiert.

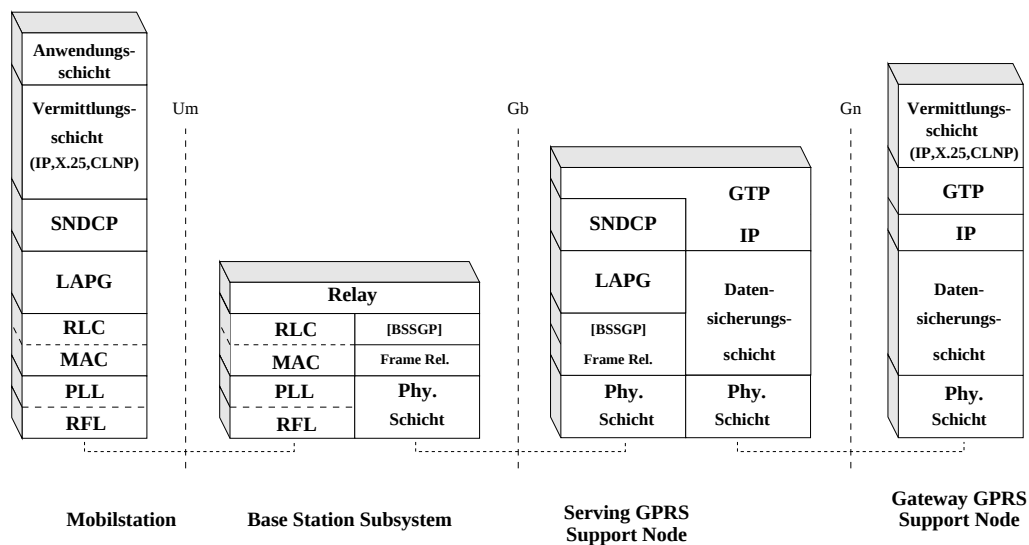


Abbildung 4.7: Der GPRS-Protokollstapel zur Datenübertragung

Als GPRS-Backbone-Protokoll wird die Nutzung des Vermittlungsschichtprotokolls der TCP/IP-Protokollfamilie in der Version 6 (*internet protocol - next generation*, IPnG) angestrebt [125, 46]. Da das IPnG noch nicht endgültig verabschiedet wurde, ist als Zwischenlösung die existierende Version 4 [128] vorgeschlagen.

Aufgrund der Netzübergangs-Funktionalität ist sowohl in der Mobilstation als auch im SGSN zwischen der Datensicherungsschicht und der Vermittlungsschicht ein Protokoll notwendig, welches die verschiedenen Vermittlungsschichtprotokolle an die Sicherungsschicht anpaßt und mehrere Vermittlungsschichtverbindungen auf eine virtuelle Sicherungsschichtverbindung multiplext. Neben dieser Funktionalität

beinhaltet das „Subnetwork Dependent Convergence Protocol“ (SNDCP) [27] Verschlüsselungs- und Datenkomprimierungsalgorithmen, die optional verwendet werden.

Die Festnetzprotokolle der Sicherungs- und Bitübertragungsschicht an der G_n -Schnittstelle zwischen SGSN und GGSN sind zur Zeit noch nicht festgelegt. Für die Funktionalität des GPRS sind diese Protokolle jedoch unkritisch, so daß Standardprotokolle verwendet werden können.

Das „BSS GPRS Application Protocol“ (BSSGP) [16] an der G_b -Schnittstelle entspricht dem aus dem GSM bekannten BSSMAP und stellt im wesentlichen die gleiche Funktionalität zur Verfügung. An der G_b -Schnittstelle wird auf der Sicherungsschicht z. B. ein ATM-basiertes „Frame Relay“-Verfahren eingesetzt.

Der Paketdatendienst stellt einen physikalischen Kanal mehreren Teilnehmern im Vielfach zur Verfügung, um ihn effizient ausnutzen zu können. Daher ist es notwendig, die Sicherungsschicht an der Funkschnittstelle U_m in die folgenden zwei Teilschichten zu unterteilen, vgl. [28]:

- logische Verbindungssteuerung (*logical link control*, LLC)
- Medienzugriff (*medium access control*, MAC).

Die LLC-Teilschicht stellt Dienste zur Verfügung, die eine zuverlässige logische Verbindung zwischen MS und SGSN gewährleisten, während die MAC-Teilschicht den Zugriff auf das Funkmedium steuert.

4.4.1.2 Verbindungssteuerungs-Teilschicht

Die LLC-Teilschicht ist für den Transport der Datenpakete der Vermittlungsschicht zwischen Mobilstation und SGSN verantwortlich. Gemäß der definierten Dienste wird neben Punkt-zu-Punkt- auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation unterstützt. Die wesentliche Funktionalität umfaßt Flußkontrolle und Fehlerkorrektur anhand der bekannten ARQ-Mechanismen, vgl. Kapitel 2.

Das Protokoll der LLC-Teilschicht [29] ist noch nicht vollständig spezifiziert. Es wird sich jedoch an das im GSM benutzte LAPD-Protokoll anlehnen. In Kapitel 9 wird ein Vorschlag gemacht, welche Funktionen notwendigerweise unterstützt werden müssen.

4.4.1.3 Medienzugriffs-Teilschicht

Kerngegenstand der Spezifikation des GPRS ist neben der Verwaltung der Mobilität der Teilnehmer und den zugehörigen Routingprozeduren die Spezifikation des Medienzugriffsprotokolls. Die GPRS-MAC-Teilschicht definiert die erforderlichen Prozeduren, um das Funkmedium mehreren Teilnehmern zur Verfügung zu stellen. Wesentliche Funktionen sind dabei Kollisionsauflösung, Multiplexverfahren sowie die Reservierungsstrategie unter Berücksichtigung der angeforderten Dienstgüte. Eine Besonderheit des GPRS-MAC-Protokolls ist, daß einer Mobilstation gleichzeitig mehrere physikalische Kanäle zugewiesen werden können (*multi-slot assignment*).

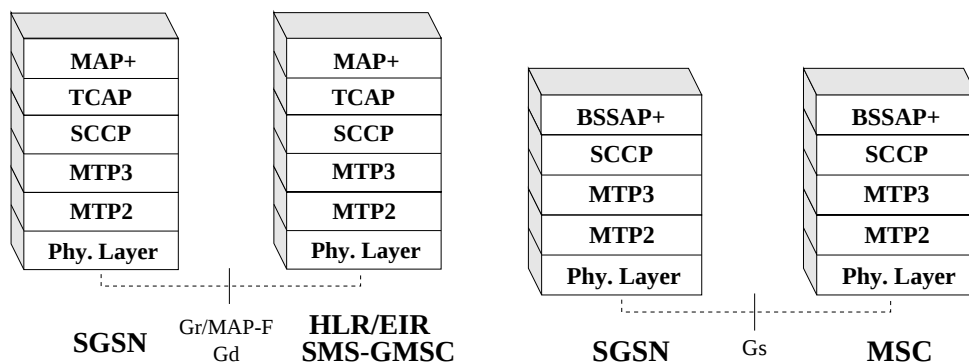


Abbildung 4.8: Signalisierungsprotokolle zwischen SGSN und HLR bzw. MSC

Das MAC-Protokoll ist zur Zeit noch nicht endgültig spezifiziert. Es basiert auf einem „Slotted ALOHA“-Verfahren. In Kapitel 9 wird die prototypische Implementierung der bisher spezifizierten Prozeduren ausführlich beschrieben [56].

Zwischen der MAC-Teilschicht und der LLC-Teilschicht wird eine weitere Teilschicht (*radio link control*, RLC) zur Steuerung der Verbindung zwischen Mobilstation und BSS an der Funkschnittstelle eingeführt. Die RLC-Teilschicht stellt einen bitmap-basierten selektiven Wiederanforderungsmechanismus für fehlerhaft übertragene Pakete zur Verfügung und führt die erforderliche Segmentierung der LLC-Protokolldateneinheiten durch.

4.4.1.4 Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht an der Funkschnittstelle ist in die „Physikalische Verbindungssteuerungsschicht“ (*physical link layer*, PLL) und die „Physikalische RF-Schicht“ (*physical radio frequency layer*, RF layer) unterteilt. Die Spezifikation dieser Teilschichten erfolgt in den GSM-Empfehlungen der Serie 05 [10, 9]. Unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Paketdatendienstes (z. B. bzgl. der Zellwechselprozeduren) sind noch nicht weiter spezifizierte Anpassungen vorgesehen.

Während in der RF-Teilschicht hauptsächlich die Modulation und Demodulation der Funksignale durchgeführt werden, stellt die PLL-Schicht Dienste für die Datenübertragung über die Funkschnittstelle zur Verfügung. Sie ist für die Vorwärtsfehlerkorrektur und das Interleaving verantwortlich und beinhaltet Funktionen zur zeitlichen Synchronisation (Rahmen- und Bittakt, *timing advance*, TA) der jeweiligen Mobil- und Basisstation und Auswertung der Funksignalqualität. Ebenso sind hier Prozeduren zur Zellauswahl- und Sendeleistungskontrolle angesiedelt.

4.4.2 Signalisierung

Die Signalisierung zwischen SGSN und HLR/GR sowie SMS-MSC bedarf keiner GPRS-spezifischen Protokolle und beruht auf dem System SS.7. In Abbildung 4.8 ist gezeigt, daß die konventionellen GSM-Signalisierungsprotokolle benutzt werden, vgl. Kapitel 2.

Der Mobilfunk-Anwendungsteil (*mobile application part*, MAP) muß jedoch bezüglich der Mobilitätsverwaltung erweitert werden, gekennzeichnet durch „+“ in MAP+. An der G_s -Schnittstelle zwischen SGSN und MSC/VLR wird ein erweitertes BSSAP [30] anstelle des Transaktionsabwicklungsteiles (*transaction capabilities application part*, TCAP) verwendet, vgl. Abbildung 4.8.

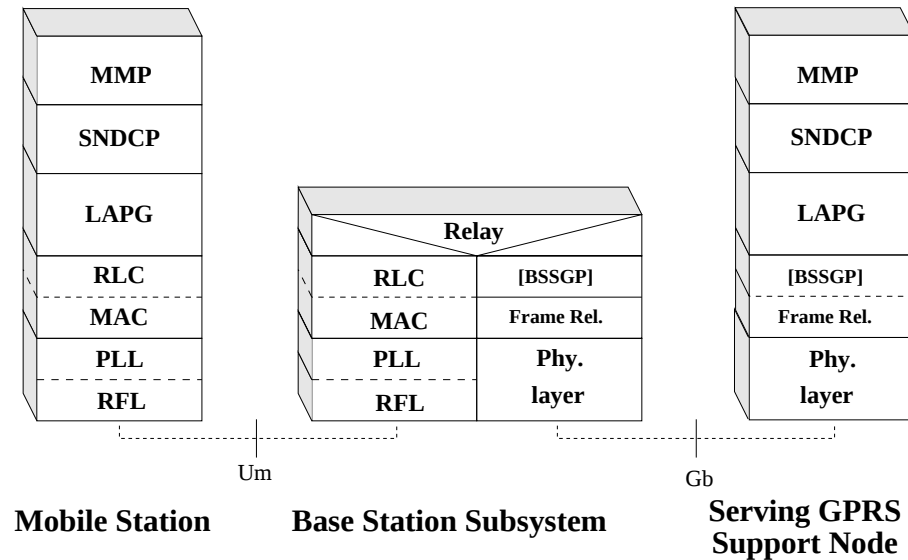


Abbildung 4.9: *Signalisierungsprotokolle zwischen SGSN und MS*

Zwischen MS, BSS und SGSN können zur Signalisierung bis zum Protokoll SNDCP die gleichen Protokolle wie bei der Datenübertragung verwendet werden, vgl. Abbildung 4.9. In der Vermittlungsschicht übernimmt das sogenannte „Mobility Management Protocol“ (MMP) die Funktionen der GPRS-Mobilitätsverwaltung und der Aktivierung bzw. Deaktivierung der Routing-Kontexte, vgl. [19, 18].

Der Frame Mode Bearer Service

Bei der Entwicklung eines neuen Paketdatendienstes wurde in dieser Arbeit u. a. untersucht, inwieweit sich ein paketvermittelter ISDN-Dienstkonzept auf das GSM-Mobilfunksystem übertragen läßt, vgl. [50, 51]. Der wesentliche Vorteil gegenüber einem vollständig neu zu entwickelnden Dienst ist ein verringerter Implementierungs- und Testaufwand durch Nutzung bewährter, bereits standardisierter Protokolle und Verfahren.

5.1 Der FMBS im ISDN

Im diensteintegrierenden digitalen Nachrichtennetz ISDN wird für die paketvermittelte Datenübertragung über virtuelle Verbindungen der sogenannte „Frame Mode Bearer Service“ benutzt [43, 137]. Nur wenn Daten zum Transport vorliegen, wird eine physikalische Verbindung aufgebaut. In der übrigen Zeit können andere Teilnehmer diesen physikalischen Kanal belegen.

Aufgrund der Signalisierung über einen dedizierten D-Kanal ist es möglich, die Verbindungssteuerung der Paketvermittlung und der Leitungsvermittlung gleich zu behandeln. Somit sind in der Signalisierungsebene des ISDN keine signifikanten Änderungen zur Integration des FMBS erforderlich. Weiterhin können die gleichen Leistungsmerkmale wie bei leitungsvermittelten Diensten angeboten werden.

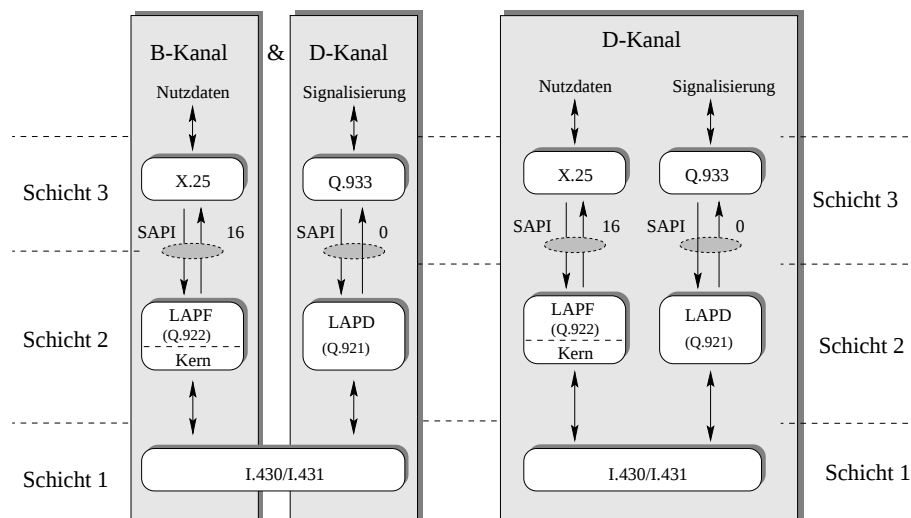


Abbildung 5.1: *Paketdatenvermittlung im ISDN*

In Abbildung 5.1 ist die Protokollarchitektur der unteren drei Kommunikationsschichten für Signalisierung und Teilnehmerdatenübertragung dargestellt. Es besteht die Möglichkeit, die Signalisierung getrennt von den Teilnehmerdaten in D- und B-Kanal oder gemeinsam im D-Kanal zu übertragen.

Im D-Kanal wird die Signalisierung durch das in der ITU-T-Empfehlung Q.933 [148] spezifizierte Vermittlungsprotokoll übernommen, wohingegen für die Teilnehmerdaten das „Data Transfer Protocol“ gemäß ITU-T-Empfehlung X.25 [64, 147] vorgeschlagen ist.

In der Sicherungsschicht erfolgt die Übertragung der Signalisierungsdaten durch das LAPD-Protokoll gemäß der ITU-T-Empfehlung Q.921 [149], vgl. Kapitel 2. Die Teilnehmerdaten werden durch ein weiteres Protokoll der LAP-Protokollfamilie, dem LAPF-Protokoll, entsprechend der ITU-T Empfehlung Q.922 [143] gesichert.

Rahmenformate und Betriebsarten des LAPF-Protokolls entsprechen denen des LAPD-Protokolls, ebenso die Dienstprimitive. Die signifikanten Unterschiede liegen in der unterschiedlichen Adressierung und Bearbeitungsmöglichkeit der Teilnehmerdaten.

In Abweichung zum LAPD-Protokoll ist im Adreßfeld des Nachrichtenkopfes des LAPF-Protokolls eine Unterscheidung von Endeinrichtung und dem Bezeichner des Dienstzugangspunktes nicht notwendig. Anhand der Verbindungskennung (*data link connection identifier*, DLCI) werden verschiedene, voneinander unabhängige Teilnehmerverbindungen unterschieden. Der DLCI setzt sich aus der Dienstzugangspunktkennung (*service access point identifier*, SAPI) und der Verbindungsendpunktkennung (*connection endpoint identifier*, CEI) zusammen, vgl. hierzu Abbildung 5.3. Außerdem beinhaltet das Adreßfeld zwei Bit zur Flußkontrolle, ein Bit zur Kennzeichnung bevorzugt zu transportierender Daten und ein sogenanntes „EA“-Bit, durch das eine Erweiterung des Adreßraumes angezeigt werden kann.

Von LAPF-Protokoll werden zur Teilnehmerdatenübertragung zwei Mechanismen unterstützt, die in verschiedenen Netzknoten zum Einsatz kommen können. In Abbildung 5.2 ist dieser Datentransport mit den englischen Fach-Termini „Frame Relaying“ und „Frame Switching“ bezeichnet, weil sich bislang keine deutschen Bezeichnungen durchgesetzt haben.

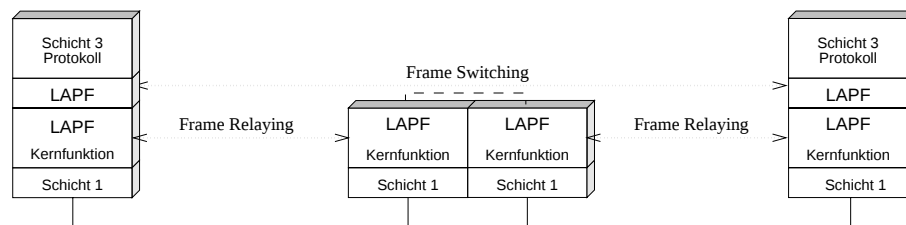


Abbildung 5.2: Referenzmodell für die Übertragung der Teilnehmerdaten

Beim Frame Relaying werden in den Vermittlungsknoten nur Kernfunktionen des LAPF-Protokolls ausgeführt, wobei im wesentlichen auf eine Fehlerbehandlung verzichtet wird. Dies führt zu einem höheren Durchsatz. Gleichzeitig sinkt aber die

Dienstgüte, da fehlerhaft übertragene Daten erst in dem Netzknoten erkannt werden, der das komplette LAPF-Protokoll bearbeitet, so daß das Relaying nicht über zu viele aufeinanderfolgende Knoten im Netz durchgeführt werden sollte.

5.2 Der FMBS im GSM

Im GSM ist, genau wie im ISDN, eine Unterscheidung bei der Behandlung von Signalisierungsinformation und Teilnehmerdaten möglich. In Abbildung 5.3 ist illustriert, daß zur Unterscheidung in der Sicherungsschicht die eingangs erwähnten Dienstzugangspunktkennungen (SAPI) verwendet werden. Signalisierungsdaten des BCCH, CCCH oder DCCH werden ausschließlich über den SAPI „0“ übertragen. Der SAPI „3“ ist für den GSM-Kurznachrichtendienst SMS reserviert. Alle anderen SAPIs stehen somit für die Übertragung der Teilnehmerdaten auf einem Verkehrs- oder Signalisierungskanal zur Verfügung. In Abbildung 5.3 ist dem Verkehrskanal zur Übertragung der Teilnehmerdaten der SAPI „1“ zugeordnet.

Dieser Sachverhalt garantiert im vorgeschlagenen Dienst ebenfalls eine klare Trennung zwischen Transport von Signalisierungsinformation und Teilnehmerdaten.

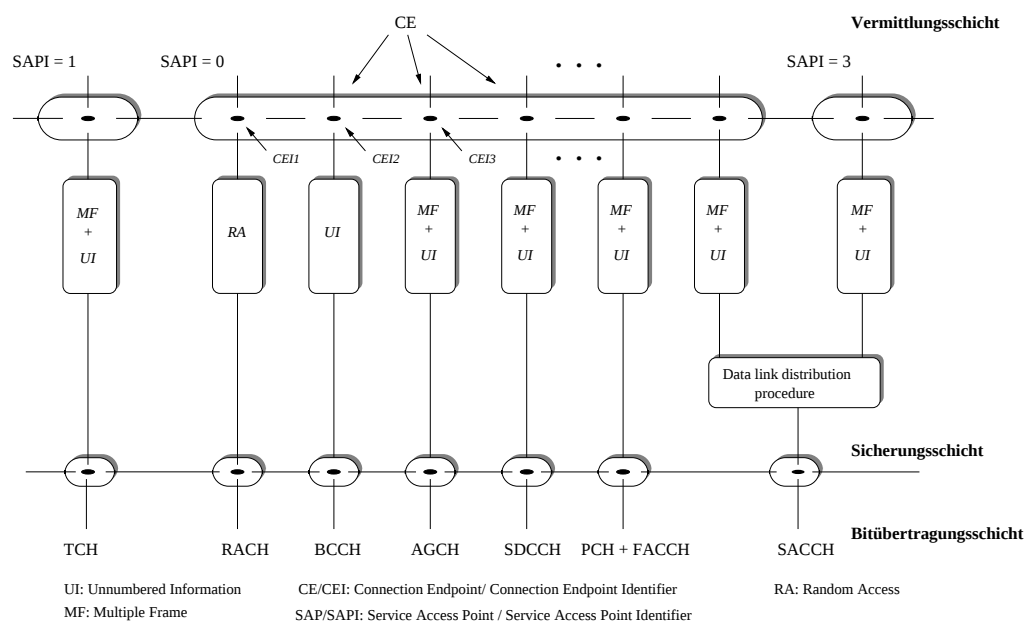


Abbildung 5.3: Dienstzugangspunkte für Signalisierung und Frame Relay

Das Konzept, im GSM auf den Verkehrskanälen virtuelle Verbindungen zur Teilnehmerdatenübertragung zu verwenden, vgl. [50], ermöglicht die Nutzung eines Verkehrskanals für mehrere Verbindungen, vgl. Abbildung 5.4. Liegen keine Teilnehmerdaten zur Übertragung mehr vor, wird der logische Kanal ausgelöst und der besetzte Verkehrskanal zur Wiedervergabe freigegeben, vgl. (2) in Abbildung 5.4. Die virtuelle Verbindung zwischen den Kommunikationspartnern bleibt dagegen bestehen. Bei einem erneuten Verbindungsaufbau, vgl. (3) in Abbildung 5.4 kann ein

neu zugeordneter Verkehrskanal direkt wieder dieser noch bestehenden virtuellen Verbindung zugeordnet werden.

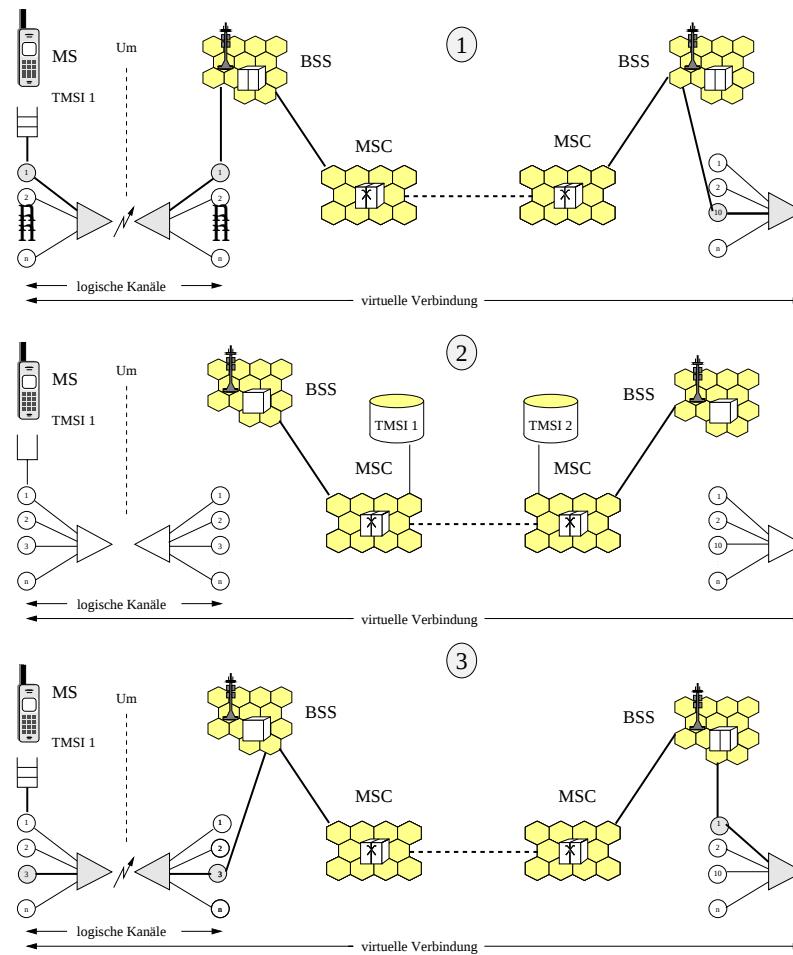


Abbildung 5.4: Prinzip der virtuellen Verbindungen im GSM

5.3 Übertragung der Teilnehmerdaten

Als Sicherungsschichtprotokoll zur Teilnehmerdatenübertragung wird das LAPF-Protokoll auf allen Teilstrecken übernommen. An der Funkschnittstelle ist eine Anpassung an die physikalischen Gegebenheiten, insbesondere an die im Vergleich zum ISDN verminderte Kanalkapazität, notwendig. In Anlehnung an die bestehende Terminologie wird die modifizierte Version LAPF_m genannt. Im nachstehenden Abschnitt werden die Änderungen gegenüber dem LAPF-Protokoll erörtert. Zu weiteren Details sei auf den Standard bzw. auf Kapitel 8 verwiesen, welches eine Beschreibung des Zustandsautomaten des Protokolls beinhaltet.

5.3.1 Sicherungsschicht

Das LAPF_m-Protokoll unterstützt die Funktionen *Multiplexen*, *Flußkontrolle* und *Fehlersicherung*. Damit bietet es prinzipiell die gleichen Möglichkeiten wie das LAPF-Protokoll im ISDN.

Die begrenzte Kapazität der Funkschnittstelle erfordert jedoch eine feste Rahmenlänge, vgl. Abbildung 5.5. Für den FMBS im GSM wird vorgeschlagen, die Rahmenlänge von 23 *byte* aus dem LAPD_m zu übernehmen. Damit entfällt einerseits die Notwendigkeit einer Rahmenabgrenzung, andererseits muß ein Mechanismus zur eventuellen Segmentierung von Schicht-3 Nachrichten vorgesehen werden.

Zur Adressierung und Flußkontrolle werden 4 *byte* benötigt, 1 *byte* enthält die notwendige Segmentierungsinformation, so daß 18 *byte* für Teilnehmerdaten verwendet werden können. Im Segmentierungsfeld kennzeichnet 1 *bit* das letzte Segment. Dementsprechend hat eine Schicht-3 Nachricht eine maximale Länge von 128·18 *byte*. Eventuelle Füllbits werden von den Teilnehmerdaten durch den nicht benötigten LAPF-Rahmenbegrenzer abgetrennt. Anstelle der Prüfsumme wird ein Fire Code zur Fehlererkennung bzw. -korrektur eingesetzt.

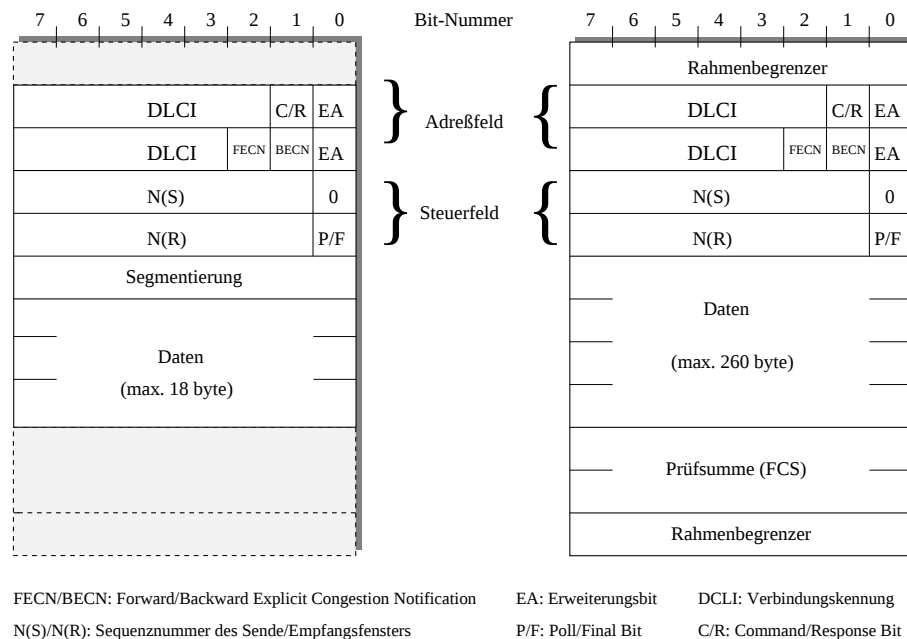


Abbildung 5.5: Rahmenstruktur des LAPF_m

Zur Wiederanforderung falsch empfangener Rahmen wird neben dem im LAPF-Protokoll implementierten „Reject“-Mechanismus (REJ) der in Kapitel 2 beschriebene „Selective Reject“-Mechanismus (SREJ) eingeführt. Dabei kann nur ein Verfahren gleichzeitig in Betrieb sein.

Desweiteren wird ein „Frame Relaying“-Trägerdienst zwischen der MSC und der Mobilstation vorgeschlagen. Abbildung 5.6 gibt eine Übersicht über die Protokollarchitektur.

Dieses Verfahren erlaubt bei ungestörtem bzw. wenig gestörtem Funkkanal den

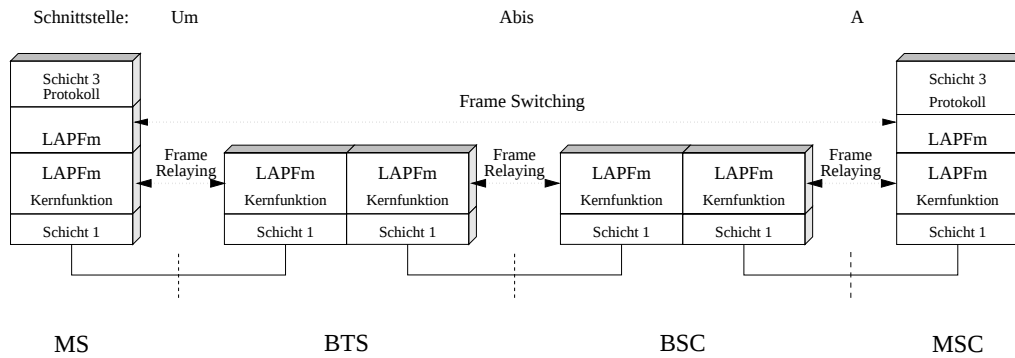


Abbildung 5.6: *Protokolle und Schnittstellen des vorgeschlagenen GSM FMBS*

höchsten Datendurchsatz. Außerdem würde die Absicherung des Funkkanals durch die Realisierung der Funktion „Frame Switching“ in BTS und BSC aufwendige Modifikationen an den Einrichtungen der BTS und des BSC bedingen. Ein „Frame Relaying“, welches sich von der Mobilstation bis zur Teilnehmer-Endeinrichtung im Partnernetz erstreckt, würde zu große Verzögerungszeiten verursachen und kommt daher nicht als Alternative in Frage.

5.3.2 Vermittlungsschicht

Die Integration des FMBS in das GSM hat zum Ziel, eine preisgünstige Anbindung an die bestehenden Paketdatennetze mit Schnittstelle nach ITU-T Empfehlung X.25 zu ermöglichen. Daher wird der ISDN-Vorschlag übernommen, das X.25-Protokoll als Vermittlungsschichtprotokoll zu verwenden. Das X.25-Protokoll ermöglicht eine einfache Zusammenarbeit zwischen dem „Frame Relaying“ und dem „Frame Switching“ sowie eine einfache Anbindung an andere paketvermittelte Netze.

5.4 Signalisierung

Der FMBS baut auf virtuellen Verbindungen auf, die physikalisch nur aufrechterhalten werden, falls Daten übertragen werden. Da die Übertragung von Daten in der Regel eine büschelhafte Charakteristik aufweist, impliziert dies einen mehrfachen Verbindungsauf- bzw. -abbau.

Im GSM ist dies nur dann realisierbar, falls ein Mechanismus zum schnellen Verbindungsaufbau zur Verfügung steht. Die Verbindungsaufbauzeiten in GSM-Mobilfunknetzen betragen, je nach Kanalqualität, drei bis fünf Sekunden und können zwar für die Sprachübertragung akzeptiert werden, nicht jedoch für einen Datendienst. Um die Nutzung virtueller Verbindungen zu ermöglichen, müssen Veränderungen in den Signalisierungsprotokollen vorgenommen werden, die im folgenden beschrieben werden, vgl. [51].

5.4.1 Sicherungsschicht

In der Sicherungsschicht werden zum Transport der Signalisierungsinformationen für den vorgeschlagenen Dienst im GSM die gleichen Protokolle verwendet wie bei der kanalvermittelten Übertragung, vgl. Kapitel 2. Die Sicherung der Schicht-3 Nachrichten an der A-Schnittstelle zwischen MSC und BSC übernimmt das MTP. Zur Sicherung der Daten zwischen BSC und BTS an der A_{bis}-Schnittstelle wird das LAPD-Protokoll eingesetzt.

Der Funkkanal zwischen BTS und MS wird durch ein leicht modifiziertes LAPD_m-Protokoll mit erweiterter Fehlerbehandlung und optimierten Parametern gesichert, vgl. hierzu Kapitel 8.

5.4.2 Vermittlungsschicht

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst den Aufbau einer virtuellen Verbindung, danach wird auf Änderungen in den drei Teilschichten der GSM-Vermittlungsschicht eingegangen.

5.4.2.1 Aufbau virtueller Verbindungen

Der erste Verbindungsaufbau entspricht der in Kapitel 2 beschriebenen herkömmlichen Aufbauprozedur. In Anlehnung an die ITU-T Empfehlung Q.933 wird vorgeschlagen, den DLCI beim Verbindungsaufbau in der *SETUP*-Nachricht anzugeben und durch die *CONNECT*-Nachricht der Gegenseite zu bestätigen. Dies geschieht in der CC-Teilschicht.

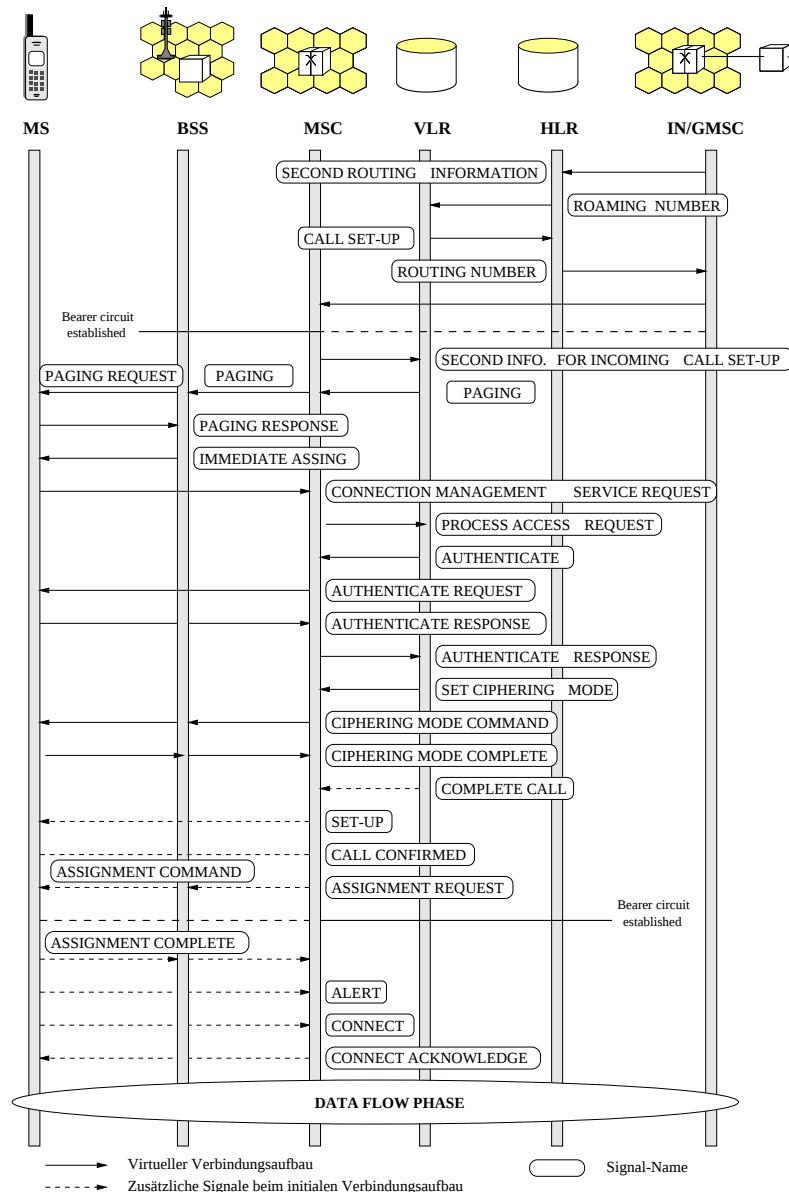
Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau und der Zuweisung des DLCI kann die Datenübertragung erfolgen. Werden sowohl von der Mobilstation als auch von ihrer Partnerinstanz in der MSC keine Daten mehr empfangen, wird nach Ablauf einer zu definierenden Zeit die RR-Schicht von der CC-Schicht aufgefordert, den TCH mit den herkömmlichen Prozeduren freizugeben. Die Auslösung der Verbindung findet nur in Richtung der Mobilstation statt. Die virtuelle Verbindung zwischen der Mobilstation und ihrem eigentlichen Kommunikationspartner bleibt bestehen, obwohl kein TCH mehr reserviert ist, vgl. Abbildung 5.4.

Die MM-Schicht speichert bei der Verbindungsauslösung die Informationen über die Verbindung ab, die sonst mit der *SETUP*-Nachricht von der Mobilstation gesendet werden. Dies sind der DLCI und die temporäre Kennung (*temporary mobile station identity*, TMSI) der Mobilstation. Mittels der TMSI kann bei erneutem Verbindungsaufbau erkannt werden, daß bereits eine virtuelle Verbindung zum gerufenen Teilnehmer besteht.

Es sind nur noch die folgenden in Abbildung 5.7 dargestellten Prozeduren zu durchlaufen:

- paging
- access
- assignment
- type of service (optional)
- authentication (optional)
- ciphering (optional)

Mit Hinblick auf die durch Verschlüsselung und Authentifizierung entstehenden Verzögerungen wird vorgeschlagen, verschiedene Prioritäten bzw. Dienstprofile einzuführen. In Abhängigkeit vom Dienstprofil und der ausgehandelten Dienstgüte werden die Standard-GSM Authentifizierungs- und/oder Verschlüsselungsprozeduren entweder überhaupt nicht durchlaufen oder optional ab- bzw. zugeschaltet.

Abbildung 5.7: *Virtueller Verbindungsaufbau*

Die MM-Schicht vergleicht nach erfolgreicher Authentifizierung die TMSI mit den von ihr gespeicherten Werten. Existiert bereits eine virtuelle Verbindung mit der Mobilstation, signalisiert die MM-Schicht dies der CC-Schicht. Dazu wird die *SETUP*-Nachricht verwendet, die bei einem herkömmlichen Verbindungsaufbau von der Mobilstation gesendet wird. Anhand der Informationen dieser *SETUP*-Nachricht kann die CC-Schicht den von der RR-Schicht aufgebauten logischen Kanal, auf dem

der Verbindungsaufbau stattgefunden hat, der entsprechenden virtuellen Verbindung zuordnen.

Andere Nachrichten der Vermittlungsschicht werden zum Verbindungsaufbau nicht mehr benötigt. Somit ist im Vergleich zur herkömmlichen Aufbauprozedur eine Verkürzung der Verbindungsaufbauzeit erreicht.

Zur weiteren zeitlichen Verkürzung wird zum Verbindungsaufbau die Verwendung der „Very Early Assignment“-Strategie (VEA) vorgeschlagen, vgl. Kapitel 2. Bei dieser Strategie wird der TCH direkt nach dem Zugriff auf dem RACH vergeben. Die Signalisierung läuft auf dem TCH und nicht auf dem langsameren SDCCH ab. Verbindungsaufbauversuche, die nicht beantwortet werden, blockieren allerdings einen TCH.

Dies gilt auch für die „Location-Updating“-Prozedur einer Mobilstation, die einen Aufenthaltsbereich verläßt. Beides führt zu einer schlechten Ausnutzung der Ressourcen. Da in einer Zelle der gleiche Verbindungsaufbaumechanismus für alle Teilnehmer benutzt werden muß, kann dieses Verfahren in Zellen mit sehr hoher Verkehrslast zu einer erhöhten Blockierrate führen.

Für den FMBS wird daher die Kombination mehrerer Zuweisungsstrategien vorgeschlagen. Bei einem Zugriff auf dem RACH wird im Informationselement des Random-Access-Bursts u. a. der Grund des Zugriffs angegeben. Dies geschieht als verschlüsselte Bitfolge. In der entsprechenden GSM-Empfehlung 04.08 [18] sind zusätzliche Kombinationen vorgesehen, die zur Zeit nicht vergeben sind. Mittels dieser Kombinationen kann der Grund „FMBS“ signalisiert werden. Dabei erfolgt eine Unterteilung in zwei Gruppen, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zu verringern. Die von der Mobilstation initiierten Rufe nutzen die eine, die vom Netz initiierten Rufe die andere Gruppe.

Tabelle 5.1 zeigt die in der Empfehlung definierten Kombinationen. Die Zahlenfolge gibt den Grund des Zugriffs an. Die mit „y“ gekennzeichneten Bits stellen Füllbits dar und haben keine weitere Bedeutung, wohingegen die mit „x“ gekennzeichneten Bits für eine Zufallszahl zur Identifikation bei der Kollisionsauflösung reserviert sind, vgl. [40].

Diese Veränderung bewirkt, daß bereits bei Empfang der *RANDOM-ACCESS-REQUEST*-Nachricht erkennbar ist, um welche Art des Zugriffs es sich handelt. Die MSC ist somit in der Lage, differenziert auf eine solche Nachricht zu reagieren. Mittels einer *IMMEDIATE-ASSIGNMENT*-Nachricht kann dann für den Frame Mode Bearer Service direkt ein TCH zugewiesen werden, während für Sprachdienste weiterhin ein SDCCH zum Verbindungsaufbau benutzt wird. Der Vorteil dieser Lösung liegt in einer Entlastung der SDCCHs bei einer Signalisierung auf einem Kanal größerer Kapazität.

Abschließend werden die notwendigen Änderungen in den drei Teilschichten der GSM-Vermittlungsschicht zusammengefaßt.

<i>Bitfolge</i>	<i>Grund für den Zugriff</i>
101yyyxx	Notruf (emergency call)
110yyyxx	Ruf-Wiederaufnahme (call re-establishment)
011010xx	Ruf-Wiederaufnahme (call re-establishment), falls TCH/F benutzt
011011xx	Ruf-Wiederaufnahme (call re-establishment), falls TCH/H benutzt
100yyyxx	Antwort auf Ruf vom Netz
111yyyxx	TCH/F wird benötigt
0100yyxx	TCH/H wird zur Sprachübertragung benötigt
0101yyxx	TCH/H wird zur Übertragung von Daten benötigt
0000yyxx	Location Updating
0001yyxx	Andere Prozeduren, die einen SDCCH benötigen
01100yxx	Reserviert für zukünftige Zwecke
0111yyxx	Reserviert für zukünftige Zwecke

Tabelle 5.1: Verschlüsselung der Informationselemente für den Access-Burst

5.4.2.2 Änderungen im Mobility Management (MM)

Im MM muß für den vorgeschlagenen Dienst eine Speichermöglichkeit der Informationen über die Verbindung vorgesehen werden. Dort werden der DLCI und die TMSI gespeichert. Dieser Speicher wird in der MSC installiert. Außerdem muß im Falle des Wiederaufbaus der virtuellen Verbindung die beschriebene *SETUP*-Nachricht an das CC-Management geschickt werden. Die Authentifizierung und Verschlüsselung ist optional und geschieht *vorerst* mit den herkömmlichen Prozeduren.

5.4.2.3 Änderungen im Connection Management (CM)

In der CC-Teilschicht der Mobilstation und MSC ist ein Timer erforderlich, der gegebenenfalls den Abbau der logischen Verbindung einleitet. Außerdem ist eine Prozedur zur Zuordnung des logischen Kanals zu der virtuellen Verbindung beim Wiederaufbau notwendig. Die normale Beendigung des Rufes geschieht dahingegen mit den herkömmlichen Prozeduren.

5.4.2.4 Änderungen im Radio Resource (RR) Management

Bei dem vorgeschlagenen Zugriffsverfahren für den Frame Mode Bearer Service im GSM kann das RR-Management unverändert übernommen werden, da in dieser Teilschicht die herkömmlichen Prozeduren übernommen werden.

Softwareentwurfs- und -bewertungsmethodik

Die rasche Entwicklung der Kommunikations- und Informationstechnik der letzten Jahre und Jahrzehnte führt zu immer umfangreicheren und komplexeren Telekommunikationssystemen. Das GSM mit seiner weit über 8000 Seiten umfassenden Spezifikation zeigt eindrucksvoll, daß moderne Kommunikationsnetze äußerst komplexe Gebilde darstellen.

6.1 Entwurf von Kommunikationsprotokollen

Mit steigender Komplexität der Kommunikationsstrukturen gestaltet sich die effiziente Entwicklung dieser Systeme bzw. deren Kommunikations-Software in zunehmendem Maße schwieriger.

Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die den Einsatz aufeinander abgestimmter CASE-Werkzeuge (*computer aided software engineering*) in den gängigen Phasen der Softwareentwicklung erlaubt, vgl. hierzu auch [81]:

- Anforderungsspezifikation
- Systementwurf
- Implementierung
- Verifikation
- Test und Wartung

Die fortschreitende Internationalisierung der Telekommunikation und die Ausbreitung von Kommunikationsnetzen über nationale Grenzen hinweg erfordert dabei eine Darstellungsform, die eine semantisch eindeutige Beschreibung des Systemverhaltens unterstützt.

6.1.1 Formale Beschreibungstechniken zur Softwareentwicklung

Bei der Systemsoftware-Entwicklung erscheint der konventionelle Weg unzureichend, die geforderte Funktionalität abgeleitet aus einer Anforderungsspezifikation manuell durch Einsatz einer nicht formalen Programmiersprache in ein auf der Zielhardware ablauffähiges Programm umzusetzen. Insbesondere Transformationsfehler bei der Programmierung und schlechte Lesbarkeit durch unzureichende Dokumentation des Quellcodes sind als charakteristische Schwachpunkte bekannt.

Formale Beschreibungstechniken (*formal description technique*, FDT) stellen hingegen ein probates Mittel dar, obigen Anforderungen zu genügen. Sie dienen der eindeutigen Festlegung funktionaler Eigenschaften und ermöglichen eine Validierung der Korrektheit des implementierten Systems.

Zu den am weitest verbreiteten — und vor allen Dingen international standardisierten — FDTs zählen:

- Estelle (*extended state transition language*) [158],
- LOTOS (*language of temporal ordering specification*) [157] und
- SDL (*specification and description language*) [77].

Während LOTOS einen prozeßalgebraischen Ansatz zur Systembeschreibung verfolgt, verwenden Estelle und SDL das Konzept kommunizierender, erweiterter endlicher Automaten (*extended finite state machine*, eFSM), vgl. [96].

Ein erweiterter endlicher Automat besteht aus einer fest definierten Menge von Zuständen. Durch den Empfang von Signalen werden Zustandsübergänge angestoßen. Der erweiterte endliche Automat unterscheidet sich von einem endlichen Automat insofern, als daß er neben seinen Zuständen lokale Daten als Variable speichern und manipulieren kann.

Speziell bei der Beschreibung von Kommunikationsprotokollen erlauben endliche Automaten eine intuitive Zerlegung des Protokollablaufes durch Zustandsgraphen und Transitionstabellen.

Eine im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführte Studie, vgl. [47], zeigte weiterhin, daß SDL durch die unterstützte grafische Darstellungsform in Kombination mit Informationsflußdiagrammen (*message sequence chart*, MSC) [78] die derzeit beste Alternative zur Entwicklung von Telekommunikationssystemen als typische Vertreter reaktiver Echtzeitsysteme darstellt.

Informationsflußdiagramme dienen vor allem der Formalisierung von Anforderungsdefinitionen für SDL-Spezifikationen. Den Einsatz geeigneter CASE-Werkzeuge vorausgesetzt, können sie zur automatischen Generierung der Grundstruktur von SDL-Systemen und zur Auswahl und Spezifikation von Testszenarien verwendet werden. SDL spezifiziert die statische Systemstruktur, das funktionale Verhalten der dynamischen Vorgänge und legt den Informationsfluß zwischen den Systemkomponenten fest. Somit wird das Systemverhalten eindeutig beschrieben und ein modularer Aufbau mit „sauberen“ Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten gewährleistet. Obzwar SDL insbesondere zur Entwicklung von Telekommunikationssystemen eingesetzt wird, findet diese Sprache vermehrt auch beim Entwurf anderer Echtzeitsysteme Verwendung, vgl. z.B. [87]. Dementsprechend haben sich vielerorts SDL-Diskussionsforen etabliert. Einzelheiten zu SDL und insbesondere deren Einsatz zur Entwicklung von Kommunikationsprotokollen finden sich in [39] und [123]. Eine Übersicht über die standardisierte Erweiterung von SDL um objekt-orientierte Entwicklungskonzepte gibt [74].

Zum Entwurf von SDL-Spezifikationen existieren komfortable, kommerzielle CASE-Werkzeuge wie GEODE [164] oder SDT [159], die eine integrierte grafische Implementierung, Validierung der funktionalen Korrektheit und funktionale Simulation sowie automatische Codegenerierung für die gewählte Laufzeitumgebung ermöglichen.

6.2 Verkehrsleistung von Kommunikationsprotokollen

Über die Beschreibung des Systemverhaltens hinausgehend, nimmt die Leistungsbeurteilung in der Entwicklung und Optimierung von Kommunikationsprotokollen eine zentrale Rolle ein. Um die Leistungsfähigkeit von Protokollen in Hinblick auf die Verkehrslast beurteilen zu können, bedarf es einer Simulationsumgebung, in der das Protokollverhalten möglichst realitätsnah simuliert werden kann.

Hinsichtlich einer Leistungsbewertung und statistischen Auswertung sind mit dem Einsatz von SDL aber Einschränkungen verbunden, da der Sprachumfang adäquate Funktionen nicht umfaßt.

Zum einen sind Aussagen über die Effizienz der aus einer Spezifikation resultierenden Implementierung in bezug auf die Software-Leistungseigenschaften nicht in die allgemeine Entwicklungsmethodik einbezogen. Die Einbußen im Bereich der Laufzeiteffizienz (um bis zu 30%) sind zwar durch die immer leistungsfähiger werdenden Rechnerplattformen kompensierbar, können aber dann problematisch werden, wenn ein formal spezifiziertes System oder Protokoll direkt auf einer Zielplattform abläuft, die aus diversen Gründen an spezielle Hardwarevorgaben gebunden ist.

6.2.1 Ansätze zur Leistungsbewertung

Daher sind zu einer optimierten, korrelierten Entwicklung von Hochleistungs-Hard- und Software Aussagen zur Gewährleistung von quantitativen Entwurfsvorgaben sowie eine Prädiktion der erforderlichen Leistungsfähigkeit der Zielplattform notwendig.

Andererseits spielt bei der Leistungsbewertung die zeitliche Synchronisierung z. B. zwischen in Sende- und Empfangseinheit ablaufenden Protokollinstanzen eine große Rolle. Eine exakte Überprüfung zeitkritischer Abläufe mehrerer kommunizierender SDL-Systeme wird von den existierenden Werkzeugen jedoch nicht unterstützt. Es können zwar Signale untereinander ausgetauscht werden, der Fortgang der Zeit innerhalb eines Systems durch Ablauf eines Timers wird von anderen Systemen aber nicht registriert.

Die Bewertung von Kommunikationsprotokollen bezüglich der tragbaren Verkehrslast erfordert somit eine Methodik, die über eine rein formale Spezifikation hinausgeht und die innerhalb der SDL-Welt bestehende Problematik der Leistungsbewertung löst. Nachfolgend sind die möglichen Konzepte skizziert.

Neben dem Konzept eines universellen Hardware-Emulators, vgl. [44], und *Erweiterungen der SDL-Syntax* um zusätzliche Sprachkonstrukte zur Beschreibung von Echtzeitanforderungen und Leistungskenngößen, vgl. [37, 69, 93, 120], ist in diesem Zusammenhang die Technik der *annotativen Erweiterung* von SDL und der Nachrichtenflußdiagramme MSC mit Hilfe von Kommentaranweisungen zu nennen, vgl. [63].

Spracherweiterungen von SDL wurden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet, da dies zu nicht SDL-konformen Spezifikationen und proprietären Entwicklungsum-

gebungen führt. In [120] basiert die Erweiterung auf dem Konzept des „Duration Calculus“, einer Erweiterung der temporalen Logik, in welcher nicht einzelne Zeitpunkte, sondern Zeitintervalle betrachtet werden, vgl. [91].

