Summary

Today's information society can be characterised by a wide range of information and an active communication. Information and the exchange of information has become one of the most dominating factors of today's life, both in social and economic ways.

Three technologies become important to fulfil the request of information and communication: fibre-optic communication, mobile and wireless communication and the world-wide information network, (Internet). With these technologies, nearly everyone in the industrialized world can communicate everywhere to everyone. Increasing importance can be seen with another technology, voice communication over data networks, mainly over IP based packet networks (IP Telephony). To fulfil future needs of customers, communication service providers should offer new services as combinations of these technologies. This is at first data communication over wireless connections to and from the Internet with a wide range of bandwidth requirements, and, secondly, IP based communication with available end-to-end Quality of Service (QoS) features over wireless connections.

Due to the limited availability of frequencies on the air interface for wireless connections, the air interface becomes the most limiting factor of communication networks. To deal economically with this limitation, new technologies are needed to use the available frequencies most efficiently.

Today in most wireless voice communication networks like the GSM based networks, a voice connection (call) allocates two channels on the air interface. One channel for up-link and one for down-link is allocated during the whole duration of the communication. Enquiries of human behavior during voice calls show, that most time only one participant talks, while the other listens. So during large periods of the voice call, one communication channel would be sufficient. With a proper detection of silent phases of voice calls and a fast and efficient on-demand allocation of communication channels, more information can be transmitted over the air interface.

To provide IP based connections with end-to-end QoS features over wireless links, an end-to-end IP connection should be available to use standardised QoS protocols of the IP family. To ensure the functional efficiency of the QoS features and to use the air interface efficiently despite large data packet headers, the whole communication network (wireless and wire-bound part) has to be adapted to these needs.

The aim of this thesis is twofold: first the presentation of a wireless network which fulfils the above mentioned features. And second the analytic and simulative studies evaluating the functional efficiency and the capability of the presented network.

Chapter 1 presents the motivation and aim of this thesis and gives a short introduction of the developed network. The technical environment of wireless and wire-bound telecommunication networks is introduced in Chapter 2. After the characterisation of different network aspects and a short description, how speech coding can be done, the Integrated Services Digital Network (ISDN) is presented. Then, the various layers and protocols of the IP protocol family, the protocols of IP telephony, QoS protocols and architectures for IP based networks are described.

The introduction of the Global System for Mobile Communications (GSM), together with the extension for packet based wireless data communication (General Packet Radio Service, GPRS) is the topic of Chapter 3. At first, the basic principles of this cellular wireless communication network architecture are presented. Later, the physical and logical channels of the air interface are introduced. The chapter closes with the presentation of the network and air interface management functions and a brief description of difficulties with wave propagation. Chapter 4 shows some related works of other researchers on the topic of efficient wireless networks.

The network designed in this thesis, the “All-IP Mobile Communication Network”, is described in detail in Chapter 5. It starts with the basic elements of the All-IP Mobile Communication Network and introduces all major aspects of the design. This includes a proper way of coding speech, parameterisation of GPRS coding schemes, the transmission of voice- and data-packets over the air interface, the administration of communication links and how end-to-end QoS features for IP based services are handled.

Chapter 6 is dedicated to the evaluation and parameterisation of the All-IP Mobile Communication Network. At first, the methodology of the simulative evaluation and the modelling of the All-IP Mobile Communication Network are presented. It is explained, how the different sorts of traffic in the network (e.g. voice, WWW-data) are modelled and how the different parts of the network are represented in the model. The evaluation includes diagrams about the delay of voice packets and the transmission rate of packets depending on the quality of the air interfaces. In addition, it shows how well the QoS features are served and how savings of resources at the air interface are achieved in contrast to the existing mobile network (GSM/GPRS). So, for example, with an assumed traffic mix with 70% voice traffic, a saving of over 50% on the number of air ressources can be achieved while serving the same given number of connections. Also, some parameters of the GSM and GPRS protocols are derived.

Chapter 7 summarises the thesis and gives an outlook for further studies.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

8-PSK . . . . Eight Phase Shift Keying
AAL . . . . ATM Adaptation Layer
ABQP . . . . Aggregate BSS QoS Profile
ACELP . . . . Algebraic CELP
ADPCM . . . . Adaptive Differential Pulse Code Modulation
AMR . . . . Adaptive Multi-Rate
ARFCN . . . . Absolute Radio Frequency Channel Number
ARP . . . . Address Resolution Protocol
ARPA . . . . Advanced Research Projects Agency
ARPANET . . . . Advanced Research Projects Agency Network
ARQ . . . . Automatic Request for Retransmission
ATM . . . . Asynchronous Transfer Mode
AUC . . . . Authentication Centre
AVT . . . . Audio/Video Transport Group
BCS . . . . Block Check Sequence
BEC . . . . Backward Error Correction
BLER . . . . Block Error Rate
BSC . . . . Base Station Controller
BSIC . . . . Base Transceiver Station Identity Code
BSS . . . . Base Station System
BSSGP . . . . BSS GPRS Protocol
BTS . . . . Base Transceiver Station
C/I . . . . Carrier to Interference (Ratio)
CCCH . . . . Common Control Channel
CELP . . . . Code-Excited Linear Prediction
CEPT . . . . Conference Européenne des Administration des Postes et des Télécommunications
CGF . . . . Charging Gateway Functionality
CS . . . . Coding Scheme
CTS . . . . Cordless Telephony System
DARPA . . . . Defense Advanced Research Projects Agency
DCS1800 . . . . . . Digital Cellular System 1800
DCS1900 . . . . . . Digital Cellular System 1900
DECT . . . . Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DIFFSERV . . . . . . Differentiated Services