Die *direkte Synchronisation* mehrerer miteinander kommunizierender SDL-Systeme wurde in [44] entwickelt und basiert auf der Idee, alle beteiligten SDL-Systeme an eine zentrale Simulationsuhr anzubinden und einen Zeitfortschritt erst nach Abarbeitung aller Signale in den Einzel-Systemen durchzuführen, vgl. hierzu Kapitel 8. Ausgangspunkt des Ansatzes der *indirekten Synchronisation* durch Einbettung von SDL-Spezifikationen in eine externe Simulationsumgebung ist die Überlegung, Protokolle nur als Teil eines Simulationssystems anzusehen. Zur gesamtheitlichen Bewertung unter realitätsnahen Bedingungen sind weitere Aspekte zu berücksichtigen, die das Systemverhalten beeinflussen. Beispielhaft seien hier Teilnehmer-, Mobilitäts-, Kanal- oder Topologiemodelle genannt. Für solche Modelle liegen zum Teil bereits Implementierungen in einer konventionellen Programmiersprache vor. Weiterhin existieren für viele grundlegende Programmieraufgaben (Listenverwaltung, Suchoperationen, etc.) effiziente Algorithmen bzw. fertige Routinen, auf die ein Systemsoftware-Entwickler im „Bausteinkastenprinzip“ zurückgreifen kann. Der Ansatz ermöglicht auch, verschiedene formal spezifizierte Protokolle vergleichend in einer Simulationsumgebung untersuchen zu können.

6.3 Entwurfs- und Bewertungsmethodik

Der bisherigen Argumentation folgend basierte die Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Dienstkonzepte bzw. der dazu untersuchten Protokolle auf SDL-Spezifikationen. Die Implementierung und Validierung erfolgte mit Hilfe des am Lehrstuhl vorhandenen CASE-Werkzeuges SDT.

Die Leistungsbewertung des FMBS wurde mit Hilfe des *SDL performance evaluation toolkit* (SPEET) durchgeführt, welches eine direkte (s. o.) zeitlich synchronisierte Simulation mehrerer miteinander kommunizierender SDL-Systeme ermöglicht. Durch Integration zusätzlicher Komponenten, z. B. zur Erzeugung von Verkehrslast und zur statistischen Auswertung, wird eine integrierte Leistungsbewertung möglich, vgl. [140]. Die wesentlichen Komponenten des Werkzeugs sind im Anhang B zusammengefaßt.

Neben dieser Methode wurde in dieser Arbeit der zukunftsweisende Ansatz verfolgt, formal spezifizierte Protokolle automatisiert in eine objekt-orientierte Simulationsumgebung einzubetten, um sie einer detaillierten Leistungsbewertung zu unterziehen. Die von mir entwickelte Methodik ist in Abbildung 6.1 der konventionellen SDL-Entwurfsmethodik gegenübergestellt.

Bei der oberhalb der gestrichelten Linie in Abbildung 6.1 dargestellten konventionellen Methodik wird der *SDT-Analyser* zur semantischen und syntaktischen Analyse der Spezifikation verwendet. Mit Hilfe des *Code-Generators* wird C- bzw. C++-Code erzeugt. Zusammen mit einem werkzeug-internen Simulationskernel und vom Benutzer geschriebenen Umgebungsfunktionen, die die Interaktion mit der Systemum-

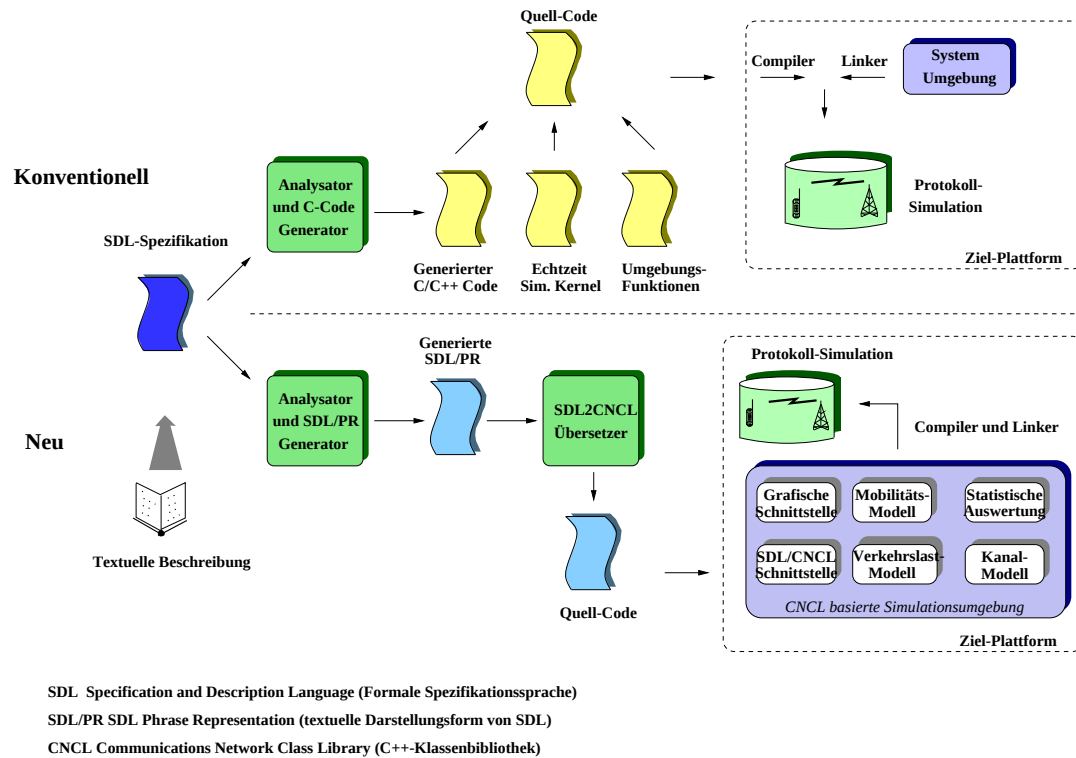


Abbildung 6.1: Entwicklungsmethodik

gebung definieren, wird der daraus entstehende Quellcode kompiliert. Diese Systemumgebung setzt sich beispielsweise aus Modellen zur Verkehrslasterzeugung oder Methoden zur statistischen Auswertung zusammen, die vom Anwender zur Simulation der Spezifikation manuell erzeugt und anwendungsspezifisch zu dem Quellcode gelinkt werden muß. Eine zeiliche Synchronisation ist nicht berücksichtigt.

Bei der im unteren Teil der Abbildung 6.1 dargestellten neuen Entwicklungsmethodik der indirekten Synchronisation wird die Spezifikation ebenfalls mit dem *SDT-Analyser* auf syntaktische und semantische Korrektheit analysiert und in die textuelle SDL-Darstellungsform umgewandelt. Anhand eines Übersetzers wird die so umgewandelte Spezifikation in C++-Code übersetzt und in eine aus einer C++-Klassenbibliothek bestehende Simulationsumgebung eingebettet, in der z.B. Methoden zur Auswertung und Kanal- und Mobilitätsmodelle integriert sind. An die Spezifikation angepaßte Umgebungsfunktionen müssen nicht erstellt werden. Durch die integrierte Umgebung ist eine implizite Synchronisation gegeben.

Mit dem Ziel, die Vorteile einer formalen Spezifikationsmethode mit den durch eine objekt-orientierte Simulationsumgebung gegebenen umfassenden Modellierungs- und Analysemöglichkeiten zu kombinieren, wurde daher in dieser Arbeit ein Prototyp zur automatischen Umsetzung SDL-spezifizierter Protokolle in C++-Klassen entwickelt.

Als C++-Klassenbibliothek stand mit der lehrstuhleigenen CNCL (*communication networks class library*) ein Klassenkonzept zur Verfügung, welches die ereignisge-

gesteuerte Simulation unterstützt und neben obig angesprochenen „Bausteinen“ umfangreiche Methoden und Schnittstellen zur statistischen Auswertung und Visualisierung bzw. Animation des zu simulierenden Systems bereitstellt, vgl. [108]. Aufbauend auf der CNCL wurde in dieser Arbeit unter der Bezeichnung *GPRSim* ein OSI-konformer Protokollsimulator zur Leistungsanalyse der GPRS-Protokolle entwickelt, der zur Einbindung transformierter SDL-Spezifikationen über eine entsprechende Schnittstelle verfügt, vgl. [48].

6.4 SDL2CNCL – Transformation einer SDL-Spezifikation in die C++-Klassenbibliothek CNCL

Bei der Entwicklung eines Übersetzers beliebiger SDL-Spezifikationen in äquivalenten C++-Code kann nicht nur der eigentliche Übersetzungsvorgang betrachtet werden. Vielmehr muß im Vorfeld die Syntax der Spezifikationssprache und die prinzipielle Struktur einer SDL-Spezifikation analysiert werden, um grundlegende Entwurfskriterien ableiten zu können. Darauf aufbauend kann dann ein Klassenkonzept entwickelt werden, welches eine geeignete Abbildung der Sprachkonstrukte der Spezifikationssprache auf äquivalente C++-Strukturen erlaubt. Abbildung 6.2 illustriert den Entwurfsansatz und zeigt die zwei notwendigen Entwicklungsschritte, die nach der Analyse parallel und unabhängig voneinander durchgeführt werden können.

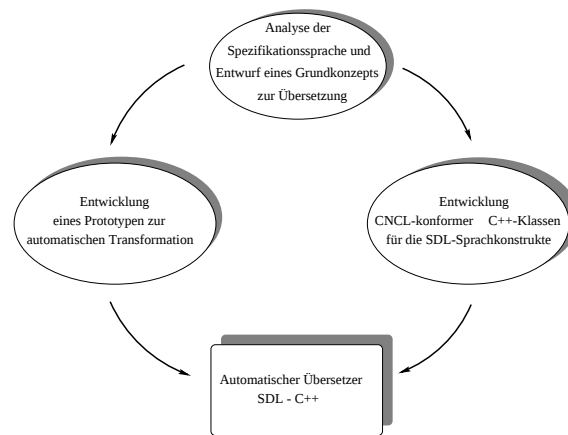


Abbildung 6.2: Ansatz zur Entwicklung des *SDL2CNCL*-Übersetzers

6.4.1 Analyse des strukturellen Aufbaus einer SDL-Spezifikation

6.4.1.1 Hierarchieebenen

Aus Abbildung 6.3 wird ersichtlich, daß eine SDL-Spezifikation aus mindestens drei Hierarchiestufen (System, Block, Prozeß) besteht. Auf der höchsten Hierarchiestufe befindet sich das *System*, welches sich aus einem oder mehreren *Blöcken* zusammensetzt. Ein Block kann wieder aus Blöcken bestehen, so daß sich eine baumartige

Struktur ergibt. Jeder Block enthält einen oder mehrere statisch oder dynamisch erzeugbare(n) $Prozess(e)$, in welchen die Systemfunktionen spezifiziert sind.

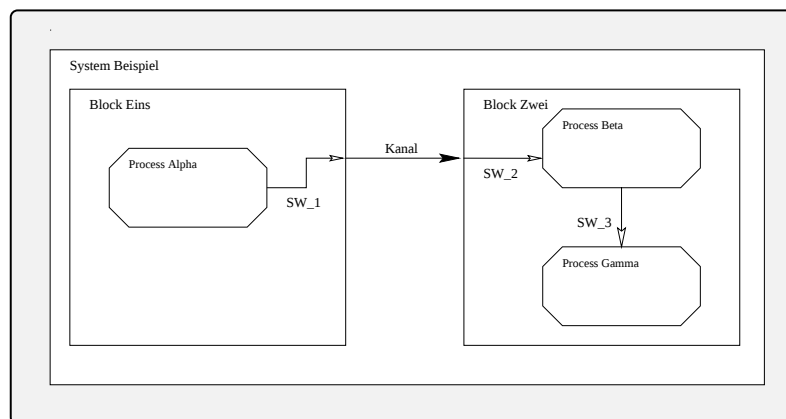


Abbildung 6.3: *Beispiel einer SDL-Spezifikation*

Jedes SDL-System ist in eine Umgebung (*environment*) eingebettet. Während die Kommunikation mit Umgebung und Systemblöcken auf Kanälen (*channels*) erfolgt, findet die Kommunikation zwischen Prozessen über Signalwege (*signal routes*) statt.

6.4.1.2 Darstellungsformen

SDL unterstützt zwei syntaktische Darstellungsformen, die auf dem gleichen semantischen Modell basieren. Anhand einer abstrakten Grammatik kann die grafische Darstellung (*graphical representation*, SDL/GR) in eine semantisch äquivalente textuelle Darstellung (*phrase representation*, SDL/PR) überführt werden.

Die Erzeugung einer SDL/PR wird in der Regel von dem zur Spezifikation verwendeten CASE-Tool vorgenommen und entzieht sich damit der Einflußnahme des Anwenders. Der Entwurf einer Spezifikation in der textuellen SDL-Form ist prinzipiell auch ohne das Werkzeug SDT möglich. Da bei dieser Spezifikationsart aber die syntaktische, semantische und dynamische Richtigkeit der Spezifikation nicht gewährleistet ist, sind „von Hand“ erstellte SDL/PR-Konstrukte für den automatischen Übersetzer unbrauchbar.

```

system Beispiel;
...
channel Kanal ... endchannel Kanal;
...
block Eins referenced;
block Zwei referenced;
...
endsystem Beispiel;
block Eins;
...
signalroute SW1 ...;
...
process Alpha referenced;
...
endblock Eins;
block Zwei;

signalroute SW2 ...;
signalroute SW3 ...;
...
process Beta referenced;
process Gamma referenced;
...
endblock Zwei;
process Alpha;
...
endprocess Alpha;
process Beta;
...
endprocess Beta;
process Gamma;
...
endprocess Gamma;

```

Um den Ablauf des Generierungsprozesses nachvollziehen zu können, ist in dem obigen Listing der formale Aufbau einer SDL/PR dargestellt, welchem die Beispielspezifikation aus Abbildung 6.3 zugrunde liegt.

Im Gegensatz zu der grafischen SDL-Darstellung, in der die einzelnen Moduln (Blöcke, Prozesse, Prozeduren etc.) ineinander verschachtelt sind, sind sie in der textuellen Form sequentiell gegliedert. Diese Abgeschlossenheit der Moduln innerhalb der SDL/PR wirkt sich auf die automatische Umsetzung, wie noch zu sehen ist, günstig aus.

6.4.2 Allgemeine Entwurfskriterien

Aufbauend auf obiger Untersuchung standen beim Entwurf des Übersetzers die folgenden einander bedingenden Kriterien im Vordergrund:

- Bewahrung des strukturellen Aufbaus einer SDL-Spezifikation
- Erzeugung einer modularen C++-Programmstruktur
- Gestaltung einer effizienten Prozeßkommunikation

6.4.2.1 Bewahrung der strukturellen Aufbaus einer SDL-Spezifikation

Nach [123] war eine grundlegende Idee bei der Entwicklung von SDL, ein System in Form von kommunizierenden Prozessen zu beschreiben. Auf diesem Konzept, Prozesse als Kernelemente einer SDL-Spezifikation zu betrachten, ist die Struktur und der Kommunikationsfluß innerhalb eines SDL-Systems aufgebaut.

Um die Abbildung der SDL-Prozesse auf ein entsprechendes Klassenkonstrukt so transparent wie möglich machen zu können und eine mehrfache Implementierung der Kommunikationsstruktur in den zu erzeugenden C++-Klassen zu vermeiden, ist es erforderlich, die Struktur einer SDL-Spezifikation bei der zu erzeugenden Klassenhierarchie zu berücksichtigen.

6.4.2.2 Erzeugung einer modularen C++-Programmstruktur

SDL ist eine Sprache zur Spezifikation und Beschreibung von Systemen, vgl. [96]; die direkte Einbindung eines Simulationswerkzeuges in die SDL-Spezifikation ist nicht vorteilhaft, da damit die übersichtliche Struktur der Spezifikation verloren geht. Weiterhin ginge die Möglichkeit verloren, ein formal spezifiziertes Protokoll direkt auf einer Zielplattform ablaufen zu lassen.

Ein weiterer Grund ist die Vergleichbarkeit des Codes mit der grafischen Spezifikation, vgl. hierzu die in Abbildung 6.4 dargestellte modulare C++-Programmstruktur. Aus Verständnisgründen ist es notwendig, einen leicht lesbaren Code zu erzeugen, da eine manuelle Nachbearbeitung z. B. zum Einfügen von Kommentaren oder zur Ergänzung nicht berücksichtigter Funktionalität des Prototypen sonst nur schwer möglich ist.

6.4.2.3 Gestaltung einer effizienten Prozeßkommunikation

Die Entwicklung einer automatisierten Übersetzung von SDL-Spezifikationen in äquivalenten C++-Code vollzieht sich vor dem Hintergrund der Integration in eine komplexe Simulationsumgebung. Erfahrungsgemäß beansprucht der Signalaustausch zwischen Prozessen einen Hauptteil der Simulationszeit, die nach Möglichkeit minimiert werden soll. Dieser Anforderung wird der Übersetzer dahingehend gerecht, daß die Prozeßkommunikation extern verwaltet wird, vgl. Abschnitt 6.4.5.4.

6.4.3 Das SDL2CNCL-Klassenkonzept

Unter Berücksichtigung obiger Entwurfskriterien sieht das Klassenkonzept vor, für jedes hierarchische SDL-Element eine Header- und eine Quellcode-Datei zu erzeugen. Abbildung 6.4 zeigt die generierte C++-Programmstruktur des in Abbildung 6.3 gezeigten SDL-Systems.

Eine direkte Umsetzung der Blöcke einer SDL-Spezifikation entfällt, da sie keinen Einfluß auf die Prozeßkommunikation haben. Auch die Implementierung der Kanalstruktur erfolgt indirekt durch Anbindung an die Signalstruktur.

Der Ansatzpunkt, die SDL-Sprachkonstrukte in die ereignisorientierte CNCL-Klassenbibliothek zu integrieren bedeutet, ein SDL-System als Ereignisbearbeiter zu modellieren. Dadurch bleibt die CNCL-Simulationsumgebung von der SDL-Hierarchie und Kommunikationsstruktur entkoppelt, so daß die Kommunikationsbeziehungen im SDL-System transparent verwaltet werden können. Alle SDL-Systeme sind an einen zentralen Ereignisverwalter angebunden, der die zeitliche Synchronisierung der Ereignisse übernimmt.

In Abbildung 6.5 sind die wesentlichen Klassen und deren Beziehung zueinander in der BOOCH-Notation dargestellt, vgl. [45]. Abgeleitet von der CNCL-Basisklasse *CN_EventHandler*, übernimmt die Klasse *SDLManager* die Aufgabe des Kommunikationsmanagers in einem SDL-System. Ein SDL-System wiederum wird auf die Klasse *SDLSystem* abgebildet, welche als zentrale Instanz im Konstruktor sämtli-

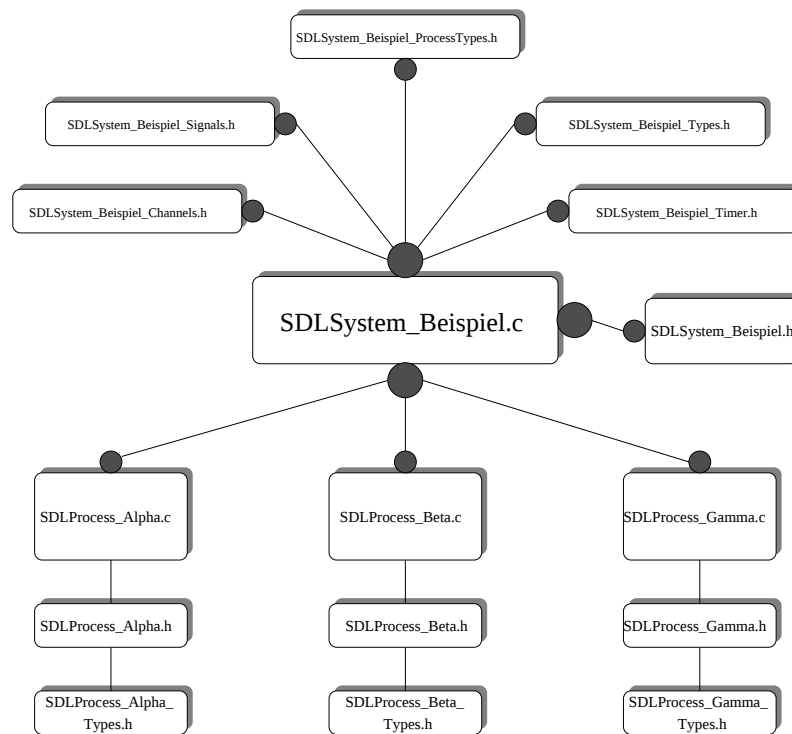


Abbildung 6.4: Programmstruktur eines transformierten SDL-Systems

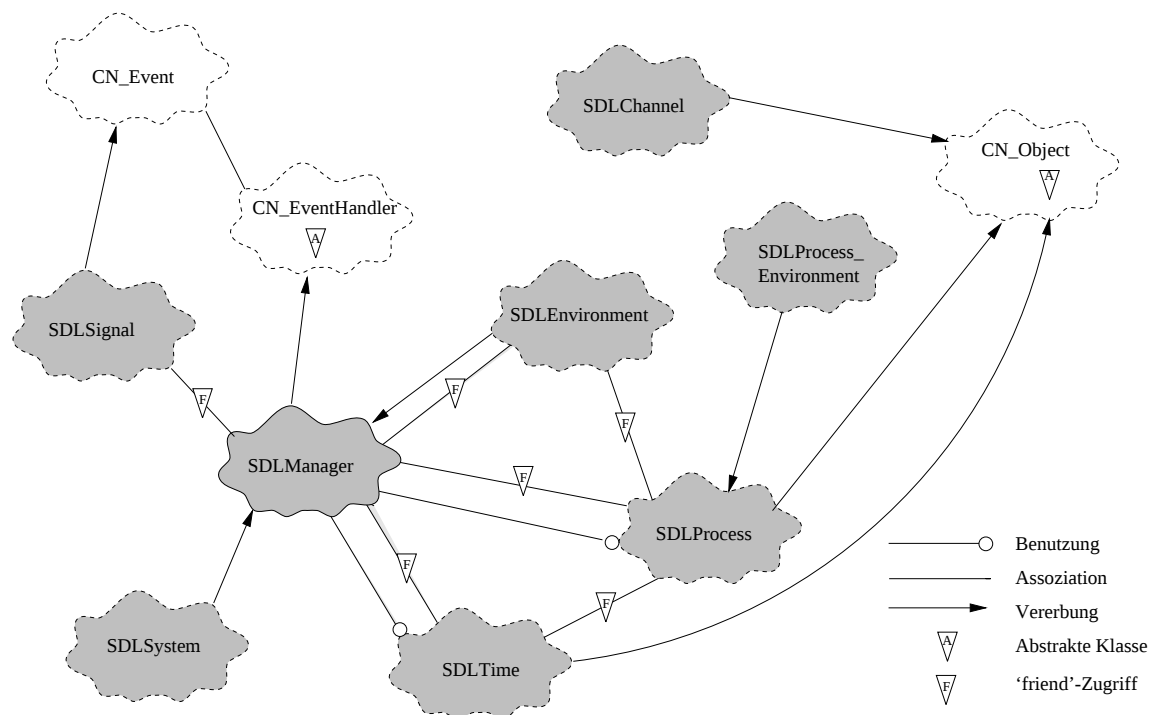


Abbildung 6.5: Darstellung der CNCL-SDL-Klassen

che Initialisierungsfunktionen beinhaltet und von der SDL-Basisklasse *SDLManager* abgeleitet ist.

Zur Nachbildung der SDL-Umgebung existieren die Klassen *SDL_Environment* und *SDLProcess_Environment*. Durch die Klasse *SDL_Environment* wird der Signalaustausch zwischen mehreren an der Simulation beteiligten Systemen koordiniert, während das dynamische Verhalten des Systems vom Benutzer in der Klasse *SDLProcess_Environment* von Hand programmiert werden muß, da das Verhalten der Laufzeitumgebung nicht in der SDL-Spezifikation selbst festgelegt ist.

Die Klasse *SDLProcess* stellt Methoden zur Verfügung, die zur Modellierung eines SDL-Prozeß benötigt werden und die Klasse *SDLChannel* beinhaltet eine Methode zur Charakterisierung der Eigenschaften (z.B. Verzögerung) eines SDL-Kommunikationskanals.

Zwei weitere Klassen werden zur Abbildung der SDL-Sprachkonstrukte „Time“ und „Signal“ benötigt. Die Methoden der Klasse *SDLTime* entsprechen den SDL-Sprachkonstrukten „Set“, „Reset“ und „Active“ zur Verwaltung von im System implementierten Timern. Die Klasse *SDLSignal* ist eine Erweiterung der CNCL Basisklasse *CN_Event*, um die Verwaltung der in SDL verwendeten Sender- und Empfängerprozeß-Kennungen zu ermöglichen.

Das Klassenkonzept wird bei der beispielhaft gezeigten Protokolleinbindung in Abschnitt 9.3 veranschaulicht. Zu weiteren Einzelheiten, z.B. bezüglich der im Prototypen nicht implementierten universellen Übersetzung von abstrakten Datentypen wird auf [124] verwiesen.

6.4.4 Entwicklung des Übersetzers

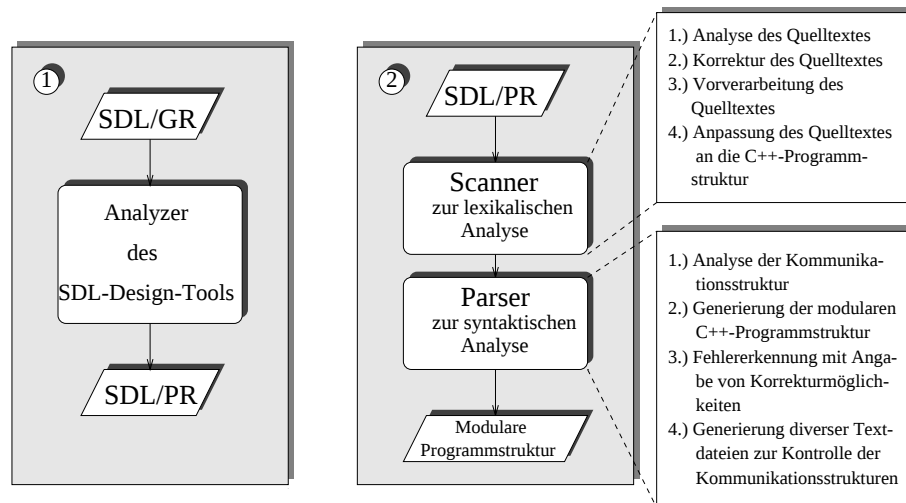
6.4.4.1 Der formale Ablauf der Übersetzung

In Abbildung 6.6 ist der prinzipielle Ablauf der Übersetzung erläutert. Bei der Entwicklung wurde die Tatsache ausgenutzt, daß SDL, wie bereits beschrieben, zwei äquivalente syntaktische Darstellungsformen unterstützt.

In Abschnitt 1 (links dargestellt) wird zur Umwandlung der grafischen SDL-Darstellungsform einer Protokollspezifikation in die äquivalente textuelle Darstellung der *Analyzer* des SDT verwendet. Der Analyzer überprüft die Darstellung auf syntaktische, semantische und dynamische Korrektheit.

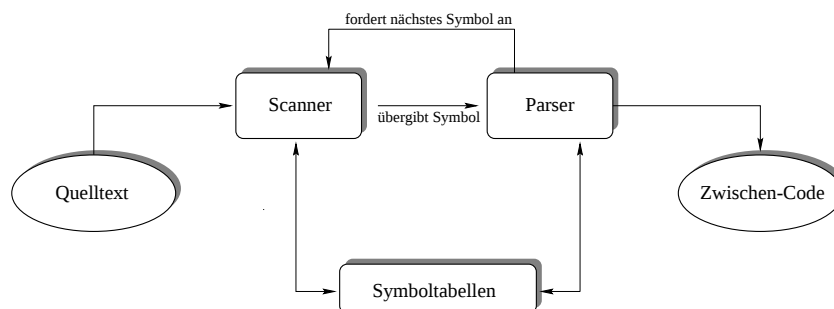
Die in Abschnitt 2 (rechts dargestellt) durchzuführende automatische Umsetzung einer SDL/PR in objekt-orientierten C++-Code kann somit eine fehlerfreie Darstellung voraussetzen. Dadurch entfällt eine Typenüberprüfung und die Kontrolle der Verträglichkeit der einander zugewiesenen Parameter, was den Übersetzungsvorgang vereinfacht.

Die Entwicklung des Transformationsprogramms gliedert sich dabei in eine lexikalische und syntaktische Analyse, wobei gemäß der in [131] und [173] empfohlenen Vorgehensweise bei der Übersetzung beide Analysen separat behandelt werden.

Abbildung 6.6: *Ablauf der Transformation*

6.4.4.2 Die lexikalische Analyse

Die erste Phase, die ein zu kompilierendes Quellprogramm zu durchlaufen hat, ist die lexikalische Analyse, welche durch einen Scanner realisiert wird. Die Hauptaufgabe eines Scanners besteht darin, Eingabezeichen zu lesen und als Ausgabe eine Folge von Symbolen zu erzeugen, die ein nachfolgender Parser syntaktisch analysiert. Diese wechselseitige Beziehung, die in Abbildung 6.7 schematisch zusammenfaßt ist, wird so implementiert, daß der Scanner als Unterroutine des Parsers agiert. Nach Erhalt eines vom Parser gegebenen Kommandos liest der Scanner solange Eingabezeichen ein, bis er das nächste Symbol erkannt hat.

Abbildung 6.7: *Interaktion zwischen Scanner und Parser*

Es gibt eine Reihe von Werkzeugen, die Scanner aus eigens dazu geschaffenen Notationen erzeugen, welche auf regulären Ausdrücken beruhen. Die Benutzung eines Scannergenerators für die lexikalische Analyse bringt eine Anzahl von generellen Vorteilen mit sich:

- Verkürzte Entwicklungs- und Implementierungszeiten
- Leichte Verständlichkeit
- Problemlose Erweiter- und Änderbarkeit

- Implementierung einer optimalen und zeiteffektiven Analysestrategie

Einer der bekanntesten, für verschiedene Betriebssysteme verfügbaren Scannergeneratoren ist der Scannergenerator *lex*. Er wurde in den 70er Jahren von M.E. Lesk und E. Schmidt vor dem Hintergrund entwickelt, einen leistungsfähigen Generator für die lexikalische Analyse im Compilerbau bereitzustellen.

Bei der vorliegenden Aufgabenstellung, der lexikalischen Analyse des kompletten Sprachumfangs der Spezifikationssprache SDL, stößt das *lex*-Werkzeug bezüglich der Summe der zu verarbeitenden regulären Ausdrücke an seine Grenzen. Aus diesem Grund findet in dieser Arbeit der Generator *flex* (*fast lexical analyzer*) Verwendung. Er wurde von Vern Paxson und seinen Mitarbeitern während ihrer Tätigkeit in der *Real Time Group* im Lawrence Berkley Laboratory in Berkley entwickelt. Die Benutzung von *flex* bringt neben der Möglichkeit einer vollständigen Bearbeitung der SDL-Sprachkonstrukte auch das schnellere Erkennen von vor-definierten Textmustern mit sich. Die Definition der internen Generatorsprachen ist sowohl bei *lex* als auch bei *flex* nahezu identisch, so daß Spezifikationen, die der *lex*-Syntax entsprechen, auch mit Hilfe des *flex*-Scannergenerators bearbeitet werden können. Die Generierung von Textscannern mit Hilfe von *flex* erfordert eine spezielle Eingabesprache, die im folgenden als *flex*-Sprache bezeichnet wird. Aus Programmen, die in dieser Sprache spezifiziert sind, generiert der *flex*-Compiler einen äquivalenten C-Quellcode.

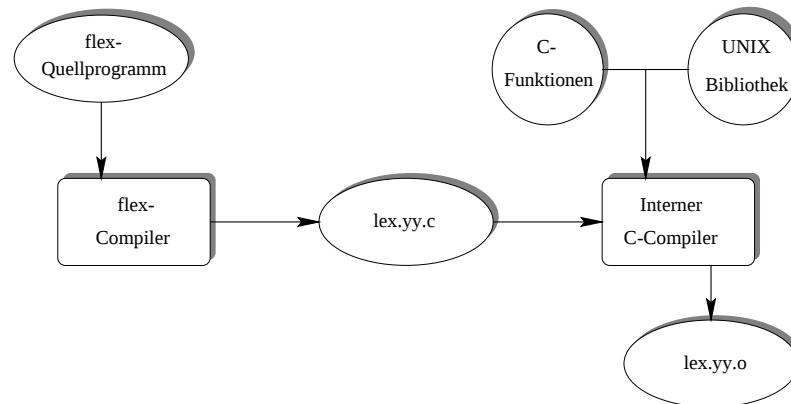


Abbildung 6.8: *Formaler Generierungsprozeß: vom Quell- zum Objektprogramm*

Aufgrund der maschinenunabhängigen Umsetzung ist es möglich, einmal generierte Scanner unabhängig von der jeweiligen Zielmaschine zu benutzen. Abbildung 6.8 zeigt den formalen Ablauf der Scannergenerierung, ausgehend von dem in der *flex*-Sprache modifizierten Quellprogramm, bis hin zu einem ablauffähigen Objektcode. Nach dem Einlesen des Quellprogramms generiert der Generator ein maschinenunabhängiges C-Programm mit dem Namen *lex.yy.c*. Dieses Programm beinhaltet die Definition und die Implementierung einer Funktion *yylex()*, die bei der weiteren Verarbeitung des Quelltextes innerhalb des später generierten Parsers eine zentrale Rolle einnimmt. Das Programm *lex.yy.c* wird wiederum kompiliert, diesmal jedoch

von einem zielmaschinen-internen C-Compiler, der unter Zuhilfenahme diverser C-Funktionen und der UNIX-Befehlsbibliothek ein Objektprogramm mit dem Namen *lex.yy.o* erzeugt.

6.4.4.3 Die syntaktische Analyse

Nachdem ein Quellprogramm unter lexikalischen Gesichtspunkten analysiert worden ist, muß der Eingabetext hinsichtlich seiner syntaktischen Struktur mit einem „Parser“ untersucht werden. Der Parser überprüft die ihm vom Scanner übergebenen Symbole unter Berücksichtigung ihrer syntaktischen Anordnung und Verträglichkeit. Hauptbestandteil eines Parsers ist demnach eine implementierte Grammatik, die den gesamten Sprachumfang der zu analysierenden Eingabesprache umfaßt.

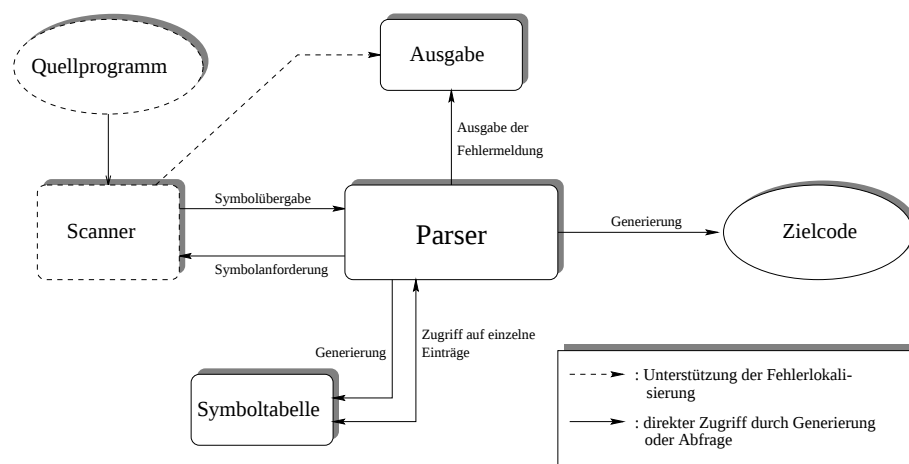


Abbildung 6.9: *Formaler Ablauf eines Parse-Vorganges*

Zur Überprüfung der Grammatik bildet der Parser aus der ankommenden Folge von Symbolen einen *Parse-Baum*. Abbildung 6.9 zeigt den formalen Ablauf der syntaktischen Analyse. Die theoretischen Grundlagen der Parse-Baum-Erstellung und die damit verbundene Beschreibung der Parse-Strategie sind Inhalt von [99]. Gerade bei komplexen und umfangreichen Eingabesprachen ist eine effiziente Entwicklung von Parsern ohne den Einsatz sogenannter Parsergeneratoren nicht realisierbar, zumal die Implementierung einer geeigneten Parser-Strategie ein zeitraubendes Unterfangen ist. Ein Parsergenerator erzeugt aus einer speziellen Notation, die an die Backus-Naur-Form (BNF) angelehnt ist, ein Programm einer höheren Programmiersprache, in dem der Algorithmus der Parser-Strategie implementiert ist.

In dieser Arbeit wurde der YACC-kompatible GNU-Parsergenerator *Bison* verwendet.¹ Ein von *Bison* erstellter Parser ist ein endlicher Zustandsautomat mit einem Stapel, in welchem er die Zustände ablegt. In jedem Zustand wird ein Token, das so-

¹Die Notation des Parsergenerators YACC (*yet another compiler-compiler*) als LALR (*look ahead left-to-right scanning of the input rightmost derivation*) Parsergenerator [94] hat sich in dem Bereich des Compilerbaus als Quasi-Standard durchgesetzt.

genannte „Look-ahead-Token“, vorausgelesen. Abhängig vom momentanen Zustand, der immer an oberster Stelle des Stacks steht, und dem Look-ahead-Token bestimmt er den neuen Zustand, zu dem er dann wechselt. Die Funktionsweise des Parsergenerators *Bison* und die des Scannergenerators *flex* sind nahezu identisch, so daß an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet werden kann.

6.4.4.4 Zusammenarbeit von Scanner und Parser

Sowohl der Scanner als auch der Parser sind zwei eigenständige Moduln, die unabhängig voneinander entwickelt werden können. Über die Zusammenarbeit zwischen der lexikalischen und syntaktischen Analyse wurden vorangehend bereits Aussagen getroffen, so daß jetzt die Akzente auf die Programmgenerierung eines lauffähigen Übersetzers gesetzt werden. Prinzipiell stehen dem Teilnehmer zwei Möglichkeiten für die Verknüpfung der lexikalischen und syntaktischen Analyse zur Verfügung. In dieser Arbeit wird die Methode der „Getrennten Moduln“ angewendet, die in Abbildung 6.10 dokumentiert ist.

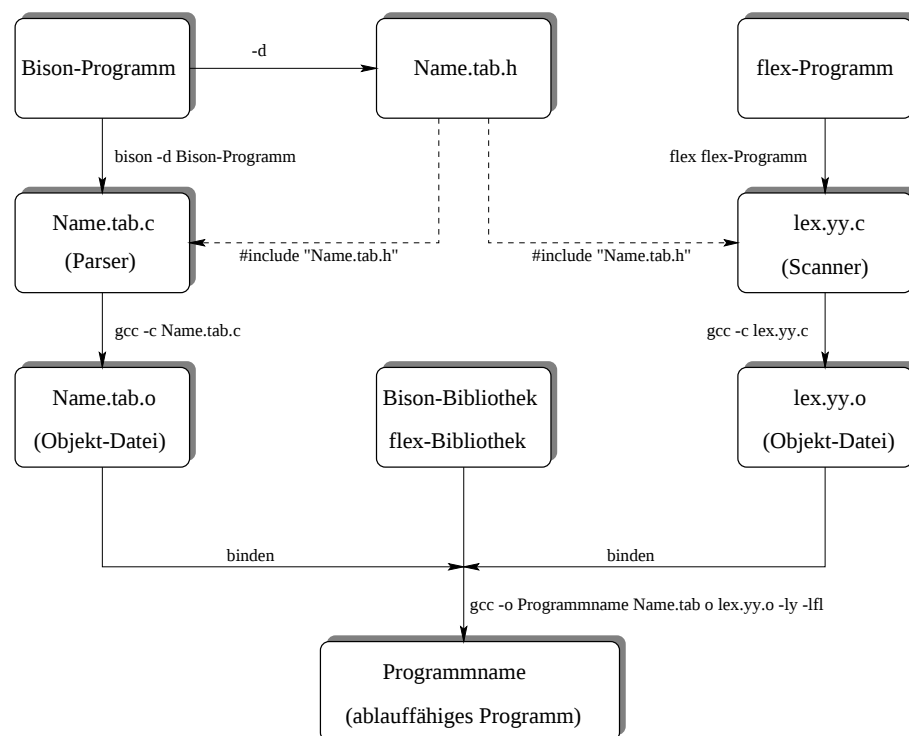


Abbildung 6.10: Verknüpfung der lexikalischen und syntaktischen Analyse

Da der Parsergenerator *Bison* die Datei *Name.tab.h* erzeugt und diese Datei in den Scanner eingebunden wird, ist der Parser bei dieser Methode immer vor dem Scanner zu generieren. Die zweite Verknüpfungsart, die Methode des Einbindens der Datei *lex.yy.c*, wird in [94] beschrieben.

6.4.5 Funktionsweise des Übersetzers

Nachfolgend werden die beiden Programme vorgestellt, die die lexikalische und syntaktische Analyse einer in SDL erstellten Spezifikation durchführen. Gemäß der Aufteilung der vorangegangenen Abschnitte wird auch hier die lexikalische und syntaktische Analyse separat behandelt.

6.4.5.1 Das Modul *ScannerSDL88.l*

Bei der Datei *ScannerSDL88.l* handelt es sich um eine *flex*-Spezifikation aus der mit Hilfe des *flex*-Compilers ein Scanner generiert wird.

Bei der Implementierung der SDL/PR-Grammatik für den automatischen Übersetzer muß die Grammatik an einigen Stellen modifiziert werden. Insbesondere die Differenzierung von Bezeichner- und Typennamen hat Auswirkungen auf die Scannerspezifikation. Im Hinblick auf die Attributübergabe vom Scanner an den Parser übernimmt der Scanner bei der Mustererkennung von SDL-Typennamen (*Integer*, *Float*, etc.) eine Vorverarbeitung.

Erkennt der Scanner einen SDL-Typennamen, dann weist er automatisch dem zugehörigen Attributwert die äquivalente Typendeklaration in der C++-Notation zu. Der Scanner entfernt aus dem SDL/PR-Quelltext automatisch alle Leerzeichen, Tabulatoren und Zeilenumbrüche. Ferner überliest er alle Kommentare, d. h. Kommentare werden aus der SDL-Spezifikation nicht mit in den generierten C++-Code übernommen.

6.4.5.2 Die Datei *ParserSDL88.y*

Die Datei *ParserSDL88.y* ist in der *Bison*-Sprache spezifiziert und beinhaltet sowohl die komplette SDL/PR-Grammatik als auch alle Funktionen, die die C++-Programme generieren. Der *Bison*-Compiler erzeugt aus der Datei *ParserSDL88.y* einen Parser, der die syntaktische Analyse des SDL/PR-Quellprogramms übernimmt.

Grundlage für die Formulierung der Regeln, aus denen sich die Grammatik zusammensetzt, ist die Syntaxdefinition der SDL/PR. Die Syntaxdefinition der SDL/PR ist Bestandteil der bereits referenzierten ITU-T Empfehlung *Z.100* [77]. Für die automatische Umsetzung der SDL-Spezifikationen mußten einige Regeln modifiziert und eine Reihe von Terminalen und Nichtterminalen zusätzlich eingeführt werden:

- Das *dummy*-Nichtterminal

Bison-Regeln bestehen aus einer Aneinanderreihung von terminalen und nicht-terminalen Symbolen. Der Zugriff auf diese Symbole ist erst dann möglich, wenn die jeweilige Regel bis zum Ende abgearbeitet (reduziert) ist. Im Extremfall bedeutet das für das hierarchisch angelegte *Bison*-Regelwerk, daß auf die Symbole der Startregel erst am Ende des Kompilierungsvorganges zugegriffen werden kann, da die Startregel als letzte reduziert wird.

Ein frühzeitiger Zugriff auf die Symbole wird mit der Einführung von *dummy*-Nicht-Terminals erreicht. Die Regel dieses Nicht-Terminals besteht aus einer leeren Anweisung. Sofort nach dem Aufruf dieser Regel reduziert sie sich wieder und ein vorgezogener Symbolzugriff wird ermöglicht. Die *dummy*-Nicht-Terminals sind über das gesamte Regelwerk verstreut und beginnen immer mit der Zeichenkette *dummy*.

- Typendeklaration der Attribute

Die in dieser Spezifikation verwendeten Attribute sind alle vom Typ eines *char*-Arrays. Diese Deklaration ist zwar gerade für den Compilerbau untypisch, findet aber ihre Begründung in der voraussetzbaren syntaktischen und semantischen Richtigkeit der SDL/PR-Quelldatei.

- Orientierung des Übersetzers innerhalb der Hierarchie

Während des Kompilierungsvorganges kommt es vor, daß der Übersetzer aus verschiedenen Zuständen heraus auf die gleiche Regel zugreift. Die Interpretation der Attribute der jeweiligen Regel hängt von dem vorherigen Zustand ab, so daß die auszuführenden Aktionen, die mit der Regel verknüpft sind, immer unterschiedlich sind. Die Entscheidung, welche Aktion zu welchem Zeitpunkt auszuführen ist, trifft der Übersetzer mit Hilfe gesetzter bzw. nicht gesetzter *flags*.

6.4.5.3 Analyse der Hierarchiestruktur

Die Analyse der Hierarchiestruktur einer SDL-Spezifikation vollzieht sich mit Hilfe verketteter Listen, vgl. Abbildung 6.11. Während des Kompilierungsvorganges erkennt der Übersetzer einzelne SDL-Elemente und legt diese dann in Einzellisten ab. Ist die Hierarchiestruktur einzelner Teilbereiche analysiert, verknüpft der Übersetzer die Einzellisten zu einer baumartigen Struktur.

Mit Hilfe der so analysierten Hierarchiestruktur können folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Differenzierung zwischen globalen und lokalen Signalen
- Direkte Einordnung der Prozeduren in die Hierarchiestruktur
- Syntax- und Typenüberprüfung

Lokale und globale Signale unterscheiden sich dadurch, daß globale Signale im gesamten System definiert sind. Der Gültigkeitsbereich lokaler Signale ist auf einzelne Blöcke beschränkt. Ein Versenden von lokalen Signalen über Kanäle ist damit ausgeschlossen.

Die Definition und Deklaration von Prozeduren erfolgt in SDL in den Prozessen. Damit ist jede Prozedur an einen Prozeß gebunden. Der Aufbau der SDL/PR, in dem die Prozedurbeschreibung abgeteilt von dem zugeordneten Prozeß am Ende einer Datei aufgeführt ist, macht es erforderlich, die Prozeßzugehörigkeit der Prozeduren in der hierarchischen Baumstruktur zu implementieren.

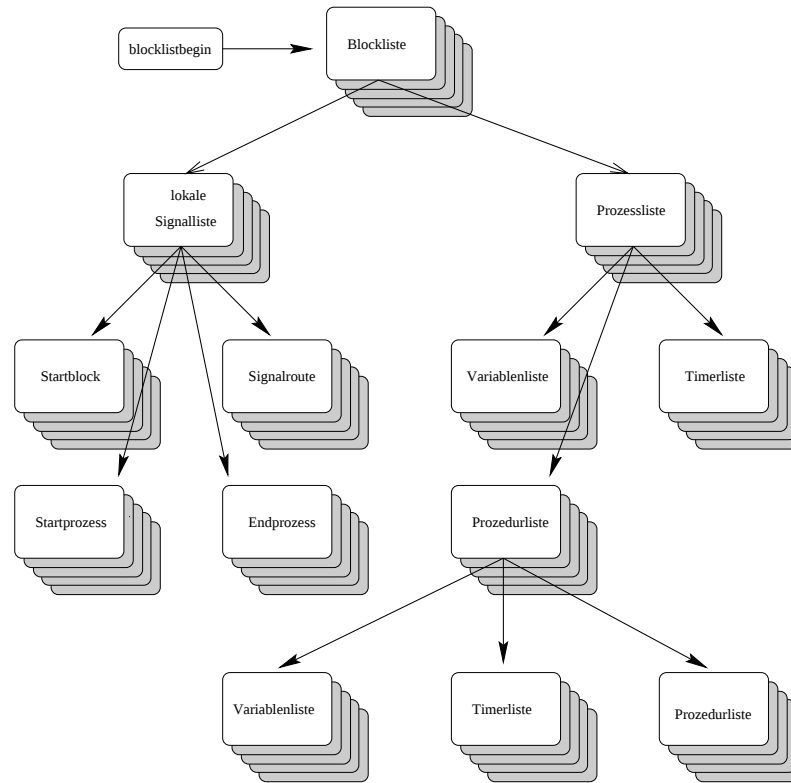


Abbildung 6.11: Darstellung der Hierarchiestruktur durch verkettete Listen

Mit dem Anlegen von Variablen- und Parameterlisten und der Abgrenzung ihres Gültigkeitsbereiches durch die Einbindung in die hierarchische Baumstruktur kann bei jedem Variablen- und Funktionsaufruf die syntaktische Richtigkeit der Ausdrücke überprüft werden.

6.4.5.4 Analyse der Kommunikationsstruktur

Gemäß der in Abschnitt 6.4.2 vorgestellten Entwurfskriterien analysiert der Übersetzer bei der Kompilierung des SDL-Quellprogramms neben der Hierarchiestruktur des SDL-Systems die Struktur der Prozeßkommunikation.

Durch einen zentralen *Kommunikationsmanager*, vgl. Abbildung 6.5 wird erreicht, daß die Zielprozesse bei Beachtung einer kanalbedingten Zeitverzögerung direkt adressiert werden können. Im einzelnen werden für jedes Signal folgende Angaben ermittelt:

- Start- und Endblock
- Kanal, über den das Signal versendet wird
- Startsignal- bzw. Endsignalroute
- Start- und Endprozeß

Durch die Verknüpfung der obigen Angabe mit den Signalnamen ist die exakte Identifizierung der Signale, insbesondere bei gleichen Signalnamen möglich. Beim Versenden der Signale im Simulationsprogramm muß nicht die gesamte Kommu-

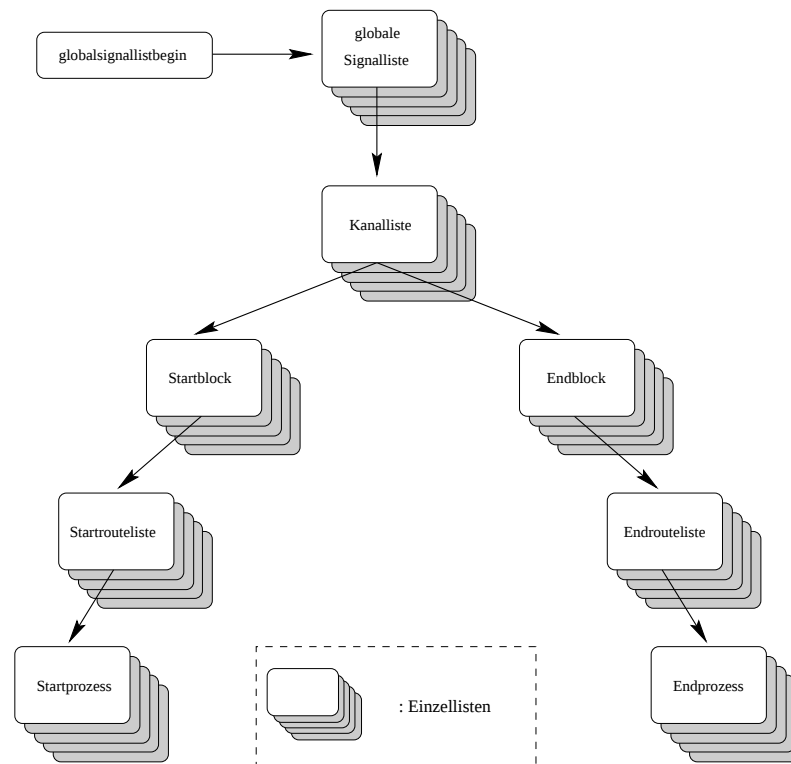


Abbildung 6.12: Darstellung der Signalwege

nikationsstruktur durchlaufen werden. Die Prozeßkommunikation ist durch die direkte Übergabe des Signals an den Zielprozeß möglich. In Abbildung 6.12 ist die Verknüpfung der Signalwege aus der Sicht der globalen Signale gezeigt. Der Signalverlauf der lokalen Signale ist in der hierarchischen Baumstruktur in Abbildung 6.11 festgelegt.

Die Beschreibungsweise der Signalverläufe berücksichtigt insbesondere bidirektionale Kanäle, bei denen das Versenden von Signalen in beide Richtungen möglich ist. Da beide Richtungen eines Kanals unterschiedliche Eigenschaften aufweisen können, betrachtet der Übersetzer einen bidirektionalen Kanal als eine Überlagerung aus zwei unidirektionalen Kanälen.

6.5 Das Simulationswerkzeug GPRSsim

Das Simulationswerkzeug *GPRSsim* wurde in dieser Arbeit zur Leistungsbewertung der Protokolle des GPRS an der Funkschnittstelle bzw. zwischen Mobilstation und dem GPRS-dienstunterstützenden Netzknoten SGSN in der Programmiersprache C++ entwickelt.

In Abbildung 6.13 ist der strukturelle Aufbau und der Informationsfluß zwischen den nachfolgend aufgelisteten funktionalen Komponenten des Simulators dargestellt:

- Simulationssteuerung (*simulation control*)
- Verkehrslasterzeugung (*UL/-DL-generator*)

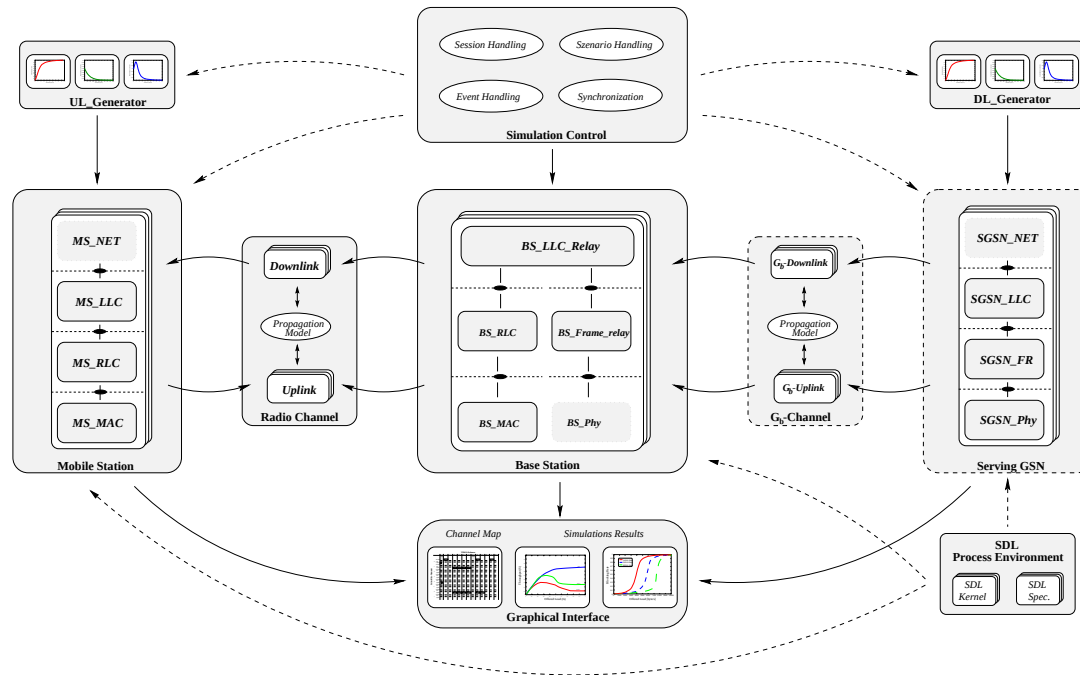


Abbildung 6.13: Der strukturelle Aufbau des GPRS-Simulators

- Netzkomponenten (*mobile station, base station, SGSN*)
- Funkkanal (*radio channel*)
- SDL-Schnittstelle (*SDL process environment*)
- Grafische Schnittstelle (*graphical interface*)

Im Modul *Simulation Control* wird neben der Initialisierung und Ablaufsteuerung die in Abschnitt 6.2.1 eingeführte indirekte zeitliche Synchronisierung der an der Simulation beteiligten Funktionsmoduln durchgeführt. Die Eigenschaften des GSM-Funkkanals werden im *Funkkanal*-Modul durch noch zu erläuternde Störmusterdateien modelliert, vgl. Kapitel 7. Die Moduln *Mobilstation*, *Basistation* und *SGSN* repräsentieren die im Simulator implementierten logischen GPRS-Netzkomponenten und beinhalten die entsprechenden Protokollfunktionen. Das *SDL-Interface* stellt eine Schnittstelle zur Einbindung formal spezifizierter Protokolle zur Verfügung. Eine Darstellung der Protokollabläufe und Ergebnisse wird durch Anbindung an ein am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze entwickeltes Werkzeug zur interaktiven Visualisierung beliebiger Simulationsvorgänge ermöglicht.

6.5.1 Modul *Simulationssteuerung*

Zur Implementierung des Simulationswerkzeuges in der Programmiersprache C++ wurde, wie bereits erwähnt, die CNCL-Klassenbibliothek verwendet. Diese unterstützt einen objekt-orientierten Softwareentwurf [119] und ermöglicht eine ereignisorientierte Simulation. Die Ereignissteuerung übernehmen sogenannte Ereignisbearbeiter (*event handler*), die durch das Eintreffen von Ereignissen (*events*),

<i>Parameter</i>	<i>Bedeutung</i>
<i>sim_time</i>	Simulationsdauer
<i>ms_number</i>	Anzahl der Mobilstationen
<i>number_of_channels</i>	Anzahl der allokierten GPRS Kanäle
<i>type_of_traffic</i>	Zusammensetzung des erzeugten Verkehrs
<i>priority</i>	Verteilung der Prioritäten der generierten Aufträge
<i>passiv_mean</i>	Ankunftsprozeß (Zwischenankunftszeit)
<i>traffic_load</i>	Bedienprozeß (Paketlänge)
<i>pattern</i>	Fehlermusterdateien
<i>coding_scheme</i>	Codierschema
<i>max_retrys</i>	Maximale Anzahl der erlaubten Zufallszugriffe

Tabelle 6.1: Die wichtigsten Parameter der Datei *.sim_defaults*

aktiviert werden und nach Abarbeitung des Vorgangs selber Ereignisse an andere Ereignisbearbeiter versenden.

Die zeitliche Ablaufsteuerung erfolgt mit Hilfe eines Ereignisverwalters (*event scheduler*), der die Abarbeitungsreihenfolge der Ereignisse bestimmt. Jedes Ereignis verfügt über eine Priorität und eine definierte Ausführungszeit. Die Simulationszeit schreitet erst dann in diskreten Schritten voran, wenn alle als gleichzeitig definierten Ereignisse abgearbeitet worden sind. Durch diese Gleichzeitigkeit im Simulationsprozeß wird nachgebildet, daß z.B. mehrere Mobilstationen zum gleichen Zeitpunkt auf ein Ereignis reagieren.

6.5.1.1 Die Simulationsparameter-Datei *.sim_defaults*

Zur Initialisierung des jeweiligen Simulationslaufes steht die Datei „*.sim_defaults*“ zur Verfügung. Sie enthält neben Parametern, die den allgemeinen Simulationsablauf betreffen, auch protokollspezifische Einträge. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Die Initialisierung erfolgt beim Start eines Simulationslaufes durch Verwendung einer überladbaren Methode zum universellen, typunabhängigen Einlesen von Parametern. Diese Kapselung erlaubt, eine Vielzahl von Simulationsparametern ohne erneutes Compilieren des Programms zu verändern.

Neben der Initialisierung und allgemeinen Ereignisverwaltung werden von der Simulationssteuerung die Protokollinstanzen sowie die beiden Funkkanäle mit einer Periodendauer von einem GSM-TDMA-Rahmen getaktet. Die aktuellen Zeitschlitz- und TDMA-Rahmen-Nummern können jederzeit abgefragt werden.

6.5.2 Modul *Funkkanal*

Charakteristika des Funkkanals werden im Modul *Funkkanal* durch kanalspezifische Störmuster berücksichtigt. Dazu geben die in Abschnitt 7.1.2.6 eingeführten Fehlermusterdateien unter Berücksichtigung der Fehlererkennungseigenschaften der

verwendeten Codierung und Decodierung für jeden logischen Kanal eine Folge von Burstfehler-Wahrscheinlichkeiten an. Zu Beginn der Simulation wird mobilstations-spezifisch auf jedem Kanal an einer zufällig bestimmten Stelle ein Störmuster abgerufen. Dynamische Signalverhältnisse können durch eine zu Simulationsbeginn festgelegte Folge wechselnder Störmuster modelliert werden.

Die Störung bzw. Zerstörung eines Bursts wird nachgebildet, indem der Zeiger, der auf den Speicherbereich der enthaltenen Daten zeigt, auf NIL gesetzt wird. Die Mobilstationen haben somit keinerlei Möglichkeit, die Art des Bursts zu erkennen oder auszuwerten.

Das Modul *Downlink* modelliert den Kanalzustand der Funkübertragungsstrecke für alle Nachrichten, die von der Basisstation an die Mobilstationen geschickt werden. Die an den Downlink gesendeten Events werden an alle in einer Liste eingetragenen Mobilstationen weitergeleitet.

Alle Events, die durch die Mobilstationen erzeugt werden, müssen in dem Modul *Uplink* auf Kollisionen und auf Funkkanalstörungen untersucht werden. Falls zwei oder mehr Mobilstationen in gleichen Zeitschlitz senden, wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gemäß eines parametrisierbaren Capture-Modells einer oder keiner der Bursts weitergeleitet, vgl. Kapitel 9.

6.5.3 Die Moduln *MS*, *BS* und *SGSN*

Die im Simulator implementierte Protokollarchitektur umfaßt die logischen Netzkomponenten *Mobilstation*, *Basisstation* und *SGSN*. Die Protokollstapel entsprechen der in Kapitel 4 vorgestellten Protokollarchitektur.

Die Moduln *MS_LLC* bzw. *SGSN_LLC* beinhalten die Sicherungsschichtprotokolle. In der aktuellen Version des Simulators sind dort die Schnittstellen zur Einbettung von SDL-Spezifikationen lokalisiert.

In den Moduln *MS_MAC* und *BS_MAC* sind die Medienzugriffs-Protokolle implementiert. Aus implementierungstechnischen Gründen wurde die physikalische Schicht als Teil der MAC-Schicht realisiert. Die Funktionen der Bitübertragungsschicht, z. B. das Senden der Bursts, werden von der MAC-Schicht übernommen.

6.5.4 Modul *Verkehrslasterzeugung*

Für beide Übertragungsrichtungen stehen separate Generatoren zur Erzeugung multimedialer Last in Form von Paketen unterschiedlicher Länge nach wählbaren Gesetzen für die Übertragungszeitpunkte zur Verfügung. Die aktuelle Version des Simulators unterstützt zwei unterschiedliche Methoden zur Zuteilung der generierten Pakete an die Mobilstationen bzw. Partnerinstanzen:

- Unkorrelierte Verkehrslast
- Korrelierte Verkehrslast

Die den Generatoren zugrunde liegenden Modelle zur Erzeugung der Verkehrslast, in denen der Bedienprozeß anhand der Verteilung der Paketlängen und die Ankunfts-

rate durch die Zwischenankunftszeit modelliert werden, wurden bereits in Kapitel 3 vorgestellt.

6.5.4.1 Unkorreliert erzeugte Verkehrslast

Unter Berücksichtigung des gewählten Szenarios erzeugen die Generatoren für Down- und Uplink unabhängig voneinander Verkehr, welcher in Form von Aufträgen gleichmäßig auf alle Mobilstationen bzw. Partnerinstanzen im Festnetz verteilt wird. Falls eine Mobilstation während der Übertragung eines Auftrags einen neuen Auftrag erhält, wird dieser in eine Warteschlange eingereiht.

Obwohl mit diesem Modell nur nicht-dialogorientierte Anwendungen nachbildbar sind, können hinreichend genaue Aussagen über das Protokollverhalten unter verschiedenen Verkehrslastszenarien getroffen werden.

6.5.4.2 Korreliert erzeugte Verkehrslast

Der Einsatz eines Verkehrslastgenerators zur Erzeugung korrelierter Verkehrslast ermöglicht eine genauere Abbildung interaktiver Anwendungen und kann auch zur Untersuchung von Gruppenkommunikationsszenarien herangezogen werden.

6.5.5 Benutzeroberfläche

Zur Visualisierung der Funktionsweise der Protokolle kann der Simulationsablauf grafisch dargestellt werden. Hierzu wird das am Lehrstuhl entwickelte *Graphical Interactive Simulation Result Tool* (GIST) verwendet.



Abbildung 6.14: Grafische Oberfläche des Simulators

Aus Sicht des Betriebssystems ist GIST ein eigenständiger Prozeß, der bei Aufruf des Protokollsimulators gestartet wird. Während des Simulationslaufes werden die Daten der darzustellenden Abläufe an diesen Prozeß übergeben. Durch Definition einer virtuellen grafischen „Simulationswelt“ können beliebige Simulationsparameter dynamisch dargestellt werden.

Zusätzlich werden diese Daten – vergleichbar mit einem Videorecorder – aufgezeichnet und stehen auch nach Beendigung der Simulation zur Verfügung. Die Navigation im Zeitbereich erfolgt mit den von einem Recorder her bekannten Bedienelementen. Sie ermöglichen das Betrachten einzelner Simulationssequenzen mit einstellbarer Geschwindigkeit, vgl. Abbildung 6.14.

6.5.6 SDL-Schnittstelle

Die SDL-Schnittstelle des Simulators wird repräsentiert durch die Klasse *SDLProcess_Environment*, vgl. Abbildung 6.13. Diese Klasse wird beim Übersetzen einer SDL-Spezifikation durch das in Abschnitt 6.4 beschriebene Programm „SDL2CNCL“ erzeugt. Sie übernimmt die Kommunikation zwischen den in C++ implementierten angrenzenden Teilschichten und dem SDL-System.

Der Informationsaustausch innerhalb der SDL-Umgebung erfolgt gemäß der SDL-Philosophie anhand von Signalen, während in der CNCL-Umgebung Events verschickt werden. An die Klasse *SDLProcess_Environment* werden dementsprechend Signale gesendet, die in Form von Events an die angrenzenden Schichten weitergegeben werden.

Modellierung des GSM-Funkkanals

Zur Untersuchung des Verhaltens der in dieser Arbeit entwickelten Protokolle bei gestörter Übertragung ist es erforderlich, die Eigenschaften des Funkkanals zu modellieren.

Die Möglichkeit einer handhabbaren analytischen Betrachtung setzt die Verwendung eines einfachen Kanalmodells voraus. Beispiele dafür sind das Gilbert-Elliot- bzw. das Fritchman-Modell, die das Verhalten des Kanals durch zeitdiskrete Markov-Ketten beschreiben, vgl. [73, 80, 85, 139].

Es hat sich jedoch gezeigt, daß einfache Kanalmodelle keine hinreichende Beschreibung der Eigenschaften der Funkkanäle eines GSM-Mobilfunksystems erlauben. Bei Verwendung komplexer Kanalmodelle ist eine Auswertung mit einfachen analytischen Methoden nicht möglich, so daß in dieser Arbeit auf eine Modellierung in Zusammenhang mit simulativen Methoden zurückgegriffen wurde.

Die durchgeführten simulativen Leistungsuntersuchungen basieren auf Fehlermusterdateien, sogenannten „Patternfiles“, die von der ETSI zur Verfügung gestellt bzw. mit Hilfe eines in dieser Arbeit entwickelten Patternfilegenerators erstellt wurden. Die Fehlermuster berücksichtigen die GSM-Burststruktur und Sendefrequenz unter Annahme eines idealen Frequenzsprungverfahrens. Nachgebildet werden für bestimmte Morphostrukturen:

- Signalschwankungen aufgrund von Mehrwegeausbreitung (*Rayleigh-Fading*)
- Abschattung (*Shadowing*)
- Gleichkanalstörer

Für die Simulationen standen Fehlermuster für verschieden stark gestörte Kanäle und unterschiedliche Bebauungen zur Verfügung. Nachfolgend werden die Fehlermusterdateien erläutert und hinsichtlich der resultierenden Funkkanalqualität ausgewertet.

7.1 Fehlermuster für Normal-Bursts

7.1.1 Beschreibung der Fehlermusterdateien

Jede dieser Fehlermusterdateien enthält die Störmuster für 24000 GSM-Normal-Bursts mit jeweils 114 *bit*. Da nur jeder achte Zeitschlitz berücksichtigt wurde, entspricht das einer Simulationsdauer von 2 *min* Echtzeit. Es liegen Dateien für drei

unterschiedliche Kanalqualitäten mit einem Gleichkanalstörabstand¹ (*carrier to interference ratio*, C/I) von 4 dB , 7 dB und 10 dB vor.

Bei den Simulationen wurde eine Geschwindigkeit des mobilen Teilnehmers von rund 3 km/h zugrunde gelegt. Prinzipiell lassen sich die nachfolgend beschriebenen Aussagen über die Fehlerhäufigkeit aber auch auf andere Geschwindigkeiten übertragen. Die Dateien liefern neben der Aussage, ob ein bestimmtes Bit korrekt oder falsch übertragen wurde, zu jedem Bit auch einen sogenannten „Softdecision“-Wert. Dieser Wert wird vom Entzerrer des GMSK-Demodulationssystems geliefert.

Die Funkübertragung des digitalen Bitstroms erfolgt in Form eines analogen modulierten Signals, das beim Empfänger nach Demodulation und Entzerrung zunächst als wertekontinuierliches Signal vorliegt. Bei der „Harddecision“, kurz HD, wird das Signal mit Hilfe einer Schwellwertentscheidung in die beiden diskreten Werte „0“ und „1“ umgewandelt. Im Gegensatz dazu wird das Signal bei der „Softdecision“, kurz SD, quantisiert. Für die in dieser Arbeit verwendeten Fehlermuster wurde eine 7-bit-Quantisierung durchgeführt.

Ein Softdecisionwert von „0“ bedeutet, daß das Bit sehr unsicher empfangen worden ist. Die Bitfehlerhäufigkeit liegt dabei im Bereich von 50%. Bei einem sehr hohen Softdecisionwert wurde das Bit dagegen sehr sicher empfangen. Durch die feinere Quantisierung bei der Softdecision wird also zusätzliche Information über die Zuverlässigkeit der empfangenen Bits gewonnen. Der Softdecisionwert sd ist proportional zur lokalen Bitfehlerrate p_e eines Bits.

Nach [115] gilt:

$$sd = -\ln\left(\frac{p_e}{1 - p_e}\right) \quad (7.1)$$

Der Wert sd wurde zur einfacheren Zahlendarstellung und zur Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit mit 8 multipliziert und in den Fehlermusterdateien mit der Bezeichnung sd' als Zeichenkette anstelle eines Gleitkommawertes abgelegt. Der größte Wert für sd' beträgt $2^7 - 1 = 127$. Die Softdecisionwerte können in dieser Form direkt vom Faltungsdecodierer für die „Maximum Likelihood Decision“ verwendet werden, vgl. [117].

7.1.2 Auswertung der Fehlermusterdateien

7.1.2.1 Softdecision

In Abbildung 7.1 ist ein Ausschnitt aus einem Patternfile für ein Kanalverhältnis von $C/I = 10\text{ dB}$ dargestellt. In der Abbildung sind die Softdecisionwerte (im Bereich zwischen 0 und 127) für insgesamt 44 Bursts à 114 bit über der Zeit aufgetragen. Die Einflüsse des Kurzzeit-Schwunds (*shortterm fading*) und des Frequenzsprungverfahrens sind in dieser Darstellung gut zu erkennen. Man sieht, daß bei diesem Kanalverhältnis rund ein Viertel der übertragenen Bursts mit maximalem Softdecisionwert, d. h. absolut fehlerfrei, empfangen werden.

¹Der Gleichkanalstörabstand bezeichnet das Verhältnis des empfangenen Nutzsignals C bezogen auf die Interferenzleistung I .

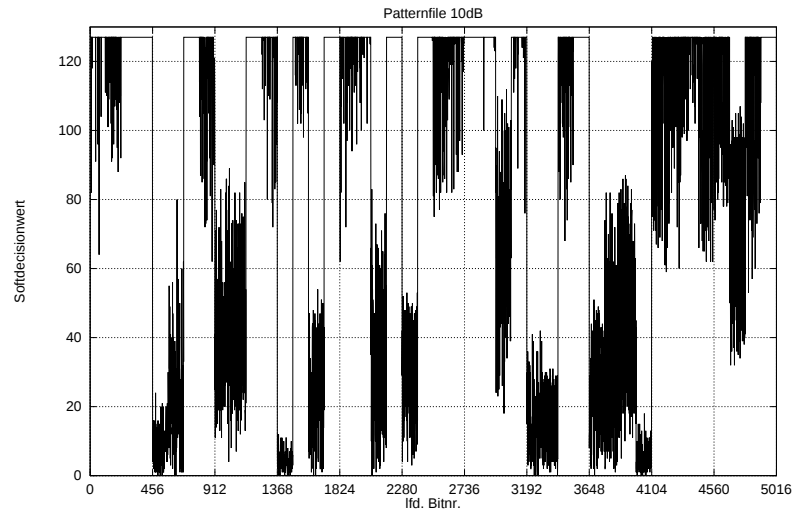


Abbildung 7.1: *Softdecisionwerte für ein C/I -Verhältnis von 10 dB*

7.1.2.2 Harddecision

In Abbildung 7.2 sind die fehlerhaft übertragenen Bits bei einer Schwellwertentscheidung abgebildet. Ein Wert von „1“ bedeutet, daß das Bit im Wert invertiert übertragen wurde. Man erkennt, daß die Fehler in Fehlerbüscheln auftreten und Einzelbitfehler selten vorkommen.

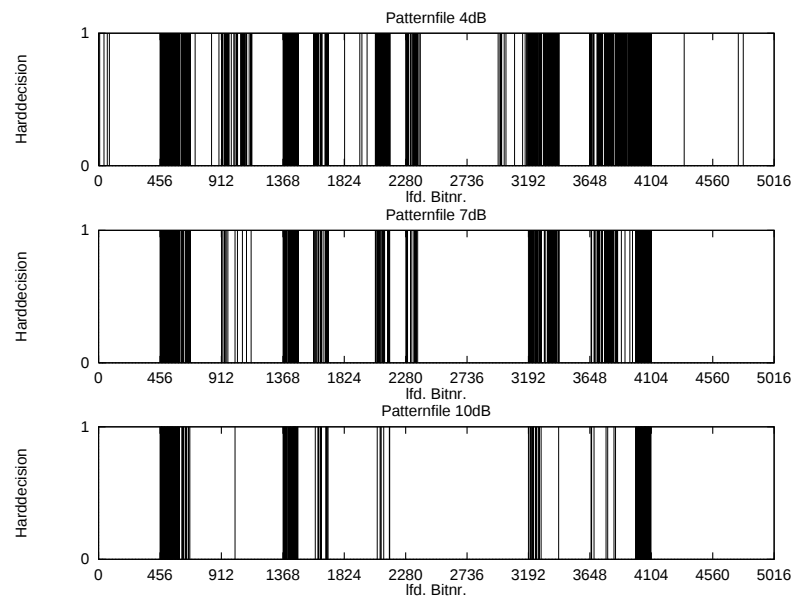


Abbildung 7.2: *Harddecisionwerte für C/I -Verhältnisse von 4, 7 und 10 dB*

Aus den Harddecisionwerten läßt sich unmittelbar die in Tabelle 7.1 dargestellte mittlere Bitfehlerhäufigkeit berechnen, welche zwischen 12,6% und 4,5% schwankt.

C/I	4 dB	7 dB	10 dB
BER	12.6%	7.8%	4.5%

Tabelle 7.1: Bitfehlerhäufigkeit bei C/I-Verhältnissen von 4, 7 und 10 dB

7.1.2.3 Fehlerverteilung

Bei einem Vergleich der Tabelle 7.1 mit Abbildung 7.2 fällt auf, daß bei einem schlechten Kanal mit einem C/I-Verhältnis von 7 dB und einer mittleren Bitfehlerhäufigkeit von 7,8% immer noch ungefähr 50% der Bursts ungestört übertragen werden. In einigen Fällen ist jedoch mehr als die Hälfte aller Bits gekippt.

Eine genauere Betrachtung zeigt, daß mehr als 66% aller gesendeten Bursts nach der Übertragung weniger als 5 Fehler (pro Burst) aufweisen und mehr als 57% der Bursts sogar absolut fehlerfrei übertragen werden. Weitere Ergebnisse finden sich in Tabelle 7.2 und Abbildung 7.3.

Fehleranzahl pro Burst	C/I-Verhältnis		
	4 dB	7 dB	10 dB
0 Fehler	40.3%	57.3%	72.4%
1 Fehler	3.6%	3.5%	2.7%
2 Fehler	2.6%	2.4%	1.8%
3 Fehler	1.9%	1.7%	1.4%
4 Fehler	1.6%	1.6%	1.1%

Tabelle 7.2: Burstfehlerverteilung bei C/I-Verhältnissen von 4, 7 und 10 dB

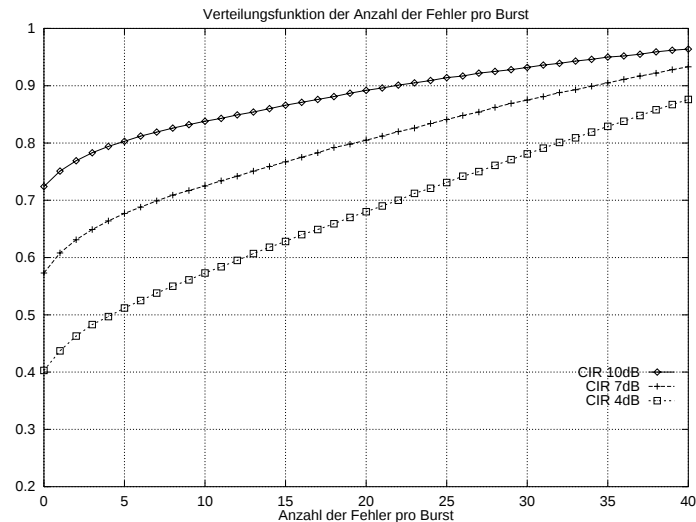


Abbildung 7.3: Burstfehlerverteilung bei C/I-Verhältnissen von 4, 7 und 10 dB

7.1.2.4 Kanalkapazität

Um die maximal mögliche Übertragungsrate zu bestimmen, kann aus der mittleren Bitfehlerwahrscheinlichkeit nach [134] die Kanalkapazität wie folgt berechnet werden:

$$C = 1 + p_e \cdot ld \quad p_e + (1 - p_e) \cdot ld \quad (1 - p_e) \quad (7.2)$$

Mit p_e wird die mittlere Bitfehlerwahrscheinlichkeit (*bit error ratio*, BER) des Kanals bezeichnet. Obige Gleichung gilt nur für einen Kanal, der unkorrelierte Fehler erzeugt, d. h. die Gleichung beschreibt die Kanalkapazität nach idealem Interleaving. Bei einer Burstlänge von 114 *bit* kann die Kanalkapazität unter Berücksichtigung der büschelhaften Charakteristik der Fehler gemäß Gleichung 7.3 berechnet werden. Die Kanalkapazität bei i Fehlern in einem Burst ergibt sich, indem die Kanalkapazität $C(BER_i)$ nach Gleichung 7.2 bei einer Bitfehlerwahrscheinlichkeit von BER_i mit der Wahrscheinlichkeit $p(BER_i)$, daß genau i Fehler in einem Burst auftreten gewichtet wird. Die Gesamtkapazität $\tilde{C}$ wird durch Addition der $C(BER_i)$ ermittelt, vgl. [117]:

$$\tilde{C} = \sum_{i=0}^{114} p(BER_i) \cdot C(BER_i), \text{ wobei} \quad (7.3)$$

$p(BER_i)$: Wahrscheinlichkeit, daß genau i Fehler in einem Burst auftreten

$C(BER_i)$: Kanalkapazität nach Gleichung 7.2

Eine Auswertung beider Gleichungen ergibt, daß durch die büschelhafte Verteilung der Fehler ohne Interleaving die Kanalkapazität erhöht wird. In Tabelle 7.3 sind die Kanalkapazität und maximale Übertragungsrate für die verschiedenen C/I-Verhältnisse aufgelistet.

Fehlerart		C/I-Verhältnis		
		4dB	7dB	10dB
Unkorrelierte Fehler	$C(p_e)$	0.454	0.605	0.735
	U_{max}	10351 bit/s	13794 bit/s	16758 bit/s
Büschelfehler	$\tilde{C}(BER_i)$	0.620	0.750	0.851
	$\tilde{U}_{max}$	14136 bit/s	17100 bit/s	19403 bit/s

Tabelle 7.3: Maximal erzielbare Übertragungsraten bei 4, 7 und 10 dB

Bei einer Bruttoübertragungsrate von 22.800 *bit/s* für einen GSM-Verkehrskanal ergibt sich eine Nettoübertragungsrate von $\tilde{U}_{max} = 22.800 \cdot \tilde{C}$ *bit/s* bei der direkten Betrachtung der Fehlermusterdateien bzw. von $U_{max} = 22.800 \cdot C$ *bit/s* nach idealem Interleaving. In Abbildung 7.4 ist grafisch veranschaulicht, daß die vom gestörten Kanal zur Verfügung gestellte Übertragungskapazität auch durch Einsatz eines Interleavers nicht vollständig genutzt wird vgl. [66].

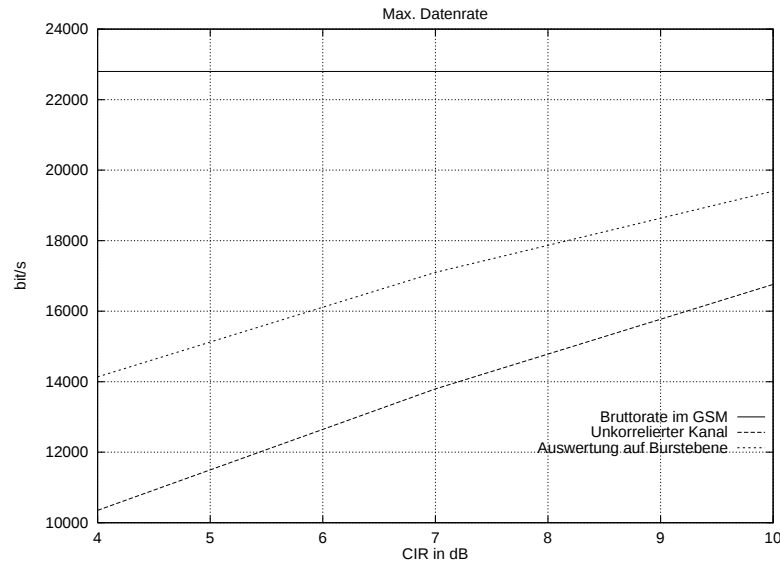
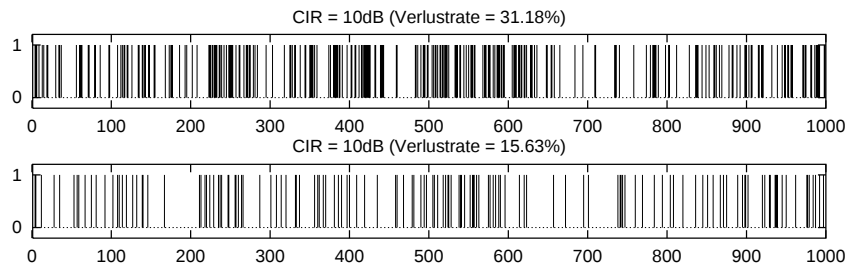


Abbildung 7.4: Maximale Übertragungsraten

7.1.2.5 Auswirkung der GSM-96-Codierung

Untersuchungen der Korrektoreigenschaften des GSM-96-Faltungscodierers mit Softdecision bei einer Codierate von $1/2$ ergaben, daß der Einsatz eines Faltungscodierers bereits ohne Interleaving die resultierende Bitfehlerhäufigkeit der Patternfiles um mehr als 10% reduziert, vgl. [66].

Abbildung 7.5: Patternfiles mit einem C/I von 10 dB

In Abbildung 7.5 sind exemplarisch die Fehlermusterdateien mit und ohne GSM-96-Codierung für ein C/I -Verhältnis von 10 dB gegenübergestellt. Die Meßergebnisse basieren auf der Auswertung von 1000 empfangenen Bursts. Der Wert „0“ entspricht einem ungestört empfangenen Burst, der Wert „1“ zeigt einen fehlerhaft empfangenen Burst an. In Tabelle 7.4 sind die resultierenden Fehlerhäufigkeiten für alle betrachteten Kanalqualitäten in einer Übersicht zusammengestellt.

Ein Vergleich der Werte in den Spalten 2 und 3 zeigt, daß durch Einsatz des Interleaving der Tiefe 4 die Fehlerhäufigkeit bei der Codierate $1/2$ im Vergleich zur Faltungscodierung ohne Interleaving beträchtlich reduziert wird. Die Tabelle zeigt jedoch auch, daß der Einsatz eines Faltungscodierers ohne Interleaving nicht sinn-

C/I	Burstfehlerhäufigkeit		
	Ohne Faltungscode	Faltungscode (R=1/2) SD, Interleaving 0	Faltungscode (R=1/2) SD, Interleaving 4
4 dB	64, 69%	80, 57%	23, 32%
7 dB	47, 56%	60, 73%	6, 87%
10 dB	31, 18%	39, 88%	1, 65%

Tabelle 7.4: Vergleich der Burstfehlerhäufigkeit

voll ist, da die in Spalte 1 der Tabelle gezeigte Fehlerhäufigkeit ohne Einsatz eines Faltungscodiers geringer ist.

7.1.2.6 Auswirkung unterschiedlicher Codierraten

In dieser Arbeit werden für die implementierten Zugriffsprotokolle unterschiedliche Codierraten betrachtet. Um eine Aussage über ihre Auswirkungen auf den Durchsatz treffen zu können, ist eine weitere Auswertung der Störmuster notwendig.

Aufbauend auf obigen Untersuchungen wurde ein Werkzeug zur Erzeugung von Fehlermusterdateien entwickelt, mit dessen Hilfe die Korrektoreigenschaften des Faltungscodierers mit Softdecision bei variabler Codierrate untersucht werden konnten. Mit dem entwickelten „Normal-Burst“-Patterngenerator können Fehlermusterdateien für unterschiedliche Codierraten und Kanalverhältnisse erzeugt werden. In Abbildung 7.6 ist das Prinzip zur Erzeugung der Störmuster dargestellt.

Die Rohdaten inklusive der zur Fehlererkennung benötigten Bits und der Tailbits werden mit einem GSM-96-Faltungscodierer codiert und danach mit Hilfe einer optimierten Punktiermatrix auf 114 *bit* punktiert, vgl. [89].

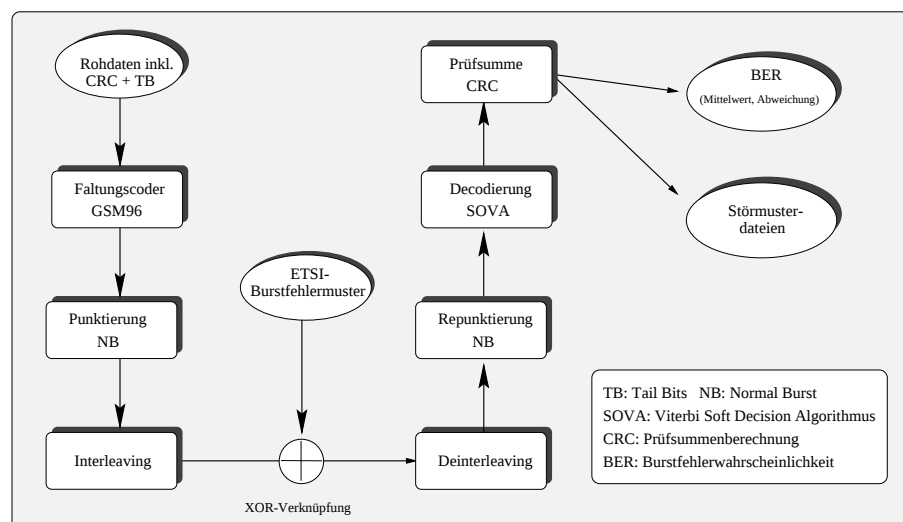


Abbildung 7.6: Prinzipskizze des Patterngenerators

Die Bits des so erzeugten Normal-Bursts werden mit einer Interleavingtiefe von 4, 8 oder 19 verschachtelt und anschließend durch die ETSI-Patternfiles, die den Funkkanal modellieren gestört. Diese Bits werden de-interleaved, re-punktiert und mit einem Viterbi-Algorithmus decodiert. Der decodierte Normal-Burst wird anhand der Prüfsumme auf Fehler untersucht.

Der Burst-Patterngenerator liefert für jede Codierrate und jedes Kanalverhältnis:

- „Normal-Burst“-Fehlermusterdateien als Folge von „1“ (gestört) und „0“ (ungestört).
- Burstfehlerhäufigkeiten gemittelt über die 24000 Bursts.

In Tabelle 7.5 sind die Burstfehlerhäufigkeiten für die verschiedenen Kanalverhältnisse und Codierraten dargestellt.

C/I	Burstfehlerhäufigkeit bei einer Codierrate von						
	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	6/7	1/1
4 dB	23, 32	52, 59	68, 27	78, 66	80, 54	84, 13	95, 68
7 dB	6, 87	25, 80	40, 57	54, 59	58, 33	63, 27	84, 40
10 dB	1, 65	9, 48	18, 43	31, 40	35, 11	40, 62	65, 69

Tabelle 7.5: *Burstfehlerhäufigkeit [in %] für variable Codierraten*

Aus der Tabelle wird ersichtlich, daß eine Punktierung bei 4 dB und 7 dB bereits bei einer Codierrate von 2/3 zu einer Fehlerhäufigkeit führt, die eine signifikante Durchsatzeinbuße erwarten läßt. Auch bei einem C/I-Verhältnis von 10 dB steigt die Fehlerhäufigkeit ab einer Codierrate von 3/4 rapide an. Die Anzahl fehlerhafter Bursts zeigt deutlich, daß bei diesen C/I-Verhältnissen durch den Einsatz einer Punktierung keine hohe Dienstgüte gewährleistet werden kann.

Zur Einschätzung der Relevanz der betrachteten C/I-Verhältnisse bezogen auf die mittlere Signalqualität in einer GSM-Zelle, wurde auf das lehrstuhleigene Handover-Simulationswerkzeug GOOSE2² zurückgegriffen. Damit läßt sich die C/I-Verteilung in einer GSM-Zelle bestimmen.

Es lassen sich folgende Aussagen ableiten: Ein C/I-Verhältnis von 10 dB entspricht einem mäßig guten Kanal. Bei 7 dB bewegt man sich an der Handoverschwelle; das System versucht, auf einen besseren Kanal zu wechseln. Kanäle mit 4 dB treten im GSM allenfalls an Netzgrenzen auf. 4 dB- und 7 dB-Störmusterdateien lassen sich bei Simulationen nur bedingt für sogenannte „worst-case“-Abschätzungen einsetzen.

Abbildung 7.7 zeigt, daß unter Beachtung der ETSI-Vorgabe bzgl. der geforderten Verteilung der Kanalqualität (Kurve a) die untersuchten C/I-Verhältnisse nur zu einem geringen Prozentsatz auftreten. C/I-Verteilungen, die den schraffierten Bereich durchqueren sind nicht erlaubt (Kurve b). Gemäß mehreren mit dem GOOSE2 un-

²GSM Object-Oriented Simulation Environment, vgl. [107].

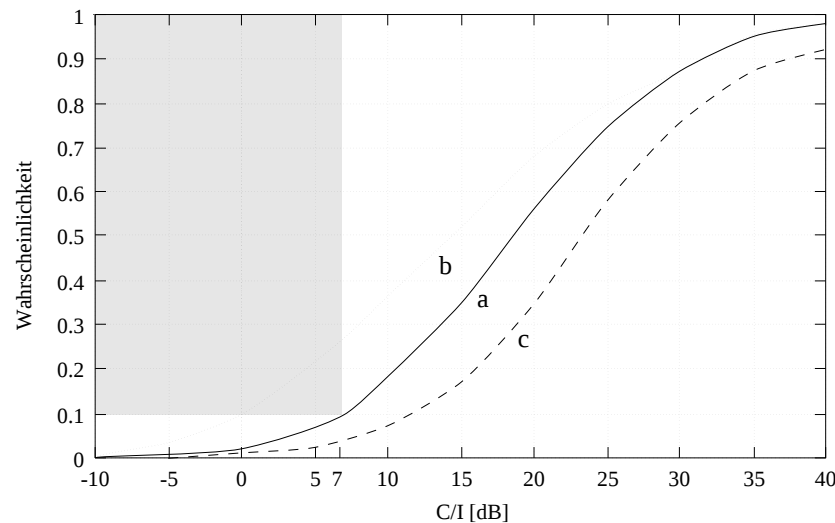


Abbildung 7.7: C/I -Verteilung in einer GSM-Zelle

tersuchten innerstädtischen Szenarien ist der Anteil noch geringer (Kurve c zeigt den Mittelwert). Legt man für ein GSM-Mobilfunknetz eine Verteilung gemäß Kurve c zugrunde, kann man durch den Einsatz variabler Codieraten im GSM mit GPRS eine signifikante Durchsatzsteigerung gegenüber dem GSM-96-Codierer erwarten.

7.2 Fehlermuster für Schicht-2-Rahmen

Sowohl die Simulation des FMBS als auch die Untersuchung des GPRS erforderten aufgrund der verwendeten Codierung spezifische Schicht-2-Fehlermuster, die im folgenden beschrieben werden.

7.2.1 RLP-Fehlermuster

Diese Fehlermuster sind von der ETSI zur Untersuchung des nicht-transparenten GSM-Datendienstes erstellt worden, welcher das RLP zur Sicherung der Daten auf dem Funkkanal verwendet, vgl. Kapitel 2. Da keine Fehlermuster für das LAPF-Protokoll vorlagen, wurden diese Fehlermuster zur Simulation des FMBS herangezogen. Die unterschiedliche Interleavingtiefe – 19 beim RLP im Gegensatz zu 8 beim LAPF – wurde dadurch nicht berücksichtigt. In den weiteren Ausführungen wird jedoch gezeigt, daß dies keinen nennenswerten Einfluß auf die Simulationsergebnisse hat.

Die RLP-Fehlermuster beruhen auf Simulationen, die bei einer Geschwindigkeit von 54 km/h für eine typisch städtische Bebauung durchgeführt wurden. Jede Datei enthält 14995 Datensätze. Entsprechend der Länge eines RLP-Rahmen besteht jeder Datensatz aus 240 bit . Durch eine „exklusiv-oder“-Verknüpfung des Datensatzes mit einem zu übertragenden Rahmen gemäß dem nachfolgend erläuterten Modell können Aussagen über die Paketfehlerhäufigkeit abgeleitet werden:

- Ein Schicht-2-Rahmen wird an die Schicht 1 übergeben.
- In der Schicht 1 werden die Daten durch Firecodierung, Faltungscodierung und Interleaving gegen Störungen auf dem Funkkanal geschützt.
- Der Schicht-1-Rahmen wird der Interleavingtiefe entsprechend auf 19 GSM Normal-Bursts verteilt über den Funkkanal übertragen.
- Der Empfänger de-interleaved und decodiert die empfangenen Daten mit Hilfe des „Viterbi-Softdecision“-Algorithmus.
- Die einzelnen Bit des wiederhergestellten Rahmens werden auf eine Störung untersucht. Fehlerhafte Bit werden mit einer „1“ gekennzeichnet, ungestörte mit einer „0“.
- Anschließend decodiert ein Firedecodierer die binären Daten. Dieser erkennt Büschelfehler bis zu einer Anzahl von 11 *bit*. Sind nicht alle Fehler korrigierbar, wird der Rahmen verworfen.

Daraus ergibt sich ein Fehlermuster für Schicht-2-Rahmen. Nichtkorrigierbare Rahmen sind mit einer „1“ gekennzeichnet, ungestörte Rahmen mit einer „0“. Die Fehlermuster liegen für Gleichkanalstörabstände von 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB und 11 dB vor.

7.2.2 Auswertung der RLP-Fehlermuster

Eine in dieser Arbeit durchgeführte Auswertung der ESTI-Pattern führt zu den in Tabelle 7.6 dargestellten Rahmenfehlerhäufigkeiten (*packet error ratio*, PER).

Codierrate	Rahmenfehlerhäufigkeit bei C/I				
	3 dB	5 dB	7 dB	9 dB	11 dB
1/2	57.32	22.16	4,85	0,63	0,05

Tabelle 7.6: *PER in [%], I = 19*

Bei einem C/I-Verhältnis $> 9\text{ dB}$ ist die PER sehr gering und auch an der Handoverschwelle bei 7 dB sind weniger als 5% der Rahmen zerstört. Unterhalb dieser Schwelle steigt die Fehlerhäufigkeit signifikant an.

7.2.3 MSDRA-Fehlermuster

Zur Simulation des im Kapitel 9 vorgestellten GPRS „Master-Slave Dynamic Rate Access“-Zugriffprotokolls (MSDRA) wurde der in Abschnitt 7.1.2 beschriebene Burst-Patterngenerator um einen Firecodierer und -decodierer erweitert, so daß Fehlermusterdateien für die MSDRA-Rahmen erzeugt werden konnten.

7.2.4 Auswertung der MSDRA-Fehlermuster

Beim MSDRA-Protokoll werden die Rahmen auf vier Normal-Bursts verwürfelt. In Tabelle 7.7 sind die Fehlerhäufigkeiten in Abhängigkeit der Codierrate abgebildet.

Ein Vergleich mit Tabelle 7.5 zeigt eine leicht höhere Paketfehlerhäufigkeit bei gleicher Charakteristik.

C/I	Codierrate			
	1/2	2/3	3/4	1/1
4 dB	25, 17	61, 53	75, 48	96, 48
7 dB	7, 55	32, 83	48, 27	86, 40
10 dB	1, 88	12, 97	23, 60	68, 28

Tabelle 7.7: *Rahmenfehlerhäufigkeit in [%] für variable Codierraten, $I = 4$*

Im Zuge der Untersuchungen der Schicht-2-Fehlermuster wurde der Patterngenerator um zwei weitere Algorithmen zur Realisierung der Interleavingtiefen 8 und 19 gemäß GSM-Empfehlung 05.03 erweitert. Damit konnte auch untersucht werden, ob die beim FMBS eingesetzten RLP-Fehlermuster der ETSI die Simulationsergebnisse aufgrund der Interleavingtiefe 19 verfälscht haben.

C/I	Rahmenfehlerhäufigkeit	
	I = 8	I = 19
4 dB	24,38	23,86
7 dB	4,48	4,01
10 dB	0,38	0,26

Tabelle 7.8: *PER in [%] bei unterschiedlicher Interleavingtiefe, $R = 1/2$*

In Tabelle 7.8 sind die Fehlerhäufigkeiten für die beiden Interleavingtiefen bei einer Codierrate von 1/2 dargestellt. Ein Vergleich mit den in Tabelle 7.6 dargestellten PER-Werten für die RLP-Fehlermuster der ETSI zeigt keine signifikanten Abweichungen, so daß für die in Kapitel 8 vorgestellten Simulationsergebnisse keine Einschränkungen gemacht werden müssen.

Leistungsbewertung des FMBS

Eine detaillierte Beschreibung der Spezifikation und Bewertung sowohl der Signalisierungsprotokolle als auch der zur Teilnehmerdatenübertragung eingesetzten Protokolle sprengt den Rahmen dieser Arbeit. In diesem Kapitel wird stellvertretend die Simulation und Bewertung des in Kapitel 5 vorgestellten Sicherungsschichtprotokolls $LAPF_m$ beschrieben.

Bezüglich der eingehenden simulativen Analyse der Signalisierungsprotokolle sei auf [76] verwiesen. In Abbildung 8.2 ist aus Gründen der Vollständigkeit eine Übersicht der kompletten Spezifikation einer Mobilstation dargestellt. Die erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Verbindungsaufbaustrategie*

Die Strategie des *Very Early Assignment* (VEA) hat sich gegenüber den anderen im GSM möglichen Strategien OACSU¹ und Non-OACSU als vorteilhaft erwiesen. Die simulierten Verbindungsaufbauzeiten verringern sich im Mittel um 70% und liegen bei einem Gleichkanalstörabstand von 11 dB im Bereich einer Sekunde.² Die Erfolgsquote beim Verbindungsaufbau bei geringeren C/I-Verhältnissen steigt um ca. 10%.

- *Optimierung des LAPD_m-Protokolls*

Laut GSM-Empfehlung 04.06 wird das LAPD_m-Protokoll als „send-and-wait“-Protokoll verwendet, vgl. Kapitel 2. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß durch Vergrößerung des Fensters auf Werte zwischen 5 und 9, bei gleichzeitigem Einsatz eines selektiven ARQ-Mechanismus, eine weitere Senkung der Verbindungsaufbauzeiten auf 0.8 sec erzielt werden kann.

8.1 Formale Spezifikation der Protokolle zur Teilnehmerdatenübertragung

Dieser Abschnitt erläutert die Spezifikation des $LAPF_m$ -Protokolls in der Spezifikationsprache SDL unter Berücksichtigung des in Kapitel 5 vorgestellten Realisierungsansatzes, vgl. [50]. Abbildung 8.1 verdeutlicht die Umsetzung des Protokollstapels in drei eigenständige SDL-Systeme MS , U_m und BS .

¹ *Off Air Call Set-up*, vgl. hierzu Kapitel 2.

² Diese Werte basieren auf Simulationsszenarien, in denen Verzögerungen durch Authentifizierungs- und Verschlüsselungsprozeduren bzw. Datenbankabfragen vernachlässigt sind.

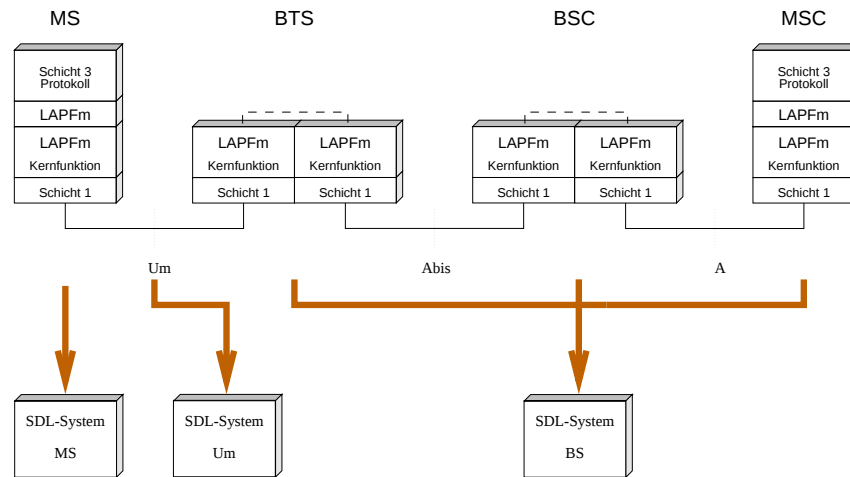


Abbildung 8.1: Die SDL-Systeme des Frame Mode Bearer Service

8.1.1 Spezifikation der Mobilstation

Jede Mobilstation wird durch ein SDL-System gemäß der schematisierten Abbildung 8.2 mit der Bezeichnung *MS* dargestellt. Simulationsszenarien mit mehreren Mobilstationen können durch eine Duplizierung dieses Systems realisiert werden.

8.1.1.1 Der Block *Network_Layer*

In den Prozessen *CM_Sublayer*, *MM_Sublayer* und *RR_Sublayer* sind die in Kapitel 2 beschriebenen Signalisierungsprotokolle der GSM-Vermittlungsschicht spezifiziert.

8.1.1.2 Der Block *PDP*

Der im Block *PDP* spezifizierte Prozeß *PDP* – als Abkürzung für *packet data protocol* – stellt die Schnittstelle zwischen der SDL-Systemumgebung und dem LAPF-Protokoll zur Teilnehmerdatenübertragung dar. Hier werden die in der Systemumgebung durch einen Lastgenerator erzeugten Transportprotokolldateneinheiten segmentiert und an die Schicht 2 weitergeleitet. Abgesehen von Auswerteroutinen sind weitere Funktionen nicht implementiert. Durch die Unterteilung der Vermittlungsschicht in die beiden Blöcke *Network_Layer* und *PDP* kann die Funktionalität eines Datenübertragungsprotokolls (z.B. X.25) implementiert werden, ohne die Struktur der Spezifikation grundlegend zu verändern.

8.1.1.3 Der Block *SAP*

Der Block *SAP* dient zur Modellierung der Dienstzugangspunkte. Signalisierungsinformation wird über den Prozeß *SAPL_0* geroutet. Die Dienstzugangspunkte zur Übertragung der Teilnehmerdaten *SAPL_X* werden dynamisch vom Prozeß *SAPL_Control* erzeugt.

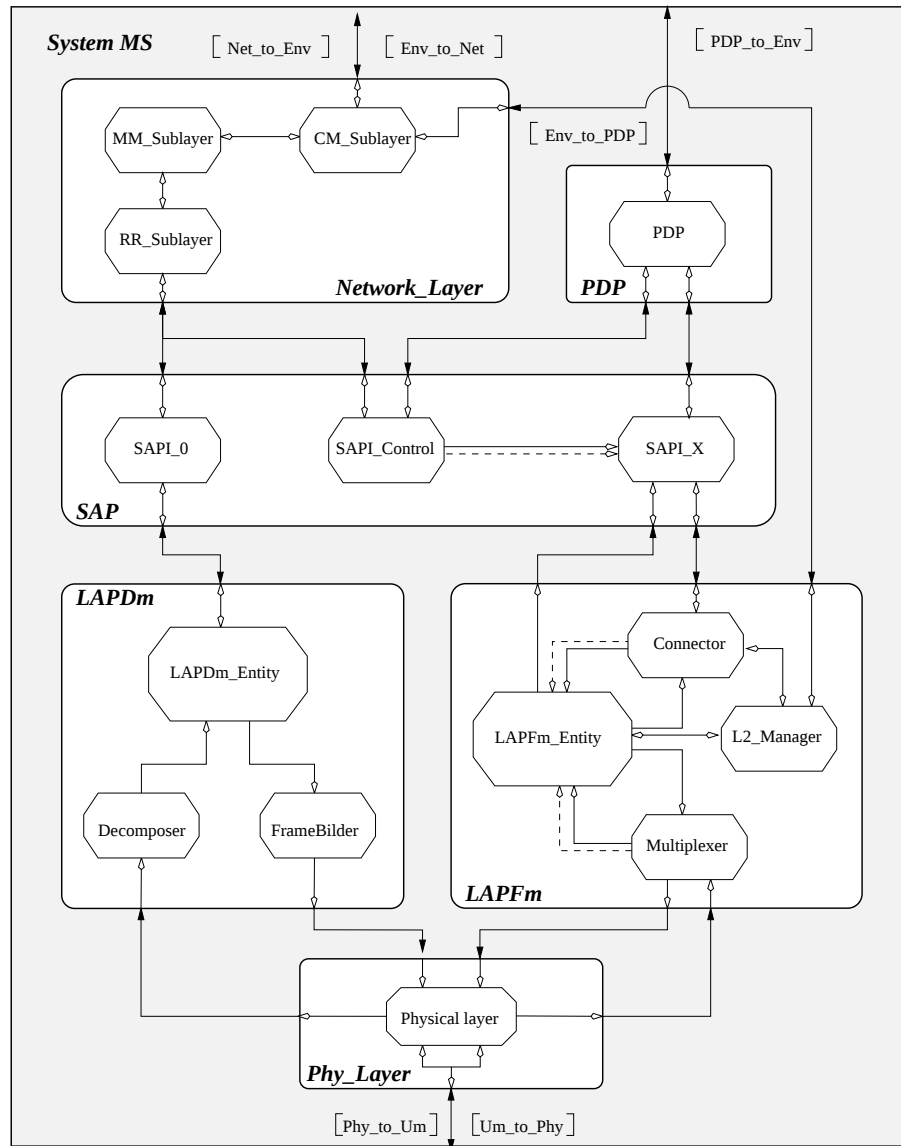


Abbildung 8.2: Übersichtsdiagramm der SDL Spezifikation der Mobilstation

8.1.1.4 Der Block $LAPD_m$

Der Block $LAPD_m$ umfaßt die Prozesse *FrameBuilder* und *Decomposer*, in welchen die Rahmenbildung bzw. -wiederherstellung durchgeführt wird, und den Prozeß *LAPD_m_Entity*, in welchem der Zustandsautomat des $LAPD_m$ -Protokolls spezifiziert ist.

8.1.1.5 Der Block $LAPF_m$

Der Block $LAPF_m$ beinhaltet vier Prozesse. Der Prozeß *Connector* segmentiert die eingehenden Schicht-3-Nachrichten bei Bedarf und ordnet sie dem entsprechenden *LAPF_m_Entity*-Prozeß zu bzw. setzt eine aus mehreren $LAPF_m$ -Rahmen bestehende Schicht-3-Nachricht wieder zusammen. Erfolgt der Verbindungsaufbau zum ersten

Mal, wird dynamisch ein neuer Prozeß *LAPF_m-Entity* erzeugt, in welchem der Zustandsautomat des LAPF_m-Protokolls gemäß Abschnitt 8.1.4 spezifiziert ist.