DNS . . . . Domain Name System
DPCM . . . . Differential Pulse Code Modulation
DSCP . . . . Differentiated Service Codepoint
E-DSS1 . . . . Euro Digital Subscriber Signalling System No.1
EGPRS . . . . Enhanced GPRS
EIR . . . . Equipment Identity Register
ETSI . . . . European Telecommunications Standards Institute
FCCH . . . . Frequency Correction Channel
FDMA . . . . Frequency Division Multiple Access
FEC . . . . Forward Error Correction
FEC . . . . Front-End Clipping
FTP . . . . File Transfer Protocol
GERAN . . . . GSM EDGE Radio Access Network
GGSN . . . . Gateway GPRS Support Node
GK . . . . Gatekeeper
GMSK . . . . Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS . . . . General Packet Radio Service
GSM . . . . Global System for Mobile Communications
GSM . . . . Groupe Spéciale Mobile
GSN . . . . GPRS Support Node
GTP . . . . GPRS Tunneling Protocol
HLR . . . . Home Location Register
HSCSD . . . . High-Speed Circuit-Switched Data
HSN . . . . Hopping Sequence (Generator) Number
HTTP . . . . Hypertext Transfer Protocol
HVXC . . . . Harmonic Vector Excitation Coding
IA . . . . Implementation Agreement
ICMP . . . . Internet Control Message Protocol
IE . . . . Information Element
IETF . . . . Internet Engineering Task Force
IMSI . . . . International Mobile Subscriber Identity
IMT 2000 . . . . . International Mobile Telecommunications 2000
INMARSAT . . . International Maritime Satellite Organization
INTSERV . . . . Integrated Services
IP . . . . Internet Protocol
IPSS7G IP-SS7-Gateway
IPTELG . . . . IP-Telefony-Gateway
IS . . . . Interim Standard (Telecommunications Industry Association)
ISDN . . . . Integrated Services Digital Network
ITU . . . . International Telecommunication Union
LA . . . . Location Area
LLC . . . . Logical Link Control
LPC . . . . Linear Predictive Coding
MA . . . . Mobile (Radio Frequency Channel (RFCH)) Allocation

MAC .... Medium Access Control
MAIO .... Mobile Allocation Index Offset
MAP .... Mobile Application Part
MCU .... Multipoint Control Unit
MELP .... Mixed Excitation Linear Prediction
MOS .... Mean Opinion Score
MPLS .... Multiprotocol Label Switching
MSC .... Mobile Switching Centre
MSK .... Minimum Shift Keying
MTP .... Message Transfer Part
NS .... Network Service
NSAPI .... Network Layer Service Access Point Identifier
NSS .... Network Subsystem
OMAP .... Operation, Maintenance and Administration Part
OSP .... Octet Stream Protocol
OSS .... Operation Subsystem
PACCH........ Packet Associated Control Channel
PACH .... Packet Access Channel
PAGCH .... Packet Access Grant Channel
PBCCH .... Packet Broadcast Control Channel
PCM .... Pulse Code Modulation
PCU .... Packet Control Unit
PDP .... Packet Data Protocol
PDTCH .... Packet Data Traffic Channel
PDU........... Protocol Data Unit
PFC .... Packet Flow Context
PFI............ Packet Flow Identifier
PHB .... Per-Hop Behavior
PHS .... Personal Handyphone Service
PNCH .... Packet Notification Channel
PPCH .... Packet Paging Channel
PPCH .... Packet Polling Channel
PPP .... Point-to-Point Protocol
PPTP.......... Point to Point Tunneling Protocol
PRACH .... Packet Random Access Channel
PSTN .... Public Switched Telephone Network
PTCCH........ Packet Timing Advance Control Channel
PTM .... Point-to-Multipoint
QoS .... Quality of Service
RA .... Routeing Area
RAS .... Registration, Admission and Status
RELP .... Residual Excited Linear Prediction
RFCH .... Radio Frequency Channel
RLC .... Radio Link Control