In dem Prozeß *Multiplexer* werden entsprechend der vom Prozeß *LAPF_m-Entity* empfangenen Signale die LAPF_m-Rahmen gebildet bzw. aus den eingehenden Signalen der physikalischen Schicht extrahiert und an die Partnerinstanz weitergeleitet. Im Prozeß *L2_Manager* sind die Funktionen zur Verwaltung der LAPF_m-Verbindungen implementiert, welche im Zusammenspiel mit dem *Radio Ressource Management* der BSC das dynamische Multiplexen der Teilnehmerdaten auf mehrere Kanäle ermöglichen.

8.1.1.6 Der Block *Physical_Layer*

Der Block *Physical_Layer* repräsentiert die Schnittstelle zum SDL-System *U_m*. Er übernimmt die Zuordnung der Verbindungen anhand der Prozeßkennung (Pid), durch die jeder SDL-Prozeß eindeutig identifiziert wird, und leitet die eingehenden Signale der Funkschnittstelle an den entsprechenden LAPD_m- bzw. LAPF_m-Zielprozeß weiter.

8.1.2 Spezifikation der Basisstation

Prinzipiell sind die Spezifikation der Mobil- und Basisstation symmetrisch aufgebaut. Aus Effizienzgründen wurden zur Simulation der Teilnehmerdatenübertragung auf ein explizites SAP-Handling verzichtet und die spezifizierten Signalisierungsprotokolle durch den Block *SYS_Management* ersetzt. In diesem Block bildet ein einziger Prozeß die Signalisierungsprozeduren nach. Zur Steuerung des Verbindungsauf- und -abbaus werden die simulierten Auf- und Abbauezeiten verwendet. Der Aufbau des SDL-Systems der Basisstation ist in Abbildung 8.3 vereinfacht illustriert.

In den zwei Blöcken *BTS* und *BSC* beinhaltet der Prozeß *Physical_Layer* die notwendige Schicht-1-Funktionalität, während in den Prozessen *LAPF_m-Kern* die Funktionen des LAPF_m-Kern-Protokolls spezifiziert sind.

8.1.3 Spezifikation der Funkschnittstelle

Das in Abbildung 8.4 gezeigte SDL-System *U_m* bildet die GSM-Kanäle nach. Im Block *Channel* übernimmt der *Channel_Manager* die Taktung und Synchronisation gemäß der GSM-spezifischen TDMA-Rahmendauer und verwaltet die Blockwiederkehrzeit der einzelnen logischen Kanäle und den zeitlichen Versatz zwischen Down- und Uplink. Zusätzlich wird die durch den Verbindungsauf- und abbau resultierende Verzögerung modelliert. Während dieser Zeitspanne ist der Kanal für andere Teilnehmer blockiert.

Durch die gestrichelten Pfeile ist angedeutet, daß jeder logische Down- bzw. Uplink-Kanal auf einen dynamisch erzeugten Prozeß *Downlink* bzw. *Uplink* abgebildet wird. Zur Modellierung der Charakteristika des Funkkanals sind die in Kapitel 7 vorgestellten Fehlermusterdateien in beiden Prozessen eingebunden.

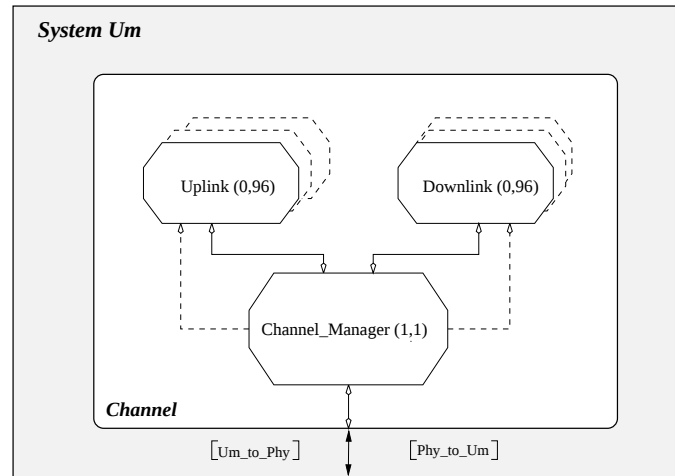
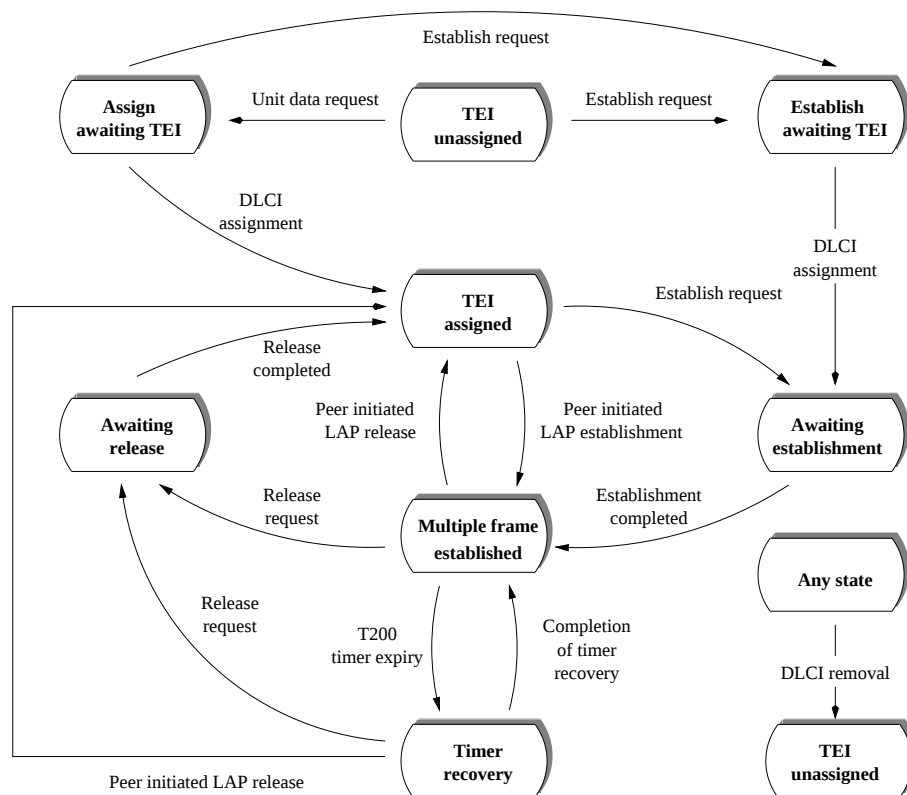


Abbildung 8.4: SDL-Spezifikation der Funkschnittstelle

Abbildung 8.5: Das Zustandsübergangsdiagramm des LAPF_m-Protokolls

Aktivität löst die Schicht 3 mit dem Primitiv *Unit_Data_Request* aus. Eine Auslösung der Verbindung kann mit dem Signal *Remove_Request* aus jedem Zustand initiiert werden. Das Signal wird von der Managementinstanz an die Schicht 2 verschickt, wenn von der SDL-Umgebung eine Anforderung zum Verbindungsabbau empfangen wurde. Für eine weitergehende Beschreibung des Zustandsautomaten sei auf [143] verwiesen.

8.2 Einbettung der Systeme in die Simulationsumgebung

Gemäß der in Kapitel 6 erläuterten Methodik, wurde jedes spezifizierte SDL-System mit dem Werkzeug SDT in ein ablauffähiges Programm übersetzt. Zur Simulation wurde eine Anbindung der übersetzten Systeme untereinander und mit der Simulationsumgebung in der Unix-Laufzeitumgebung realisiert. Dazu wurde der in Abschnitt 6.3 erörterte Ansatz der direkten Synchronisation und das Konzept der Unix-Sockets zur Prozeßkommunikation³ verwendet, vgl. Abbildung 8.6.

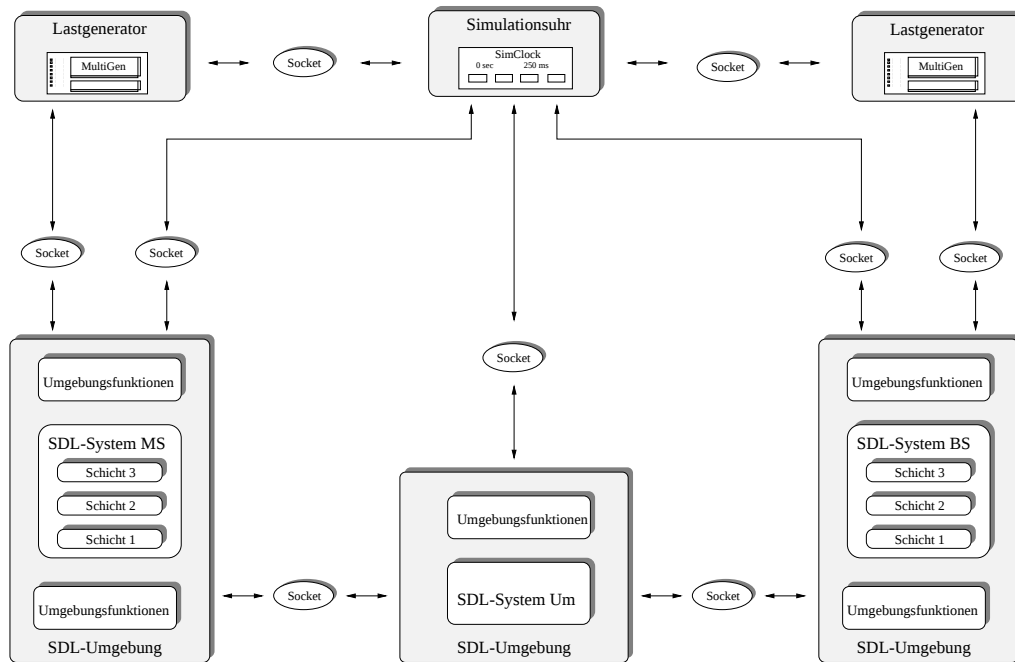


Abbildung 8.6: *Kommunikationskonzept zur Simulation der SDL-Systeme*

Bei der Simulation ist die Nachbildung des Zeitfortschritts von zentraler Bedeutung. In Abbildung 8.7 sind die Ursachen für eine Zeitverzögerung im realen System dargestellt.

Die Blockwiederkehrzeiten verursachen eine Wartezeit, welche die Hauptverzögerung innerhalb des simulierten Szenarios darstellt. Sie werden innerhalb des SDL-Systems U_m durch Timerlaufzeiten von 20 ms nachgebildet. Die Blockwiederkehrzeit berechnet sich aus der Übertragungsrate eines logischen Kanals, die von dem definierten Mehrfachrahmen und der verwendeten Codierung abhängt.

Ein Schicht-2-Rahmen hat eine Länge von 184 bit . Bei der verwendeten SDCCH-Codierung wird dieser mit einer 40 bit langen Prüfsumme gesichert und anschließend mit der Codierate $R = 1/2$ faltungscodiert. Die resultierenden 456 bit werden auf vier Normal Burst interleaved, vgl. Abbildung 2.9.

Bei einer Wiederkehrzeit der physikalischen Kanäle von etwa 4.615 ms ($8 \cdot 15/26\text{ ms}$) und einer Kanalkombination 1, bei welcher 24 der 26 Zeitschlitze des verwendeten

³Sockets sind Dateien, auf die Unix-Prozesse lesend und schreibend zugreifen können, vgl. [36].

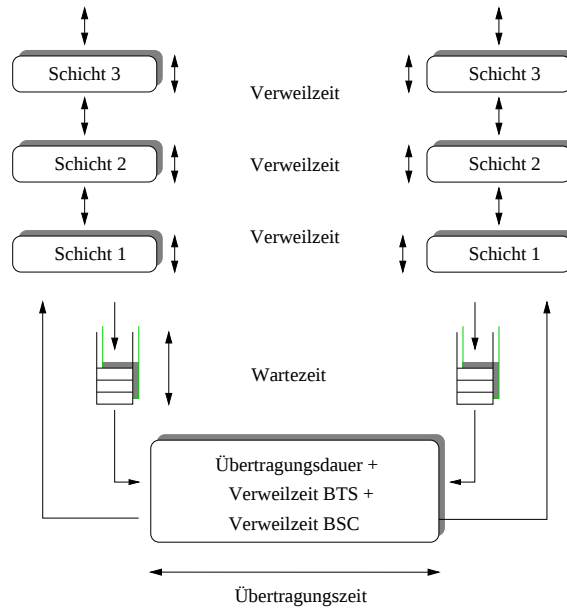


Abbildung 8.7: Der Zeitfortschritt im realen System

26er Mehrfachrahmens zur Nutzdatenübertragung zur Verfügung stehen, ergibt sich die Blockwiederkehrzeit zu, vgl. Abbildung 2.7:

$$26/24 * 4 * 8 * 15/26 \text{ ms} = 20 \text{ ms}$$

Die Übertragungszeit setzt sich aus der Dauer der Übertragung über den Funkkanal, der jeweiligen Verweilzeit in der BTS und der BSC und der Übertragungsdauer über die A- bzw. A_{bis}-Schnittstelle zusammen. Die Verarbeitungszeit in der BTS und der BSC sowie die Übertragungsdauer über die A- und A_{bis}-Schnittstelle werden als vernachlässigbar gering betrachtet und fließen mit 2 ms in die Übertragungszeit mit ein. Um diese Zeit wird die Simulationsuhr inkrementiert, wenn ein Signal z. B. von der Mobilstation über die Funkschnittstelle zur Basisstation geschickt wird.

8.3 Simulation

Nach einer Erläuterung der zur Leistungsbewertung des FMBS herangezogenen Kenngrößen und Simulationsszenarien werden in diesem Abschnitt die erzielten Simulationsergebnisse dargestellt und ausgewertet, vgl. [51].

8.3.1 Leistungskenngrößen

Bei den Simulationsuntersuchungen wurden folgende Meßwerte ermittelt:

- Durchsatz (*throughput*, S): Der Durchsatz gibt die Anzahl der fehlerfrei empfangenen Nutzbit pro Sekunde an.
- Rundsendezeit (*round trip delay*, RTD): Mit dem RTD wird die Zeitspanne bezeichnet, die vom Versenden eines LAPF_m-Rahmens bis zur Bestätigung durch die Partnerinstanz vergeht.

- Fenstersperrzeit (*window blocking time*, WBT): Die Fenstersperrzeit ist die Zeitdauer, in der keine weiteren Datenrahmen gesendet werden können, weil die Anzahl noch nicht bestätigter Rahmen gleich der Fenstergröße ist.
- Verwurfswahrscheinlichkeit (*dropping rate*, P_V): Die Verwurfswahrscheinlichkeit ist ein Maß für die Anzahl zurückgewiesener bzw. abgebrochener Verbindungen aufgrund zu großer Verzögerung beim Verbindungsaufbau bzw. der Datenübertragung.

8.3.2 Simulationsparameter

In den simulierten Szenarien wurde untersucht, wie sich die Leistungsfähigkeit des Protokolls in Abhängigkeit der nachfolgend erläuterten charakteristischen Protokollparameter verhält. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 8.3.1 eingeführten Kriterien wurde zudem verifiziert, daß der in Kapitel 5 vorgeschlagene *SREJ*-Mechanismus gegenüber dem *REJ*-Mechanismus zu einer Durchsatzsteigerung führt. Zwar wurde bereits bei einer ersten Untersuchung des FMBS in [130] eine Bewertung der Wiederanforderungsmechanismen durchgeführt. Die bei der Weiterentwicklung des FMBS vorgenommenen Korrekturen machten jedoch eine Überprüfung der seinerzeit erzielten Ergebnisse erforderlich.

Als Simulationsparameter wurden die Fenstergröße, die Nachrichtenlänge⁴ und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Verkehrskanäle in Abhängigkeit von der Kanalqualität variiert. Die Modellierung des gestörten Funkkanals wurde anhand der in Kapitel 7 vorgestellten Störmusterdateien auf Paketebene vorgenommen.

Da eine Änderung der Fenstergröße mit den Zeitintervallen zur Steuerung des Wiederanforderungsmechanismus korreliert ist, wurden bei den Simulationen in Abhängigkeit von der gewählten Fenstergröße unterschiedliche Wertekombinationen der drei implementierten Timer (T_{200} , T_{209} , T_{210}) untersucht. Zur Verdeutlichung der Korrelation sind die Funktionen der Timer nachfolgend zusammengefaßt.

8.3.2.1 Der „Retransmission“-Timer T_{200}

Der „Retransmission“-Timer T_{200} steuert den ARQ-Mechanismus des Protokolls im „Send-and-Wait“-Betrieb. In diesem Modus wird jeder Datenrahmen (I-Rahmen) direkt nach Empfang durch einen RR-Rahmen bestätigt, mit dem die Empfangsbereitschaft signalisiert wird (*receive ready*). Wird kein weiterer I-Rahmen empfangen, ohne daß die Verbindung ausgelöst wurde, wird nach Ablauf des Timers T_{200} die Bestätigung des letzten empfangenen Datenpaketes erneut übertragen.

8.3.2.2 Der „Retransmission“-Timer T_{209}

Der Timer T_{209} verhindert bei einer Fenstergröße von $k > 1$, daß jeder I-Rahmen sofort durch einen RR-Rahmen bestätigt wird, da Quittungen in I-Rahmen oder in

⁴Simulationen mit gemischten Lasten wurden für den FMBS nicht durchgeführt, vgl. dazu [141]. Aufgrund der Umstellung auf das Betriebssystem Solaris konnte der in [44] entwickelte Lastgenerator nicht verwendet werden.

einem RR-Rahmen kumulativ transportiert werden können. Eine „Sammelquittung“ bestätigt den zuletzt korrekt empfangenen Rahmen und wird spätestens nach Ablauf des Timers *T209* geschickt. Im Gegensatz zum Ablauf des Timers *T200* findet kein Wechsel in den Zustand *Timer Recovery* statt, vgl. Abbildung 8.5. Der Prozeß bleibt im Zustand *Multiple Frame Established*. Geht die Sammelquittung verloren, so läuft je nach Einstellung der Timerwerte entweder der Timer *T209* erneut ab, oder es wird durch Ablauf des Timers *T200* ein Zustandsübergang in den Zustand *Timer Recovery* verursacht.

8.3.2.3 Der „ARQ-Control“-Timer *T210*

Der Timer *T210* überwacht die Wiederanforderungsstrategien *Selective Reject* und *Reject*. Nach Ablauf des Timers wird die Wiederanforderung erneut verschickt. Der Minimalwert für diesen Timer ist durch das „Round Trip Delay“ vorgegeben, damit nicht vor einer möglichen Antwort der Partnerinstanz eine erneute Wiederanforderung gesendet wird.

8.3.3 Simulationsszenarien

Bei den nachfolgend dargestellten Simulationsergebnissen lassen sich im wesentlichen zwei Szenarien unterscheiden:

- exklusive Nutzung von Verkehrskanälen (1 MS)
- konkurrierende Nutzung von Verkehrskanälen (mehrere MS)

Zuerst wurde für eine Mobilstation eine optimale Zusammenstellung aus Fenstergröße und Timer-Einstellungen gesucht, um eine Maximierung des Nettodurchsatzes zu erreichen. Obwohl aufgrund des nicht implementierten Vermittlungsschichtprotokolls beim Verbindungsaufbau keine Dienstgüte-Parameter ausgehandelt werden können, wurden mit Hilfe der Fenstersperrzeit und der Rundsendezeit Aussagen über die Dienstgüte in Form der Verwurfswahrscheinlichkeit abgeleitet.

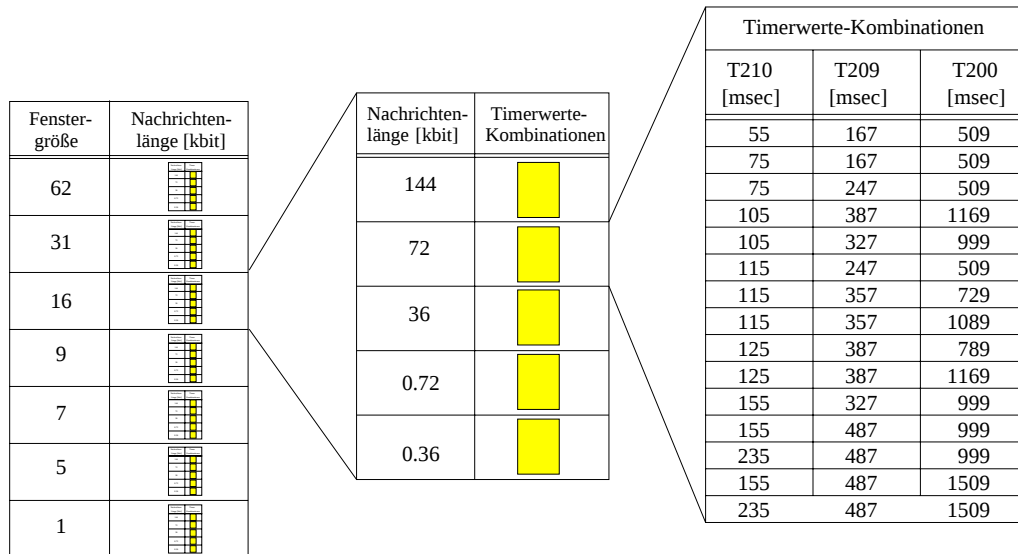
Aufbauend auf den im ersten Szenario optimierten Parameterwerten, wurde im zweiten Szenario der erzielbare Durchsatz bei konkurrierendem Zugriff mehrerer Mobilstationen auf einen bzw. mehrere Verkehrskanäle gemessen.

Die Korrelation der Simulationsparameter bedingte eine Vielzahl zu simulieren-der Parametersätze, vgl. Abbildung 8.8. Die nachfolgend erläuterten Ergebnisse repräsentieren die Wertekombinationen, von denen charakteristische Aussagen abgeleitet werden konnten.

8.3.4 Simulationsergebnisse

8.3.4.1 Durchsatz

In den Abbildungen 8.9 und 8.10 sind exemplarisch der Durchsatz für die untenstehenden Kombinationen „kleiner“ bzw. „mittelgroßer“ Timerwerte dargestellt:

Abbildung 8.8: *Simulations-Parameter und ihre evaluierten Einstellungen*

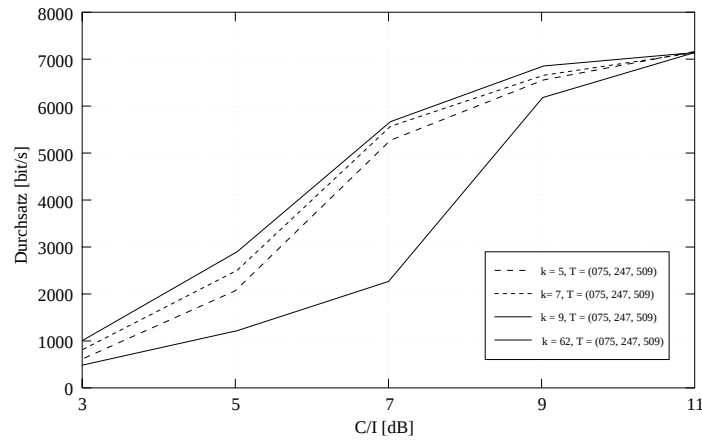
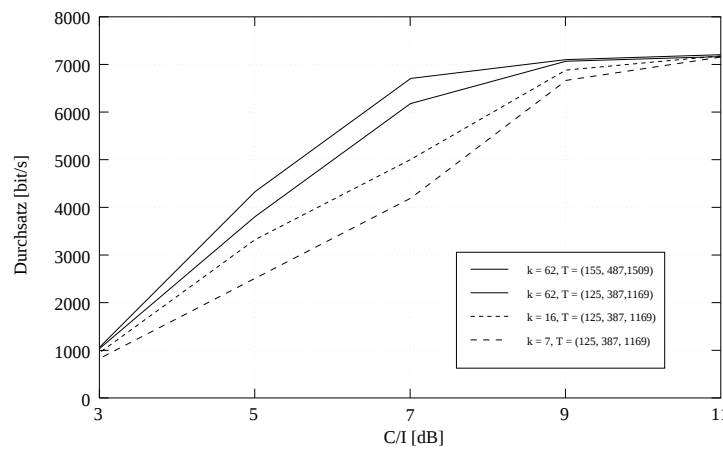
- $T210 < 100 \text{ ms}$
- $T209 < 300 \text{ ms}$
- $T200 < 600 \text{ ms}$
- $100 \text{ ms} < T210 < 300 \text{ ms}$
- $300 \text{ ms} < T209 < 600 \text{ ms}$
- $600 \text{ ms} < T200 < 2000 \text{ ms}$

Bei kleinen Werten sind Fenstergrößen von $k = 7$ oder $k = 9$ optimal, vgl. Abbildung 8.9. Bei einer fast ungestörten Übertragung erreicht der Durchsatz fast das theoretische Maximum von $7,2 \text{ kbit/s}$ ⁵. Das Protokoll verhält sich bis zu einem C/I-Verhältnis von $\geq 9 \text{ dB}$ stabil, der Durchsatz bleibt nahe 7 kbit/s , sinkt aber bei $C/I = 7 \text{ dB}$ bereits signifikant auf $5,5 \text{ kbit/s}$ ab. Bei einer Fenstergröße von 9 und einem C/I-Verhältnis von 7 dB sinkt der Nettodurchsatz sogar auf ungefähr die Hälfte des Angebotes und bei Fenstergrößen über 9 verschlechtert sich der Durchsatz noch. Eine Kombination „große Fenstergrößen - kleine Timerwerte“ scheidet, wie zu erwarten war, aus. Da ab 7 dB im GSM ein Handover eingeleitet wird, sind die Werte für 5 dB und 3 dB vollständigshalber aufgeführt, ohne zur Bewertung der Übertragungsraten herangezogen zu werden.

In Abbildung 8.10 ist jedoch zu sehen, daß bei einer Kombination aus mittelgroßen Timern und Fenstergrößen über 16, ein höherer Durchsatz erreicht werden kann. Dies ist vor allem im Bereich des C/I-Verhältnisses zwischen 7 dB und 9 dB ersichtlich. Der maximal zu erzielende Gewinn für eine Fenstergröße von 62 gegenüber einer Fenstergröße von 9 bei 7 dB liegt bei ca. 17% , vgl. dazu die obersten Kurven der Abbildungen 8.9 und 8.10.

Ein anderer Gesichtspunkt ergibt sich aus einem Vergleich der in Abbildung 8.9 und 8.10 dargestellten Verläufe der Kurven für eine Fenstergröße von 7. Während

⁵Dieser Wert berechnet sich aus der in Abschnitt 8.2 eingeführten Blockwiederkehrzeit von 20 msec und der Nutzdatenmenge pro LAPF_m-Rahmen von 144 bit

Abbildung 8.9: *Durchsatz bei kleinen Timerwerten*Abbildung 8.10: *Durchsatz bei mittelgroßen Timerwerten*

der Verlauf im Bereich der C/I-Verhältnisse von 11 dB und 9 dB beinahe identisch ist, ergeben sich im weiteren Verlauf größere Unterschiede für die unterschiedlich gesetzten Timer. Bei 7 dB liegt der Unterschied bei 14%, ein Hinweis auf die erwähnte Korrelation zwischen Fenstergröße und Timerwerten hinsichtlich des Durchsatzes. Die Abhängigkeit zwischen Fenstergröße und Timerwerten zeigt sich insbesondere im Fehlerfall. Für jede Fenstergröße können zwei suboptimale Fälle vorliegen:

- Die Timerwerte sind zu klein gewählt. Als Beispiel sei in Abbildung 8.9 die Kurve für die Fenstergröße 62 angeführt. Als Folge der hohen Anzahl möglicher unbestätigter Rahmen können fehlerhafte Rahmen nicht innerhalb der durch die relevanten Timer vorgegebenen Zeitspannen übertragen werden. Sie werden zu schnell erneut angefordert, wobei sich dies bei einem Fehler in der Wiederanforderung potenziert. Bei einer ungünstigen Timerkonstellation ist zudem das Fenster schnell gesperrt. Ein häufiger Wechsel in den Zustand *Timer Recovery* tritt auf, in dem zwar Daten empfangen aber nicht gesendet werden dürfen. Dies führt schließlich zu einem mehrfachen Ablaufen des Timers T_{200}

und endet in einem Verbindungsabbau.

- Die Timer sind zu groß gewählt. Dies kann anhand der Kurve für die Fenstergröße 7 in Abbildung 8.10 verdeutlicht werden. Im Fehlerfall wird ein verworfener Rahmen wieder angefordert. Jedoch fällt bei kleinen Fenstern schnell ins Gewicht, daß auf diese wiederholte Übertragung relativ lange gewartet werden muß. Bei großen Fenstern sind dementsprechend hohe Timerwerte notwendig, die offensichtlich nicht optimal für kleine Fenster sind.

8.3.4.2 Rundsende- und Fenstersperrzeit

Nach der Ermittlung geeignet erscheinender Parametersätze wurde untersucht, wie sich die gewählte Fenstergröße bzw. Timerkonstellationen auf die Rundsendezeit und Fenstersperrzeit auswirken, vgl. Abbildung 8.11.

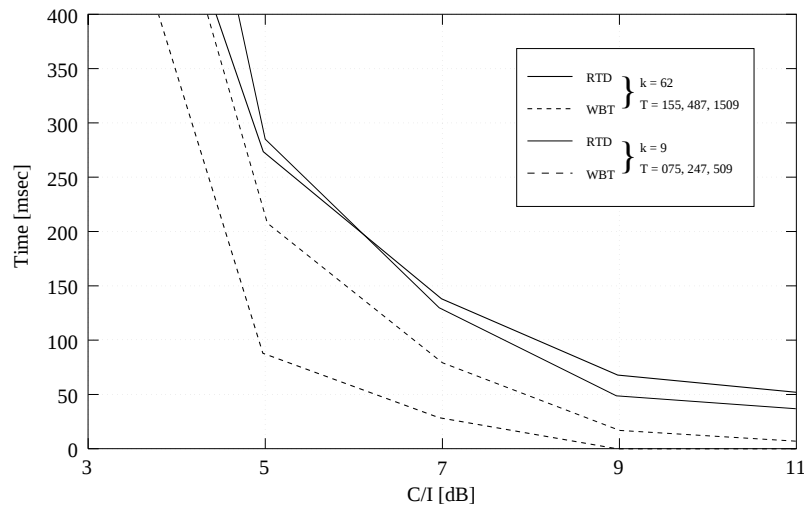


Abbildung 8.11: Rundsendezeit (RTD) und Fenstersperrzeit (WBT)

Die Rundsendezeit ist bei einer Fenstergröße von $k = 9$ mit 50 msec um ca. 30% geringer als diejenige mit einer Fenstergröße von $k = 62$ (75 msec). Jedoch sind die absoluten Werte in beiden Fällen in einem für Datendienste akzeptablen Rahmen. Die Fenstersperrzeit zeigt den gleichen qualitativen Verlauf. Daher hängt die einzustellende Konfiguration von den Empfangsbedingungen in der jeweiligen Zelle ab.

Mit Bezug auf die Arbeiten von [130] wurde im weiteren Verlauf der Simulationen der Einfluß des zur Wiederanforderung gestörter Pakete verwendeten ARQ-Verfahrens untersucht. Die in den Abbildungen 8.12 und 8.13 dargestellten Ergebnisse wurden mit den optimierten Parametereinstellungen ermittelt.

Es ist zu sehen, daß die Verwendung eines *SREJ*-Verfahrens eine deutliche Erhöhung des Nettodurchsatzes gegenüber dem *REJ*-Verfahren bedingt. Dies gilt insbesondere

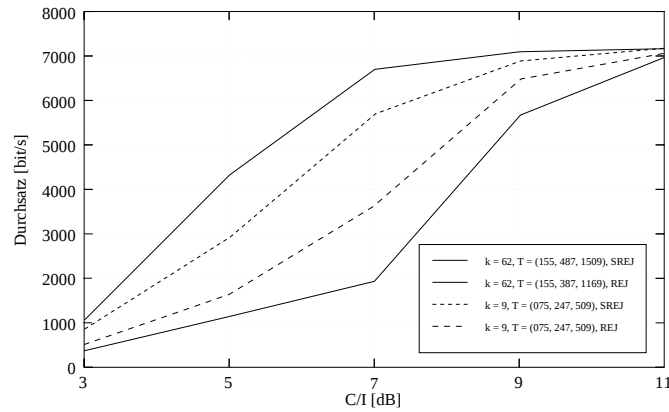


Abbildung 8.12: Vergleich der Wiederanforderungsmechanismen: Durchsatz

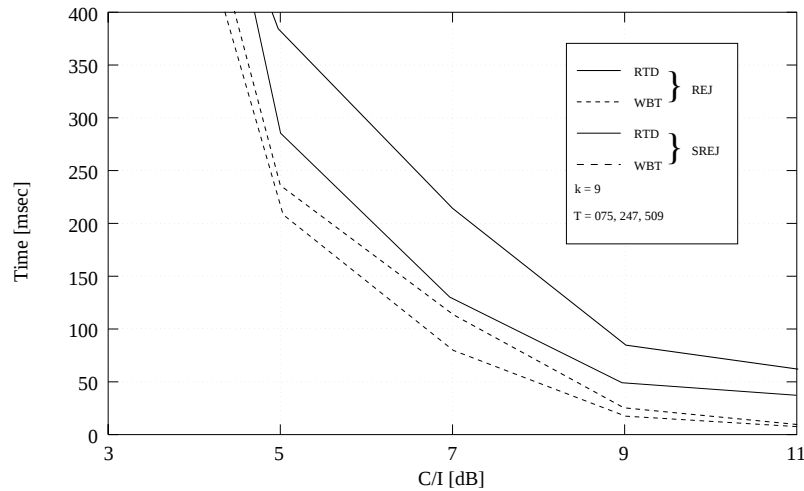


Abbildung 8.13: Vergleich der Wiederanforderungsmechanismen: RTD und WBT

für große Fenster, da beim *REJ*-Verfahren im Fehlerfall häufig korrekt empfangene Rahmen erneut übertragen werden müssen.

Zwar ist dieser Effekt bei kleineren Fenstern bzw. Timerwerten geringer, jedoch haben weitere Untersuchungen bestätigt, daß sich mit dem *SREJ*-Verfahren auch dann bessere Ergebnisse erzielen lassen.

8.3.4.3 Durchsatz bei Verwendung mehrerer Verkehrskanäle

Im weiteren Verlauf der Leistungsbewertung wurde untersucht, wie sich ein konkurrierender Zugriff mehrerer Mobilstationen auf die Verkehrsleistung des Dienstes auswirkt. Die Simulationen beschränkten sich dabei auf maximal acht Mobilstationen und eine Trägerfrequenz.

Abbildung 8.14 zeigt den erzielbaren Durchsatz für verschiedene Kanalqualitäten, wenn einer Mobilstation bis zu acht Verkehrskanäle zugewiesen werden.

Der Durchsatz steigt wie zu erwarten linear mit der Anzahl der verwendeten Verkehrskanäle. Mit dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, daß die implementier-

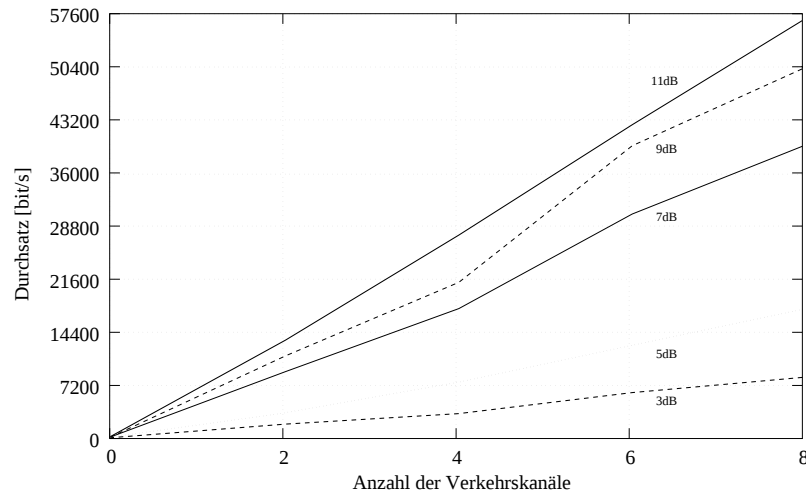


Abbildung 8.14: *Durchsatz bei exklusiver Nutzung mehrerer Verkehrskanäle*

ten Multiplex- bzw. Segmentierungsalgorithmen korrekt funktionieren.

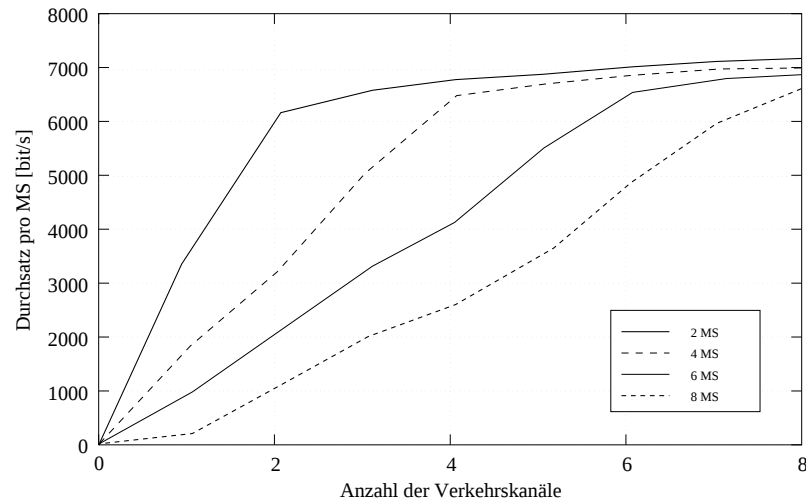


Abbildung 8.15: *Durchsatz bei konkurrierendem Zugriff auf mehrere Verkehrskanäle*

In Abbildung 8.15 ist der Durchsatz bei gleichzeitigem Zugriff mehrerer Mobilstationen bei einem C/I-Verhältnis von 11 dB dargestellt. Der Verlauf der Kurven wird hauptsächlich durch die Verbindungsauf- und -abbauzeiten beeinflusst, solange die Anzahl der zur Verfügung stehenden Verkehrskanäle gleich oder größer als die Anzahl der konkurrierenden Mobilstationen ist. In diesem Bereich liegt der Durchsatz ungefähr bei 90% des theoretischen Maximums von $7,2 \text{ kbit/s}$. Greifen mehr Mobilstationen zu als Verkehrskanäle zur Verfügung stehen, sinkt der Durchsatz durch vermehrt auftretende Kollisionen auf 80% oder weniger ab. Beispielsweise liegt der Durchsatz bei 2 Verkehrskanälen und 8 Mobilstationen bei 55% des maximal erzielbaren Durchsatzes von $14,4 \text{ kbit/s}$ ($\approx 1000 \text{ bit/s}$ pro MS) bzw. bei 4 Verkehrskanälen und 8 Mobilstationen bei 70% ($\approx 2500 \text{ bit/s}$ pro MS). Stehen 8 Mobilstationen 6 Verkehrskanäle zur Verfügung werden 86% erzielt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Simulationen mit variablen Nachrichtenlängen bei konstanten Ankunftsrate durchgeföhrt. Exemplarisch ist in Abbildung 8.16 der Durchsatz bei 6 konkurrierenden Mobilstationen gezeigt.

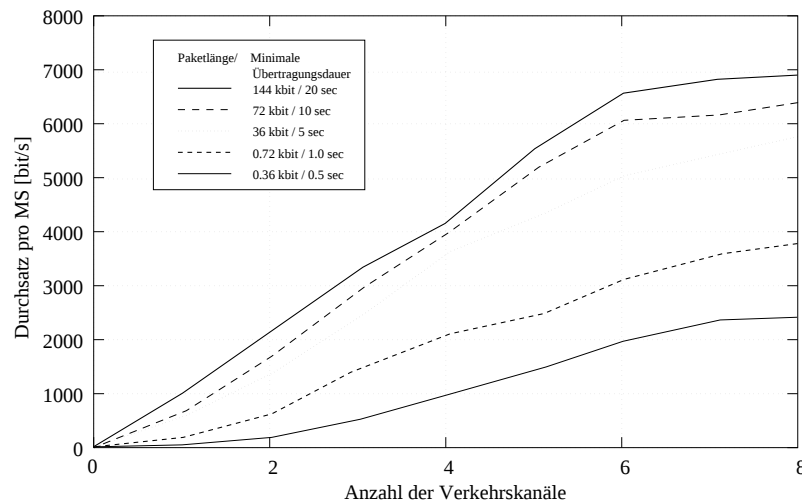


Abbildung 8.16: *Einfluß unterschiedlicher Nachrichtenlängen auf den Durchsatz*

Die in der Abbildung 8.16 angegebene minimale Übertragungsdauer berechnet sich dabei aus der Blockwiederkehrzeit. Die Abbildung zeigt, daß bei Nachrichtenlängen von 36 – 144 *kbit* (obere drei Kurven) ein guter bis befriedigender Durchsatz erreichbar ist. Bei 4 Verkehrskanälen werden zum Beispiel zwischen 72% und 80% des theoretischen Maximums durchgesetzt. Dies entspricht ungefähr den Ergebnissen aus Abbildung 8.15. Bei Nachrichten, deren Länge 1 *kbit* unterschreitet, führen die häufigen Verbindungsauf- und -abbauzyklen zu deutlich geringeren Durchsätzen. Bei Längen zwischen 360 *bit* und 720 *bit* ist ein Durchsatz von nur noch 20-40% des theoretischen Maximums zu erwarten.

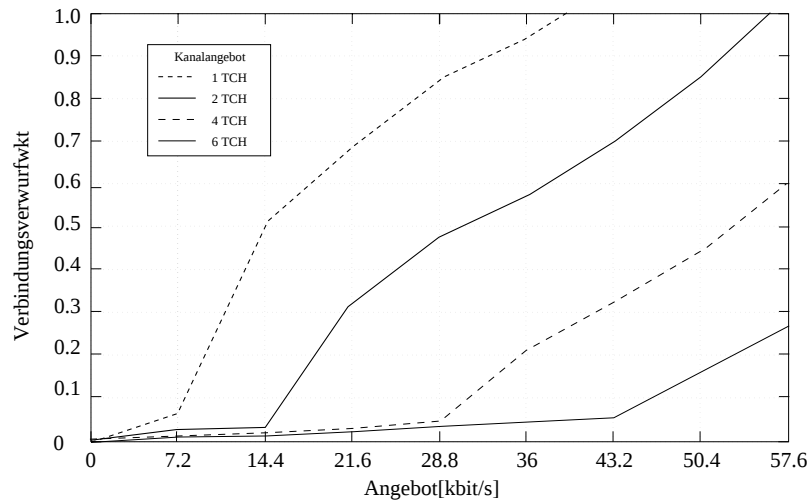
8.3.4.4 Verwurfswahrscheinlichkeit

Neben dem Durchsatz wurde als weiterer wichtiger Parameter die Verwurfswahrscheinlichkeit untersucht, vgl. Abbildung 8.17.

Im Niederlastbereich bleibt die Verwurfswahrscheinlichkeit gering und steigt bis auf 5%. Durch die zunehmende Blockierung des Kanals erfolgt mit steigendem Angebot ein signifikanter Anstieg.

8.3.5 Bewertung

Mit den in dieser Arbeit durchgeföhrtten Untersuchungen wurde gezeigt, daß das Prinzip, virtuelle Verbindungen in Kombination mit “Frame Relaying“ zur Übertragung von Teilnehmerdaten einzusetzen zufriedenstellende Leistungskenngrößen aufweist. In umfangreichen Simulationen konnte der Einfluß von Fenstergröße und Timerwerten auf die Verkehrsleistung ermittelt werden. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Protokolle in ähnlicher Umgebung übertragen und können zum Beispiel zur

Abbildung 8.17: *Verwurfswahrscheinlichkeit*

Optimierung des im GSM zur Signalisierung verwendeten LAPD_m-Protokolls verwendet werden.

Die unter Vollast durchgeführten hier dargestellten Simulationen können als besonders ungünstiger Belastungsfall zur Bewertung der Verkehrsleistung des FMBS angesehen werden. Mit Hilfe der in Kapitel 5 beschriebenen Modifikationen der Signalisierungsprotokolle kann die Zeit für einen Verbindungsaufbau zwar auf ca. 1 Sekunde reduziert werden, die Abbildung 8.16 zeigt jedoch, daß diese Zeitspanne für einen effizienten Paketdatendienst immer noch relativ lang ist. Insbesondere bei kürzeren zu übertragenden Nachrichten fallen die Verbindungsauf- und -abbauzeiten stark ins Gewicht. Berücksichtigt man gemischte Lasten und Verteilungen der Paketlängen und Zwischenankunftszeiten gemäß den in Kapitel 3 vorgestellten Modellen, bietet sich der Einsatz des FMBS insbesondere für horizontale Anwendungen an, die längere Datenpakete und einen relativ kontinuierlichen Datenstrom erzeugen.

Leistungsbewertung des GPRS

Die in Kapitel 4 erörterte Abhandlung über die Funktionalität und Protokollarchitektur des GPRS hat aufgezeigt, daß die Verwaltung und Zuteilung der Funkbetriebsmittel die in einer GPRS-Zelle tragbare Verkehrslast wesentlich beeinflussen. Daher konzentriert sich die in dieser Arbeit durchgeführte Leistungsbewertung auf die Protokolle der Sicherungsschicht zwischen MS, BS und SGSN. Hauptaugenmerk wird auf die Untersuchung des Vielfachzugriffes an der Funkschnittstelle gelegt.

In der Fachliteratur finden sich zahlreiche aktuelle Veröffentlichungen zur Leistungsbewertung von Paketdaten-Protokollen in digitalen, zellularen TDMA-basierten Mobilfunknetzen, vgl. hierzu beispielsweise [35, 41, 122] oder [71, 71]. Diese Forschungsarbeiten basieren größtenteils auf der Analyse von Slotted-Aloha-Protokollen bzw. auf dem bereits in Kapitel 4 erwähnten „Packet Reservation Multiple Access“-Protokoll. Der GPRS findet in diesen Arbeiten keine Berücksichtigung.

Forschungsergebnisse zur Bewertung der tragbaren Verkehrslast an der GPRS-Funkschnittstelle sind erstmals 1995 publiziert worden, vgl [161]. Neben meinen Veröffentlichungen, vgl. z. B. [49, 56] sind weitere Arbeiten zur Leistungsbewertung des Vielfachzugriffes, die sich direkt an den Standardisierungsvorschlägen orientieren, im wesentlichen nur noch in [150, 151] zu finden. Untersuchungen zu Alternativ-Vorschlägen zum Vielfachzugriff im GPRS, vgl. Abschnitt 9.5, sind insbesondere von [98, 102, 95] durchgeführt worden, vgl. aber auch [59] und [60].

9.1 Überblick über die implementierten Protokolle

9.1.1 Verbindungssteuerung

Bei der Auswahl möglicher Protokolle für die logische Verbindungssteuerungsteilschicht des GPRS zwischen MS und SGSN liegt es nahe, die existierenden GSM-Protokolle der Sicherungsschicht (LAPD und RLP) auf ihre Verwendungsmöglichkeit hin zu analysieren.

Sowohl das in Abschnitt 3.4.6 eingeführte RLP als auch das in Kapitel 5 erwähnte LAPD erfüllen nicht alle Anforderungen, die an ein GPRS Sicherungsschicht-Protokoll gestellt werden. Beide Protokolle sind ihrer Einsatzumgebung angepaßte Abwandlungen des HDLC-Protokolls und gleichen sich in wesentlichen Punkten, vgl. Kapitel 2. In Abschnitt 9.3 wird die prinzipiell für einen Einsatz im GPRS notwendige Funktionalität erörtert, die abhängig von der jeweiligen Protokollvariante mit unterschiedlichem Aufwand realisiert werden muß.

Als Ausgangspunkt der simulativen Untersuchung wurden eine zur Leistungsbewertung des FMBS erstellte formale Spezifikation des LAPD sowie eine aus vorangegangenen Arbeiten stammende formale SDL-Spezifikation des RLP verwendet [65]. Diese formalen Spezifikationen wurden an die Simulationsumgebung angepaßt, mit dem in Kapitel 6 vorgestellten *SDL2CNCL*-Programm übersetzt und über die SDL-Schnittstelle an den Simulator angebunden.

Während für das RLP eine mit „GPRS RLP“ (GRLP) bezeichnete modifizierte Version vollständig implementiert wurde, ist die Implementierung der notwendigen Modifikationen des LAPD Ausgangspunkt zukünftiger Untersuchungen. In Anlehnung an die gängige Terminologie wurde eine vorläufige Version unter der Bezeichnung *LAPG* als Abkürzung für „Link Access Procedure on the G-Channel“ formal spezifiziert.

9.1.2 Vielfachzugriff

Da eine kanalgebundene Vermittlung nach dem ersten Zufallszugriff keine spezielle Verwaltung des Zugriffs mehrerer Benutzer auf einen Kanal erfordert, wurden neue Vielfachzugriffsprotokolle entwickelt und implementiert, die speziell auf die Anforderungen des GPRS zugeschnitten sind. Mit dem „Variable Rate Reservation Access“-Protokoll (VRRRA) sowie dem „Master Slave Dynamic Rate Access“-Protokoll (MSDRA) wurden zwei Prinzipskizzen der ETSI GPRS Standardisierungsgruppe für den Vielfachzugriff am Bezugspunkt U_m ausgearbeitet, zum Teil erweitert und in Protokoll-Prototypen umgesetzt, vgl. [49, 52, 56]. Weiterhin wurde das auf [170] zurückgehende, am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze entwickelte „Cellular Packet Radio Access Control“-Protokoll (CELLPAC) modifiziert, an das Konzept der GPRS-Simulationsumgebung angepaßt und re-implementiert, vgl. [34]. Im Zuge des Standardisierungsprozesses wurde das im MSDRA-Protokoll verwendete Master-Slave-Kanalkonzept gegenüber dem in VRRRA und CELLPAC, vgl.[66] benutzten Konzept der gleichberechtigten Paketdatenkanäle favorisiert. Unter Berücksichtigung des Zieles der Arbeit, eine prototypische Implementierung und Bewertung des zukünftigen GPRS-Standards zu realisieren, wurde verstärkt an der Untersuchung und Weiterentwicklung des MSDRA-Protokolls gearbeitet; über [34] hinausgehende Auswertungen des CELLPAC-Protokolls wurden zurückgestellt¹. Auch das VRRRA-Protokoll ist noch nicht abschließend bewertet, wird aber zur Zeit in aktueller Form simulativ untersucht, vgl. [88].

9.2 Grundlagen zum Vielfachzugriff

Üblicherweise wird in zellularen Mobilfunksystemen die Kommunikation zwischen Festnetzkomponenten und Mobilstationen bzw. zwischen Mobilstationen unterein-

¹Das CELLPAC-Protokoll kann als Basis des VRRRA-Protokolls angesehen werden. Die wesentlichen Konzepte des Protokolls finden sich in der VRRRA-Protokollbeschreibung wieder.

ander über Basisstationen abgewickelt; die Mobilstationen können nicht direkt mit anderen mobilen Instanzen kommunizieren.

Auch in GSM-basierten Mobilfunknetzen wird die Kanalvergabe zentral von der Basisstation, die für die Versorgung der Zelle zuständig ist, gesteuert. Bedingt durch die Vorgabe, die Kanalstruktur und Strategie der zentralen Kanaluweisung des GSM zu übernehmen, sind die Freiheitsgrade bei der Entwicklung eines Medienzugriffsverfahrens für den GPRS eingeschränkt.

Die z. B. aus DECT-Systemen oder der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation bekannten dezentral gesteuerten Zugriffsverfahren sowie zentral gesteuerte Verfahren mit Minislots oder anderweitigen Unterteilungen des Kanals zur Optimierung der Wettbewerbsphase scheiden aus, vgl. z. B. [127].

9.2.1 Allgemeines Zugriffsprinzip

Andererseits genügt ein „Slotted-ALOHA“-Verfahren (S-ALOHA) mit expliziten Reservierungen den Anforderungen. In Vertretung für die zahlreichen seit der Entwicklung des Protokolls im Jahre 1975 erschienenen Abhandlungen über die Leistungseigenschaften sei auf [114] und [84] verwiesen.

Die Übertragung von Mobilstation zur Basisstation verläuft in drei Phasen, vgl. Abbildung 9.1:

1. *Wettbewerbsphase*: Sendewillige Mobilstationen übertragen auf speziell dafür vorgesehenen Zeitschlitten im Wettbewerb ihre Reservierungsanfrage.
2. *Reservierungsphase*: Die Basisstation weist der Mobilstation die der Dienstgüte entsprechenden Zeitschlitz für den nachfolgenden Datentransfer zu.
3. *Transferphase*: Der Datentransfer verläuft ohne Wettbewerb auf den zugewiesenen Zeitschlitten ab, wobei die übertragenen Daten auch quittiert werden.

Die Übertragung von der Basisstation zur Mobilstation erfolgt in zwei Phasen:

1. *Mitteilungsphase*: Die Basisstation teilt der Mobilstation diejenigen Zeitschlitz mit, auf denen sie die Daten senden wird.
2. *Transferphase*: Die Mobilstation hört die angezeigten Zeitschlitz ab. Die Übertragung verläuft kollisionsfrei auf den zugewiesenen Kanälen.

Die maximale Anzahl nicht erfolgreicher Zufallszugriffe ist ein konfigurationsabhängiger Parameter. Ebenso ist die Reservierungsdauer entweder durch eine maximale Zeit oder Datenmenge limitiert. Für die Zeitspanne der Reservierung wird allen anderen Teilnehmern verwehrt, die für diese Übertragung nötigen logischen und physikalischen Kanäle zu nutzen.

Ein solches Verfahren setzt eine Anmeldung einer Übertragung durch die Mobilstation voraus. Soll dabei die Übertragungskapazität nicht fest, sondern dynamisch gemäß der gewünschten Dienstgüte wählbar sein, so muß allen Mobilfunkteilnehmern in regelmäßigen Abständen die momentane Situation der Kanalbelegung mitgeteilt werden. Je kürzer dieser Zeitabstand ist, desto eher können die auf eine Übertra-

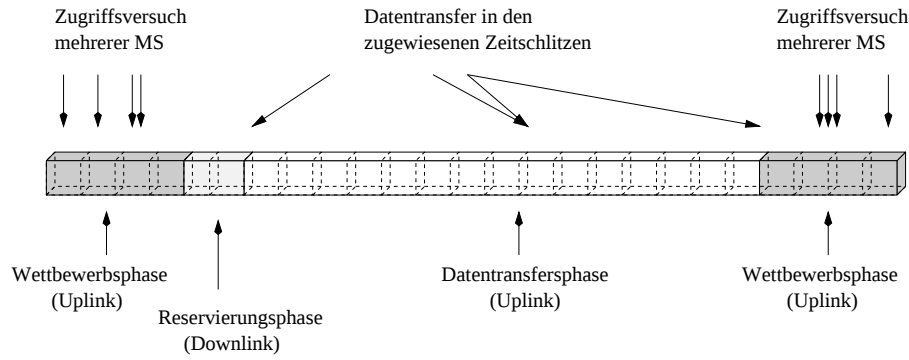


Abbildung 9.1: Zeitlicher Ablauf eines Reservierungsverfahren

gung wartenden Stationen auf einen als frei gekennzeichneten Kanal konkurrierend zuzugreifen.

Bei der Entwicklung eines auf diesem Prinzip basierenden Zugriffsverfahrens ist die Dimensionierung des Signalisierungsaufwands der Basisstation und die gewählte Kanalzuteilungs- bzw. Abfertigungsstrategie ein leistungsbestimmender Faktor, da hier ein Optimum zwischen kurzer Zugriffszeit der mobilen Teilnehmer und Durchsatz auf dem Downlink zu finden ist. Weitere wesentliche Entwurfsmerkmale liegen in der Anzahl der für einen Zufallszugriff zur Verfügung stehenden Zeitschlitz und der verwendeten Strategie zur Kollisionsauflösung.

9.2.2 Erforderliche Kapazität des Zugriffskanals

Ein wichtiger Parameter bei der Betrachtung des Zufallszugriffs ist die Anzahl der für den Zufallszugriff aufeinanderfolgend zur Verfügung stehenden Zeitschlitz N_{RA} bzw. die daraus resultierende Kapazität des Zufallszugriffskanals. In diesem Abschnitt wird analysiert, wie die Anzahl der Zugriffslots bei unterschiedlichen Teilnehmerzahlen und Verkehrslasten zu wählen ist.

Bei dem zu analysierenden Zugriffsverfahren sendet eine Basisstation in regelmäßigen Abständen auf dem Rundsendekanal Informationen über relevante Zugriffsparameter, u. a. über die Position und Anzahl von RACH-Slots. Eine Mobilstation sendet beim Erstzugriff im nächsten möglichen Slot. Danach wartet sie eine bestimmte Zeitspanne auf eine Bestätigung von der Basisstation. Erhält die Mobilstation während dieser Zeitspanne keine Bestätigung (aufgrund einer Kollision oder eines Übertragungsfehlers), wählt sie gleichverteilt einen der folgenden N_{RA} Slots für den erneuten Zugriff aus.

9.2.2.1 Betrachtung bei fester Rahmenlänge

Im folgenden wird das S-ALOHA Zugriffsverfahren zunächst für konstante Rahmenlängen und unendlich viele Stationen (d. h. die Ankunftsrate bleibt auch bei Kollisionen gleich) betrachtet. Bei der auf [35] beruhenden Analyse werden insbesondere die Stabilität des Systems und die mittlere Anzahl kollidierter Stationen

betrachtet. Daraus wird dann ein optimaler Wert für die Zugriffsrahmenlänge N_{RA} abgeleitet.

Geht man von einer unendlich großen Anzahl von Teilnehmern aus, kann die Ankunftsrate λ als Poisson-verteilt angenommen werden. Damit beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß k Stationen in einem Slot senden, vgl. [168]:

$$p_a(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (9.1)$$

Zu Beginn eines Zugriffsrahmens versuchen n im vorherigen Rahmen kollidierte Stationen gleichverteilt in einem der N_{RA} Slots des aktuellen Rahmens zu senden. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Station in einem bestimmten Slot sendet, beträgt somit $p = \frac{1}{N_{RA}}$ und die Wahrscheinlichkeit, daß i der n Stationen in einem bestimmten Slot senden, ergibt sich dann aus der Binomialverteilung:

$$p_{in} = \binom{n}{i} \left(\frac{1}{N_{RA}} \right)^i \left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right)^{n-i}. \quad (9.2)$$

Bezeichnet man die mittlere Anzahl kollidierter Teilnehmer pro Zugriffsrahmen mit N , so setzt sich diese aus drei Beiträgen N_1 bis N_3 zusammen.

$$N = \sum_{i=1}^3 N_i. \quad (9.3)$$

Der Anteil N_1 wird aus den Teilnehmern gebildet, die im vorherigen Zugriffsrahmen nicht erfolgreich waren und im neuen Rahmen erneut kollidieren. Sei i die Anzahl im vorherigen Zugriffsrahmen kollidierter Teilnehmer, die im betrachteten Slot erneut senden (und erneut kollidieren), sowie k die Anzahl der Stationen, die im betrachteten Slot neu senden wollen, so ergibt sich die Anzahl der in diesem Slot kollidierenden Stationen aus der Gleichung:

$$n_{c1} = \sum_{k=0}^{\infty} (k+i) p_a(k), \quad (i \geq 2). \quad (9.4)$$

Die mittlere Anzahl N_1 von Teilnehmern ergibt sich dann zu:

$$N_1 = N_{RA} \cdot \sum_{i=2}^n p_{in} \sum_{k=0}^{\infty} (k+i) p_a(k). \quad (9.5)$$

Der Beitrag N_2 setzt sich aus einem im vorherigen Rahmen kollidierten Stationen sowie einem oder mehreren Stationen, die im betrachteten Slot erstmals senden, zusammen:

$$N_2 = N_{RA} \cdot p_{1n} \sum_{k=1}^{\infty} (k+1) p_a(k). \quad (9.6)$$

Der Beitrag N_3 resultiert aus zwei oder mehr Stationen, die in einem bestimmten Slot gleichzeitig zum ersten Mal senden. Damit erhält man für einen N_{RA} Slots langen Zugriffsrahmen:

$$N_3 = N_{RA} \cdot p_{0n} \sum_{k=2}^{\infty} k p_a(k). \quad (9.7)$$

Die Gesamtzahl N kollidierter Stationen pro Zugriffsrahmen ergibt sich aus Gleichung 9.3. Nach [35] kann die Summe in folgender Form dargestellt werden:

$$N = N_{RA} \cdot \left(\lambda - \left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right)^{n-1} e^{-\lambda} \left(\left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right) \lambda + \frac{n}{N_{RA}} \right) \right) + n. \quad (9.8)$$

Die Abweichung Δ der Anzahl kollidierter Stationen von einem Zugriffsrahmen zum nächsten beträgt:

$$\begin{aligned} \Delta &= N - n \\ &= N_{RA} \cdot \left(\lambda - \left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right)^{n-1} e^{-\lambda} \left(\left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right) \lambda + \frac{n}{N_{RA}} \right) \right). \end{aligned} \quad (9.9)$$

Das Minimum ergibt sich bei folgendem Wert für n :

$$n_{min} = - \frac{\lambda (N_{RA} - 1) \ln \left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right) + 1}{\ln \left(1 - \frac{1}{N_{RA}} \right)}. \quad (9.10)$$

Entwickelt man in obiger Gleichung die $\ln$ -Funktion in eine Taylor-Reihe (mit der Bedingung $N_{RA} \gg 1$), so folgt:

$$n_{min} = N_{RA} \cdot (1 - \lambda) + \lambda \quad (9.11)$$

In [35] wurde das Systemverhalten für verschiedene Ankunftsrate und Rahmenlängen als Parameter untersucht. Dabei stellte sich heraus, daß bei einem größeren Wert für N_{RA} auch der Bereich, in dem Δ negativ ist, sich vergrößert, was erwartungsgemäß zur Stabilisierung des Systems beiträgt. Desweiteren wurde nachgewiesen, daß das System für eine feste Rahmenlänge instabil wird.

9.2.2.2 Betrachtung bei variabler Rahmenlänge

Bei der Veränderung der Rahmenlänge N_{RA} aufgrund der Anzahl kollidierter Stationen n ist zu beachten, daß eine Erhöhung von N_{RA} den Betrag von n zwar verringert, sich aber gleichzeitig die Zugriffszeit erhöht.

Die Zahl kollidierter Stationen ist minimal, wenn $n = n_{min}$ gilt. Aus Gleichung 9.10 folgt dann für die optimale Rahmenlänge:

$$N_{RA} = \frac{n - \lambda}{1 - \lambda}. \quad (9.12)$$

Diese Rahmenlänge kann als eine momentan optimale Rahmenlänge für das System betrachtet werden, die sich in Abhängigkeit von n ändert, d. h. die Rahmenlänge muß variabel sein. Die Werte für λ und n sind von der Basisstation nicht direkt bestimmbar, können aber anhand verschiedener Algorithmen geschätzt werden. Setzt man N_{RA} aus Gleichung 9.12 in Gleichung 9.10 ein, so ergibt sich die Differenz der Zahl kollidierter Stationen für aufeinanderfolgende Rahmen bei variabler Rahmenlänge zu:

$$\Delta_v = \frac{n - \lambda}{1 - \lambda} \left(\lambda - \left(\frac{n - 1}{n - \lambda} \right)^{n-1} e^{-\lambda} \right). \quad (9.13)$$

Bei der Berechnung von Δ_v als Funktion von n mit λ als Parameter, zeigt sich, daß die Funktion für $\lambda < 1/e$ negativ ist und fällt: das System wird stabilisiert. Für wachsende Werte von λ wird Δ_v jedoch positiv und steigend: das System wird dann instabil.

9.2.2.3 Berücksichtigung der Konfiguration des Zugriffskanals

Sei N_{RA} wie bisher die Anzahl für den Zufallszugriff vorgesehener Slots und $l \cdot N_{RA}$ ($l > 1$) die Anzahl reservierter Slots in einem Rahmen, so daß dieser aus $N_{RA} + l \cdot N_{RA}$ Slots bestehe. Die reservierten Slots können dabei im Rahmen an unterschiedlicher Stelle liegen. Die Abweichung Δ kann auch hier als Funktion von n mit festen Parametern λ und N_{RA} bestimmt werden. Nach [35] ergibt sich die optimale Rahmenlänge zu:

$$N_{RA_{M2}} = \frac{n - \lambda(l + 1)}{1 - \lambda(l + 1)} \quad (9.14)$$

Bei dieser Rahmenlänge ergibt sich nachweislich die minimale Anzahl kollidierter Stationen. Das System arbeitet bei dieser Methode jedoch nur stabil, falls für die Ankunftsrate gilt:

$$\lambda < \frac{1}{e^{l+1}}. \quad (9.15)$$

9.2.3 Zuteilungsstrategie für den Paketdatenkanal

Beim Entwurf der Zugriffsprotokolle wurde in dieser Arbeit eine dynamische Prioritätensteuerung eingesetzt, die auf [167] zurückgeht. Die wesentlichen Eigenschaften werden nachstehend vorgestellt.

Bei dynamischen Prioritäten ändert sich die Priorität eines Auftrages mit seiner Wartezeit im System. Wenn man voraussetzt, daß verschiedene Auftragsklassen existieren, die durch statische Prioritäten gekennzeichnet sind bieten sich unterschiedliche Verfahren an, die in der Literatur ausführlich diskutiert werden, vgl. z. B. [111]:

1. Beim ersten Ansatz ist die Priorität eines Auftrages von seiner bisherigen Wartezeit im System abhängig. Führt man verschiedene statische Prioritätsklassen ein, innerhalb derer die Abfertigung nach der Strategie FCFS² erfolgt, ergibt sich die Priorität einer Anforderung der Klasse i , die zum Zeitpunkt t_0 in das System eintrat, zum Zeitpunkt $t > t_0$ z. B. nach [111]:

$$q_i(t) = q_i^0 + k_i(t - t_0)^r \quad (9.16)$$

Dabei stellt q_i^0 eine Anfangspriorität, k_i eine klassenspezifische Prioritätssteigerung und r einen Wichtungsfaktor dar. Als nächster Auftrag wird derjenige mit der höchsten Priorität bearbeitet.

²First Come First Serve

2. Die zweite Möglichkeit, Prioritäten dynamisch zu vergeben bieten die terminorientierten Verfahren. Hierbei wird davon ausgegangen, daß jeder Auftragsklasse eine maximale Verzögerung T_i^{MD} zugeordnet werden kann. Diese maximale Verzögerung läßt sich als die Dauer interpretieren, die eine Anforderung höchstens warten darf, bis ihre Bearbeitung begonnen werden muß, weil sonst die Bearbeitung wertlos ist und der Auftrag deshalb verworfen wird. Die Priorität der Klasse i kann bei Verwendung der in Gleichung 9.16 eingeführten Variablen wie folgt berechnet werden:

$$q_i(t) = q_i^0 + \frac{k_i}{(T_i^{MD} - (t - t_0))} \quad (9.17)$$

Auch bei dieser Strategie wird der Auftrag mit der höchsten Priorität zuerst übertragen, wobei innerhalb jeder Klasse die Strategie FCFS Anwendung findet. Ein Spezialfall der terminorientierten Abfertigung ergibt sich für $q_i^0 = 0$ und $k_i = 1$. In diesem Fall wird der Auftrag als nächstes zur Bearbeitung vorgesehen, der seinem Termin oder auch „Due Date“ ($T_i^{DD} = T_i^{MD} + t_0$) am nächsten gekommen ist. Der Termin eines Auftrages ist der Zeitpunkt, an dem seine Bearbeitung spätestens begonnen werden muß. Eine solche Strategie wird in der Literatur als „Earliest Due Date First“ (EDD) bezeichnet, vgl. [103]. Andererseits kann ein Zeitpunkt T_i^{DD} auch allgemeiner als die Wichtigkeit (*urgency*) einer Anforderung der Klasse i interpretiert werden, die nicht unbedingt seinem Termin entsprechen muß.

Von den dargestellten Möglichkeiten soll im nächsten Abschnitt die terminorientierte Abfertigungsstrategie EDD in der „Relative Urgency“-Variante genauer erläutert werden. Dieses Modell wurde eingehend in [167] untersucht und in dieser Arbeit als Abfertigungsstrategie verwendet. Eine analytische Berechnung komplizierterer Modelle mit $q_i^0 \neq 0$ und $k_i \neq 0$ in Gleichung 9.16 ist in der vorliegenden Literatur noch nicht durchgeführt worden.

9.2.3.1 Die Abfertigungsstrategie *Relative Urgency*

Die Abfertigungsstrategie EDD in der „Relative Urgency“-Variante entspricht im wesentlichen der oben vorgestellten terminorientierten Abfertigung. Bei der RU-Variante erfolgt die Abfertigung der einzelnen Anforderungen jedoch mit Hilfe ihrer individuellen Wichtigkeit (*relative urgency*). Es werden nachfolgend keine Klassen von Anforderungen (mit statischen Prioritäten) berücksichtigt, obwohl dies möglich wäre. Eine Anforderung vom Typ k hat die Wichtigkeit ω_k mit:

$$\omega_N > \omega_{N-1} > \dots \omega_k \dots > \omega_1 \geq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (9.18)$$

Kleine Werte von ω_k repräsentieren hohe Wichtigkeiten. Anforderungen desselben Typs werden im Modell derselben Warteschlange zugeordnet.

Die Priorität für die Bearbeitung einer Anforderung wird dynamisch mit Hilfe der Wichtigkeit ω_k und der individuellen Ankunftszeit berechnet. Die Anforderung mit

kleinster Summe aus ($\omega_k + \text{Ankunftszeit}$) wird als nächste bedient, hat also die höchste Priorität. In der Warteschlange k , in der alle Anforderungen des Typs k warten, wird nach der Strategie FCFS ausgewählt. Bei Mehrdeutigkeit wird die Anforderung mit höchster Wichtigkeit (kleinstem ω_k) zuerst bedient. Die Auswahl findet nur nach Fertigstellung einer in Arbeit befindlichen Anforderung statt. Die dynamische Priorität $q_k(t)$ einer zum Zeitpunkt T_k eingetroffenen Anforderung mit der Wichtigkeit ω_k ist zum Zeitpunkt t , an dem die Anforderung w_k Zeiteinheiten gewartet hat:

$$\begin{aligned} q_k(t) &= \omega_k - t + T_k, & \text{mit } t = T_k + w_k & \text{ gilt:} \\ q_k(t) &= \omega_k - w_k \end{aligned} \quad (9.19)$$

Die dynamische Priorität wächst für jede Anforderung linear mit der Zeit t . Die Steigung ist, unabhängig von der Wichtigkeit ω_k , für alle Anforderungen gleich groß.

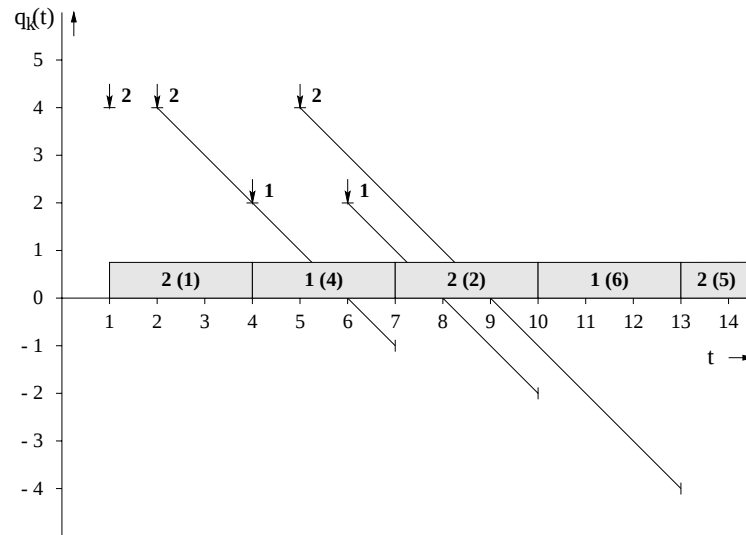


Abbildung 9.2: Verlauf dynamischer Prioritäten bei der EDD/RU-Strategie

In Abbildung 9.2 ist ein Beispiel mit zwei Wichtigkeiten $\omega_1 = 2$ und $\omega_2 = 4$ und den konstanten Bediendauern $\beta_1 = \beta_2 = 3$ dargestellt. Eine Anforderung hat bei ihrem Eintritt in das System die Priorität ω_k , da $t = w_k = 0$ ist. Zu den Zeitpunkten $t = 1, 2, 4, 5$ und 6 treffen Anforderungen ein. Der individuelle Prioritätenverlauf ist, falls die Anforderung warten muß, durch die diagonalen Linien dargestellt. Nach Fertigstellung einer Anforderung wird zur Bearbeitung die Anforderung mit höchster dynamischer Priorität ausgewählt. Die Belegung der Bedieneinheit ist durch die schraffierte Fläche angegeben. Darin ist die jeweilige zu bearbeitende Anforderung eingetragen: Die Angabe 1 (4) zeigt eine Anforderung vom Typ $k = 1$, die zum Zeitpunkt $t = 4$ eingetroffen ist. Der Zeitpunkt $t = 4$ ist insoweit interessant, weil dort die dynamischen Prioritäten der Anforderungen 2 (2) und 1 (4) gleich sind. Bei der Strategie RU wird in einem solchen Fall die Anforderung mit der höheren Anfangspriorität bevorzugt behandelt, in diesem Fall also 1 (4). Erreicht die dynamische Priorität einer Anforderung den Wert 0, so ist ihr Termin erreicht.

Der Termin kann verschieden interpretiert werden: man kann ihn als spätesten Starttermin für den Bearbeitungsbeginn (wie im Beispiel erläutert) verstehen, oder als Fertigstellungstermin (due date). Im ersten Fall kann die Wichtigkeit ω_k einer Anforderung als Richtwert für die maximal erwünschte individuelle Wartezeit verstanden werden, die möglichst nicht überschritten werden sollte. Im zweiten Fall entspricht ω_k der für die Anforderung der Warteschlange k geforderten maximal zulässigen Verweilzeit. Dies ist besonders bei bekannten Bediendauern von Bedeutung, wie beim GPRS der Fall. Aufgrund von zufälligen Ankunftsprozessen pro Warteschlange können die erwünschten Warte- bzw. Verweilzeiten nur mit gewisser Wahrscheinlichkeit eingehalten werden.

Für die mittlere Wartezeit bzw. die Wartezeitverteilungsfunktion können nach [167] Näherungen angegeben werden. Für starken Verkehr (*heavy traffic*) d. h. einer Gesamtauslastung des GPRS-Kanals $\rho_{\leq N} \rightarrow 1$ ist die mittlere Wartezeit der Prioritätsklasse i bei insgesamt N Klassen:

$$W_i = W_{FCFS} + \rho_{\leq N} \sum_{j=1}^N \rho_j (\omega_i - \omega_j), \quad (9.20)$$

mit

$$W_{FCFS} = \frac{\rho_{\leq N} \beta (1 + C^2)}{2(1 - \rho_{\leq N})} \quad (9.21)$$

Dabei ist $\rho_i = \lambda_i \cdot \beta_i$ der Auslastungsbetrag der Anforderungen vom Typ i , die eine mittlere Bediendauer β_i haben. Eine andere Näherung führt auf:

$$W_i = \frac{W_0 + \sum_{j=1}^i \rho_j W_j + \sum_{j=i+1}^N \rho_j W_j \exp\left[\rho_{\leq N} \frac{\omega_i - \omega_j}{W_j}\right]}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j (1 - \exp\left[\rho_{\leq N} \frac{\omega_j - \omega_i}{W_i}\right])} \quad (9.22)$$

Wenn man nun die mittlere Wichtigkeit $\bar{\omega}$ einführt, lassen sich auch die Wartezeitverteilungsfunktion und die Mindestwertverteilungen für die unterschiedlichen Wichtigkeiten angeben:

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \omega_i}{\rho_{\leq N}} \quad (9.23)$$

$$P(W_i \leq t) = 1 - (1 - p) \exp[-\mu(\bar{\omega} - \omega_i)] \exp[-\mu t] \quad (9.24)$$

$$P(W_i > t) = (1 - p) \exp[-\mu(\bar{\omega} - \omega_i)] \exp[-\mu t] \quad (9.25)$$

Hierbei sind p und μ die Parameter einer negativ exponentiellen Verteilung mit einem Dirac-Stoß der Höhe $(1 - p)$ bei $t = 0$, mit der sich die tatsächliche Verteilung approximieren läßt. Die Parameter p und μ lassen sich unabhängig von i für die FCFS-Strategie ermitteln.

9.2.4 Kollisionsauflösung beim Zugriffskanal

Zur Kollisionsauflösung wurde der exponentielle Backoff-Algorithmus herangezogen. Dabei handelt es sich um eine einfache Methode zur Kollisionsauflösung, die z. B. im Ethernet-Protokoll gemäß IEEE Standard 802.3 [136] verwendet wird. Bei dieser Methode wird der Zugriffskanal so kontrolliert, daß die Zugriffswahrscheinlichkeit einer Station, die i Kollisionen nacheinander erlebt hat zu $p_r = 2^{-i}$ bestimmt wird. Alternativ kann auch der Zugriff gleich verteilt über die nächsten 1 bis 2^i Slots erfolgen. Das Ziel dieses Algorithmus ist, die Zeitspanne, über die bei einer Sendewiederholung gesendet werden darf, mit zunehmender Anzahl der Kollisionen auszudehnen, da eine Zunahme der Kollisionen ein Anzeichen für ein erhöhtes Verkehrsaufkommen darstellt.

Bei einer in [105] vorgeschlagenen Kollisionsauflösungsmethode beobachtet eine Station den Zugriffskanal und unterscheidet, ob auf den letzten Slot erfolgreich zugegriffen wurde, sich eine Kollision ereignete oder ob dieser leer blieb. Bezeichnet man mit $z(k)$ die Anzahl der Stationen, die in Slot k sendeten, dann ergibt sich $z(k) = 0$, $z(k) = 1$ oder $z(k) \geq 2$ abhängig davon, ob der letzte Slot leer war, erfolgreich übertragen wurde oder sich eine Kollision ereignete. Mit $p_r(k)$ als Sendewahrscheinlichkeit und I_A als Zustandsfunktion in Slot k gilt:

$$p_r(k+1) = \min \left\{ p_{max}, p_r(k) \left(\frac{1}{q} \cdot I_{z(k)=0} + 1 \cdot I_{z(k)=1} + q \cdot I_{z(k) \geq 2} \right) \right\}, \quad (9.26)$$

wobei $0 < p_{max} \leq 1$, $0 < q \leq 1$ ist und I_A den Wert 1 besitzt, falls das Ereignis A zutrifft; andernfalls ist I_A gleich Null.

Der oben vorgestellte Algorithmus impliziert, daß aufgrund eines leeren (kollidierten) Slots die beobachtende Station den momentanen Wert von p als zu niedrig (groß) betrachtet und somit den Wert von p erhöht (verringert). Der Wert für p_{max} sei 1 und für den Parameter q werden in [105] die Werte $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{\sqrt{2}}$ untersucht. Da in dieser Betrachtung ebenfalls davon ausgegangen wird, daß auch neu generierte Daten mit der Wahrscheinlichkeit p gesendet werden, kann der Durchsatz S_{DFT} bei festem Parameter p_r sofort angegeben werden, vgl. [84]:

$$S_{DFT}(n) = \binom{m}{1} p_r (1 - p_r)^{m-1} \quad (9.27)$$

Das exponentielle Backoff-Verfahren läßt sich für $m \geq 2$ als eine diskrete Markoffkette beschreiben, vgl. [105]. In dieser Beschreibung sind die Systemzustände $X_k (k = 0, 1, \dots)$ so gewählt, daß $p_r = q^k$ gilt. Sei π_k die Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands X_k , dann folgt aus der Analyse der Markoffkette als Durchsatz für den exponentiellen Backoff-Algorithmus:

$$S_{EB}(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{m}{1} p_r (1 - p_r)^{m-1} \pi_k \quad (9.28)$$

Ausgehend von diesen Gleichungen können die Durchsätze als Funktion von n mit verschiedenen Parametern p_r bzw. q berechnet werden, wobei sich π_k aus einer Re-

kursionsgleichung bestimmen läßt, vgl. [105]. Es zeigt sich bei der Methode mit festem p_r , daß für $m \rightarrow \infty$ das System instabil wird und der Durchsatz zu Null wird. Dagegen konvergiert S_{EB} für einen gegebenen Parameter q gegen einen bestimmten positiven Wert, auch für sehr große Werte m . Für $q = 0.5$ und bei $m = 1000$ Stationen ergibt sich $S_{EB} \simeq 0.311$, dies entspricht etwa 85% des maximal erreichbaren Durchsatzes e^{-1} und bedeutet im normalen Betrieb ein zufriedenstellendes Ergebnis. Das vorgestellte Verfahren ist somit nachweislich stabil.

9.3 Das Sicherungsprotokoll GRLP für den GPRS

Nachdem wesentliche Grundlagen zum Vielfachzugriff dargestellt wurden, wird in diesem Abschnitt am Beispiel des GRLP ein Überblick über die notwendige Funktionalität eines LLC-Protokolls für den GPRS gegeben. Auf eine Darstellung der Funktionsweise des zugrunde liegenden RLP-Protokolls wird mit Bezug auf Abschnitt 3.4.6 verzichtet und auf die entsprechenden GSM-Empfehlung [23] verwiesen.

- *Variable Rahmenlänge:*

Die GPRS Protokollarchitektur mit der Sicherung der Übertragung an der Funkschnittstelle U_m durch das RLC-Protokoll ermöglicht eine variable Rahmenlänge auf LLC-Ebene. Daher können Rahmenbegrenzer wegfallen; die Technik des Bitstopfens entfällt. Im Rahmenkopf wird ein zusätzliches Feld zur Angabe der Rahmenlänge notwendig.

- *Variable Adreßtypen:*

Mit dem Paketdatendienst werden neue Adreßtypen mit unterschiedlicher Länge eingeführt. Das Adreßfeld muß daher eine variable Länge haben, welche anhand der Verwendung eines Erweiterungsbits im Adreßfeld verwaltet wird. Jeder Verbindungskennzeichner (*data link connection identifier*, DLCI) besteht aus einer Dienstzugangspunktkennung (*service access point identifier*, SAPI) und einer Geräteendpunktkennung (*terminal endpoint identifier*, TEI), die die TLLI³, TMSI⁴, IMSI⁵ oder IMGI⁶ beinhalten kann. Die Zuweisung der Adreßtypen erfolgt beim Einbuchungsvorgang und wird von den Management-Instanzen verwaltet.

- *Priorisierte Dienstzugangspunkte:*

Die Prioritätsklassen im GPRS bedingen die Einführung neuer SAPIs. Entsprechend der vier vorgeschlagenen Klassen sind mindestens vier SAPIs notwendig. In Anlehnung an das in Kapitel 3 vorgestellte eMLPP-Schema sind weitere SAPIs denkbar, die für Signalisierung bzw. Notrufe reserviert werden können.

³Temporary Logical Link Identity

⁴Temporary Mobile Station Identity

⁵International Mobile Station Identity

⁶International Mobile Station Group Identity

Durch die Einführung von Prioritäten muß zudem die Flußkontrolle und Fehlerbehandlung prioritätsspezifisch verwaltet werden.

- *Erweiterter Operationsmodus:*

Für den bestätigten Punkt-zu-Punkt-Dienst unterstützt das Protokoll eine „duplex“-Kommunikation und operiert dazu im gleichberechtigten, bestätigten Betriebsmodus (*asynchronous balanced mode*, ABM). Da die bestehenden GSM LLC-Protokolle lediglich eine PTP-Kommunikation unterstützen, muß der Protokollautomat für den Punkt-zu-Mehrpunkt-Dienst entsprechend erweitert werden. Eine „duplex“-Kommunikation ist hierbei nicht möglich, so daß als Betriebsart im bestätigten Fall der nicht-gleichberechtigte Modus (*asynchronous unbalanced mode*, AUM) eingeführt wird. Nichtbestätigter Datentransfer wird durch Austausch nicht-numerierter Informationsrahmen gewährleistet.

- *Neue Dienstprimitive:*

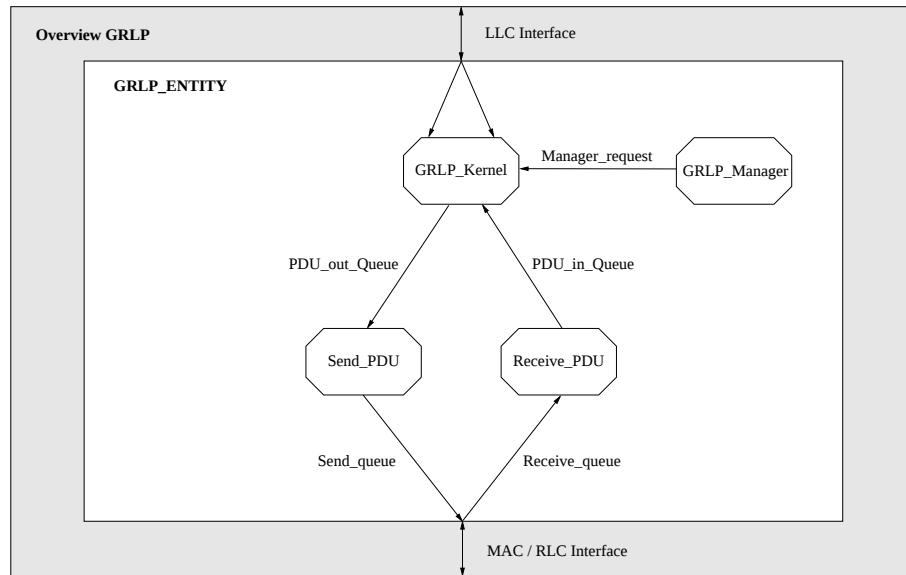
Prioritätsbedingt kann es notwendig sein, eine logische Verbindung kurzfristig auszusetzen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufzunehmen. Dies wird durch zwei neue Dienstprimitive (*GRLP_suspend*, *GRLP_resume*) unterstützt. Dazu ist auf GRLP-Ebene eine entsprechende Erweiterung des Verbindungsaufbauprimitivs SABM notwendig. Die Kommunikation mit der RLC-Schicht erfordert ebenfalls ein bzw. zwei neue(s) Primitiv(e), die in der GRLP-Spezifikation mit *GRLP_data* bzw. *GRLP_ptm_data* bezeichnet wurden.

9.3.1 Integration des GRLP in den Simulator

In diesem Abschnitt wird beispielhaft die Integration des in SDL spezifizierten GRLP in den Simulator beschrieben, vgl. [54]. Bei der Übersetzung der in Abbildung 9.3 illustrierten SDL Spezifikation des GRLP werden die SDL-Konstrukte gemäß Abschnitt 6.4.3 auf sechs CNCL-Klassen abgebildet:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| • SDLProcess_Environment | • SDLProcess_GRLP_Manager |
| • SDLSystem_GRLP | • SDLProcess_Receive_PDU |
| • SDLProcess_GRLP_Kernel | • SDLProcess_Send_PDU |

Die Systeme Mobilstation, Basisstation und Prozeßumgebung sind in der Simulationssteuerung definiert und werden nicht explizit in Klassen umgesetzt. Der nachfolgende Quell-Code deutet an, wie die Prozeßumgebung sowie die Mobilstationen erzeugt werden. Die Erzeugung der Basisstation erfolgt äquivalent zur Mobilstation. Dabei ist zu beachten, daß zu jeder Instanz einer Mobilstation eine entsprechende Partnerinstanz in der Basisstation vorhanden sein muß.

Abbildung 9.3: *SDL-Spezifikation des GRLP (Prozeßebene)*

```

int          num_systems = 1 + mob_zahl;    // Anzahl der Systeme
const long   environment_process_type = 1;

// environment settings
CNSDLSignal::set_max_signals(num_systems * 100);
CNSDLProcess *environment_process = new
    SDLProcess_environment("environment", NIL, environment_process_type);
environment = new CNSDLEnvironment(num_systems,
    environment_process, &global_scheduler);

// create and install ms_systems
SDLSystem_rlp *ms_system;

for (int id=2; id<mob_zahl+2; id++)
{
    ms_system = new SDLSystem_rlp(id, &global_scheduler, channel_delay);
    environment->install(id, ms_system);
}

// deinstall and delete ms_systems
for (int id=2; id<mob_zahl+2; id++)
    delete environment->deinstall(id);

// deinstall and delete environment
delete environment

```

In Abschnitt 6.5.6 wurde erwähnt, daß zur Kommunikation zwischen dem SDL-System und der CNCL-Umgebung die Klasse *SDLProcess_Environment* existiert. Bei der Anbindung des GRLP übernimmt diese Klasse somit den Austausch mit der im Simulator implementierten Containerklasse der LLC-Teilschicht und mit dem

SDL-System des GRLP. Der Nachrichtenfluß zwischen MSDRA und GRLP bzw. GRLP und GRLP_SDL_System ist in Abbildung 9.4 dargestellt.

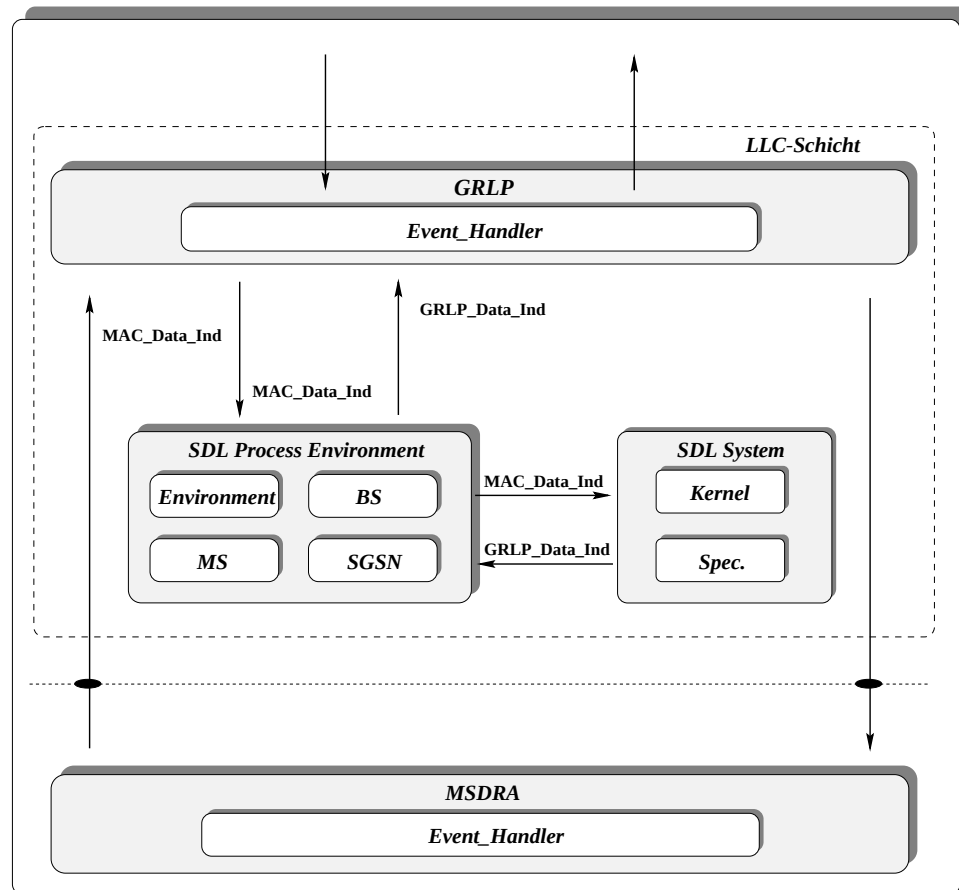


Abbildung 9.4: Anbindung des SDL-Systems an den Simulator (Nachrichtenfluß)

9.4 Das MSDRA-Protokoll

Das nachfolgend vorgestellte Protokoll stellt eine Ausarbeitung und prototypische Implementierung einer in die GPRS-Standardisierung eingeflossenen Prinzipskizze zur Steuerung des Vielfachzugriffs im zukünftigen Paketdatendienst dar, vgl. hierzu [52, 56, 161]. Eine offizielle Bezeichnung für das skizzierte Zugriffsprinzip existiert nicht. In Anlehnung an das verwendete Kanalkonzept und die dynamische Kanalzuweisung wird der in dieser Arbeit entwickelte Prototyp mit „Master-Slave Dynamic Rate Access“-Protokoll (MSDRA) bezeichnet.

9.4.1 Zugriffs- und Kanalkonzept

Das MSDRA-Protokoll kontrolliert nicht nur den Zugriff der Paketdaten-Teilnehmer auf das Funkmedium durch Algorithmen zur Kollisionsauflösung, Multiplexen und Kanalreservierung unter Berücksichtigung der angeforderten Dienstgüte, sondern umfaßt auch Fehlerbehandlungsmechanismen.

Eine Besonderheit des Protokolls ist der sogenannte „Multi-Slot“-Modus, in welchem einer Mobilstation gleichzeitig mehrere logische Kanäle zugewiesen werden. Der Kanalzugriff basiert auf dem eingangs erwähnten S-ALOHA Zugriffsverfahren mit expliziten Reservierungen.

Sobald ein GRLP-Rahmen zur Übertragung vorliegt, wird dieser abhängig von einem variablen Codierungsschema segmentiert und auf eine entsprechende Anzahl von MSDRA-Protokolldateneinheiten (MPDU) aufgeteilt. Eine MPDU wird auf vier Bursts verwürfelt, die in Zeitschlitzten derselben Nummer in aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen gesendet werden.

Erst wenn ein GRLP-Rahmen korrekt zusammengesetzt ist, wird er weitergereicht. Damit wird vom MSDRA-Protokoll in der Terminologie des IEEE 802.3 Standards ein „Typ 2“-Dienst angeboten, vgl. [136]. Ein unbestätigter Informationsaustausch ist bisher nicht vorgesehen, ist jedoch bei der Betrachtung der Mehrpunktkommunikation in Erwägung zu ziehen.

Das Multiplexen von GRLP-Rahmen auf den PTCHs wird zentral durch die Basisstation anhand einer Rahmen-Identifikationsnummer (*temporary flow identity*, TFI) organisiert, die einem GRLP-Rahmen für die Dauer der Übertragung zugeordnet ist. Durch die in den MPDUs enthaltene TFI ist innerhalb einer Zelle die Übertragung eines GRLP-Rahmens eindeutig gekennzeichnet.

Zusätzlich zu der TFI wird die Kanalvergabe durch ein „Uplink State Flag“ (USF) gesteuert. Bevor eine MS Daten empfangen bzw. senden kann, wird ihr einer von sieben möglichen USF-Werten zugewiesen und mitgeteilt, auf welchen Kanälen der Datentransfer stattfinden wird.

Da in der dem Prototypen zugrundeliegenden Prinzipskizze die in Abschnitt 9.2 angesprochenen Entwurfskriterien „Zuteilungsstrategie“ und „Kollisionsauflösung“ nicht näher spezifiziert waren, wurden für den Prototypen eine terminorientierte Abfertigungsstrategie und ein exponentieller Backoff-Algorithmus zur Kollisionsauflösung gemäß der Erläuterung in den Abschnitten 9.2.3.1 und 9.2.4 ausgewählt. Beide Verfahren berücksichtigen die Prioritäten der jeweiligen zu übertragenden Daten. Bezüglich der Dimensionierung des Zufallszugriffkanals sei auf die Abschnitte 9.2.2 und 9.4.1.2 verwiesen.

Weil die Anzahl der zu reservierenden Zeitschlitzte mit der zu übertragenden Datenmenge variiert, wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Kanalbelegung verwaltet. Das als „Look-Ahead-First-Fit“ bezeichnete vorläufig implementierte Verfahren sucht unter einer skalierbaren Anzahl zukünftiger Zeitschlitzte die erste passende Lücke in der verwalteten Kanalbelegungstabelle. Andernfalls verweilen die Daten in der Warteschlange gemäß der Abfertigungsstrategie.

9.4.1.1 Logisches Kanalkonzept

Der generelle Ansatz, die Übertragung von Paketdaten zu ermöglichen, besteht darin, aus den in einer Zelle vorhandenen physikalischen GSM-Kanälen bestimmte Kanäle, die Packet Data Channels (PDCH), für den Paketdatendienst zu reservieren

<i>Gruppe</i>	<i>Kanal</i>	<i>Kanalbezeichnung</i>	<i>Richtung</i>
PBCCH	PBCCH	Packet Broadcast Control Channel	(MS $\leftarrow$ BS)
PCCCH	PRACH	Packet Random Access Channel	(MS $\Rightarrow$ BS)
	PPCH	Packet Paging Channel	(MS $\leftarrow$ BS)
	PPRCH	Packet Paging Response Channel	(MS $\Rightarrow$ BS)
	PAGCH	Packet Access Grant Channel	(MS $\leftarrow$ BS)
PDCCH	PACCH	Packet Associated Control Channel	(MS $\Leftrightarrow$ BS)

Tabelle 9.1: Die Steuerkanäle des MSDRA-Protokolls

und diese logisch zu unterteilen, vgl. Kapitel 4.

Die Abbildung der PDCHs auf die physikalischen Kanäle folgt dem bestehenden GSM-Prinzip. Ein PDCH ist durch einen physikalischen Zeitschlitz und die TDMA-Nummer bestimmt. Uplink und Downlink stellen logisch voneinander unabhängige Ressourcen dar. Auf dem gleichen PDCH können Daten an eine MS versendet und Daten einer anderen MS empfangen werden. Gemäß der Anforderung einer flexiblen Anpassungsmöglichkeit an das Verkehrsaufkommen in einer Zelle wird die Zuweisung der PDCH dynamisch verwaltet.

Vor dem Einbuchen in den GPRS wird auf dem BCCH ein PDCH angezeigt, der die Funktion eines bidirektionalen Signalisierungskanals übernimmt. Auf diesem sogenannten „Master Packet Data Channel“ (MPDCH) läuft der GPRS-bezogene Signaliervverkehr einer Zelle ab. Der MPDCH ist logisch unterteilt in, vgl. Tabelle 9.1:

- Packet Broadcast Control Channel (PBCCH), auf dem GPRS spezifische Kontrollinformationen angezeigt werden.
- Packet Random Access Channel (PRACH), auf dem der Zufallszugriff abläuft.
- Packet Paging Channel (PPCH), auf dem Funkrufe ausgesendet werden, die den adressierten Mobilstationen eine anstehende Downlink-Übertragung anzeigen.
- Packet Paging Response Channel (PPRCH), der zur Bestätigung empfangener Funkrufe dient.
- Packet Access Grant Channel (PAGCH), auf dem Kanalreservierungen angezeigt werden.

Der Datentransfer bzw. die Übertragung verbindungsbezogener Signalisierung läuft auf den sogenannten „Slave Packet Data Channels“ (SPDCH) ab. Zu diesen zählen die:

- Packet Traffic Channel (PTCH), welche einzelnen MS temporär zur Datenübertragung zugewiesen werden.
- Packet Traffic Broadcast Channel (PTBCH), auf welchen Rundsendedaten übertragen werden.
- Packet Associated Control Channel (PACCH), auf welchen die verbindungsbezogenen Signalisierungsdaten übertragen werden.

9.4.1.2 Logische Kanalstruktur

Eine in den GPRS eingebuchte Mobilstation muß neben der GPRS-spezifischen Signalisierungsinformation in regelmäßigen Abständen auch die Steuerkanäle des GSM (z. B. BCCH oder SCH) empfangen können. Die zeitliche Abfolge von Paketdatenkanälen und GSM-Steuerkanälen wird in einer Mehrfachrahmenstruktur festgelegt. Im GSM werden mit dem 51er und 26er Mehrfachrahmen zwei verschiedene Mehrfachrahmenstrukturen zur Definition der zeitlichen Abfolge der GSM-Kanäle verwendet, vgl. Kapitel 2. Wird für den GPRS ein 51er Mehrfachrahmen definiert, ist die Position der CCHs der eigenen Zelle bekannt und ändert sich zeitlich nicht. Auch in den Nachbarzellen sind die CCH-Positionen bis auf einen unbekannten zeitlichen Versatz fest, es sei denn, die angrenzende Zelle ist mit der eigenen synchronisiert. Aus diesen Überlegungen heraus wird der 51er Mehrfachrahmen als Grundlage für das MSDRA-Protokoll definiert.

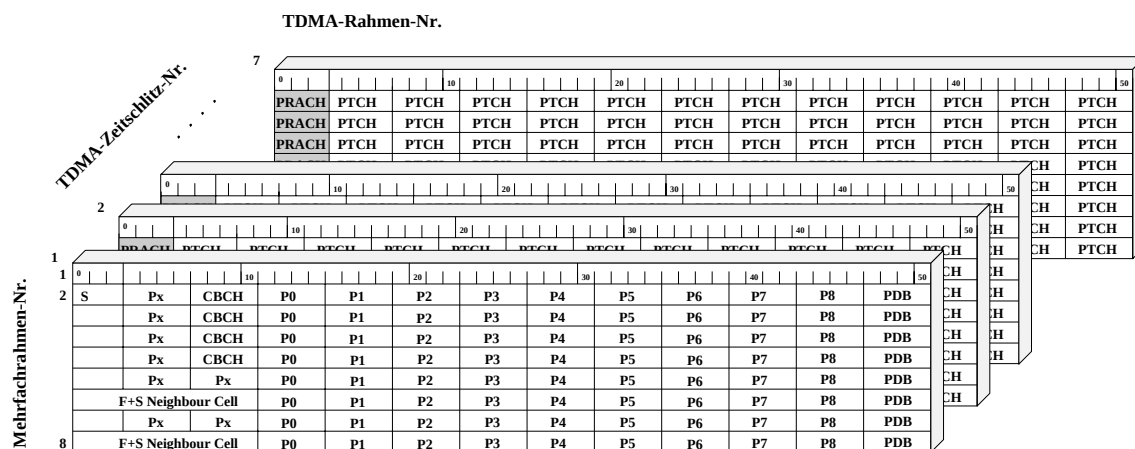


Abbildung 9.5: *Beispiel eines Mehrfachrahmenzyklus auf dem Downlink*

Weiterhin wird aus dem GSM-BCCH-Zyklus ein *Mehrfachrahmenzyklus* abgeleitet. Dieser aus acht 51er Mehrfachrahmen bestehende Zyklus dauert ca. 1,9 sec und bestimmt den maximalen Abstand, der vergehen darf, bevor ein bestimmter CCH wieder ausgelesen werden muß. In Abbildung 9.5 ist ein solcher Zyklus für den Fall dargestellt, daß Synchronisationsparameter der Nachbarzelle gelesen werden.

Der MPDCH ist auf den Zeitschlitz 0 der 51 TDMA-Rahmen der acht Mehrfachrahmen abgebildet. Die restlichen Zeitschlitzstellen stellen die SPDCHs dar. Gemäß der Interleavingtiefe von vier, mit der eine MPDU verwürfelt wird, sind jeweils die vier gleichen Zeitschlitzstellen aufeinanderfolgender TDMA-Rahmen zu einem Block zusammengefaßt.

In Abbildung 9.5 bleiben die TDMA-Rahmen 0 bis 2 unbenutzt. Auf dem Uplink bilden diese den PRACH, auf dem der Zufallszugriff erfolgt. In der Prinzipskizze der ETSI waren lediglich diese drei Rahmen pro Mehrfachrahmen für den PRACH reserviert. Erste Berechnungen und Simulationen zeigten jedoch, daß dies bereits zu vielen Kollisionen und einem instabilen Protokollverhalten führt. Daher wurde durch Reservierung weiterer Zeitschlitze die Kapazität des PRACH erhöht und kann in der aktuellen Version gemäß den Ausführungen in Abschnitt 9.2.2 dynamisch in Abhängigkeit des aktuellen Verkehrsaufkommens angepaßt werden, vgl. Abbildung 9.6.

TDMA-Rahmen-Nr.[illegible]Abbildung 9.6: *Beispiel der Verteilung des Zufallszugriffkanals*

Die ersten elf Zeitschlitzte des MPDCH werden verwendet, um die CCHs zu lesen, vgl. Abbildung 9.5. Ungenutzte Zeitschlitzte in diesem Teil des MPDCH können zum Paging verwendet werden (Px). Die verbleibenden zehn Blöcke sind ebenfalls zur Rufbenachrichtigung (P0 bis P8) sowie zum Rundsenden von Paketdaten (*packet data broadcasting*, PDB) reserviert. Darüber hinaus dürfen alle Blöcke für den Datentransfer benutzt werden, falls sie nicht anderweitig benötigt werden.

Zeitschlitz 0 des ersten TDMA-Rahmens im MPDCH 0 des gezeigten Beispiels („S“) wird zum Lesen des SCH der eigenen Zelle verwendet. In den Mehrfachrahmen 5 und 7 werden die ersten 11 Zeitschlitze verwendet, den SCH und FCCH der benachbarten Zellen zu lesen. Dieser Teil ist in der Abbildung mit „F+S“ angegeben. Die Dauer von elf Rahmen ist ausreichend für jeden beliebigen zeitlichen Versatz der Rahmen einer Nachbarzelle, da SCH und FCCH alle zehn TDMA-Rahmen wiederholt werden. In den Zeitschlitzen 8 bis 11 der Mehrfachrahmen 0 bis 3 kann die Mobilstation den

CBCH abhören.

In Abbildung 9.7 wird dargestellt, zu welchen Zeitpunkten der BCCH und der EBCCH⁷ der eigenen Zelle gelesen wird. Für den BCCH sind dies die Zeitschlitz 0 der TDMA-Rahmen 2 bis 5 in allen Mehrfachrahmen und die Zeitschlitz 0 der TDMA-Rahmen 6 bis 9 in den Mehrfachrahmen 4 bis 7 für den EBCCH. Das Abhören von BCCH und EBCCH ist nur dann erforderlich, wenn ein spezielles Bit im PDB anzeigt, daß sich Parameter verändert haben. Für den Fall synchronisierter Nachbarzellen ist die Lage des BCCH bekannt, und es reicht aus, die Zeitschlitz 0 der TDMA-Rahmen 2 bis 5 im Mehrfachrahmen 7 zu belegen.

TDMA-Rahmen-Nr.																																																										
Multirahmen-Nr.	<table><tr><th colspan="4">10</th><th colspan="4">20</th><th colspan="4">30</th><th colspan="4">40</th><th colspan="4">50</th><th>0</th></tr><tr><th>1</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr></table>													10				20				30				40				50				0	1																							
	10				20				30				40				50				0																																					
	1																																																									
	0	S	BCCH		CBCH	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	1		BCCH		CBCH	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	2		BCCH		CBCH	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	3		BCCH		CBCH	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	4		BCCH	EBCCH		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	5		BCCH	EBCCH		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
	6		BCCH	EBCCH		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																											
7		BCCH	EBCCH		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	PDB																																												

Abbildung 9.7: Struktur des DL-MPDCH beim Abhören von BCCH-Parametern

Zum Auslesen der Zellauswahlparameter benachbarter Zellen müssen innerhalb des Mehrfachrahmenzyklus zwei ganze Mehrfachrahmen und die Zeitschlitz 0 von drei TDMA-Rahmen reserviert werden, da der zeitliche Versatz der benachbarten Zelle unbekannt ist. Dies geschieht in den Mehrfachrahmen 4 und 6 und wird aus Kapazitätsgründen betreiberspezifisch nur in bestimmten Zyklen durchgeführt werden.

9.4.2 Fehlerbehandlung und Fehlersicherung

Zur Fehlerbehandlung wird im MSDRA-Protokoll ein selektives ARQ-Verfahren verwendet, welches anhand einer Blockfolgenummer und einer Bitmap die erneute Übertragung fehlerhaft empfangener MPDUs steuert. Die Fenstergröße ist durch die maximale Länge der Bitmap auf 64 begrenzt. Einzelheiten zum Quittierungsmechanismus werden bei der Beschreibung der Transferabläufe beschrieben.

Zur Fehlersicherung kommen beim MSDRA-Protokoll *punktierte Faltungscodes* zum Einsatz. Diesen liegt der im GSM eingesetzte 1/2-Faltungscodierer zugrunde, vgl. Kapitel 2. Die Decodierung erfolgt mit dem ebenfalls aus dem GSM bekannten Viterbi Softdecision Decodierer, vgl. [79]. Hardwareänderungen lassen sich somit weitgehend vermeiden.

Standardmäßig wird zur Übertragung von Signalisierungsinformation auf das für den GSM-SDCCH verwendete Schema mit einem Faltungscode der Rate 1/2 und einem 40 *bit* langen Fire Code zurückgegriffen.

⁷Extended BCCH

Die Nutzdaten werden dagegen mit einer 16 *bit* langen Prüfsumme (*frame check sequence*, FCS) gesichert und mit einem Faltungscode der Rate 3/4 mit folgender Punktiermatrix codiert:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Als Erweiterung der in der Prinzipskizze vorgesehenen Fehlersicherung werden in dieser Arbeit weitere Codierraten vorgeschlagen. Dadurch kann der Grad der Redundanz dynamisch an die momentane Signalqualität adaptiert werden. Tabelle 9.2 zeigt die möglichen Optionen.⁸

<i>Name</i>	<i>Codier- rate</i>	<i>USF</i>	<i>Nutz- bits</i>	<i>FCS</i>	<i>Tail</i>	<i>Codierte Bits</i>	<i>Punktierte Bits</i>	<i>Daten- rate</i>
CS 1	1/2	3	162	40	4	456	0	8.26
CS 2	$\approx 2/3$	6	249	16	4	588	132	12.69
CS 3	$\approx 3/4$	6	293	16	4	676	220	14.94
CS 4	1	12	405	16	4	912	456	20.64
CS 5	3/4	-	303	16	4	684	228	16.7

Tabelle 9.2: Übersicht über die möglichen MSDRA-Codierschemata

Um das Decodieren der *Uplink State Flags* (USF) zu vereinfachen, werden für die Codierschemata 2 bis 4 spezielle Punkturvorschriften verwendet, bei denen das 12 *bit* lange Codewort für das USF nicht punktiert wird. Bei den Schemata 2 und 3 wird dazu eine Vorcodierung des USF mit 6 *bit* vorgenommen, bevor der Rahmen faltungscodiert wird. Bei Verwendung des Codierschemas 1 wird der gesamte Rahmen codiert und das USF muß als Teil der Informationsdaten decodiert werden. Eine Vorcodierung ist aufgrund der längeren Prüfsumme nicht notwendig.

Zur Angabe des zu benutzenden Codierschemas werden die beiden in einem GSM Normal-Burst vorhandenen *Stealing Bits* verwendet. Da vier aufeinanderfolgende Bursts zu einer MPDU gehören, kann das Schema so mit einem 8 *bit* langen Blockcode der Hammingdistanz 5 gegen Übertragungsfehler geschützt werden.

Abbildung 9.8 zeigt exemplarisch die Fehlersicherung der Teilnehmerdaten bei dem standardmäßig benutzten Schema 5. Der Prototyp sieht vor, eine dynamische Codierrate oder eine feste Rate 3/4 gemäß Schema 5 zu verwenden. Dabei werden die Stealing Bits zur Angabe der Codierrate nicht benötigt, sondern können zur Übermittlung des Status des USF verwendet werden. Dies impliziert, daß keine Bits für das USF reserviert werden müssen, so daß die Datenrate auf 16.7 *kbit/s* steigt.

⁸Die aktuelle Version des vorläufigen GPRS-Standards der Funkschnittstelle sieht ebenfalls variable Codierraten vor, vgl. [28].

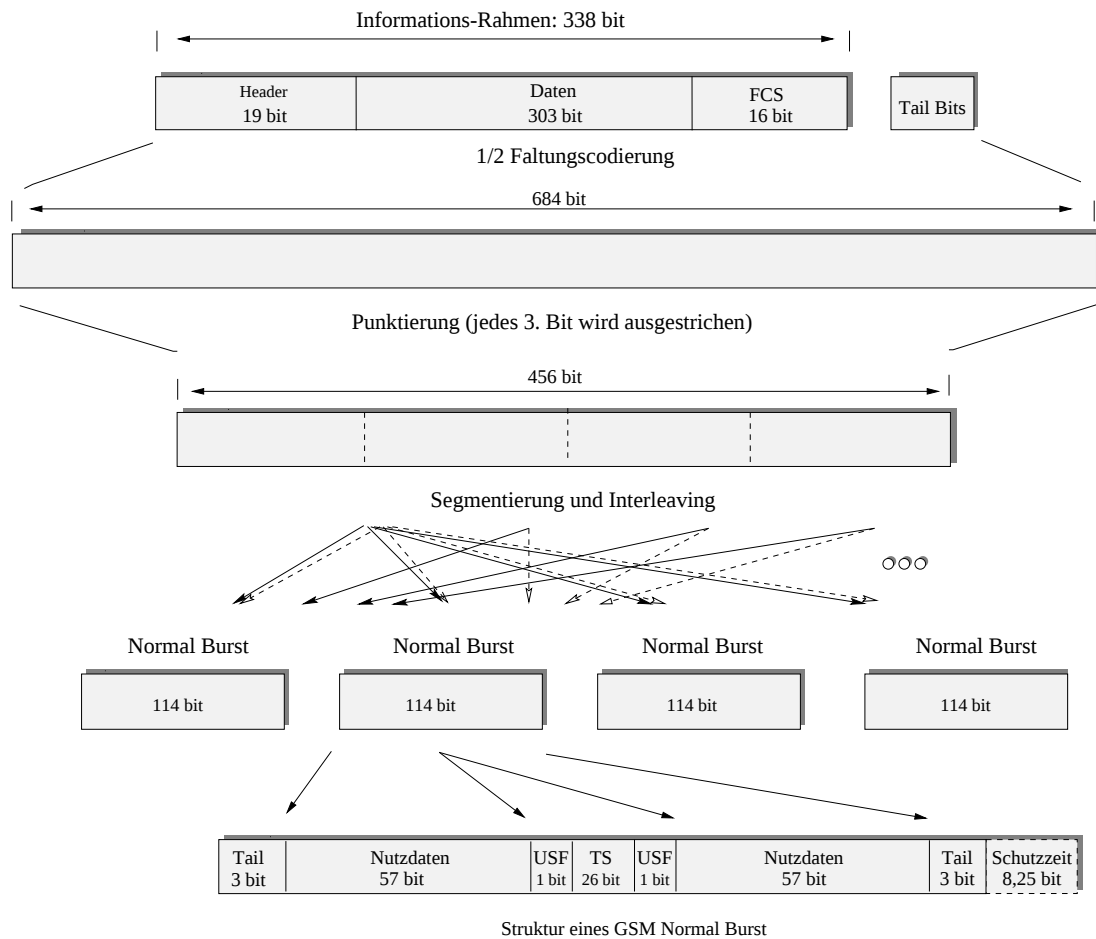


Abbildung 9.8: Fehlersicherung der Teilnehmerdaten gemäß CS 5

9.4.3 Rahmenformate

Im MSDRA-Protokoll sind drei Rahmenstrukturen definiert:⁹

- *Informations-Rahmen* (I-Rahmen)
- *Steuer-Rahmen* (S-Rahmen)
- *Steuer-Rahmen für den Zufallszugriff* (S_z -Rahmen)

9.4.3.1 Struktur der Informations-Rahmen

Ein I-Rahmen besteht aus einem Rahmenkopf (*header*), dem Informationsfeld, welches die Nutzdaten aufnimmt und einer zur Fehlersicherung erforderlichen Prüfsumme. In Abhängigkeit des Codierungsschemas wird dem Kontrollfeld das USF vorangestellt. Der 19 *bit* lange Header ist in vier Teile unterteilt:

- Rahmentyp-Kennung (MPDU type)
- Temporäre LLC-Rahmen-Kennung (*temporary flow identity*, TFI)

⁹Die Unterscheidung von S- und S_z -Rahmen beruht darauf, daß *I+S-Rahmen* auf GSM *Normal-Bursts* aufgeteilt werden, während für den kürzeren S_z -Rahmen GSM *Random-Access-Bursts* verwendet werden.

- Blockfolgennummer (*block sequence number*, BSN)
- BCCH Changed Flag (BCF)

Zur Angabe des Rahmentyps sind 3 *bit* vorgesehen. Entsprechend der Kennung werden die weiteren Felder des Rahmens interpretiert. Die TFI ist 8 *bit* lang, während 7 *bit* für die BSN vergeben werden. Ein gesetztes BCF zeigt an, daß im folgenden Mehrfachrahmen der BCCH gelesen werden muß, vgl. Abschnitt 9.4.1.2. Die Länge des Informationsfeldes ist abhängig von dem verwendeten Codierungsschema.

Wenn keine Rahmen zur Übertragung anstehen, werden von der Basisstation „Idle“-Rahmen versendet. Dadurch erhält die MS permanent die Werte des USF und BCF. Die Informationsbits haben keine Bedeutung und werden auf „1“ gesetzt oder können zur Sendeleistungsanpassung verwendet werden.

9.4.3.2 Struktur der Steuer-Rahmen

Die Struktur der Steuer-Rahmen hängt von der jeweiligen Funktion ab. Zur Unterscheidung des Typs dient die bereits beschriebene 3 *bit* lange Kennung. Da das Protokoll sehr sensitiv auf einen Verlust der Steuerinformation reagiert, werden Steuer-Rahmen ausschließlich gemäß CS 1 codiert.

S_z -Rahmen werden in der Zugriffsphase von der Mobilstation gesendet. Zu diesem Zeitpunkt ist die Mobilstation noch nicht mit der Basisstation synchronisiert, so daß eine vergrößerte Schutzzeit notwendig wird. Die Struktur und Codierung eines S_z -Rahmens ist in der Abbildung 9.9 dargestellt. Ein Interleaving findet nicht statt, um eine zusätzliche Verzögerung zu vermeiden.

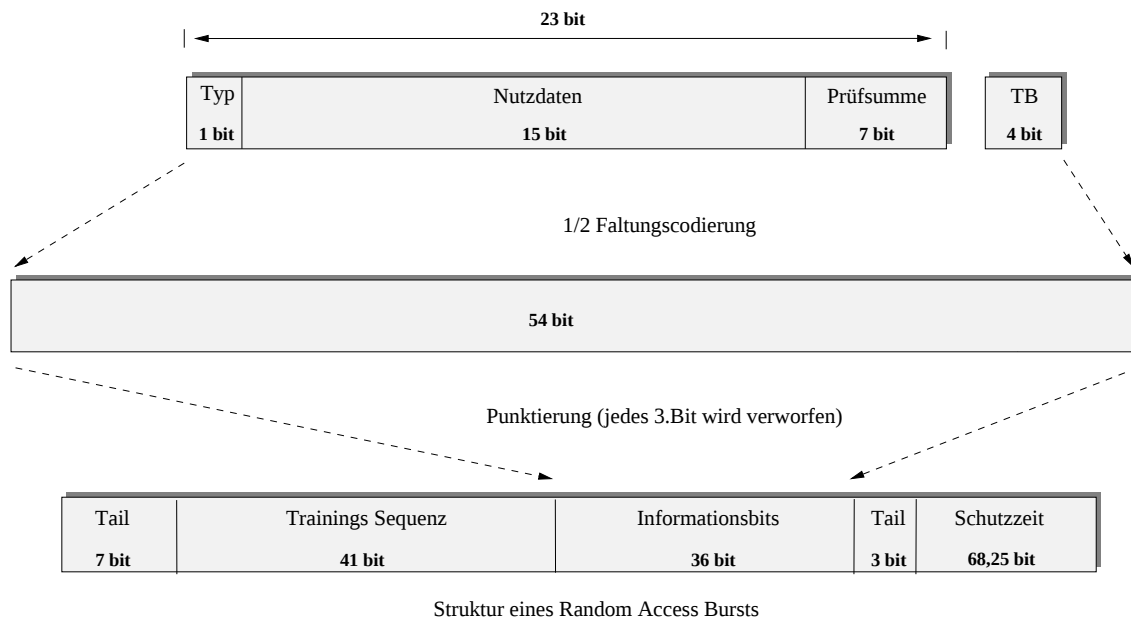


Abbildung 9.9: Codierung eines MSDRA S_z -Rahmens

9.4.3.3 Funkruf-Rahmen

Durch einen Funkruf-Rahmen (*paging frame*) wird der Mobilstation mitgeteilt, daß Daten zur Übertragung anstehen. Es gibt zwei Arten von Paging-Rahmen, vgl. Abbildung 9.10:

- Normal Paging (N-Paging), für unsynchronisierte Mobilstationen
- Immediate Paging (I-Paging), für synchronisierte Mobilstationen

Typ	TLLI	MPDU Anzahl	PPRCH	Prio.	Parameterwiederholung für drei weitere Mobilstationen				unbenutzt
3 bit	25 bit	7 bit	6 bit	3 bit	123 bit (3 X 41 bit)				14 bit

Typ	TLLI	TFI	MPDU Anzahl	PTCH Angabe	Prio.	USF	Timing Advance	Power Level	Parameter für eine weitere MS	unbenutzt
3 bit	25 bit	8 bit	7 bit	8 bit	3 bit	24 bit	6 bit	5 bit	86 bit	6 bit

Abbildung 9.10: *Paging-Rahmen*

Über eine 25 *bit* lange *TLLI* wird die adressierte Mobilstation identifiziert. 7 *bit* werden zur Angabe der Anzahl der zu übertragenden MPDUs mitgesendet. Außerdem wird die Priorität in 3 *bit* mitgeteilt. Da vier Mobilstationen gleichzeitig mit einer N-Paging-Nachricht angesprochen werden können, wird zusätzlich der Zeitschlitz des MPDCHs angezeigt (PPRCH), auf dem die jeweilige Mobilstation mit einem Paging-Response-Rahmen (PR) antworten soll. Ein I-Paging-Rahmen wird zur Initialisierung einer Übertragung mit synchronisierten Mobilstationen verwendet. Ein Antwortrahmen der Mobilstation ist nicht mehr erforderlich. Der Transfer der Daten erfolgt unmittelbar im Anschluß an das Senden des I-Paging-Rahmens, in welchen die Parameter der anstehenden Datenübertragung für zwei Mobilstationen angezeigt werden. Dazu werden die PTCHs, auf denen die Übertragung erfolgen wird, und der Wert der zugehörigen USFs angegeben.

9.4.3.4 Kanalreservierungs-Rahmen

Der in Abbildung 9.11 gezeigte Kanalreservierungs-Rahmen (*Channel-Reservation, CR*) wird von der Basisstation auf dem MPDCH als Antwort auf einen Zufallszugriff (Uplink) oder nach einem PR-Rahmen (Downlink) gesendet. Der Mobilstation werden dabei die TFI, die Bitmap der Kanäle, auf denen die Daten gesendet werden, und eine Zufallszahl zur Identifikation der MS mitgeteilt.

Typ	RA-ID	TFI	BSN	PTCH Angabe	USF	Timing Advance	Power Level	Parameter für eine weitere MS	RA-Bestätigung für max. 8 MS	unbenutzt
3 bit	6 bit	8 bit	7 bit	8 bit	24 bit	6 bit	5 bit	64 bit	48 bit (8 x 6 bit)	2 bit

Abbildung 9.11: *Der Kanalreservierungs-Rahmen*

Die Zufallszahl wird dabei aus dem vorangegangenen RA bzw. PR wiederholt. Zur zeitlichen Synchronisation und Sendeleistungssteuerung sind in einem CR-Rahmen weiterhin die Timing Advance und der Power Level enthalten. Die Kanalreservierung wird für zwei Mobilstationen gleichzeitig durchgeführt. Zusätzlich sind 48 *bit* reserviert, um eingegangene Reservierungswünsche zu bestätigen.

9.4.3.5 Bestätigungs-Rahmen

Mit dem in Abbildung 9.12 dargestellten Bestätigungs-Rahmen (*Acknowledgement*, ACK) werden die empfangenen Daten quittiert bzw. neu angefordert. Mit einem ACK-Rahmen werden zwei Übertragungen bestätigt. Dazu sind jeweils die TFI und eine 64 *bit* lange Bitmap enthalten, in der die fehlerhaften Blöcke markiert sind.

Typ	TFI	Bitmap der fehlerhaft empfangenen MPDUs	Parameter für eine weitere Mobilstation	unbenutzt
3 bit	8 bit	64 bit	72 bit	2 bit

Abbildung 9.12: *Quittierungs-Rahmen*

9.4.3.6 Random-Access- und Paging-Response-Rahmen

Die Random-Access- (RA) und Paging-Response-Rahmen (PR) werden von der Basisstation für den Aufbau der beantragten Übertragung benötigt. Durch die Nutzung der Struktur des im GSM verwendeten Access-Bursts stehen nur 23 Informationsbits zur Verfügung, vgl. Abbildung 9.9.

Ein Bit dient zur Unterscheidung der beiden Rahmen. Eine 6 *bit* lange Zufallszahl identifiziert die Mobilstation bei einer nachfolgenden Kanalreservierung durch die Basisstation.

Der PR-Rahmen enthält lediglich eine Prüfsumme, da er nur zur Synchronisation der Mobilstation beim Aufbau einer Downlink-Verbindung mit der Basisstation dient. Beim RA-Rahmen sind 7 *bit* zur Angabe der Anzahl der zu übertragenden Rahmen vorgesehen und weitere 3 *bit* zur Angabe der Anzahl der von der Basisstation zu reservierenden Kanäle. Die Priorität wird mit 3 *bit* verschlüsselt, der Rest des Rahmens enthält die Prüfsumme.

9.4.4 Uplink-Transfer

Eine Mobilstation initiiert einen Pakettransfer, indem sie einen RA-Rahmen auf dem ausgewiesenen Zufallszugriffskanal sendet. Die Basisstation antwortet mit einer Kanalreservierungsnachricht, vgl. Abbildung 9.13. Das buschelige Anfallen von Paketdaten kann zu einem temporären Engpaß der Kanalressourcen führen, so daß kurzfristig mehr Reservierungswünsche vorliegen, als innerhalb eines bestimmten Zeitlimits bedient werden können. Zur Vermeidung, daß bereits korrekt in der BS eingegangene Reservierungsanfragen unnötigerweise wiederholt werden, werden die Mobilstationen darüber informiert, daß ihr gesen-

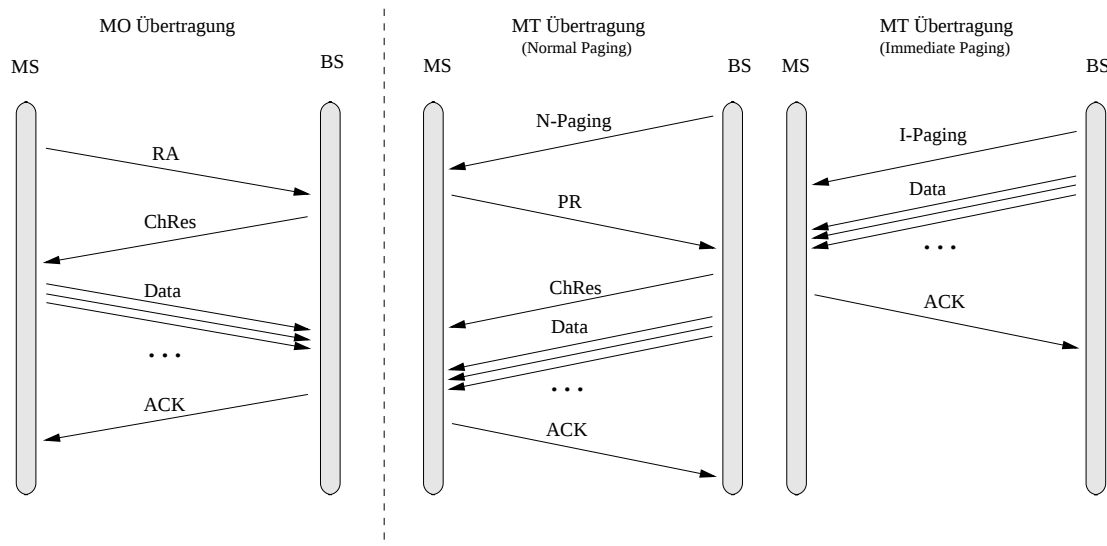


Abbildung 9.13: Daten-Transfer (fehlerfreie Übertragung)

deter RA bereits empfangen wurde und eine Kanalreservierung zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen wird.

Um nicht zuviel Kanalkapazität auf dem Downlink-MPDCH zu belegen, werden diese Eingangsbestätigungen als Teil eines Kanalreservierungs-Rahmens einer anderen Mobilstation verschickt.

Nun kann der Transfer der Daten in den reservierten PTCHs mit den zugeteilten Freigabezuständen beginnen. Hat die Mobilstation alle anstehenden Daten gesendet, bestätigt die Basisstation den Empfang mit einem ACK-Rahmen. Sind alle Rahmen als korrekt empfangen bestätigt, ist die Übertragung beendet. Eine negative Bestätigung bewirkt das erneute Aussenden der gekennzeichneten I-Rahmen.

9.4.5 Downlink-Transfer

Vor der Übertragung der Teilnehmerdaten sendet die Basisstation auf dem MPDCH einen an die entsprechende Mobilstation adressierten Normal-Paging-Rahmen, vgl. Abbildung 9.10. Nachdem der PR-Rahmen in der Basisstation eingegangen ist, wird ein CR-Rahmen übertragen und der Transfer der I-Rahmen beginnt, vgl. Abbildung 9.13.

Kennt die Basisstation mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den Aufenthaltsort der Mobilstation kann der Mobilstation in der Benachrichtigung über anstehende Datenblöcke direkt die zum Empfang notwendigen Informationen mitgeteilt werden, vgl. Abbildung 9.10.

In Abweichung zum Standardvorschlag wird seitens der Basisstation die Bestätigung implizit durch ein gesetztes USF initiiert. Dadurch wird die Übertragung eines zusätzlichen Rahmens vermieden, mit dem die Bestätigung angefordert wird. Bei positiver Quittung aller MPDUs ist die Übertragung beendet. Anderenfalls wiederholt die Basisstation die in der Bitmap gekennzeichneten MPDUs.

9.5 Das VRR-Protokoll

Eine zweite in der Diskussion befindliche Variante zur Steuerung des Vielfachzugriffs im GPRS ist aus einem existierenden Protokoll abgeleitet und unter dem Namen “Variable Rate Reservation Access” (VRR) bereits in der Literatur diskutiert worden, vgl. [106, 102].

9.5.1 Zugriffs- und Kanalkonzept

Auch beim VRR-Protokoll wird ein Multislot-Modus unterstützt, in dem bis zu sieben Zeitschlitz pro TDMA-Rahmen für eine Mobilstation zur Paketdatenübertragung zugewiesen werden können. Im Gegensatz zum MSDRA-Protokoll basiert das Kanalkonzept des VRR-Protokolls auf „gleichberechtigten“ Paketdatenkanälen. Prinzipiell werden auch hierbei die bereits in 9.1 eingeführten Kanäle verwendet. Die dem GPRS zugewiesenen PDCHs werden jedoch unabhängig voneinander behandelt. Jeder fünfte Zeitschlitz eines PDCHs stellt einen Signalisierungskanal (PCCH) dar und wird zur Übertragung von Steuerinformationen benutzt, vgl. Abbildung 9.14. Die dazwischenliegenden Zeitschlitz werden als PTCHs zur Datenübertragung genutzt bzw. als PRACH für den Zufallszugriff, wenn sie im PCCH zuvor als „unbelegt“ gekennzeichnet waren.

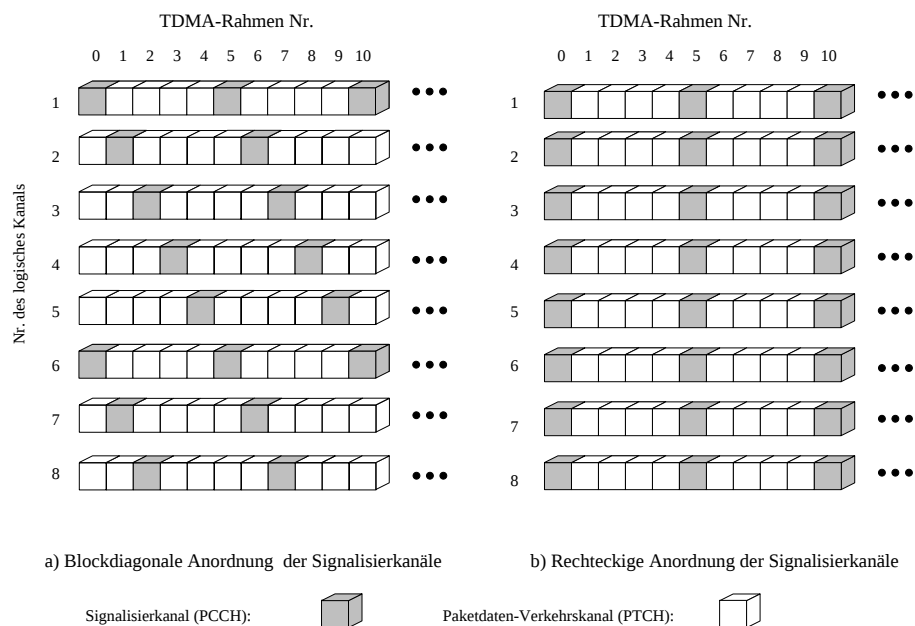


Abbildung 9.14: Die Kanalstruktur des VRR-Protokolls

Ebenso wie bei parallel genutzten MSDRA-Masterkanälen hat dies zur Folge, daß die Mobilstationen in Paging-Gruppen eingeteilt werden müssen. Jedem PDCH ist eine gewisse Anzahl von Mobilstationen zugeteilt, die nur diesen Kanal ständig abhören. Im Gegensatz zum MSDRA müssen Informationen über alle reservierten PDCHs auf dem BCCH übertragen werden, womit mehr Kapazität auf dem BCCH

für den Paketdatendienst in Anspruch genommen wird. Eine Änderung der Anzahl zur Verfügung gestellter PDCHs erfordert zudem eine Neueinteilung der Paging-Gruppen.

Ein weiterer prinzipieller Unterschied zum MSDRA-Protokoll liegt in der Fehlerbehandlung. Im Gegensatz zum MSDRA-Protokoll, in welchem eine PDU – bis auf die verkürzten S_z -Rahmen – in vier Bursts übertragen wird, sind die VRRP-PDUs auf Burst-Ebene definiert. Bei gestörtem Empfang wird nur der fehlerhafte Burst wieder angefordert. Das eigentliche Prinzip des Vielfachzugriffs weicht bis auf obige Änderungen nicht weiter vom MSDRA-Protokoll ab.

9.5.1.1 Logische Kanalstruktur

Im VRRP-Protokoll beeinflusst die Zykluslänge von vier PTCHs (bzw. PRACHs) und einem PCCH neben dem Durchsatz auch die mittlere Zugriffswartezeit der Mobilstationen. Diese hängt mit der zeitlichen Anordnung der einzelnen PCCHs auf den PDCHs zusammen, welche auf unterschiedliche Weise realisiert werden kann. In Abbildung 9.14 ist der rechtwinkligen eine blockdiagonale Anordnung gegenübergestellt. Bei der blockdiagonalen Anordnung wird für eine Verteilung der Auslastung der Mobil- und Basisstation gesorgt, da nicht unmittelbar hintereinander acht PCCHs abgehört und ausgewertet werden müssen.

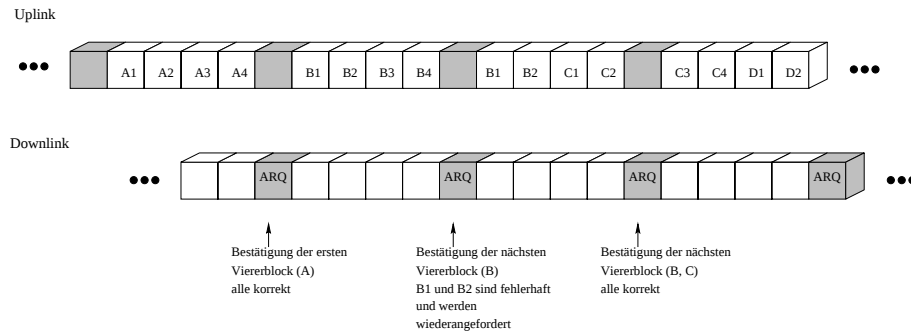
Die für den Erstzugriff der Mobilstation wichtige Information der momentanen Kanalbelegung wird gezielt auf den gesamten Zyklus verteilt. Da die Kanalzustände aller PTCHs in jedem PCCH angezeigt werden, wird bei der rechteckigen Anordnung diese Information achtmal direkt hintereinander übertragen. Eine sendewillige Mobilstation muß, um über die momentane Kanalbelegung informiert zu sein, nur den letzten der acht PCCHs deuten. Die sieben vorherigen sind redundant.

Eine blockdiagonale Verteilung der Steuerkanäle erfordert jedoch einen zusätzlichen Rechenaufwand und bedingt eine leicht erhöhte Verzögerung im Multislot-Betrieb. Da die Daten in Viererblöcken zusammengefaßt sind, müssen auf einigen PDCHs erst die PCCHs abgewartet werden, bevor auf diesen Kanälen gesendet werden kann. Beim Empfang andererseits endet die Übertragung nicht gleichzeitig, sondern auf jedem zugewiesenen Kanal zeitlich versetzt, wobei durch die Freigabe einzelner Kanäle keine Verschwendung der Kanalkapazität entsteht.

9.5.2 Fehlerbehandlung und Fehlersicherung

Das VRRP-Protokoll verwendet zur Fehlerbehandlung ein hybrides selektives ARQ-Verfahren, bei dem in jedem PCCH, also in jedem fünften Zeitschlitz eines logischen Kanals, die auf den letzten vier PTCHs gesendeten Daten bestätigt oder als fehlerhaft gekennzeichnet werden, vgl. Abbildung 9.15.

Alle nicht korrekt empfangenen Daten werden in der Reihenfolge bestätigt, in der sie gesendet wurden. Die Mobilstation wiederholt dementsprechend im folgenden PTCH zuerst die fehlerhaften Daten-Bursts, so daß eine Laufnummer, die die gesendeten Bursts identifiziert, nicht benötigt wird.

Abbildung 9.15: *Der ARQ-Mechanismus im VRRP-Protokoll*

In Abbildung 9.15 ist der Bestätigungsmechanismus grafisch dargestellt. Im zweiten Datenblock sind zwei Bursts gestört und durch den Faltungscodierer nicht korrigierbar. Diese werden im Signalisierungskanal auf dem Downlink angezeigt und daraufhin von der Mobilstation wiederholt, bevor der Anfang des nächsten Viererdatenblocks übertragen wird. Werden Signalisierungsdaten gestört, weiß die Sendeinstanz nicht, welche Daten im zuletzt gesendeten Viererblock korrekt empfangen wurden und welche erneut gesendet werden müssen. In den nächsten vier PTCHs werden daher GSM-Dummy-Bursts gesendet, um anzuzeigen, daß die Signalisierungsdaten wiederholt werden müssen. Da diese somit unmittelbar nach dem Empfang ausgewertet werden müssen, kann kein Interleaving angewendet werden, wohingegen die Daten-Bursts in beiden Übertragungsrichtungen mit der Interleavingtiefe 4 verwürfelt werden können. Höhere Interleavingtiefen sind aufgrund der Zykluslänge nicht möglich.

<i>Name</i>	<i>Codier- rate</i>	<i>Nutz- bits</i>	<i>FCS</i>	<i>Tail Bits</i>	<i>Codierte Bits</i>	<i>Punktierte Bits</i>	<i>Daten- rate</i>
CS 1	1/2	45	8	4	114	0	8.26
CS 2	2/3	60	12	4	152	38	10.40
CS 3	3/4	70	12	4	172	58	11.96
CS 4	4/5	75	12	4	182	68	13.00
CS 5	5/6	79	12	4	190	76	14.69
CS 6	1	98	16	0	114	0	16.98

Tabelle 9.3: *Übersicht über die möglichen Codierschemata im VRRP-Protokoll*

In den Abbildungen 9.16 und 9.17 sind die Codiervorgänge für die Nutzdaten bzw. die Signalisierung des Downlinks dargestellt. Während zur Codierung der Signalisierungsdaten ein Faltungscodierer mit Rate 1/2 eingesetzt wird, kann für die Nutzdaten durch Punktierung eine variable Codiertrate realisiert werden, vgl. Tabelle 9.3. Die zu übertragenden Daten werden segmentiert, in vier VRRP-PDUs aufgeteilt, faltungscodiert, eventuell punktiert und auf vier Bursts verwürfelt übertragen.

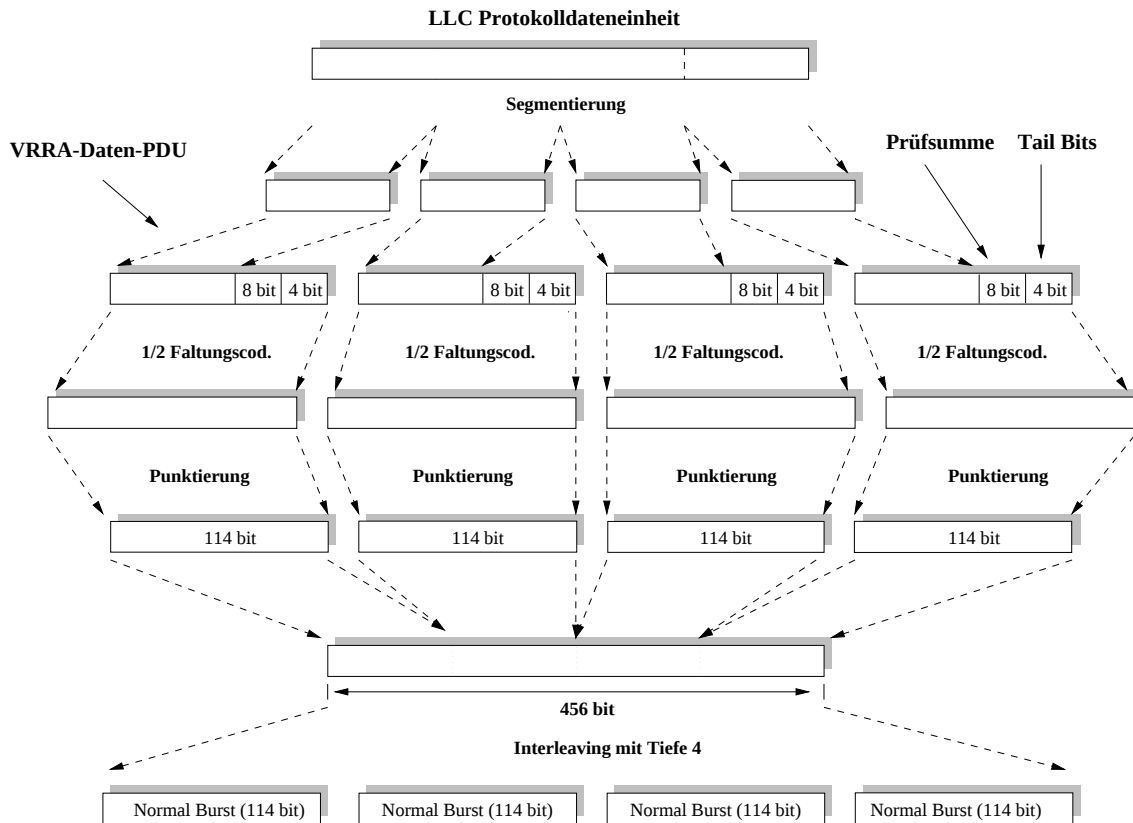


Abbildung 9.16: Sicherung der Nutzdaten im VRRM-Protokoll

9.5.3 Rahmenformate

Im VRRM-Protokoll lassen sich die gleichen Rahmentypen wie im MSDRA-Protokoll unterscheiden:

- *Informations-Rahmen* (I-Rahmen)
- *Steuer-Rahmen* (S-Rahmen)
- *Steuer-Rahmen für den Zufallszugriff* (S_z -Rahmen)

Die I- bzw. S-Rahmen werden in GSM-Normal-Bursts übertragen, für die S_z -Rahmen werden GSM-Access-Bursts verwendet. Im Downlink kommen zwei Typen von Steuer-Rahmen zum Einsatz. Ein Bit kennzeichnet, ob es sich um ein *Packet Paging* (PP) oder ein *Packet Access Grant* (PAG) handelt. Abbildung 9.18 veranschaulicht die Struktur der beiden S-Rahmen.

In beiden Rahmentypen kennzeichnet eine aus 8 bit bestehende Bitmap den aktuellen Zustand aller logischen Kanäle auf dem Uplink. Auf einen als besetzt gekennzeichneten Kanal darf nur von einer Mobilstation zugegriffen werden, der dieser durch ein PP oder durch einen PAG zugewiesen wurde. Eine 4 bit lange Bitmap kennzeichnet die korrekt bzw. fehlerhaft empfangenen Bursts. Die Codierate wird mit 3 bit verschlüsselt.

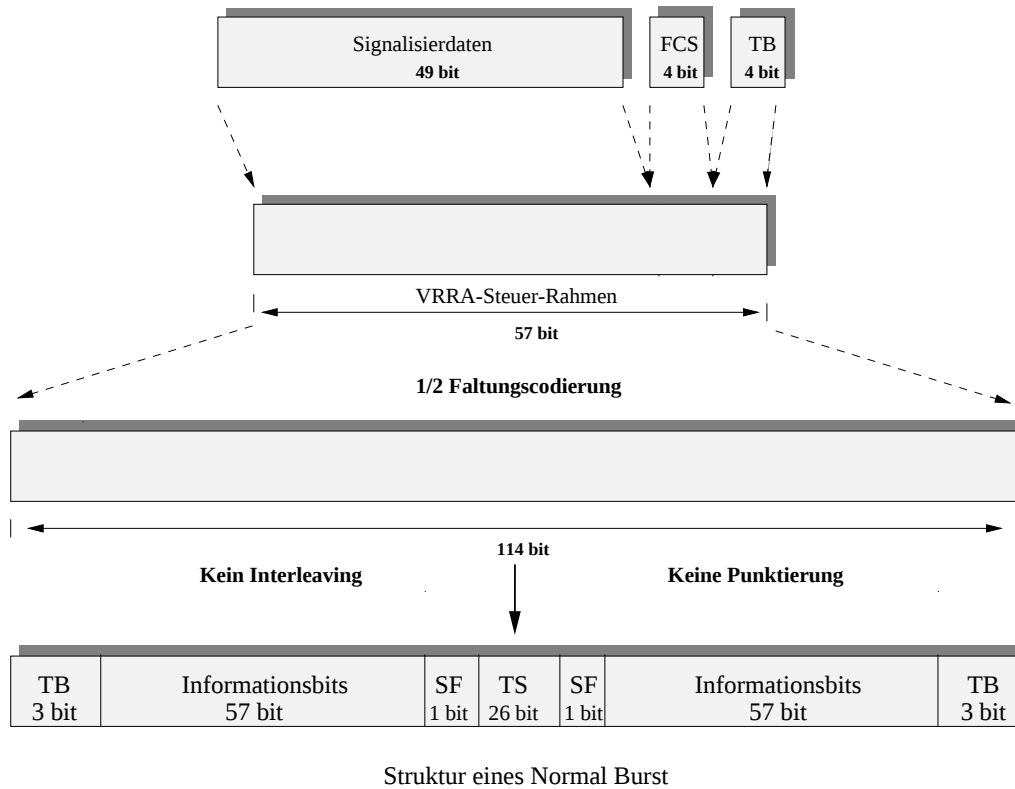


Abbildung 9.17: Sicherung der Signalisierungsdaten im VRRM-Protokoll

Packet Paging

Typ	FCB	Temporay Logical Link Identity (TLLI)	ACB	ARQ	R
1 bit	8 bit	25 bit	8 bit	4 bit	3 bit

Packet Access Grant

Typ	FCB	RA-ID	PRA	Pri.	TS	PL	TA	ACB	ARQ	R
1 bit	8 bit	5 bit	3 bit	2 bit	3 bit	6 bit	6 bit	8 bit	4 bit	3 bit

FCB : Bitmap freier Uplink-Kanäle ACB : Bitmap zugewiesener Downlink-Kanäle
 ARQ: Angabe der fehlerhaften Bursts RA-ID: Verkürzte Identität der Mobilstation
 R : Coderate PL: Power Level TA: Timing Advance

Abbildung 9.18: Die im Downlink eingesetzten Steuer-Bursts

9.5.3.1 Packet-Paging-Rahmen

Im „Packet-Paging“-Rahmen (PP) wird eine in der Zelle befindliche Mobilstation durch die TLLI eindeutig adressiert und ihr mitgeteilt, auf welchen logischen Kanälen sie zu Beginn des nächsten TDMA-Rahmens Nachrichten empfangen muß. Die reservierten Kanäle werden in einer 8 bit langen Bitmap, der „Allocated Channel

Bitmap“ (ACB), angezeigt. Die Interleavingtiefe von vier Bursts zwingt die sendenden Instanzen alle Bursts des Datenviererblick zu nutzen. Somit muß eine „gepagte“ Mobilstation unmittelbar nach Empfang der Steuernachricht die an sie adressierten Daten bereits zu Beginn des nächsten Fünferzyklus auf den zugewiesenen logischen Kanälen empfangen. Durch die Anordnung der Steuerkanäle und die Nutzung mehrerer Kanäle kann die Zeitspanne zwischen Benachrichtigung und Empfang des ersten I-Rahmens stark variieren.

9.5.3.2 Packet-Access-Grant- und Packet-Random-Access-Rahmen

Der „Packet-Access-Grant“-Rahmen (PAG) dient als Bestätigung eines Reservierungswunsches. Der Mobilstation wird neben der Timing Advance (TA) auch der Power Level (PL) mitgeteilt. Die restliche Bitfolge dient zur Identifizierung des vorangegangenen „Packet-Random-Access“-Rahmens (PRA). Dieser wird, wie in Abbildung 9.19 gezeigt, von den mobilen Instanzen als Äußerung eines Sendewunsches an die Basisstation genutzt. Die beiden Steuer-Rahmen werden, wenn genauso viele Mobilstationen gepagt wie Sendewünsche bestätigt werden müssen, in einer abwechselnden Reihenfolge gesendet. Muß weder eine Übertragung signalisiert noch ein Sendewunsch bestätigt werden, wird der Signalisierungs-Zeitschlitz durch ein PP belegt. Dabei wird eine noch nicht belegte TLLI benutzt, so daß sich keine der Mobilstationen angesprochen fühlt. Die Information der momentanen Kanalvergabe wird jedoch von allen Mobilstationen ausgewertet.

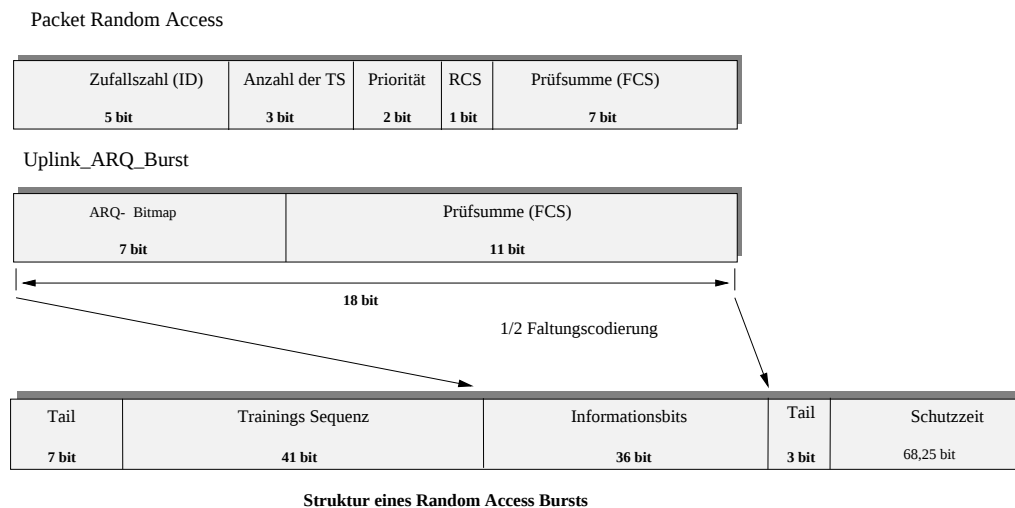


Abbildung 9.19: Die im Uplink verwendeten Steuer-Bursts

Die noch unsynchronisierten Mobilstationen äußern ihren Sendewunsch mit einem PRA, wobei der Access-Burst des GSM verwendet wird. Neben einer 5 bit langen Kennung der mobilen Instanz wird die Priorität und die Anzahl der zur Übertragung notwendigen logischen Kanäle übermittelt. Ein RCS-Bit (*requirement for consecutive*

slots) zeigt an, ob die zuzuweisenden Kanäle eine zusammenhängende Folge bilden.¹⁰ Um die Identifizierungswahrscheinlichkeit der Mobilstationen zu erhöhen, obwohl nur fünf Bit in einem PRA-Rahmen zur Verfügung stehen, wird die Bitfolge durch eine logische „Oder“-Verknüpfung mit der Kennung der Basisstation und der TLLI der Mobilstation erzeugt. Durch den GPRS-Context sind der Basisstation alle Mobilstationen dieser Zelle durch die TLLI bekannt. Die eindeutigen Kennungen können somit durch die berechneten 5 *bit* langen Identifier auf Seiten der Basisstation rekonstruiert und die Mobilstation mit hoher Wahrscheinlichkeit identifiziert werden. Im PAG werden bis auf das RCS-Bit alle im PRA übertragenen Parameter wiederholt. Zusätzlich wird der logische Kanal, in dem der Reservierungswunsch gesendet wurde, durch 3 *bit* bestätigt.

9.5.3.3 Bestätigungs-Rahmen

Bei Downlink-Übertragungen bestätigen die Mobilstationen die Korrektheit der empfangenen Daten im zugeordneten Signalisierungskanal mit einem Bestätigungs-Rahmen (ARQ). Eine Identifizierung wird insofern überflüssig.

9.5.3.4 Informations-Rahmen

In Abhängigkeit der Codiertrate werden in einem *Informations*-Rahmen die Nutzdaten übertragen. Ein Steuerfeld ist aufgrund der festen Abfolge von PTCH und PCCH nicht notwendig. Das Ende einer Übertragung wird durch Setzen der Stealing-Bits des Normal-Bursts angezeigt. Diese sogenannten „Endflags“ werden ungeschützt übertragen, vgl. Abbildung 9.16. Im letzten Viererblock eines Pakettransfers werden alle Endflags gesetzt, um eine eindeutige Decodierung zu gewährleisten. Da jeder logische Kanal unabhängig von den weiteren zugewiesenen Kanälen das Ende der Übertragung anzeigt, kann die Basisstation die Kanäle einzeln freigeben.

9.5.4 Uplink-Transfer

Bei Empfang einer Übertragungsanforderung werden in der „Interface Control Information“ (ICI) neben der Priorität und der Datenmenge auch die Anzahl der anzufordernden logischen Kanäle für diese Übertragung angezeigt.

Sobald ein logischer Kanal in einem Signalisierungskanal als frei gekennzeichnet ist, sendet die MS einen PRA. Das RCS-Bit wird gesetzt, falls die Hardware der Mobilstation über mehrere Zeitschlitze hinweg empfangen kann. Die Mobilstation wartet nun auf einen PAG-Rahmen der Basisstation. Bleibt der PAG-Rahmen aus, wird nach einer bestimmten Zeitspanne, die durch einen exponentiellen Backoff-Algorithmus bestimmt wird, ein erneuter Zufallszugriff versucht.

Empfängt eine Mobilstation den an sie gerichteten PAG-Rahmen, beginnt sie auf den zugewiesenen Verkehrskanälen zu senden. Nach jedem Viererblock muß die Mo-

¹⁰ Bei entsprechender Anpassung der Hardwarekomponenten kann durch einen Wegfall von Trainingssequenz und Schutzzeit die Datenrate erhöht werden.

bilstation den auf dem entsprechenden Signalisierungskanal empfangenen Steuer-Rahmen bezüglich der ARQ-Bitmap auswerten. Bei Überschreitung der maximalen Reservierungsdauer durch wiederholte Anforderung fehlerhafter Rahmen, wird die Übertragung seitens der Mobilstation spontan abgebrochen und die zugewiesenen Kanäle werden von der Basisstation im nächsten Signalisierungskanal als frei gekennzeichnet.

9.5.5 Downlink-Transfer

Liegen in der Basisstation Daten für eine Mobilstation zur Übertragung an, wird durch ein PP-Rahmen mitgeteilt, auf welchen Kanälen diese ab dem nächsten TDMA-Rahmen zu empfangen sind. Das SREJ-ARQ-Verfahren erfordert, daß die Mobilstation die zuletzt empfangenen Bursts bestätigt. Durch ihren unsynchronisierten Zustand werden in den entsprechenden Uplink-Kanälen GSM-Access-Bursts zur Übertragung benutzt. Das Ende der Nachricht wird wie bei der durch die Mobilstation initiierten Übertragung durch Auswertung der Endflags auf jedem logischen Kanal signalisiert.

9.6 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungen vorgestellt, die zur Leistungsbewertung der vorgestellten Medienzugriffsprotokolle MSDRA und VRRRA durchgeführt wurden. Dazu wurden beide Protokolle unter Verwendung der CNCL-Klassenbibliothek in C++ spezifiziert und an die in Abschnitt 6.5 eingeführte Simulationsumgebung *GPRSim* angebunden, vgl. [54].

9.6.1 Leistungskenngrößen

Bei den Simulationsuntersuchungen wurden folgende Meßgrößen berücksichtigt:

- Rahmentransferdauer (*frame transfer delay*, FTD): Die Rahmentransferdauer beschreibt die Zeitspanne, die vom Versenden eines LLC-Rahmens bis zum Empfang durch die Partnerinstanz vergeht. Sie setzt sich aus der Rahmenzugriffszeit (*frame access delay*, FAD) und der Rahmenübertragungsdauer (*frame transmission delay*, FT_xD) zusammen
- Nutzlast (*input load*, N) und Angebot (*offered load*, G): Die Nutzlast ist ein Maß für die pro Sekunde erzeugte Nutzdatenmenge. In das Angebot fließt zusätzlich die durch Kontrollinformation und Wiederholung gestörter Pakete bedingte Redundanz mit ein.
- Durchsatz (*throughput*, S): Der Durchsatz ist die Anzahl der pro Sekunde fehlerfrei empfangenen Nutzdaten und gibt die Nettodatenrate an.
- Kollisionswahrscheinlichkeit (*collision probability*, P_c): Die Kollisionswahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der bei einem Zufallszu-

griff eine Kollision auftritt. Der Capture-Effekt, vgl. hierzu Tabelle 9.4, bleibt hierbei unberücksichtigt.

- Paketverlustwahrscheinlichkeit (*dropping probability*, P_d): Die Paketverlustwahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine Nachricht in der Quelle verworfen wird, weil sie während einer vorgegebenen, dienstgüte-abhängigen Zeitspanne, vgl. Kapitel 4 bzw. aufgrund von zu vielen vergeblichen Zufallszugriffen nicht übertragen wurde.

9.6.2 Simulationsparameter und Simulationsszenarien

Zur Leistungsbewertung der implementierten Zugriffsprotokolle wurde das Protokollverhalten in verschiedenen Simulationsszenarien über eine Zeitspanne von etwa 2 bis 8 Minuten Echtzeit¹¹ simuliert.

Als wesentlicher Simulationsparameter wurde das Verkehrsaufkommen anhand der Zwischenankunftszeiten und Anzahl der Mobilstationen variiert, um Aussagen über die Leistungskenngrößen der Protokolle in verschiedenen Verkehrslastsituationen machen zu können. Die Simulationen wurden mit den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Kanalbelegungsmodellen unter Berücksichtigung gemischter Lastszenarien durchgeführt, in welchen die dort aufgeführten Anwendungen gleich verteilt an der Erzeugung des Verkehrsaufkommens beteiligt sind. Die Zwischenankunftszeiten wurden negativ exponentiell verteilt angenommen, sofern unkorrelierte Szenarien simuliert wurden. Als Kommunikationsmodus wurde angenommen, daß alle Mobilstationen gleichzeitig senden und empfangen können. Neben diesen als realitätsnah einzustufenden gemischten Lastszenarien im Duplexmodus wurden auch Simulationen im Halbduplexmodus mit nur jeweils einer aktiven Anwendung durchgeführt, um den Einfluß unterschiedlicher Paketlängen auf die zu untersuchenden Meßgrößen abschätzen zu können.

Während für das VRRP-Protokoll aufgrund des Implementierungsstatus nur der „Single-Slot“-Modus ohne Unterscheidung von Prioritätsklassen untersucht werden konnte, wurde beim MSDRA-Protokoll die Anzahl der einer Mobilstation zugewiesenen Kanäle variiert. Weiterhin wurden zur Untersuchung der im MSDRA-Protokoll implementierten Abfertigungsstrategie unterschiedliche Prioritätsverteilungen bewertet. Im Verlaufe der Untersuchungen zeigte sich, daß die in Abschnitt 9.2.3.1 eingeführte „Relative Urgency“-Strategie mit Unterbrechungen gegenüber einer statischen, unterbrechenden Abfertigungsstrategie vorzuziehen ist.

Im Gegensatz zur relativ starr festgelegten Abfolge der logischen Kanäle beim VRRP-Protokoll stellte sich beim MSDRA-Protokoll zudem die Frage, inwieweit die Anordnung der Steuerkanäle einen signifikanten Einfluß auf die Leistungskenngrößen hat. Dabei wurde nicht nur die Abfolge der Steuerkanäle, sondern auch die Anzahl der Masterkanäle variiert. Es zeigte sich, daß eine starre Abfolge (*paging*, *reservation*, *acknowledgement*) mit zwei Masterkanälen gegenüber einer Strategie

¹¹Nach 2 Minuten sind die Einschwingvorgänge abgeklungen und das System befindet sich in einem stationären Zustand.

mit statischen Prioritäten eine Durchsatzsteigerung um bis zu 15% bewirkt. Simulationen mit dynamischen Prioritäten zeigten ein instabiles Verhalten in Abhängigkeit der gewählten Prioritäts- und Protokollparameter und der eingestellten Verkehrslast. Zu einer abschließenden Bewertung sind weitere Untersuchungen notwendig. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf eine starre Abfolge der Steuerkanäle mit zwei Masterkanälen auf dem Downlink und der RU-Strategie zur Abfertigung wartender Uplink-Aufträge.

Vergleichend wurden insbesondere die Wiederanforderungsmechanismen beider Protokolle bei gestörtem Kanal analysiert, wobei beim VRRM-Protokoll zusätzlich die Wirkung des implementierten Algorithmus zur adaptiven Codierratensteuerung untersucht wurde. Entsprechend den Parametern der vorhandenen Störmuster wurde bei diesen Untersuchungen für die Dauer der Simulation ein fester Gleichkanalstörabstand von 4 dB , 7 dB oder 10 dB eingestellt. Als Referenz wurde zudem eine störungsfreie Übertragung simuliert.

Bei den sonstigen Simulationen wurde gemäß den in Abschnitt 7.1.2.6 dargestellten Untersuchungen zur C/I-Verteilung in einer Zelle 5% der Mobilstationen eine Signalqualität von $\leq 10\text{ dB}$ zugeordnet. 95% der Mobilstationen übertragen fehlerfrei.

Zusammenfassend wurden die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse mit folgenden Annahmen und Einstellungen gewonnen:

- Für den GPRS stehen bis zu acht Paketdatenkanäle zur Verfügung, von denen jeder Mobilstation gleichzeitig maximal zwei zugewiesen werden. Die Kommunikation erfolgt im vollduplex Modus, d. h. jede Mobilstation kann parallel senden und empfangen.
- Ein „Capture“-Modell beschreibt das Empfangsverhalten, wenn mehrere RA-Bursts gleichzeitig im selben Slot von der Basisstation empfangen werden. Dabei wird angenommen, daß alle Mobilstationen mit gleicher Leistung senden, wobei mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine dieser Mobilstationen näher zur Basisstation ist als alle anderen, so daß ihr Signal trotz Störung erfolgreich empfangen wird.

<i>MS-Anzahl</i>	<i>Empfangswahrscheinlichkeit</i>
1	1.0
2	0.67
3	0.48
4	0.40
5	0.35
> 5	0

Tabelle 9.4: *Capture-Modell*

In Tabelle 9.4 ist angegeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit einer von n gleichzeitig (in einer Burst-Periode) gesendeten Access-Bursts fehlerfrei in der Basisstation ankommt. Die gewählten Empfangswahrscheinlichkeiten beruhen

auf Angaben, die vom ETSI GRPS ad-hoc Standardisierungsgremium zur Verfügung gestellt wurden. Eine Verifikation der Werte ist in dieser Arbeit nicht durchgeführt worden.

- Alle Mobilstationen sind im Zustand „Active“, vgl. Abschnitt 4.3.2. Dadurch werden Verzögerungen vermieden, die durch den Funkruf im Zustand „Standby“ hervorgerufen werden.
- Die maximale Anzahl von Zugriffsversuchen beträgt 7, d. h. bei mehr als 7 vergeblichen Zugriffsversuchen wird der generierte Auftrag verworfen.
- Die Anzahl der Zugriffszeitschlitze ist fest vorgegeben und beträgt 56.
- Die maximale Länge einer LLC-PDU beträgt 2 kbyte . Größere Datenpakete werden segmentiert und so auf die LLC-PDUs aufgeteilt, daß deren maximale Länge nicht überschritten wird.
- Verarbeitungszeiten in BTS, BSS und SGSN werden vernachlässigt.
- Für jeden Zeitschlitz auf der Funkschnittstelle wird für die physikalischen Verbindungen zwischen BTS und BSC sowie BSC und SGSN eine Datenrate von 16 kbyte angenommen.
- Die Simulationszeit beträgt in Abhängigkeit der untersuchten Kriterien zwischen 2 min und 8 min Echtzeit.
- Die Anzahl der Mobilstationen beträgt 300 (bzw. 1 zur Untersuchung des Einflusses der Signalqualität auf den implementierten Wiederanforderungsmechanismus).
- 5% der Mobilstationen übertragen bei einem C/I-Verhältnis von 10 dB oder weniger. Für 95% der Mobilstationen wird eine fehlerfreie Übertragung angenommen.

Bei den nachfolgenden Diagrammen ist auf der Abszisse das Angebot in byte/s angegeben, auf der Ordinate die untersuchte Meßgröße. Die in den Diagrammen eingetragenen Kurven lassen sich in drei Lastbereiche einteilen:

- Niederlastbereich
- Betriebslastbereich
- Überlastbereich

Der Niederlastbereich spielt bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Protokolle in qualitativer wie in quantitativer Hinsicht eine untergeordnete Rolle und wird daher nicht weiter betrachtet. Der Betriebslastbereich ist häufig gekennzeichnet durch einen relativ linearen Anstieg. Im Überlastbereich geht das Protokoll in die Sättigung, wobei die Meßgröße nur noch relativ geringen Schwankungen auf hohem Niveau ausgesetzt ist. In der Umgebung des Grenzbereiches von Betriebslast und Überlast befindet sich der Arbeitspunkt des Protokolls.

9.6.3 Simulationsergebnisse für das MSDRA-Protokoll

9.6.3.1 Durchsatz

In den Abbildungen 9.20 und 9.21 ist der Gesamtdurchsatz auf den 8 Paketdatenkanälen über dem Angebot für die verschiedenen Lastmodelle getrennt für Up- und Downlink dargestellt.

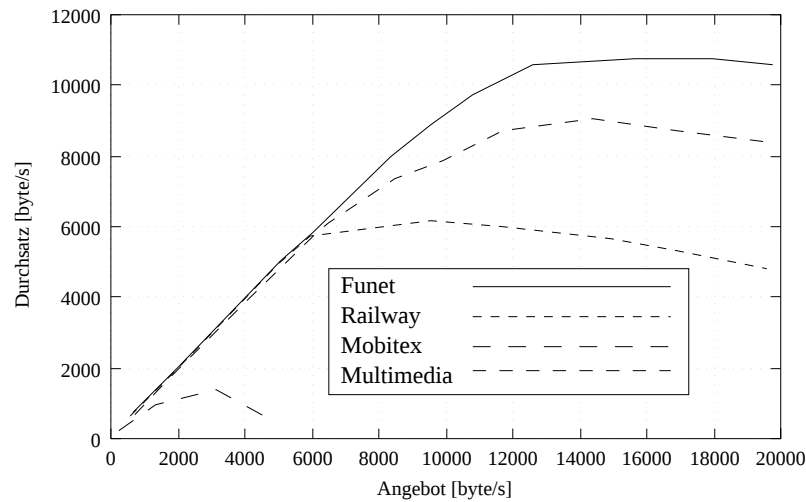


Abbildung 9.20: *Durchsatz auf dem Uplink*

Beim Uplink-Transfer steigt der Durchsatz in allen Lastszenarien bis etwa 6 kbyte/s linear mit der Last. Mit steigender Länge der generierten Datenpakete vergrößert sich dieser lineare Bereich, da sich das Verhältnis von Nutzdaten zu Signalisierungsdaten vergrößert. Damit kann eine größere Nutzdatenmenge pro Zeiteinheit übertragen werden.

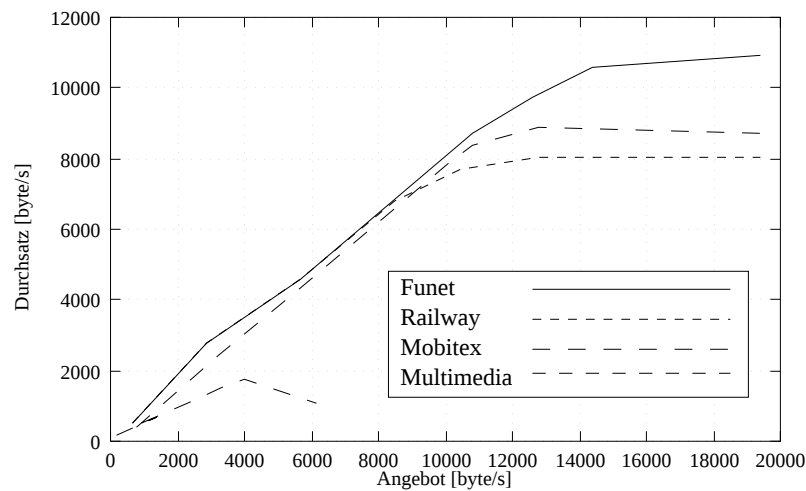
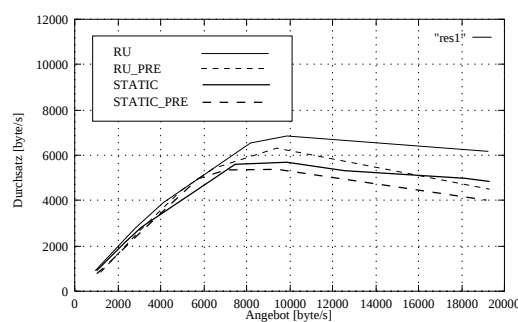


Abbildung 9.21: *Durchsatz auf dem Downlink*

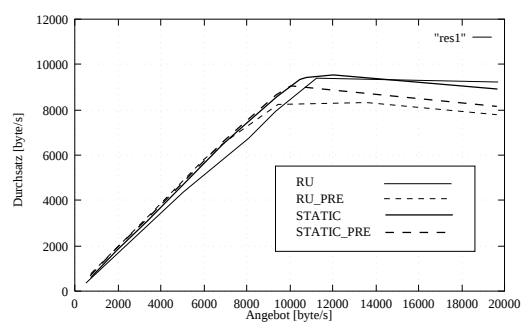
Beim gemischten Lastprofil werden mit ca. 9 kbyte/s knapp 70% des maximal theoretischen Durchsatzes, der bei der verwendeten Codierung und gewählten Kanalkonfiguration bei ca. 13 kbyte/s liegt, erreicht. Das Verhältnis von maximalem Durchsatz zum maximal theoretischen Durchsatz beträgt:

- beim Funet-Modell ca. 84%
- beim Railway-Modell ca. 67%
- beim Mobitex-Modell ca. 14%

Dies zeigt, daß die Paketlänge einen deutlichen Einfluß auf die Leistungskenngröße *Durchsatz* hat. Je kürzer die erzeugte Paketlänge, desto geringer ist der Durchsatz. Zur Erzeugung einer hohen Verkehrslast sind sehr viel mehr Mobilstationen notwendig, als bei entsprechend langen Paketen. Der Signalisierungsaufwand steigt enorm an, was sich negativ auf den Durchsatz auswirkt. Dies trifft insbesondere auf das Mobitex-Modell zu, bei welchem zur Übertragung der generierten Aufträge nur eine bzw. allenfalls zwei MSDRA-PDUs benötigt werden. Beim Railway-Modell sind die generierten Aufträge mit durchschnittlich 170 byte etwa 5-6 mal so lang. Im gleichen Verhältnis steigt der Durchsatz. Beim Funet-Modell werden mit durchschnittlich 1000 byte noch einmal deutlich längere Pakete erzeugt. Der Durchsatz steigt auf ca. 84% an, d.h. Mehrfachübertragungen, abgebrochene Aufträge und die notwendige Signalisierung bedingen einen Overhead von 15%. Unter Berücksichtigung der eingestellten Signalqualität und Einhaltung der Dienstgüte-Parameter ist selbst bei steigender Paketlänge nicht mit einem signifikant höheren Durchsatz zu rechnen. Auf dem Downlink erreicht der Durchsatz in allen Bereichen aufgrund der fehlenden Kollisionen einen geringfügig höheren Wert. Im Gegensatz zum Uplink bleibt der Durchsatz bei hoher Last konstant, da wegen der geringeren Wartezeit weniger Aufträge während der Übertragung abgebrochen werden. Obige Argumentation kann in entsprechend abgeleiteter Form auf alle Leistungskenngrößen übertragen werden.



(a) Durchsatz mit 1 MPDCH



(b) Durchsatz mit 2 MPDCH

Abbildung 9.22: *Durchsatz in Abhängigkeit der Abfertigungsstrategie*

In Abbildung 9.22 ist beispielhaft der Uplink-Durchsatz bei Verwendung unterschiedlicher Abfertigungsstrategien bei gemischter Last über dem Angebot dargestellt. In Abbildung 9.22a steht ein MPDCH zur Übertragung der Signalisierungsinformation zur Verfügung; in Abbildung 9.22b ist der Durchsatz bei Verwendung

von zwei MPDCH gezeigt, vgl. dazu Abschnitt 9.4.1. Der Kurvenverlauf zeigt, daß bei hoher Last die Kapazität eines Masterkanals nicht mehr ausreicht und mit der Zuweisung eines zweiten Masterkanals ein höherer Durchsatz erzielt werden kann. Der Einsatz der unterschiedlichen Abfertigungsstrategien STATIC, mit statischen Prioritäten bzw. RU, mit termin-orientierter Abfertigung wirkt sich im Betriebslastbereich kaum aus. Bei Verwendung eines MPDCH kann mit der RU-Strategie der größte Durchsatz erzielt werden. Die Einführung einer unterbrechenden Abfertigung (STATIC_PRE u. RU_PRE) führt bei beiden Abfertigungsstrategien zu einem geringeren Durchsatz, unabhängig von der Anzahl der MPDCH.

9.6.3.2 Frame Transfer Delay

Da die Rahmentransferdauer stark von der Länge eines Auftrags abhängt, wurde dieser Parameter auf die mittlere Transferdauer einer MSDRA-PDU normiert. Aus den in Tabelle 4.2 vorgegebenen Zeiten sich die folgenden maximal erlaubten Übertragungszeiten pro Block berechnen:

- Priorität 1: 140 ms
- Priorität 2: 1,4 s
- Priorität 2: 14 s

Die Abbildungen 9.23 bzw. 9.24 zeigen die Rahmentransferdauer in Abhängigkeit des erzeugten Lastprofils.

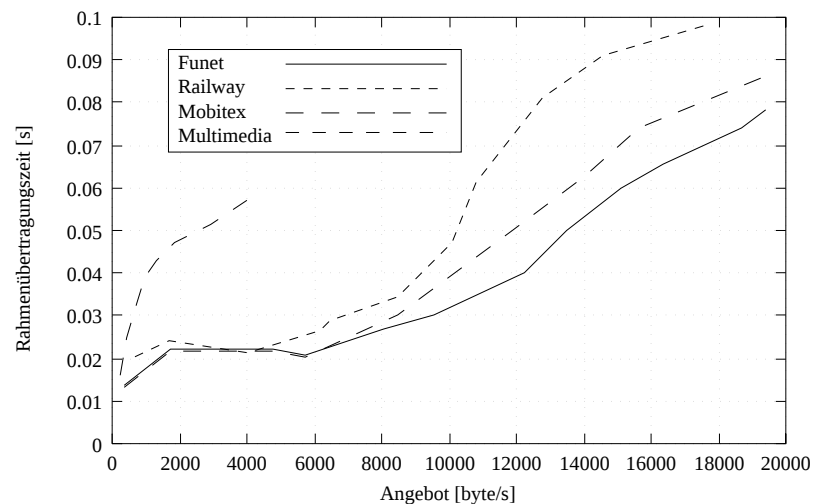
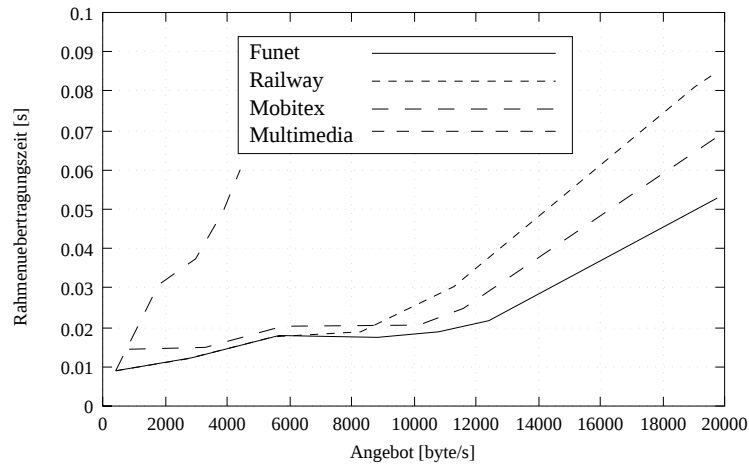


Abbildung 9.23: *Rahmentransferdauer auf dem Uplink*

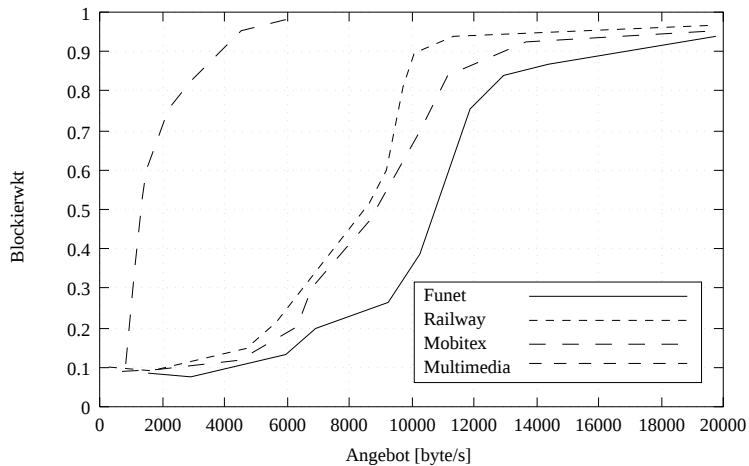
Im Niederlastbereich entspricht das „Frame Transfer Delay“ auf dem Downlink mit ca. 18 ms der minimalen Übertragungsdauer auf einem PTCH. Erst, wenn der Kanal ausgelastet ist, erhöht sich die Rahmentransferdauer durch die zusätzliche Wartezeit auf einen freien Kanal. Mit dem Funet-Modell werden aufgrund der langen erzeugten Datenpakete die geringsten Rahmentransferdauern erreicht, wohingegen die extrem kurzen Pakete des Mobitex-Modells frühzeitig zu einem Anstieg der durchschnittlichen Rahmentransferdauer führen.

Abbildung 9.24: *Frame Transfer Delay auf dem Downlink*

Auf dem Uplink wirken sich die Zufallszugriffe und auftretenden Kollisionen auf die Rahmentransferdauer aus. Bei niedriger Last beträgt die Rahmentransferdauer bereits ca. 22 ms und steigt bei Erhöhung des Angebots bis auf fast 100 ms an. Im Arbeitsbereich des Protokolls liegen die Übertragungszeiten bei 30 ms . Die durch die Dienstgüte-Parameter vorgegebenen Verzögerungsanforderungen werden somit erfüllt.

9.6.3.3 Kollisionswahrscheinlichkeit

In Abbildung 9.25 ist die Kollisionswahrscheinlichkeit für eine feste Anzahl von 7 PRACH dargestellt. Dies entspricht 56 verfügbaren Zugriffszeitschlitzen.

Abbildung 9.25: *Kollisionswahrscheinlichkeit auf dem Uplink*

Im Niederlastbereich steigen die Kurven etwa linear mit zunehmender Last und liegen unter 10%. Im Betriebslastbereich erhöht sich die Kollisionswahrscheinlichkeit sprunghaft ab einer bestimmten Last, da die Anzahl der Zugriffskanäle nicht mehr ausreicht und vermehrt Kollisionen auftreten. Die Kurven aller Verkehrsmodelle steigen im Überlastbereich auf eine Kollisionswahrscheinlichkeit von etwa 85-90 %

an und gehen dann in eine Sättigung über. Der Einsatz des dezentral gesteuerten exponentiellen Backoff-Algorithmus, vgl. Abschnitt 9.2.4, zeigt keine signifikanten Auswirkungen auf die Kollisionswahrscheinlichkeit.

9.6.3.4 Paketverlustwahrscheinlichkeit

In den Abbildungen 9.26a und 9.26b ist die Paketverlustwahrscheinlichkeit (P_d) für die einzelnen Lastmodelle über dem Angebot dargestellt. Als Verwurfskriterium gelten die in Abschnitt 4.1.3 angegebenen Dienstgüteparameter und die maximal erlaubte Anzahl erfolgloser Zufallszugriffe.

Die Verlustwahrscheinlichkeit auf dem Uplink bewegt sich bis zu einem Angebot von 6 kbyte/s in einem Bereich zwischen 1% und 5%. Mit steigender Auslastung des Kanals und erhöhter Kollisionswahrscheinlichkeit werden die Aufträge immer häufiger verworfen. Beim gemischten Lastprofil steigt die Verlustwahrscheinlichkeit im Überlastbereich stetig an und erreicht schnell einen Wert von über 20%.

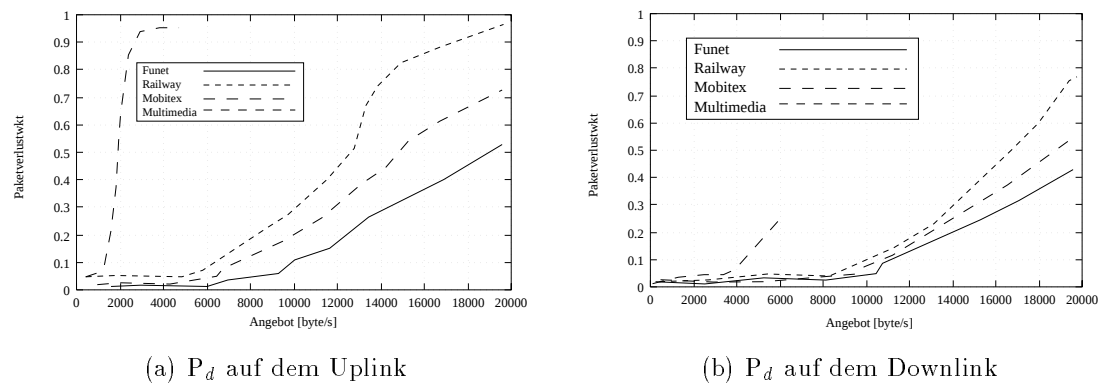


Abbildung 9.26: *Paketverlustwahrscheinlichkeit*

Die Verlustwahrscheinlichkeit auf dem Downlink liegt bis zu einem Angebot von 10 kbyte/s deutlich unter 5%. Mit steigender Auslastung des Kanals und erhöhter Kollisionswahrscheinlichkeit werden die Aufträge immer häufiger verworfen. Beim gemischten Lastprofil steigt die Verlustwahrscheinlichkeit bei Überlast auf ca. 40%.

9.6.3.5 Durchsatz bei konstantem Gleichkanalstörabstand

In Abbildung 9.27 ist der Durchsatz für eine Mobilstation auf einem Paketdatenkanal in Abhängigkeit des C/I-Verhältnisses für die Lastmodelle dargestellt. Die Werte geben nicht den maximal erzielbaren Durchsatz an, der bei voller Auslastung des Kanals durch die Mobilstation zu erzielen wäre, sondern repräsentieren einen qualitativen Verlauf, der bei Teillast erzielt wurde.

Es zeigt sich, daß eine sinkende Signalqualität bei langen Paketen einen größeren Einfluß hat, als bei kurzen Paketen. Der Durchsatz für das Funet-Modell sinkt bei einem C/I-Verhältnis von 10 dB von knapp 250 byte/s bei ungestörter Übertragung

auf ca. 160 *byte/s* ab, während sich der Durchsatz beim Railway-Modell nur unwesentlich verringert.

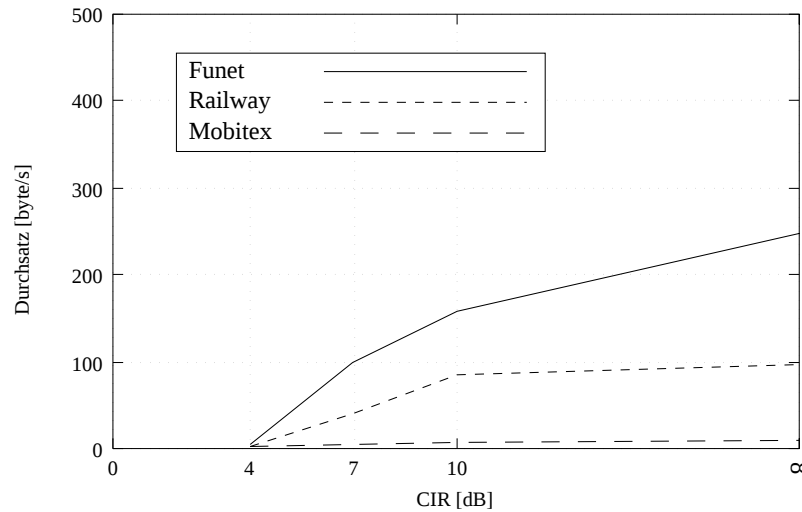


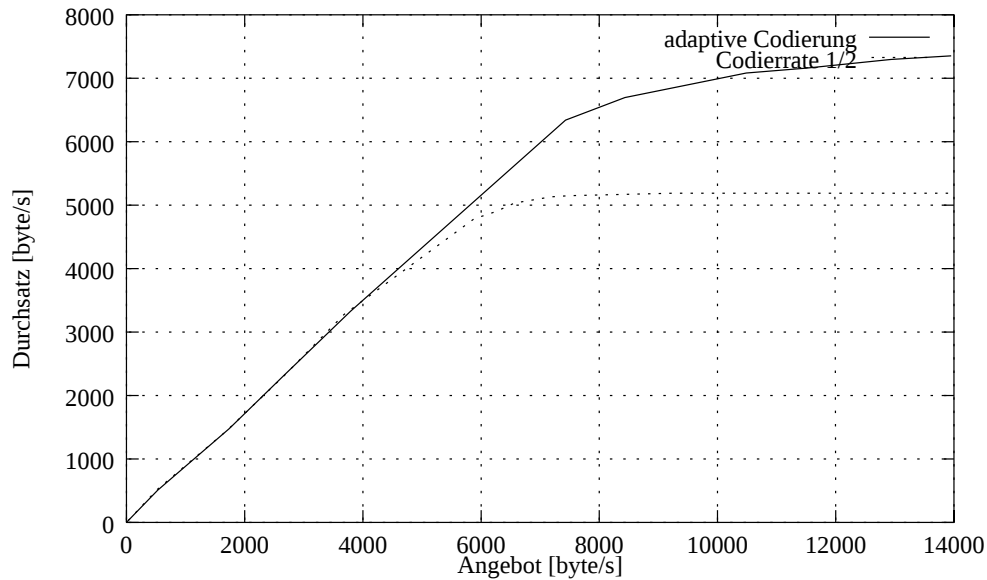
Abbildung 9.27: *Durchsatz bei unterschiedlichen C/I-Verhältnissen*

Dieser Effekt ist mit dem block-orientierten ARQ-Verfahren zu erklären. Bei einem Gleichkanalstörabstand von 10 *dB* werden ca. 18,4% der Bursts zerstört, vgl. Kapitel 7, aber 24,6% der Informations-Rahmen. Zudem gehen ca. 39,8% der Zugriff-Bursts verloren. Andererseits steigt mit der durchschnittlichen Auftragslänge die Wahrscheinlichkeit, daß Aufträge verworfen werden.

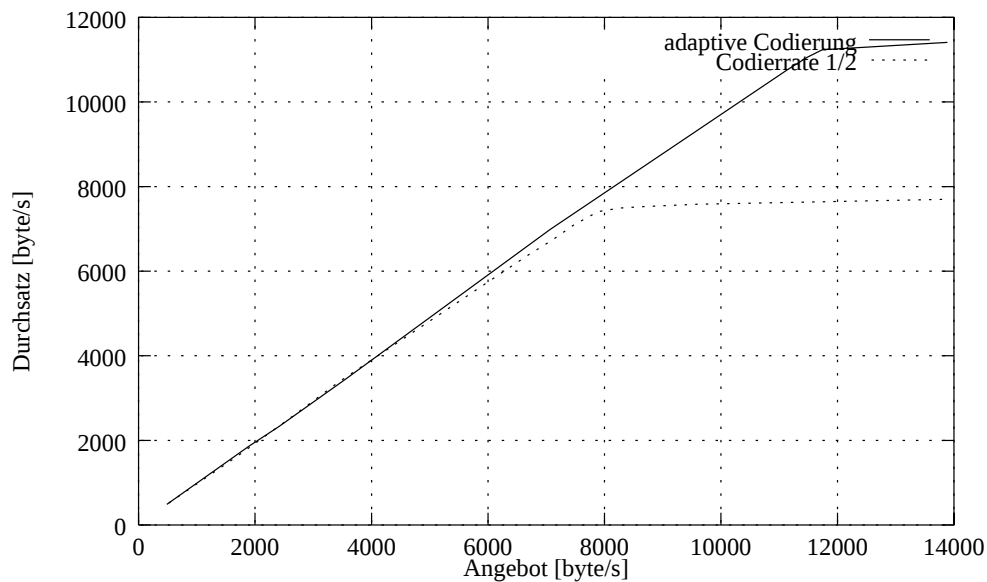
9.6.4 Simulationsergebnisse für das VRR-Protokoll

9.6.4.1 Durchsatz

In den Abbildungen 9.28 bzw. 9.29 ist der auf allen 8 Paketdatenkanälen gemessene Durchsatz bei gemischter Last für Downlink und Uplink dargestellt. Die obere Kurve zeigt den Durchsatz bei Einsatz adaptiver Codierung. Bei der unteren Kurve wurde die Standardcodierung CS1 gemäß Tabelle 9.3 mit einer Codierrate von $r = 1/2$ verwendet. Zu erkennen ist, daß der Durchsatz erwartungsgemäß im Niederlastbereich, d. h. bei geringem Verkehrsaufkommen, proportional zum Angebot steigt. Hier nicht abgebildete Untersuchungen des Durchsatzverhaltens bei unterschiedlichen Lastprofilen, vgl. [109], zeigten, daß sich kurze Nachrichten nicht so signifikant auf den Durchsatz auswirken, wie beim MSDRA-Protokoll, vgl. Seite 156. Im VRR-Protokoll werden minimal 180 *bit* entsprechend vier Datenburst übertragen. Zieht man den LLC-Protokolloverhead ab, so erhält man als kleinste Datenmenge 140 *bit*. Obzwar im Mobitex-Modell auch kürzere Pakete erzeugt werden, ist der Anteil nicht genutzter Übertragungskapazität prozentual geringer als beim MSDRA-Protokoll. In Analogie zum MSDRA-Protokoll arbeitet das Protokoll bei der Übertragung längerer Nachrichten effektiver, vgl. hierzu Abbildung 9.21. Bei Verwendung adaptiver Codierung werden bei längeren Nachrichten höhere Codierstufen erreicht. Das Protokoll erreicht beim implementierten Algorithmus seine

Abbildung 9.28: *Uplink-Durchsatz des VRRM Protokolls*

maximale Datenrate nach 20 fehlerfrei übertragenen Bursts. Dies entspricht Nachrichten mit einer Länge von mindestens 170 *byte*, dem Mittelwert der Paketlänge des Railway-Modells.

Abbildung 9.29: *Downlink-Durchsatz des VRRM Protokolls*

Bei nicht-adaptiver Codierung und dem Standardschema mit einer Faltungscodierung der Rate $1/2$ wird ein Durchsatz von maximal $5,8 \text{ kbyte/s}$ erreicht. Im Verhältnis zum maximal theoretischen Durchsatz von $8,26 \text{ kbyte/s}$ entspricht dies ca. 70%. Bei adaptiver Codierung ist mit über 10 kbyte/s ein wesentlich höherer Durchsatz erzielbar. Vergleichende Simulationen mit einer dem MSDRA-Protokoll entsprechenden Codierrate von $3/4$ resultierten in einem maximalen Durchsatz von ca.

8,1 kbyte/s. Gegenüber dem MSDRA-Protokoll ist somit ein ca. 10% geringerer Durchsatz erzielbar.

Bei der Datenübertragung auf dem Downlink wird mit steigendem Verkehrsangebot ein linear wachsender Durchsatz erreicht, bis der Kanal voll ausgelastet ist und der Durchsatz die Sättigung erreicht. Gegenüber dem Uplink reduziert sich der Signalerfassungsaufwand aufgrund der fehlenden Kollisionen. Mit einem Verhältnis von 85% wird eine deutlich bessere Auslastung des Kanals erreicht.

9.6.4.2 Kollisionswahrscheinlichkeit

In Abbildung 9.30 ist die aufgrund kollidierter bzw. fehlerhaft empfangener Zugriffsrahmen auf dem Uplink gemessene Kollisionshäufigkeit dargestellt. Zur Kollisionsauflösung wurde der aus Abschnitt 9.2.4 bekannte exponentielle Backoff-Algorithmus verwendet.

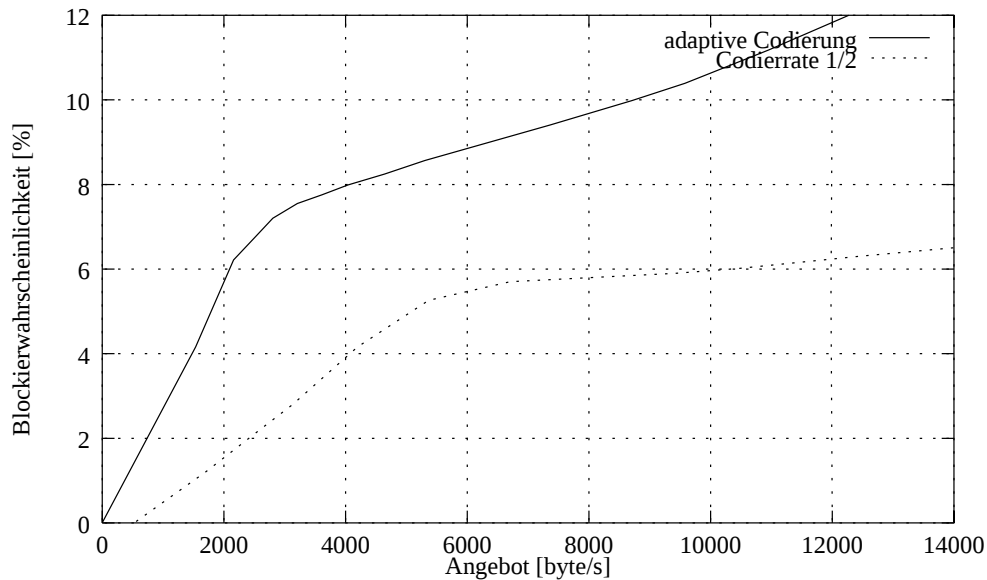


Abbildung 9.30: Kollisionshäufigkeit des VRRM Protokolls

Die Kollisionshäufigkeit liegt im Arbeitsbereich bei unter 8% und zeigt somit ein mit dem MSDRA-Protokoll vergleichbares Verhalten. Aufgrund der unterschiedlichen logischen Kanalstruktur bleibt die Kollisionswahrscheinlichkeit jedoch auch bei höheren Lasten geringer und steigt erst wesentlich später entscheidend an.

9.6.4.3 Paketverlustwahrscheinlichkeit

In Abbildung 9.31 ist die Paketverlustwahrscheinlichkeit auf dem Uplink in Prozent dargestellt. Die Anzahl der verworfenen Aufträge steigt bei fester Codierung relativ schnell auf 4% an. Bei adaptiver Codierung verdoppelt sich die Verlustwahrscheinlichkeit.

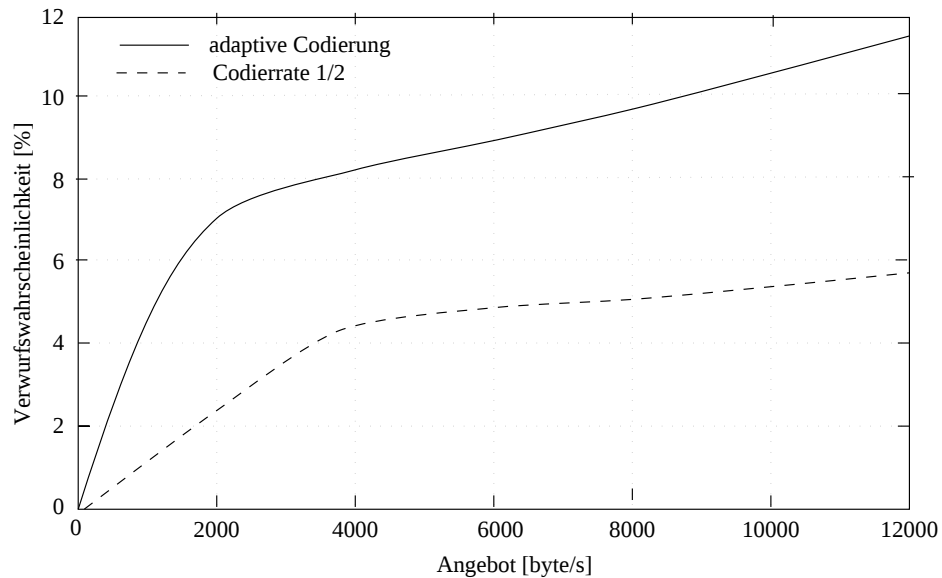


Abbildung 9.31: Uplink-Verlusthäufigkeit des VRRM-Protokolls

9.6.4.4 Durchsatz bei konstantem Gleichkanalstörabstand

In Abbildung 9.32 ist die Auswirkung eines fest vorgegebenen C/I-Verhältnisses auf den für eine Mobilstation erreichbaren Durchsatz bei verschiedenen Lastmodellen zu sehen. Durch Verwendung einer doppelt logarithmischen Skalierung kann man deutlich erkennen, daß der Durchsatz unterhalb von 10 dB unabhängig vom verwendeten Kanalbelegungsmodell relativ schnell abfällt, wobei das ARQ-Verfahren, bei welchem fehlerhafte Bursts selektiv wiederangefordert werden, vgl. Abschnitt 9.5.2, bereits bei einem Gleichkanalstörabstand von 10 dB eine gute Leistung bedingt. C/I-Verhältnisse, die besser als 10 dB sind führen nicht zu einer wesentlichen Durchsatzsteigerung. Es fällt jedoch auf, daß bei einem Gleichkanalstörabstand von 10 dB und darunter ein gegenüber dem MSDRA-Protokoll höherer Durchsatz erreicht werden kann. Da sich Störungen nur auf die selektive Wiederholung einzelner Bursts auswirken und nicht auf eine aus vier Bursts bestehende MSDRA-PDU, werden weniger Daten wiederholt.

9.6.5 Bewertung

Obzwar beide Protokolle in gleichen Lastszenarien untersucht wurden, lassen sich die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Implementierung der Abfertigungsstrategie, Kanalzuteilung und Kanalcodierung nur bedingt vergleichen. Dennoch zeigen die bisher durchgeführten Untersuchungen, daß die unterschiedlichen Fehlerbehandlungs- und Kanalkonzepte beider Protokolle erheblichen Einfluß auf die Verkehrsleistung der Protokolle haben.

In weiteren Untersuchungen zum Einfluß der Kanalkonzepte auf die Leistungskenngrößen, vgl. [109], wurde auch festgestellt, daß die durchschnittlichen Zugriffszeiten beim MSDRA-Protokoll von der Anzahl der einer Mobilstation zugewiesenen

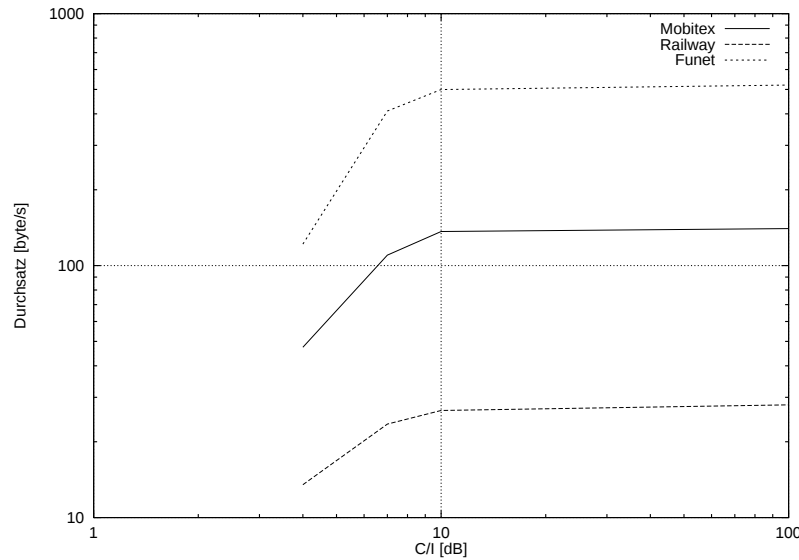


Abbildung 9.32: *Uplink-Durchsatz bei verschiedenen Kanalqualitäten*

Kanäle nicht beeinflusst werden, während die Zugriffszeit und Kanalanzahl beim VRRM-Protokoll aufgrund der blockdiagonalen Anordnung und festen Abfolge der Steuerkanäle korreliert sind und mit steigender Anzahl zugewiesener Kanäle geringer werden.

Im Vergleich zum MSDRA-Protokoll liegen die Stärken des VRRM-Protokolls in einer effizienteren Fehlerbehandlung, vgl. Abbildungen 9.32 und 9.27. Das MSDRA-Protokoll reagiert deutlich empfindlicher auf Übertragungsfehler. Bedingt durch die flexible Mehrfachrahmenstruktur und den geringeren Protokolloverhead haben die Simulationen dennoch gezeigt, daß mit dem MSDRA-Protokoll bei statischer Codierung und der eingestellten Signalqualität ein höherer Durchsatz erreicht werden kann.

Neben der weiteren Untersuchung bisher von der ETSI nicht spezifizierter Funktionsmerkmale der Protokolle, sind zu einer weiteren Beurteilung der Verkehrsleistung und erzielbaren Dienstgüte des GPRS die Kommunikation zwischen Mobilstation und SGSN und der Signalisierungsverkehr beispielsweise zur Aufenthalts- und Mobilitätsverwaltung zu berücksichtigen. Daneben erscheint die Untersuchung von Algorithmen zur adaptiven Kanalcodierung vielversprechend, einen von der Signalqualität abhängigen Fehlerschutz vorzusehen.

Zusammenfassung

Bedingt durch die Globalisierung der Telekommunikation und dem rapide steigenden Stellenwert *persönlicher* und *ortsungebundener* Kommunikation eröffnen sich neue Märkte für Mobilfunksysteme. Die mobilen Endgeräte der Zukunft werden multimediale Internetanwendungen ebenso unterstützen wie verschiedenartige Telematikanwendungen. Mobilfunk wird sich durch leistungsstarke Daten- und Mehrwertdienste auszeichnen, die speziell auf die Ansprüche des einzelnen Teilnehmers zugeschnitten sind und ein flexibles Dienstgüteprofil offerieren.

In dieser Arbeit wurden im Kontext der aktuellen internationalen Standardisierung verschiedene Möglichkeiten dargelegt, das Dienstspektrum des Mobilfunksystemstandards GSM an die zukünftigen Anforderungen des Massenmarktes „Mobilkommunikation“ anzupassen.

Nach einer allgemeinen Einführung in das GSM wurden mögliche zukünftige Anwendungen vorgestellt und bezüglich ihrer Dienstgüteanforderungen diskutiert. Im Anschluß daran wurden verschiedene Verkehrslast- bzw. Kanalbelegungsmodelle erörtert, die zur Nachbildung des Quellenverhaltens der einzelnen Anwendungen dienen.

In einer Übersicht wurden daraufhin die wesentlichen Konzepte der neuen, in der Phase 2+ spezifizierten, GSM-Dienste HSCSD, ASCI, PDS, UUS vorgestellt und in Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des GSM qualitativ bewertet.

Abgeleitet von dem aus dem ISDN bekannten Verfahren der paketvermittelten Datenübertragung mittels virtueller Schicht-2-Verbindungen wurde dann ein Konzept entwickelt und bewertet, einen „Frame Mode Bearer Service“ (FMBS) in das GSM zu integrieren. Dazu wurden die notwendigen Modifikationen auf Seiten der Signalisierung und die durch die Struktur der GSM Funkschnittstelle bedingten Anpassungen der Teilnehmerdatenübermittlung untersucht.

Es wurde gezeigt, daß die Integration mit verhältnismäßig geringem Aufwand durchgeführt werden kann. Mit dem FMBS steht ein bereits erprobter, im GSM kostengünstig gestaltbarer Paketdatendienst zur Verfügung. Mit den bestehenden GSM-Datendiensten vergleichbare Leistungsmerkmale stehen die Vorteile einer ökonomischeren Ausnutzung der Funkkanals durch statistisches Multiplexen und ein mögliches flexibles Dienstgüteprofil bei datenvolumenbezogener Gebührenabrechnung gegenüber. Ansatzpunkte für eine weitere Effizienzsteigerung liegen in einer optimierten, echtzeitorientierten Datenhaltung unter Berücksichtigung der Integration des Konzeptes des „Intelligenten Netzes“ [160].

Neben dem FMBS wurde der zukünftige GSM Paketdatenfunkdienst GPRS eingehend beschrieben und bezüglich seiner Dienstmerkmale untersucht. In der Erörte-

rung wurde deutlich, daß sich die Einführung einer paketvermittelten Übertragungstechnik in das auf Kanalvermittlung ausgelegte GSM aufwendig gestaltet und neue Netzkomponenten und Protokollarchitekturen erfordert; gleichzeitig können jedoch die zukünftigen Anforderungen konzeptionell bestmöglich beachtet werden.

Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Arbeit, eine simulative Leistungsbeurteilung der vorgestellten Dienstkonzepte bezüglich der tragbaren Verkehrslast durchzuführen, wurde in dieser Arbeit eine neue Softwareentwicklungs- und -bewertungsmethodik entwickelt, in ihren Kernzügen beschrieben und exemplarisch angewendet: Durch die Entwicklung eines Prototypen zur automatischen Umsetzung formal in SDL spezifizierter Protokolle in C++-Klassen konnten die Vorteile einer formalen Spezifikationsmethode mit den durch eine objekt-orientierte Simulationsumgebung gegebenen umfassenden Modellierungs- und Analysemöglichkeiten vereinigt werden.

Aufbauend auf der CNCL C++-Klassenbibliothek wurde der Protokollsimulator *GPRSim* entwickelt, welcher sich durch ein modulares Design und OSI-konforme Schnittstellen zwischen den Protokollschichten auszeichnet und über eine Schnittstelle zur Einbindung SDL2CNCL-übersetzter Spezifikationen verfügt. Weiterhin ist in dem Werkzeug ein Lastgenerator integriert, welcher die beschriebenen Modelle beinhaltet und zur Erzeugung beliebiger gemischter Verkehrslastszenarien verwendet werden kann.

Der GSM-Funkkanal wurde durch Fehlermusterdateien nachgebildet. Dabei wurden verschiedener GSM-konformer Kanalcodierverfahren untersucht. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Codierraten des eingesetzten GSM-Faltungscodierers sowie unterschiedlicher Codespreizungstiefen wurde zudem ein Programmpaket zur Erzeugung und Auswertung von entsprechenden Fehlermustern entwickelt. Die Auswertung ergibt, daß adaptive Codierverfahren einen vielversprechenden Ansatzpunkt zu einer möglichen Durchsatzsteigerung bieten.

Da die Standardisierungsarbeiten zum GPRS zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Arbeit noch nicht abgeschlossen sind, konnten bei der prototypischen Implementierung der Protokolle der GPRS-Funkschnittstelle nicht alle Entwurfsmerkmale berücksichtigt werden. Dies bezieht sich beispielsweise auf die Untersuchung von Funktionen zur zeitlichen Synchronisierung und Leistungssteuerung. Auch sind die zur Prioritätensteuerung, Kollisionsauflösung und Kanalbelegungsstrategie implementierten Algorithmen als erste – wenn auch nach fundierten Erkenntnissen ausgewählte – Vorschläge zu werten, die noch weiter untersucht werden müssen.

Neben der allgemeinen Optimierung der Protokolle hinsichtlich leistungsrelevanter Parameter sind weiterführende Arbeiten daher insbesondere im Bereich des Dienstgütemanagements erforderlich. Hierbei ist das in den Standardisierungsarbeiten bisher nicht genau ausgearbeitete Interworking mit externen Paketdatennetzen wie dem Internet und deren Dienstgütekonzeppte zu berücksichtigen. Wichtig ist auch die Entwicklung effizienter Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikationskonzepte.

Mit dem Simulator *GPRSim* steht ein effizientes Werkzeug zur Verfügung, um in zukünftigen Untersuchungen zu analysieren, ob der neue GSM-Paketdatendienst

GPRS die an ihn gestellten Erwartungen erfüllen kann.

Ungeachtet dessen, ist das GSM nicht nur mit der Entwicklung des GPRS auf dem besten Weg, die Visionen einer allumfassenden mobilen Kommunikation noch vor der Jahrtausendwende Realität werden zu lassen. Auch in anderen System- und Dienstbereichen werden die Spezifikationen fortwährend erweitert und an die zukünftigen Anforderungen angepaßt. Kein anderes digitales zelluläres Mobilfunksystem verfügt über solch umfassend ausgearbeitete akzeptierte Standards und eine derart weltweit verbreitete Infrastruktur wie das GSM.

Zudem werden neue Modulationsverfahren in absehbarer Zukunft noch höhere Übertragungsraten ermöglichen, die das GSM als Grundbaustein des *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) geeignet erscheinen lassen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Packet Data on Signalling channels Service (PDS); Service description – Stage 3 (GSM 04.63)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1996.
- [2] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Packet Data on Singalling channels Service (PDS) – Stage 1 (GSM 02.63)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1996.
- [3] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); User-to-User Signalling (UUS); Service description – Stage 2 (GSM 03.87)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, März 1996.
- [4] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service (eMLPP) – Stage 1 (GSM 02.67)*. Technischer Bericht 5.0.4, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1997.
- [5] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiple Subscriber Profile (MSP) Service description – Stage 1 (GSM 02.97)*. Technischer Bericht 5.1.1, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, September 1997.
- [6] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); User-to-User Signalling (UUS); Service description – Stage 1 (GSM 02.87)*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, März 1997.
- [7] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Voice Broadcast Service (VBS) – Stage 1 (GSM 02.68)*. Technischer Bericht 5.1.3, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [8] ETSI TC-SMG 1. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Voice Group Call Service (VGCS) – Stage 1 (GSM 02.68)*. Technischer Bericht 5.1.3, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [9] ETSI TC-SMG 2. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Channel coding (GSM 05.03)*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1996.
- [10] ETSI TC-SMG 2. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical layer on the radio path; General description (GSM 05.01)*. Technischer Bericht 5.0.0,

- Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1996.
- [11] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Packet Data on Signalling channels Service (PDS) – Stage 2 (GSM 03.63)*. Technischer Bericht 5.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1996.
 - [12] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Base Station Controller - Base Transceiver Station (BSC - BTS) interface; Layer 3 specification (GSM 08.58)*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1996.
 - [13] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Broadcast Call Control (BCC) (GSM 04.69)*. Technischer Bericht 5.0.1, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, April 1997.
 - [14] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service (eMLPP) – Stage 2 (GSM 03.67)*. Technischer Bericht 5.1.1, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1997.
 - [15] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service (eMLPP) – Stage 3 (GSM 04.67)*. Technischer Bericht 5.0.1, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1997.
 - [16] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Base Station Subsystem - Serving GPRS Support Node (BSSGP) interface specification (GSM 08.64)*. Technischer Bericht (Draft) 1.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juni 1997.
 - [17] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Group Call Control (GGCS) protocol specification (GSM 04.68)*. Technischer Bericht 5.0.2, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, April 1997.
 - [18] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface layer 3 specification (GSM 04.08)*. Technischer Bericht 5.6.2, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
 - [19] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface signalling layer 3; General aspects (GSM 04.07)*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
 - [20] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Voice Broadcast Service (VBS) – Stage 2 (GSM 03.69)*. Technischer Bericht 5.2.1, Eu-

- ropäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [21] ETSI TC-SMG 3. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Voice Group Call Service (VGCS) – Stage 2 (GSM 03.68)*. Technischer Bericht 5.2.1, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [22] ETSI TC-SMG 4. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Interworking between a Public Land Mobile Network (PLMN) and a Packet Switched Public Data Network/Integrated Services Digital Network (PSPDN/ISDN) for the support of packet switched data transmission services (GSM 09.06)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1996.
- [23] ETSI TC-SMG 4. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio Link Protocol (RLP) for data and telematic services on the Mobile Station - Base Station System (MS - BSS) interface and the Base Station System - Mobile-services Switching Centre (BSS - MSC) interface (GSM 04.22)*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Mai 1997.
- [24] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Service Description – Stage 2 (GSM 03.60)*. Technischer Bericht (Draft) 0.20.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Dezember 1996.
- [25] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) across the G_n and G_p interface (GSM 09.60)*. Technischer Bericht (Draft) 1.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1997.
- [26] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); External network interworking (GSM 09.61)*. Technischer Bericht (Draft) 1.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juni 1997.
- [27] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Subnetwork Dependent Convergence Protocol (SND CP) (GSM 04.65)*. Technischer Bericht (Draft) 1.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juni 1997.
- [28] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Overall description of the GPRS Radio interface (U_m) (GSM 03.64)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juni 1997.
- [29] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Mobile Station (MS) – Serving GPRS*

- Support Node (SGSN) Logical Link Control (LLC) layer specification (GSM 04.64)*. Technischer Bericht (Draft) 1.3.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [30] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Serving GPRS Support Node (SGSN) — Visitor Location Register (VLR) interface layer 3 specification (GSM 09.18)*. Technischer Bericht (Draft) 1.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, August 1997.
- [31] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Service Description – Stage 1 (GSM 02.60)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Februar 1997.
- [32] ETSI TC-SMG GPRS ad hoc. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); User interworking (GSM 07.60)*. Technischer Bericht (Draft) 1.1.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1997.
- [33] A. Aho, R. Sethi, J. D. Ullmann. *Principles of Compiler Design*. Addison-Wesley, Bonn, München, Paris, 1992. ISBN 0–201–10073–8.
- [34] M. Awad. *Simulative Leistungsbewertung eines paketorientierten Mehrpunktdienstes für das GSM Mobilfunknetz*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, Mai 1996.
- [35] Benelli. B., G. F. Cau, A. Radelli. *A Performance Evaluation of Slotted Aloha Multiple Access Algorithms with Fixed and Variable Frames for Radiomobile Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Band 43, Nr. 2, pp. 181–193, März 1994. ISSN 0018-9545.
- [36] M. J. Bach. *The Design of the UNIX Operating System*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986. ISBN 0–13–201757–1.
- [37] F. Bause, P. Buchholz. *Qualitative and Quantitative Analysis of Timed SDL Specifications*. In *Kommunikation in verteilten Systemen*, Springer, Informatik aktuell, pp. 486–500, März 1993.
- [38] F. Belina, D. Hogrefe, A. Sarma. *The CCITT-Specification and Description Language SDL*. In *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 16, pp. 311–341, Hemel Hempstead, Hertfordshire, April 1989.
- [39] F. Belina, D. Hogrefe, A. Sarma. *SDL with Applications from Protocol Specification*. Carl Hanser Verlag und Prentice-Hall International, Hemel Hempstead; Hertfordshire, 2. Auflage, 1993. ISBN 0–13–785890–6.
- [40] J. Biala. *Mobilfunk und Intelligente Netze*. Vieweg & Sohn, Braunschweig; Wiesbaden (u. a.), 2. neubearbeitete Auflage, 1995. ISBN 3–528–15302–4.
- [41] G. Bianchi, et al. *C-PRMA: a Centralized Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Band 46, Nr. 3, pp. 422–436, Mai 1997.

- [42] R. E. Blahut. *Theory and Practice of Error Control Codes*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u.a.), 1983. ISBN 0-201-10102-5.
- [43] P. Bocker. *ISDN – Das diensteintegrierende digitale Nachrichtennetz*. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo, 1986. ISBN 3-540-1527-1.
- [44] S. Böhmer. *Entwurf eines ATM-basierten Funknetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung*. Band 5 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation* (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke), Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1996. Dissertation, RWTH Aachen.
- [45] G. Booch. *Object-oriented Analysis and Design with Applications*. Benjamin/Cummings, Redwood City, Californien (u.a.), 2. Auflage, 1994. ISBN 0-8053-5340-2.
- [46] B. Bradner, A. Mankin. *IPng – Internet Protocol Next Generation*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u. a.), 1996. ISBN 0-201-63395-7.
- [47] G. Brasche. *Vergleich der funktionalen Spezifikationsprachen SDL, Estelle und LOTOS*. Interner bericht, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstraße 16, D-52074 Aachen, April 1993.
- [48] G. Brasche. *Dynamische Kanal- und Mobilitätsverwaltung paketorientierter zellularer Mobilfunknetze*. Zwischenbericht im Kooperationsprojekt Profs. Walke, Kühn, Drobnik, Mathar; hier Prof. Dr. B. Walke, Januar 1996.
- [49] G. Brasche. *Evaluation of a MAC Protocol proposed for a General Packet Radio Service in GSM*. In *Tagungsband der 7. PIMRC (Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications)*, Vol. 1, pp. 668–672, TaiPei, Taiwan, IEEE, Oktober 1996. ISBN 0-7803-3692-5.
- [50] G. Brasche. *A Frame Mode Bearer Service Proposed for the Cellular Radio Network GSM*. In *Tagungsband der 46. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 2, pp. 512–516, Atlanta, GA, USA, IEEE VTS, April 1996. ISBN 0-7803-3157-5.
- [51] G. Brasche. *Modelling and Simulation of a Frame Mode Bearer Service for the GSM Cellular Radio Network by Formal Specification*. In *Tagungsband des ESS '96 (European Simulation Symposium)*, Vol. 1, pp. 528–532, Genoa, Italien, Oktober 1996.
- [52] G. Brasche. *Performance Analysis a Multi-slot MAC Protocol proposed for a General Packet Radio Service in GSM*. In *Tagungsband des 2. PWC-Workshops (Personal Wireless Communications)*, pp. 157–170, Frankfurt, IFIP, Dezember 1996.
- [53] G. Brasche. *Advanced speech and data services for GSM Phase 2+ – Overview and Analysis*. In *Tagungsband der 2. EPMCC '97 und 3. ITG-Fachtagung*, number 145 in ITG Fachbericht, pp. 211–212, Bonn, Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG), VDE Verlag, Berlin, Offenbach, Oktober 1997. ISBN 3-8007-2307-7.
- [54] G. Brasche. *Analysis of Multi-Slot MAC Protocols proposed for the GSM Phase 2+ General Packet Radio Service*. In *Tagungsband der 47. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 3, pp. 1295–1300, Phoenix, Arizona, USA, IEEE, Mai 1997. ISBN 0-7803-3659-3.

- [55] G. Brasche, F. Müller. *Untersuchung des Weitbereichs-TCP-Verkehrs unter Berücksichtigung seiner besonderen Charakteristika nach dem Packet-Train-Modell*. Technischer Bericht, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, Mai 1997.
- [56] G. Brasche, B. Walke. *Concepts, Services and Protocols of the new GSM Phase 2+ General Packet Radio Service*. IEEE Communications Magazine, Band 35, Nr. 8, pp. 94–104, August 1997. ISSN 0163-6804.
- [57] A. Capone, L. Musumeci. *Performance Evaluations of High Speed Circuit Switched Data Services in GSM Systems*. In *Tagungsband der 47. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 1, pp. 1684–1688. IEEE VTS, Mai 1997. ISBN 0-7803-3659-3.
- [58] S. Chakraborty. *Mobile Multimedia: In Context to ATM Transport and GSM/GPRS Mobile Access Networks*. In *Tagungsband der Globecom '95*, pp. 1937–1941, Singapur, Singapur, November 1995.
- [59] S. Chakraborty, S. Wager. *Inhibit Sense Multiple Access with Reservation, a Contender for GSM/GPRS Packet Services*. In *Tagungsband der 2. MoMuC (2nd International Workshop on Mobile Multimedia Communications)*, Bristol, England, April 1995.
- [60] S. Chakraborty, S. Wager. *The Inhibit Multiple Access with Polling (ISMA/P): A MAC-RLP Combined Procedure for Packet Mode Data over Non-interleaved Channel for GSM/GPRS Services*. In *Tagungsband der 46. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 2, pp. 776–780, Atlanta, GA, USA, IEEE VTS, April 1996. 0-7803-3157-5.
- [61] H. Cornelson. *Entwicklung und Implementierung von Lastgeneratoren für multimediale Sprach-, Audio- und Paketdaten Anwendungen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, Nov 1996.
- [62] P. B. Danzig, J. Sugih. *tcplib: A Library of TCP Internetwork Traffic Characteristics*. Dept. of Computer Science, University of South-California, Los Angeles, CA, USA, 1991. Technical report USC-CS-91-495.
- [63] P. Dauphin, et al. *Specification-driven Performance Monitoring of SDL/MSC-specified Protocols*. In *Protocol Test Systems*, Berlin, Chapman & Hall, 1995. Editoren: Cavalli, A. and Budkowski, S.
- [64] R. J. Deasington. *X.25 Explained: protocols for packet switching networks*. Ellis Horwood, Chichester, 2. Auflage, 1986. ISBN 0-7458-0110-2.
- [65] P. Decker. *FAX Transmission on Non-Transparent GSM Data Service*. In *Tagungsband der 1. MoMuC (1st International Workshop on Mobile Multimedia Communications)*, Tokio, Japan, IEEE, Dezember 1993.
- [66] P. Decker. *Entwurf und Leistungsbewertung hybrider Fehlersicherungsprotokolle für paketierte Sprach- und Datendienste im GSM-Mobilfunksystem*. Band 8 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke)*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1997. Dissertation, RWTH Aachen.

- [67] P. Decker, B. Walke. *A General Packet Radio Service Proposed for GSM*. In *GSM in a future competitive environment*, Nokia Espoo, Finnland, ETSI/SMG, Oktober 1993.
- [68] C. Dhas, U. Konangi. *X.25: An Interface to Public Packet Networks*. IEEE Communications Magazine, Band 24, Nr. 4, pp. 18–25, September 1986.
- [69] M. Diefenbruch, E. Heck. *Performance Evaluation of SDL Systems Adjunct by Queuing Models*. In *Tagungsband des 7. SDL Forums*, pp. 231–242, Oslo, Norwegen, 1995. Editoren: R. Braek und A. Sarma.
- [70] J. Dunlop, et al. *Block Reservation Multiple Access for 3rd Generation Cellular Systems*. In *Tagungsband der 2. ICUPC (Intern. Conf. on Universal Personal Communication)*, Ottawa, Kanada, Oktober 1993. ISBN 0–7803–1396–8.
- [71] J. Dunlop, E. Santos. *Transmission of Compressed Video Over GSM Data Channels*. In *Tagungsband der 46. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 1, pp. 306–310, Atlanta, GA, USA, IEEE VTS, April 1996. ISBN 0–7803–3157–5.
- [72] J. Eberspächer, H. J. Vögel. *GSM – Global System for Mobile Communication: Vermittlung, Dienste, Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1997. ISBN 3–519–06192–9.
- [73] E. O. Elliott. *Estimates of Error Rates for Codes on Burst-noise Channels*. The Bell System Technical Journal, Band 42, pp. 1977–1997, September 1963.
- [74] J. Ellsberger, D. Hogrefe, A. Sarma. *SDL – Formal Object-oriented Language for Communicating Systems*. Prentice-Hall, Hemel Hempstead, 1997. ISBN 0–13–621384–7.
- [75] G. S. Fishman. *Principles of Discrete Event Simulation*. Wiley & Sons, New York, 1978. ISBN 0–471–04395–8.
- [76] Z. Fitsumberhan. *Simulative Leistungsbewertung eines Frame Mode Bearer Service für das GSM Mobilfunknetz*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, Dezember 1995.
- [77] ITU-T SG X (Languages for Telecommunication Applications). *ITU-T Empfehlung Z.100: Functional Specification and Description Language (SDL)*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [78] ITU-T SG X (Languages for Telecommunication Applications). *ITU-T Empfehlung Z.120: Message Sequence Charts (MSC)*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [79] G. D. Forney. *The Viterbi Algorithm*. Proceedings of the IEEE, Band 61, Nr. 3, pp. 268–278, März 1973. ISSN 0018-9219.
- [80] B. D. Fritchman. *A Binary Channel Characterization using Partitioned Markov Chains*. IEEE Transactions on Information Theory, Band IT-13, pp. 221–227, April 1967.

- [81] R. Froelich, W. Hesse, G. Merbeth. *Softwareentwicklung: Vorgehensmodelle, Projektführung, Produktverwaltung*. Oldenburg, München (u.a.), 1992. ISBN 3-486-20693-1.
- [82] V. S. Frost, B. Melamed. *Traffic Modeling For Telecommunications Networks*. IEEE Communications Magazine, Band 4, pp. 70-81, März 1994.
- [83] M. Frullone, G. Riva, P. Grazioso, C. Carciofi. *Performance Evaluation of Packet Reservation Multiple Access in a Mixed Cellular Environment*. In *Tagungsband der 2. ICUPC (Intern. Conf. on Universal Personal Communication*, Vol. 1, pp. 23-27, Ottawa, Kanada, IEEE, Oktober 1993. ISBN 0-7803-1396-8.
- [84] R. Gallager, D. Bertsekas. *Data Networks*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2. Auflage, 1992. ISBN 0-13-200916-1.
- [85] E. N. Gilbert. *Capacity of a Burst-noise Channel*. Bell System Techn. Journal, Band 39, pp. 1253-1266, September 1960.
- [86] J. Goodman, et al. *Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications*. IEEE Transactions on Communications, Band 37, Nr. 8, pp. 885-890, 1989. ISSN 0090-6778.
- [87] F. Goudenove, L. Doldi. *Use of SDL to Specify Airbus Future Air Navigation Systems*. In *7. SDL Forum*, pp. 359-370, Oslo, Norwegen, 1995. Editoren: R. Braek and A. Sarma.
- [88] R. Grafe. *Implementierung eines coderatenadaptiven Protokolls für einen Paketdatendienst (GPRS) im GSM*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, Juni 1997.
- [89] J. Hagenauer. *Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and their Applications*. IEEE Transactions on Computers, Band 36, Nr. 4, pp. 389-400, April 1988.
- [90] F. Halsall. *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*. Addison-Wesley, Wokingham (u.a.), 4. Auflage, 1994. ISBN 0-201-56506-4.
- [91] M. R. Hansen, Z. Chaochen. *Semantics and Completeness of Duration Calculus*. In *Real-Time: Theory in Practice, REX Workshop*, Vol. 600 of *Lecture Note in Computer Science*, pp. 209-225, 1992.
- [92] T. Haug. *Overview of GSM: Philosophy and Results*. International Journal of Wireless Information Networks, Band 1, Nr. 1, pp. 7-16, 1994.
- [93] E. Heck, D. Hogrefe. *Hierarchical Performance Evaluation Based on Formally Specified Communication Protocols*. IEEE Transactions on Computers, Band 40, Nr. 4, pp. 500-513, April 1995.
- [94] H. Herold. *Lex und Yacc: lexikalische und syntaktische Analyse*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u.a.), 1992. ISBN 3-89319-382-0.

- [95] J. Hämäläinen, H. Kari. *Packet Radio Service for GSM Network*. In *Tagungsband der 2. MoMuC (2nd International Workshop on Mobile Multimedia Communications)*, pp. 365–374, Bristol, England, April 1995.
- [96] D. Hogrefe. *Estelle, LOTOS und SDL - Standard-Spezifikationssprachen für verteilte Systeme*. Springer-Verlag, Hamburg; New York (u. a.), 1989. ISBN 3-540-50477-X.
- [97] G. J. Holzmann. *Design and Validation of Computer Protocols*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991. ISBN 0-13-539925-4.
- [98] Z. Honskasalo, J. Hämäläinen. *Cellular Wideband Mobile Data Communications*. In *5. WIN Workshop (Fifth Winlab Workshop on Third Generation Wireless Information Networks)*, pp. 365–374, New Jersey, USA, April 1995.
- [99] J. E. Hopcroft, J. D. Ullmann. *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u. a.), 1993. ISBN 3-925118-82-9.
- [100] C. Huitema. *IPv6: The New Internet Protocol*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2. Auflage, 1998. ISBN 0-13-850505-5.
- [101] T. Ichikawa, H. Kayama, H. Yamamoto, Y. Inoue. *PHS with Packet Data Communications (PHS-PD) Protocol Architecture*. In *Tagungsband der 47. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 1, pp. 416–425. IEEE VTS, Mai 1997. 0-7803-3659-3.
- [102] Hämäläinen J. *Design of GSM High Speed Data Services*. Band 186, Technische Universität Tampere, Tampere, Finnland, 1996. Dissertation, ISBN 951-722-641-1.
- [103] J. R. Jackson. *Queues with a Dynamic Priority Discipline*. Management Science, Band 8, pp. 18–34, Januar 1960.
- [104] R. Jain, S. A. Routhier. *Packet Trains – Measurement and a New Model for Computer Network Traffic*. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, Band 4, Nr. 6, pp. 986–995, September 1986.
- [105] D. G. Jeong, W. S. Jeong. *Performance of an Exponential Backoff Scheme for Slotted-ALOHA protocol in local wireless environment*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Band 44, Nr. 3, pp. 470–479, August 1995.
- [106] H. Jokinen, et al. *Multi-slot Packet Radio Air Interface to TDMA systems – Variable Rate Reservation Access (VRRA)*. In *Tagungsband der 6. PIMRC (Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications)*, pp. 366–371, Toronto, Kanada, IEEE, September 1995.
- [107] M. Junius. *Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunknetze*. Band 3 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke)*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1995. Dissertation, RWTH Aachen.
- [108] M. Junius, S. Arefzadeh. *CNCL – ComNets Class Library*. Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstraße 16, D-52074 Aachen, 1995.

- [109] A. Keller. *Implementierung und Leistungsbewertung eines Zugriffsprotokolls für einen Paketdatendienst (GPRS) im GSM-System*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, April 1996.
- [110] S. Kerschner-Aceval. *Mobilfunk-Neuling setzt auf vierte Technikgeneration*. VDI-Nachrichten, Nr. 5, pp. 19, Februar 1997.
- [111] L. Kleinrock. *Queueing Systems*. Band I: Theory, John Wiley & Sons, 1975.
- [112] M. Kojo, et al. *Connecting mobile workstations to the Internet over a digital cellular telephone network*. Mobile Computing, Band 353, pp. 253–270, Januar 1996. Editoren: T. Imielinski und H. Korth, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-9697-9.
- [113] H. Kopka. *LaTeX - Einführung*. Band 1, Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u. a.), 1. Auflage, 2. unveränderter Nachdruck, 1995. ISBN 3-89319-664-1.
- [114] S. Lam, L. Kleinrock. *Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation*. IEEE Transactions on Communications, Band 23, pp. 410–423, September 1975.
- [115] S. Lin, D. J. Costello. *Error Control Coding - Fundamentals and Applications*. Band 1 von *Computer Applications in Electrical Engineering Series*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1. Auflage, 1983. ISBN 0-13-283796-X.
- [116] S. B. Lippman. *C++ - Einführung und Leitfaden*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u. a.), 2. Auflage, 3. korrigierter Nachdruck, 1994. ISBN 3-89319-375-8.
- [117] H. D. Lüke. *Signalübertragung: Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York (u. a.), 5., verbesserte und überarbeitete Auflage, 1992. ISBN 3-540-54824-6.
- [118] B. A. Mah. *Measurements and Observations of IP Multicast Traffic*. Technical report, Berkley Institute, University of California, 1994.
- [119] B. Meyer. *Objektorientierte Softwareentwicklung*. Carl Hanser Verlag, München (u. a.), 1990. ISBN 3-446-15773-5.
- [120] S. Mørk, et al. *A Timed Semantics for SDL*. In *Tagungsband FORTE/PSTV '96, Session: Formal Description Techniques IX, Theory, application and tools*, pp. 295–309, Kaiserslautern, Oktober 1996. Editoren: R. Gotzhein and J. Brederke. Chapman and Hall.
- [121] M. Mouly, Marie-B. Pautet. *The GSM System for Mobile Communications*. GSM, 49, rue Louise Bruneau, F-91129 Palaiseau, France, 1992.
- [122] A. Murase, A. Maebara, I. Okajima, S. Hirata. *Mobile Radio Packet Data Communications in a TDMA Digital Cellular System*. In *Tagungsband der 47. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 2, pp. 1034–1038. IEEE VTS, Mai 1997. ISBN 0-7803-3659-3.

- [123] A. Olsen, et. al. *Systems Engineering Using SDL-92*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2. Auflage, 1994. ISBN 0-444-89872-7.
- [124] W. Olzem. *Integration of protocols specified in SDL into an event-driven simulation environment*. Kopernikusstraße 16, D-52074 Aachen, Januar 1995.
- [125] C. Perkins. *Request for Comments (draft): Mobile Internet Protocol*. Technical report, DDN Network Information Centre, SRI International, September 1996.
- [126] W. W. Peterson, E. J. Weldon. *Error Correcting Codes*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 3. Auflage, 1986. ISBN 0-262-16039-0.
- [127] C. Plenge. *Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme*. Band 10 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke)*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1997. Dissertation, RWTH Aachen.
- [128] J. Postel. *Request for Comments 791: Internet Protocol*. Mil-std 1777, DDN Network Information Centre, SRI International, September 1981.
- [129] J. Rapeli. *Addressing requirements for telecommunications after the year 2000*. IEEE Journal on Personal Communications, Band 2, Nr. 4, pp. 20-28, Februar 1995.
- [130] M. Sailer. *Formale Spezifikation eines Frame Mode Bearer Service zur paketorientierten Datenübertragung im GSM Mobilfunknetz*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, November 1995.
- [131] H. J. Schneider. *Compiler, Aufbau und Arbeitsweise*. Walter de Gruyter & Co., Berlin; New York, 1975. ISBN 3-11-0020580-0.
- [132] F. Schreiber. *The Objective Empirical Distribution Function and its Error Formulae*. AEÜ (Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik), Band 35, Nr. 12, 1981. ISSN 0001-1096.
- [133] F. Schreiber. *Effective Control of Simulation Runs by a New Algorithm for Correlated Random Sequences*. AEÜ (Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik), Band 42, Nr. 6, pp. 347-354, 1988. ISSN 0001-1096.
- [134] C. E. Shannon. *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, Band XXVII, Nr. 3, pp. 379-656, Juli 1948.
- [135] J. Solomon. *Mobile IP: The Internet Unplugged*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1. Auflage, 1998. ISBN 0-13-856246-6.
- [136] W. Stallings. *Networking Standards: A guide to OSI, ISDN, LAN, and MAN Standards*. Addison-Wesely, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u.a.), 1993. ISBN 0-201-56357-6.
- [137] W. Stallings. *ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 3. Auflage, 1995. ISBN 0-13-180944-X.
- [138] W. Stallings. *Data and Computer Communications*. Macmillan Publishing Company, New York, 5. Auflage, 1997. 0-02-946478-1.

- [139] H. Steffan. *Stochastische Modelle für den Funkkanal und deren Anwendung*. Band 4 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke)*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1996. Dissertation, RWTH Aachen.
- [140] M. Steppeler, M. Lott. *SPEET — SDL Performance Evaluation Tool*. In *8. SDL Forum (Time for Testing - SDL, MSC and Trends)*, pp. 53–67, Evry, Frankreich, September 1997. Editoren: A. Cavalli and A. Sarma, Elsevier Science Publishers, ISBN 0–444-82816–8.
- [141] D. Stockhusen. *Bewertung eines GSM Frame Mode Bearer Services im Vergleich zu den neuen GSM Phase 2+ Paket-Datendienstkonzepten*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstr. 16, D-52074 Aachen, Juli 1997.
- [142] B. Stroustrup. *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley, Bonn; Paris; Reading, Massachusetts (u.a.), 2. Auflage, 3. Nachdruck, 1995. ISBN 0–201–53992–6.
- [143] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung Q.922: ISDN Data Link Layer Specification for Frame Mode Bearer Services*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1992.
- [144] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung G.732:*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [145] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung Q.700: Signalling System No. 7*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [146] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung Q.735: Multi-Level Precedence and Preemption (MLPP)*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [147] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung X.25: Interface Between Data Terminal Equipment (DTE) and Data Circuit-terminating Equipment (DCE) for Terminals Operating in the Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1993.
- [148] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Empfehlung Q.933: Digital Subscriber Signalling System No. 1 (DSS 1) - Signalling Specification*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1994.
- [149] ITU-T SG XI (Switching, Signalling). *ITU-T Recommendation Q.921: ISDN User-Network Interface - Data Link Layer Specification*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, 1994.
- [150] P. Taaghola, R. Tafazolli, B. G. Evans. *Burst Reservation Multiple Access Techniques for the GSM/DCS and DECT Systems*. In *Tagungsband der 7. PIMRC (Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications)*, pp. 412–416, TaiPei, Taiwan, IEEE, Oktober 1996. ISBN 0–7803–3692–5.

- [151] P. Taaghola, R. Tafiolli. *An Air Interface Solution for a Multirate General Packet Radio Service for GSM/DCS*. In *Tagungsband der 47. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 2, pp. 1263–1267, Phoenix, Arizona, USA, IEEE, Mai 1997. ISBN 0-7803-3659-3.
- [152] ETSI TC-SMG. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General description of a GSM Public Land Mobile Network (PLMN) (GSM 01.02)*. Technischer Bericht 5.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, März 1996.
- [153] ETSI TC-SMG. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM 02.34) High Speed Circuit Switched Data: Stage 1 Service Description*. Technischer Bericht 5.2.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Juli 1997.
- [154] ETSI TC-SMG. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM 03.34) High Speed Circuit Switched Data: Stage 2 Service Description*. Technischer Bericht (Draft) 2.0.0, Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation, Sophia Antipolis, Frankreich, Januar 1997.
- [155] ISO TC97/SC21. *ISO IS 4335: Information Processing Systems: Data communications — High Level Data Link Control*. Internationaler standard, Internationale Organisation für Normen (ISO), Genf, Schweiz, 1988.
- [156] ISO TC97/SC21. *ISO IS 8348: Information Processing Systems: Data Communications — Network Service Definition, Addendum 1: Connection-less Mode of Transmission*. Internationaler standard, Internationale Organisation für Normen (ISO), Genf, Schweiz, 1988.
- [157] ISO TC97/SC21. *ISO IS 8807: LOTOS - A Formal Description Technique Based on the Temporal Ordering of Observational Behaviour*. Internationaler standard, Internationale Organisation für Normen (ISO), Genf, Schweiz, 1988.
- [158] ISO TC97/SC21. *ISO IS 9074: Extended State Transition Language*. Internationaler standard, Internationale Organisation für Normen (ISO), Genf, Schweiz, 1988.
- [159] TeleLOGIC Malmö AB, Schweden. *SDT 3.01 Reference Manual*, 1994.
- [160] J. Thörner. *Intelligent Networks*. Artech House, Norwood, Massachusetts, 1994. ISBN 0-89006-706-6.
- [161] D. Turina. *Performance Evaluation of a Single-Slot Packet Data Channel in GSM*. In *Tagungsband der 45. VTC (Vehicular Technology Conference)*, Vol. 2, pp. 544–548, Chicago, ILL, USA, IEEE VTS, Juli 1995. ISBN 0-7803-2742-X.
- [162] P. Vary. *Nachrichtensysteme*. Vorlesungsmanuskript, Lehrstuhl und Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung, RWTH Aachen, Muffeter Weg 3, 52074 Aachen, 1993.
- [163] P. Vary. *Mobile Kommunikationssysteme*. Vorlesungsmanuskript, Lehrstuhl und Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung, RWTH Aachen, Muffeter Weg 3, 52074 Aachen, 1996.

- [164] Verilog S. A., 150, Rue Nicolas Vauquelin, BP 1310, 31106 Toulouse CEDEX, Frankreich. *Object Geode Reference Manual*, 1995.
- [165] B. J. Vickers, T. Suda. *Some Measured Characteristics of Data and Voice Traffic: A Brief Survey*. Dept. of Computer Science, University of California, Irvine, September 1994. Technical report.
- [166] Fuhrman W., V. Brass. *Performance Aspects of the GSM Radio Subsystem*. Proceedings of the IEEE, Band 82, Nr. 9, pp. 1449–1466, September 1994.
- [167] B. Walke. *Realzeitrechner-Modelle*. Oldenburg-Verlag, München; Wien, 1978. ISBN 3-486-21551-5.
- [168] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie — Teil 1: Dienste und Protokolle digitaler Kommunikationsnetze*. Vorlesungsmanuskript, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstraße 16, D-52074 Aachen, 1996.
- [169] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle — Teil 1*. Vorlesungsmanuskript, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Kopernikusstraße 16, D-52074 Aachen, 1997.
- [170] B. Walke, et al. *The Performance of CELLPAC: A Packet Radio Protocol Proposed for the GSM Mobile Radio Network*. In *Tagungsband der MRC '91 (Mobile Radio Conference)*, pp. 57–63, Nizza, Frankreich, November 1991.
- [171] F. Weidelich. *GSM-Rail löst Funkwirrwarr ab*. VDI-Nachrichten, Nr. 5, pp. 19, Februar 1997.
- [172] C. Wietfeld. *Mobilfunksysteme für die europäische Verkehrsleittechnik – Leistungsanalyse des CEN-DSRC-Standards*. Band 11 von *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (Hrsg: Prof. Dr.-Ing. B. Walke)*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1997. Dissertation, RWTH Aachen.
- [173] N. Wirth. *Compilerbau - Eine Einführung*. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 3. überarb. und erw. Auflage, 1984. ISBN 3-519-22338-4.
- [174] ITU-T SG XI. *ITU-T Empfehlung V.110: Support of Data Terminal Equipments with V-series Type Interfaces by an Integrated Services Digital Network*. Technischer bericht, Internationale Fernmeldeunion - Bereich Telekommunikation, Genf, Schweiz, März 1992.

Abkürzungen

A

ADT	<i>Abstract Data Type</i> Abstrakter Datentyp
AGCH	<i>Access Grant Channel</i> Zuteilungskanal für den Verbindungsaufbau
ASCI	<i>Advanced Speech Call Items</i> Erweiterte Sprachdienste der GSM Phase 2+
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i> Wiederanforderungsmechanismus
ATM	<i>Asynchronous Transfer Modus</i> Asynchroner Übertragungsmodus
AuC	<i>Authentication Centre</i> Authentifizierungszentrale

B

BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i> Verteilsteuerkanal für Orientierungsinformation
BCS	<i>Block Check Sequence</i> Blockprüfsumme
BER	<i>Bit Error Rate</i> Bitfehlerrate
BS	<i>Base Station</i> Feststation
BSC	<i>Base Station Controller</i> Feststation-Steuerung
BSIC	<i>Base Station Identify Code</i> Farbcode zur Unterscheidung von Basisstationen
BSS	<i>Base Station Subsystem</i> Feststation-System
BSSAP	<i>BSS Application Part</i>
BSSGP	<i>BSS GPRS Protocol</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> Funkfeststation: Sende-/Empfangseinrichtung einer BS

C

CBCH	<i>Cell Broadcast Channel</i> Rundfunkkanal
CCCH	<i>Common Control Channel</i> Allgemeiner Steuerkanal
CCH	<i>Control Channel</i> Steuerkanal zur Übertragung von Signalisierdaten
CCITT	Comité Consultatif International des Télégraphique et Téléphonique Internationales Standardsierungsgremium für Telegrafie und Telefonie ¹
CELLPAC	<i>CELLular PACKET</i> Zugriffsprotokoll
CEP	<i>Connection EndPoint</i> Verbindungszugangspunkt
CEPI	<i>Connection EndPoint Identifier</i> Verbindungszugangspunkt-Kennung
CEPT	<i>Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications</i> Standardisierungsgremium der europäischen Postverwaltungen
CIR	<i>Carrier to Interferer Ratio</i> Verhältnis zwischen Trägersignal und Störsignal beim Empfänger
CKSN	<i>Cyphering Key Sequence Number</i> Verschlüsselungssequenz
CM	<i>Call Management</i> Verbindungsverwaltung
CLNP	<i>ConnectionLess Network Protocol</i> Verbindungsloses Vermittlungsschichtprotokoll
CLNS	<i>ConnectionLess Network Service</i> Verbindungsloser Vermittlungsschichtdienst
CNCL	<i>Communication Networks Class Library</i> C++-Klassenbibliothek des Lehrstuhls Kommunikationsnetze
CONP	<i>Connection Oriented Network Protocol</i> Verbindungsorientiertes Vermittlungsschichtprotokoll
CONS	<i>Connection Oriented Network Service</i> Verbindungsorientierter Vermittlungsschichtdienst
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> Zyklischer Redundanzprüfalgorithmus
CRX	<i>Continous Receive</i> Kontinuierlicher Empfangsmodus
CS	<i>Circuit Switched GSM Service</i> Leitungsvermittelter GSM-Dienst
CSPDN	<i>Circuit Switched Public Data Network</i> Leitungsvermittelltes öffentliches Datennetz

¹Die CCITT wird seit Nov. 92 als ITU-T bezeichnet

D

DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i> Dedizierter Steuerkanal
DCS 1800	<i>Digital Cellular System at 1800 MHz</i> GSM-Standard im 1800 MHz-Frequenzbereich
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i> ² Europäischer Standard für schnurlose Telefonie
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> Netzmanagementprotokoll der Internet-Protokollfamilie
DL	<i>Downlink</i> Senderichtung Basisstation → Mobilstation
DLL	<i>Data Link control Layer</i> Sicherungsschicht
DNIC	<i>Data Network Identification Code</i> Code zur Identifikation eines Datennetzes
DRX	<i>Discontinuous Receive</i> Diskontinuierlicher Empfangsmodus
DSF	<i>Downlink Status Flag</i> Steuerbit auf dem Downlink
DTX	<i>Discontinuous Transmission</i> Modus zur Diskontinuierlichen Sprachübertragung

E

EIR	<i>Equipment Identity Register</i> Geräteidentifikationsregister
EMLLP	<i>Enhanced Multi-Level Link Precedence</i> Prioritätenschema aus dem ISDN
ETS	<i>European Telecommunication Standard</i> Europäischer Telekommunikationsstandard
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation

F

FACCH	<i>Fast Associated Control Channel</i> Schneller beigeordneter Steuerkanal
FAD	<i>Frame Access Delay</i> Rahmenzugriffszeit
FCCH	<i>Frequency Correction Channel</i> Frequenzkorrektur-Steuerkanal
FCS	<i>Frame Check Sequence</i> Rahmenprüfsumme
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i> Frequenzvielfach

²Seit 1996 steht DECT nicht mehr für *Digital European Cordless Telecommunications*

FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> Frequenzvielfach-Zugriffsverfahren
FEC	<i>Forward Error Correction</i> Vorwärtsfehlerkorrektur
FPLMTS	<i>Future Public Land Mobile Telecommunication Systems</i> Mobilfunksystem der 3. Generation
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> Dateiübertragungsprotokoll der Internet Protokollfamilie
FUNET	<i>Finnish University and Research Network</i> Finnisches Universitäts- und Forschungsnetz

G

GGSN	<i>Gateway GSN</i>
GIST	<i>Graphical Interactive Simulation result Tool</i> Tool zur dynamischen Visualisierung von Simulationsergebnissen
GL2R	<i>GPRS Layer 2 Relay Protocol</i> GPRS Schicht-2-Brückenfunktion
GMSC	<i>Gateway MSC</i> Mobilvermittlung, Schnittstelle zum Festnetz
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i> Modulationsverfahren im GSM-Mobilfunksystem
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> Phase 2+ Paketfunkdienst des GSM
GPRS-AP	<i>GPRS Access Point</i> GPRS Dienstzugangspunkt
GR	<i>GPRS Register</i> Datenbank, in der GPRS-spezifische Daten verwaltet werden
GRLP	<i>GPRS Radio Link Protocol</i> GPRS Schicht 2 Protokoll an der Funk-Schnittstelle
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> Europäischer Mobilfunkstandard der ETSI; ursprgl: <i>Groupe Spécial Mobile</i>
GSM 900	<i>Global System for Mobile Communications at 900MHz</i> Der GSM-Standard im 900 MHz-Frequenzbereich
GSN	<i>GPRS Support Node</i> GPRS Netzknoten zwischen dem BSS und GGSN
GTP	<i>GPRS Tunnel Protocol</i> GPRS Tunnel Protokoll

H

HDLC	<i>High-level Data Link Control</i> Sicherungsschichtprotokoll (Codeunabhängige Leitungssteuerung)
HLR	<i>Home Location Register</i> Heimatdatei des GSM
HSCSD	<i>High Speed Circuit Switched Data</i> Hoch-bitratiger kanalvermittelter GSM Phase 2+ Datendienst

I

IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i> Gremium zur Entwicklung von Internet Standards
IMSI	<i>International Mobile Station Identifier</i> Internationale Nummer zur Identifikation einer Mobilstation
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i> Diensteintegrierendes digitales Nachrichtennetz
IP	<i>Internet Protocol</i> Internet Vermittlungsschichtprotokoll
ISO	<i>International Organisation for Standardization</i> Internationale Organisation für Normen
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> Internationale Fernmeldeunion
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication standardisation sector</i> Internationale Fernmeldeunion - Bereich für Telekommunikationsstandardisierung
IWF	<i>Interworking Function</i> GSM-Netzübergangsfunktion

L

LAP	<i>Link Access Procedure</i> Leitungszugangsverfahren
LAPD	<i>Link Access Procedure on the D-channel</i> Leitungszugangsverfahren auf dem D-Kanal des ISDN
LAPD_m	<i>Link Access Procedure on the D_m-channel</i> Leitungszugangsverfahren auf dem D _m -Kanal des GSM
LAPF	<i>Link Access Procedure</i> Leitungszugangsverfahren für den ISDN-FMBS
LAPF_m	<i>Link Access Procedure</i> Leitungszugangsverfahren für den GSM-FMBS
LLC	<i>Logical Link Control</i> Logische Verbindungssteuerung
LRE	<i>Limited Relative Error</i> Statistisches Auswerteverfahren

M

MAC	<i>Medium Access Control</i> Medienzugriffskontrolle
MPDCH	<i>Master PDCH</i> Steuerkanal im GPRS
MM	<i>Mobility Management</i> Mobilitätsverwaltung
MS	<i>Mobile Station</i> Mobilstation

MSC	<i>Mobile-services Switching Centre</i> Mobilvermittlungsstelle
MSC	<i>Message Sequence Chart</i> Informationsflußdiagramm
MSDRA	<i>Master/Slave Dynamic Rate Access</i> Medienzugriffsprotokoll im GPRS
MSISDN	<i>Mobile Station ISDN Number</i> ISDN-Nummer einer Mobilstation
MSRN	<i>Mobile Station Roaming Number</i> Roaming-Nummer einer Mobilstation
MTP	<i>Message Transfer Part</i> Nachrichtentransferteil

N

NCH	<i>Notification Channel</i> Benachrichtigungskanal in den ASCI
NOACSU	<i>Non-Off-Air-Call-Set-Up</i> GSM-Verbindungsaufbaustrategie
NSS	<i>Network Subsystem</i> Vermittlungs-Teilsystem

O

OACSU	<i>Off-Air-Call-Set-Up</i> GSM-Verbindungsaufbaustrategie
OMC	<i>Operation and Maintenance Centre</i> Betriebs- und Wartungszentrale
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> Standard zur Kommunikation offener Systeme

P

PACCH	<i>Packet Associated Control Channel</i> Beigeordneter Paket-Daten-Steuerkanal
PAGCH	<i>Packet Access Grant Channel</i> Steuerkanal im GPRS
PBCCH	<i>Packet Broadcast Channel</i> Rundfunk-Steuerkanal im GPRS
PC	<i>Power Control</i> Sende- u. Empfangsleistungskontrolle
PCCCH	<i>Packet Common Control Channel</i> Allgemeiner Steuerkanal im GPRS
PCH	<i>Paging Channel</i> Aufrufkanal für Verbindungsaufbau Festnetz → Mobilstation
PDB	<i>Packet Data Broadcast</i> Rundfunk-Datenkanal im GPRS
PDCH	<i>Packet Data Channel</i> Allgemeine Bez. de PAKetdatenkanäle im GPRS

PDN	<i>Packet Data Network</i> Paketdatennetz
PDP	<i>Packet Data Protocol</i> Protokoll zur Übertragung von Paketdaten
PDS	<i>Packet Data on Signalling channels service</i> GSM Phase 2+ Paketdatendienst
PDTCH	<i>Packet Data Transfer Channel</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> Protokolldateneinheit
PHL	<i>PHysical Layer</i> Physikalische Schicht
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i> Öffentliches Mobilfunknetz
PPCH	<i>Packet Paging Channel</i> Funkrufkanal im GPRS
PRACH	<i>Packet Random Access Channel</i> Zufallszugriffskanal im GPRS
PSPDN	<i>Packet Switched Public Data Network</i> Öffentliches Paketdatennetz
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i> Öffentliches Telefonnetz
PTCH	<i>Packet Transfer Channel</i> Logischer Kanal zur Übertragung von Paketdaten
PTM	<i>Point to Multipoint</i> Mehrpunktkommunikation
PTM-B	<i>PTM Broadcast</i> Mehrpunktkommunikation im Rundfunk-Modus
PTM-G	<i>PTM Group Call</i> Mehrpunktkommunikation in Gruppen-Modus
PTP	<i>Point to Point</i> Punkt-zu-Punkt-Kommunikation

Q

QoS	<i>Quality of Service</i> Dienstgüte
------------	---

R

RACH	<i>Random Access Channel</i> Zufallszugriffskanal
RBER	<i>Residual Bit Error Rate</i> Restbitfehlerrate
RF	<i>Radio Frequency</i> Funkfrequenz
RLC	<i>Radio Link Control</i> Funkverbindungskontrolle

RLP	<i>Radio Link Protocol</i> Sicherungsprotokoll an der GSM-Funk-Schnittstelle
RM	<i>Radio Resource Management</i> Funkbetriebsmittelverwaltung

S

SACCH	<i>Slow Associated Control Channel</i> Beigeordneter GSM-Steuerkanal
SAP	<i>Service Access Point</i> Dienstzugangspunkt
SAPI	<i>Service Access Point Identifier</i> Nummmer zur Kennzeichnung eines Dienstzugangspunktes
SCH	<i>Synchronisation Channel</i> GSM-Steuerkanal zur Synchronisierung
SDCCH	<i>Stand-alone Dedicated Control Channel</i> Dedizierter GSM-Steuerkanal
SDL	<i>Specification and Description Language</i> Formale Spezifikations- und Beschreibungssprache der ITU
SDL-GR	<i>SDL Graphical Representation</i> Grafische Darstellungsform von SDL
SDL-PR	<i>SDL Phrase Representation</i> Textuelle Darstellungsform von SDL
SDT	<i>SDL Design Tool</i> CASE Wekrzeug zum Entwurf und Simulation von SDL Spezifikationen
SDU	<i>Service Data Unit</i> Dienstdatenprotokolleinheit
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i> Teilnehmeridentifikationsmodul
SGSN	<i>Serving GSN</i> Dienstunterstützender GPRS-Netzknoten
SMS	Short Message Service Kurznachrichtendienst des GSM
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i> Internet Protokoll zur Übermittlung von e-Mail:
SNDCP	<i>SubNetwork Dependent Control Protocol</i> Vermittlungsteilschicht zur Anpassung verschiedener Vermittlungsschichtprotokolle
SPDCH	<i>Slave PDCH</i> Bezeichnung der Paketdatenkanäle zur Teilnehmerdatenübertragung
SREJ	<i>Selective Reject</i> Wiederanforderungsverfahren
SS	<i>Supplementary Services</i> GSM-Zusatzdienst
SS7	<i>Signalling System No. 7</i> Signalisierungsstandard für Telekommunikationsnetze

T

TA	<i>Timing Advance</i> Wert zur Synch. des Rahmen- bzw. Bittaktes
TAF	<i>Terminal Adaptation Function</i> Anpassungsfunktion in der Mobilstation
TCAP	Transaction Capabilities Application Part Transaktionsabwicklungsteil
TCH	<i>Traffic Channel</i> GSM-Verkehrskanal
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> Zeitvielfach
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> Zeitvielfach-Zugriffsverfahren
TFI	<i>Temporary Frame Identity</i> Temporäre Kennung einer LLC-PDU im GPRS
TLLI	<i>Temporary Logical Link Identity</i> Temporäre Kennung einer logischen Verbindung
TMSI	<i>Temporary Mobile Station Identity</i> Temporäre Kennung einer MS
TRAU	<i>Transcoder and Rate Adaptor Unit</i> Einheit zur Ratenadaption im GSM

U

UL	<i>Uplink</i> Senderichtung Mobilstation → Basisstation
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> Europäisches Mobilfunksystem der 3. Generation
USF	<i>Uplink Status Flag</i> Status Flag zur Kanalvergabe

V

VAD	<i>Voice Activity Detection</i> Sprachaktivitätserkennung
VBS	<i>Voice Broadcast Call Service</i> Rundsende-Sprachdienst
VEA	<i>Very Early Assignment</i> GSM-Verbindungsaufbaustrategie
VGCS	<i>Voice Group Call Service</i> Gruppenruf-Sprachdienst
VLR	<i>Visitor Location Register</i> GSM-Besucherdatei
VRRA	<i>Variable Rate Reservation Access</i>

Das Simulationswerkzeug SPEET

Das Simulationswerkzeug SPEET besteht aus folgenden Komponenten:

- Lastgenerator
- Simulationssteuerung
- Auswertungsmodul

Der Lastgenerator dient als Lastquelle und Lastsenke. Die Simulationssteuerung sorgt für die zeitliche Synchronisation aller Teilsysteme, und mit dem Auswertungsmodul ist eine statistische Auswertung der betrachteten Simulationsvariablen möglich. Die einzelnen Moduln sind unter dem Betriebssystem UNIX in C entwickelt worden und basieren auf der grafischen Benutzerschnittstelle X-Windows/Motif, so daß der Benutzer während eines Simulationslaufs Befehle eingeben kann, um ein Kommunikationsprotokoll unter dynamischen Verkehrslasten zu untersuchen.

B.0.6 Die Simulationssteuerung *SimCtrl*

Grundvoraussetzung für eine Simulation mehrerer SDL-Systeme ist die zeitliche Synchronisation aller beteiligten Prozesse. Die in SPEET als Teil der Simulationssteuerung bereitgestellte Simulationsuhr *SimClock* verwaltet für alle Prozesse eine gemeinsame Simulationszeit. Diese Simulationszeit wird in diskreten Schritten mit einer minimalen Granularität von 1 ms hochgezählt.

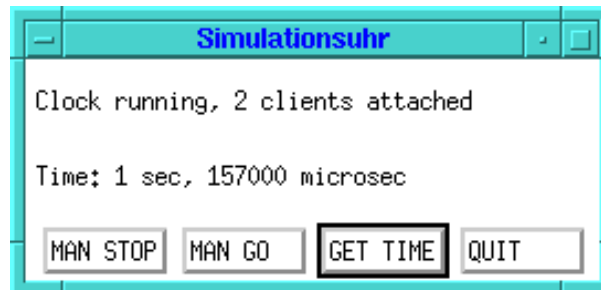


Abbildung B.1: Die Simulationsuhr *SimClock*

Beim Start der an der Simulation beteiligten Prozesse wird die Simulationszeit von der Simulationsuhr gesetzt. Es wird gewartet, bis alle Systeme miteinander über Unix-Sockets verbunden sind, erst dann setzt die Simulationsuhr die Simulationszeit um einen Zeitschritt hoch.

Damit die Simulationszeit fortschreiten kann, müssen alle Transitionen in den Prozessen abgearbeitet sein. Hat ein Prozeß alle Aktionen ausgeführt, schickt er ein Signal an die Simulationsuhr. Dieses Signal teilt der Simulationsuhr mit, daß ein Prozeß alle Signale aus der Eingabewarteschlange abgearbeitet hat. Liegt wieder ein Signal in der Eingabewarteschlange eines Prozesses an, versendet dieser ein weiteres Signal, das der Simulationsuhr

anzeigt, daß sich ein Prozeß in einer Transition befindet. Die Simulationsuhr verwaltet intern diese Signale der Prozesse und erhöht die Simulationszeit erst dann, wenn die Anzahl der Signale zum Verweilen in der Simulationszeit gleich der Anzahl der Signale zum Fortlaufen der Simulationszeit ist.

Die jeweils aktuelle Simulationszeit schreibt die Simulationsuhr in den Arbeitsspeicher. Auf diesen Speicherbereich können alle beteiligten Prozesse lesend zugreifen. Damit besteht die Möglichkeit, in jedem der Prozesse zur Protokollierung der Messungen auf die aktuelle Simulationszeit zuzugreifen.

Durch dieses Prinzip vergeht während der Abarbeitung von Eingangssignalen durch die Prozesse keine Zeit. Damit ist die Unabhängigkeit der Simulationen von der jeweiligen Rechnerlast gegeben.

B.0.7 Der Lastgenerator *MultiGen*

Der Lastgenerator *MultiGen* dient während eines Simulationslaufes als Lastquelle und als Lastsenke. Er besteht im wesentlichen aus vier Basisgeneratoren und einer grafischen Benutzeroberfläche, die eine Visualisierung der Zustandsdaten erlaubt. Abbildung B.2 zeigt den Lastgenerator mit einigen Popup-Menüs.

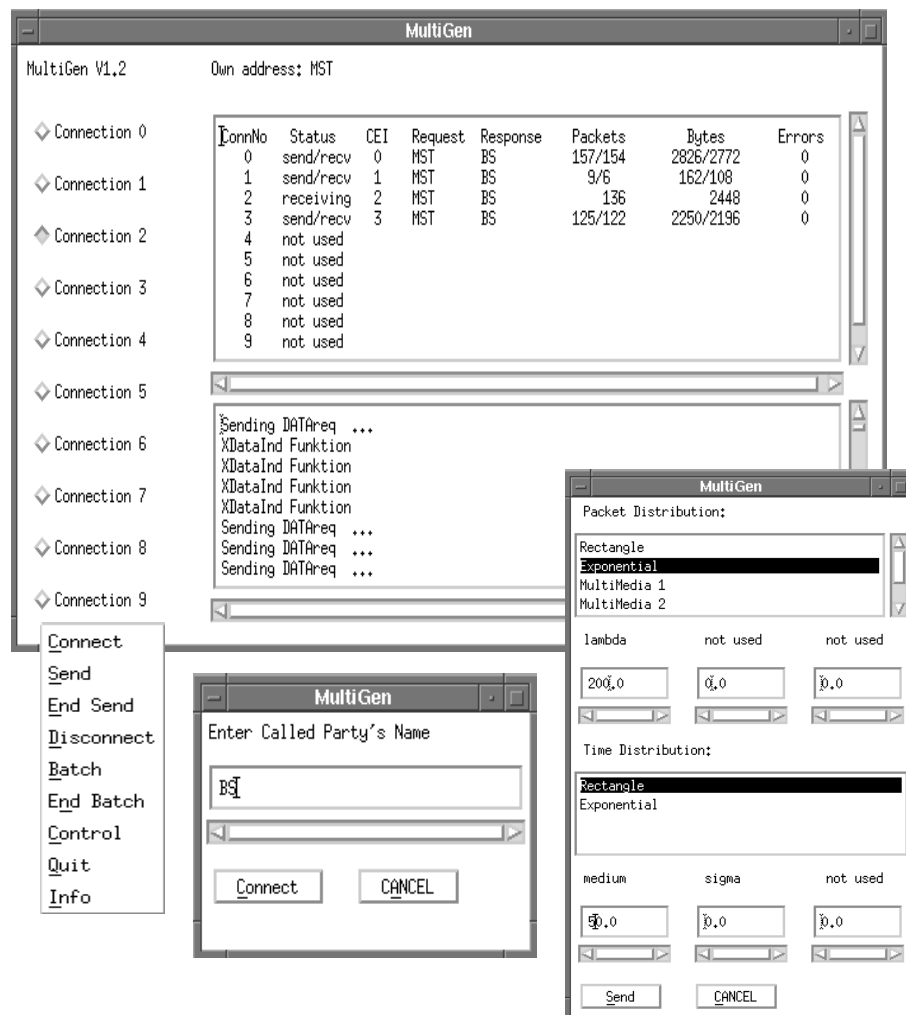


Abbildung B.2: Der Lastgenerator *MultiGen* mit einigen Popup-Menüs

Die Kommunikation mit dem SDL-System bzw. der Partnerinstanz erfolgt über Dienstprimitive gemäß dem ISO/OSI-Referenzmodell. Zum Verbindungsaufbau stehen z.B. die Primitive *CONNECTreq/ind/rsp/con* zur Verfügung. Neben der Angabe des gewünschten Kommunikationspartners besteht die Möglichkeit, für die Simulation relevante Parameter an das SDL-System zu übergeben.

Die Basisgeneratoren unterscheiden sich bezüglich der Längen der zu generierenden Protokolldateneinheiten und der Zwischenankunftszeit. Zur Beschreibung des Ankunftsprozesses Generierung stehen, wie in Abbildung B.2 zu sehen ist, verschiedene Verteilungsfunktionen zur Auswahl. Ebenfalls festgelegt werden kann die Verteilungsfunktion für den Bedienprozeß.

B.0.8 Das Modul zur statistischen Auswertung *SimEval*

Das Modul *SimEval* stellt drei statistische Auswertungsverfahren zur Verfügung:

- LRE 1 (*Limited Relative Error with Correlated Random Sequences*)
- LRE 2 (*Limited Relative Error with Uncorrelated Random Sequences*)
- Batch-Means [75]

Die beiden LRE-Verfahren basieren auf [132] bzw. [133] zur Bestimmung der Verteilungsfunktion korrelierter bzw. beliebiger Zufallssequenzen.

Die an einer Simulation beteiligten Anwendungen können Meßwerte unter Angabe der Meßgröße und der Ausgangsparameter des gewünschten Verfahrens, wie z.B. maximaler relativer Fehler oder Größe des Konfidenzintervalls, während des Simulationslaufes an das Auswertemodul übergeben. Zur eindeutigen Kennzeichnung wird zu Anfang der Simulation im Zuge einer Registrierungsprozedur jeder Meßgröße eine Referenznummer zugewiesen. Die grafische Darstellung der statistisch ermittelten Kenngrößen erfolgt anhand zweier Methoden der CNCL-Bibliothek (*draw_lre* und *draw_btm*), die in das Auswertemodul integriert wurden.

Übersicht über die GPRS-Standards

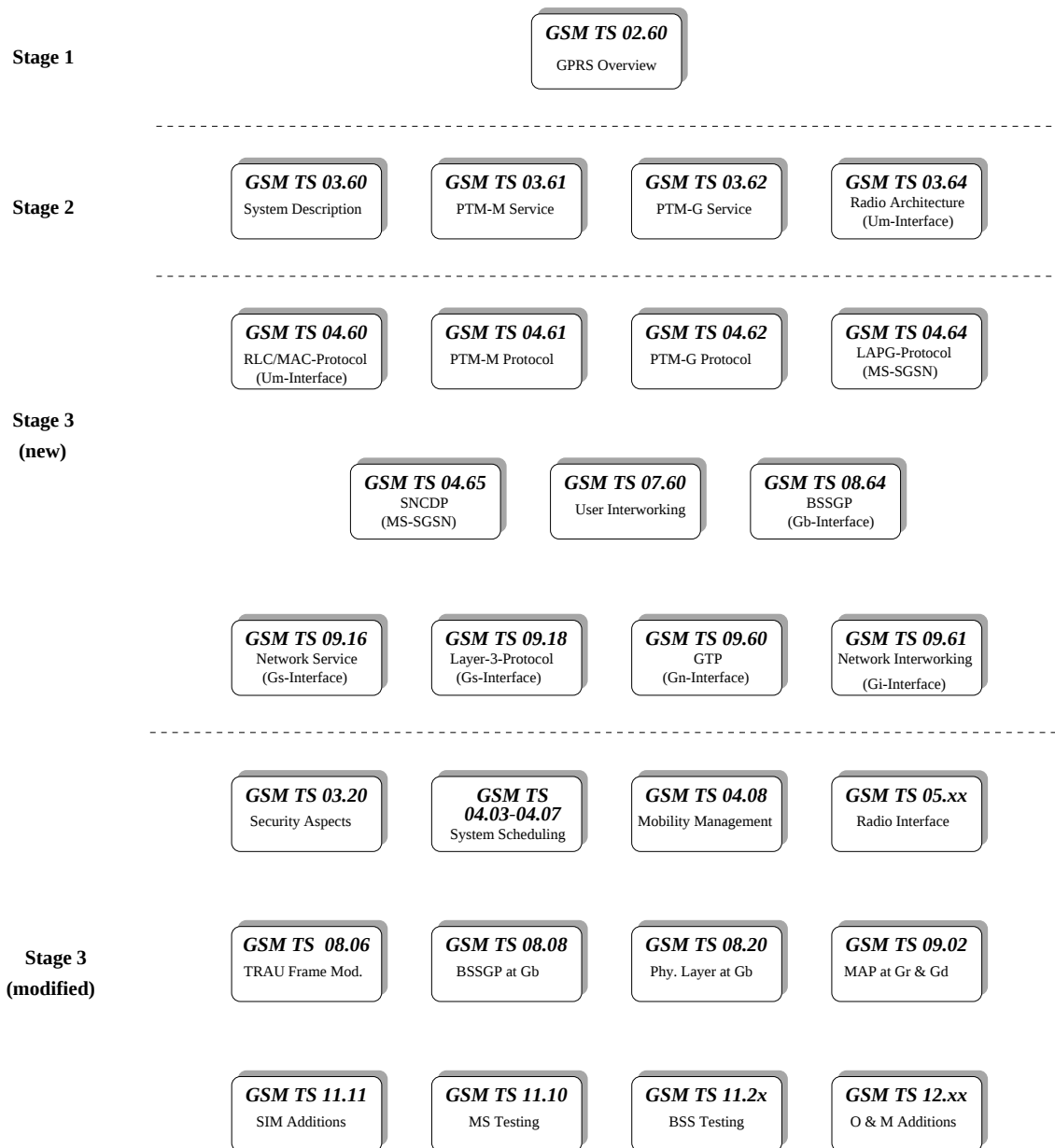


Abbildung C.1: Überblick über die GPRS-Standards