ROCCO .... Robust Checksum-based Header Compression
ROHC .... Robust Header Compression
RPE-LPC ...... Regular Pulse Excitation - Linear Predictive Coding
RPE-LTP ...... Regular Pulse Excitation - Long Term Prediction
RSS .... Radio Subsystem
RSVP .... Resource Reservation Protocol
RTCP .... Real-Time Transport Control Protocol
RTP .... Real-Time Transport Protocol
SAP .... Service Access Point
SCCP .... Signalling Connection Control Part
SCH .... Synchronization Channel
SCTP .... Stream Control Transmission Protocol
SDU .... Service Data Unit
SFH .... Slow Frequency Hopping
SGSN .... Serving GPRS Support Node
SIP .... Session Initiation Protocol
SLA .... Service Level Agreement
SNDCP .... Subnetwork Dependent Convergence Protocol
SNR .... Signal to Noise Ratio
SS7 .... Signalling System No. 7
SSCOPMCE ... Service Specific Connection Oriented Protocol in a Multi-link and Connectionless Environment
TBF .... Temporary Block Flow
TCA .... Traffic Conditioning Agreement
TCAP .... Transaction Capabilities Application Part
TCP .... Transmission Control Protocol
TDMA .... Time Division Multiple Access
TFI .... Temporary Flow Identity
TG .... Telefonie-Gateway
TID .... Tunnel Identifier
TLLI .... Temporary Logical Link Identity
TN .... Timeslot Number
ToS .... Type of Service
TS .... Timeslot
UDP .... User Datagram Protocol
UMTS .... Universal Mobile Telecommunication System
URL .... Uniform Resource Locator
USF .... Uplink State Flag
VDF .... Verteilungsdichte-Funktion
VLR .... Visitor Location Register
VoIP .... Voice over IP
VPN .... Virtual Private Network
WG .... Working Group
WWW .... World Wide Web
XID .... Exchange Identifier

Formelzeichen und Bezeichner

$\mathcal{A}$	Auslastung des Systems
`ATL`	(`AIMF_TBF_LÄNGE`) Länge eines Temporary Block Flow (TBF) mit festem Ende
$\mathcal{B}$	Aktuell zur Verfügung stehende Übertragungsdatenrate der Funkübertragung
$\mathcal{B}_i$	Datenrate des Verkehrsstroms i
$\mathcal{B}_{i_{min}}$	Minimal einem Verkehrsstrom i zur Verfügung stehende Datenrate
$\mathcal{B}_{alt}$	Summe der Datenraten aller derzeit aktiven Datenströme
$\mathcal{B}_{neu}, \mathcal{P}_{neu}$	Datenrate und Priorität eines neuen Verkehrsstroms
$\mathcal{D}_{ij}$	Datenrate des j-ten PDP-Kontextes zum mobilen Endgerät i
$\mathcal{D}_i$	Gesamte Datenrate zum mobilen Endgerät i
$\mathcal{E}$	Anzahl mobiler Endgeräte in einer Mobilfunkzelle
$\mathcal{F}$	Größe des Radio Link Control (RLC)/Medium Access Control (MAC)-Fensters (Standardmäßig 64 RLC/MAC-Blöcke)
$\mathcal{G}$	Größe von Datenpaketen in Anzahl von Oktett (Byte)
$\mathcal{P}, \mathcal{P}_i$	Priorität eines Verkehrsstroms i
$\mathcal{P}_{\text{Sprache}}, \mathcal{P}_{\text{WWW}}, \mathcal{P}_{\text{FTP}}$	Priorität einer Verkehrsklasse (Sprache, WWW-Verkehr oder FTP-Verkehr)
$\mathcal{Q}_{ij}$	Priorität des j-ten PDP-Kontextes zum mobilen Endgerät i
$\mathcal{Q}_i$	Höchste Priorität aller PDP-Kontexte zum mobilen Endgerät i
$\mathcal{R}_i$	Rate der Flusssteuerung im Serving GPRS Support Node (SGSN) für das mobile Endgerät i
$\mathcal{R}_{\text{BSS}}$	Rate der Flusssteuerung im SGSN zum Base Station System (BSS)
$\mathcal{V}$, $\mathcal{V}_i$	Verkehrsmix
V_i	Verhältnis von zur Verfügung stehender Datenrate zur benötigten Datenrate
$\mathcal{Z}$	Anzahl der für eine Übertragung zur Verfügung stehenden Zeitschlitze (Multislot-Übertragung)
$\mathcal{Z}_s$	Anzahl der für die Übertragung von Signalisiermeldungen zum mobilen Endgerät zur Verfügung stehenden Funkkanäle
Δ	Ersparnis an Funkkanälen beim All-IP-Mobilfunknetz im Gegensatz zum Global System for Mobile Communications (GSM)

Kapitel 1 Einführung

Die heutige Gesellschaft ist geprägt durch ein fast grenzenloses Angebot an Information und eine rege Kommunikation. Die Information ist in der Informationsgesellschaft zu einem bestimmenden Faktor geworden, sowohl in wirtschaftlicher als auch in sozialer Hinsicht. Der Wunsch nach Information führt zu einem steigenden Bedarf an Kommunikation. Stetig erhöht sich das Bedürfnis immer und überall erreichbar zu sein und von überall her zu jeder Zeit alle Informationen, die nötig sind, einsehen zu können. Somit wird die „Informations- und Kommunikationstechnologie-Branche [...] die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“ [Her99].

Zwei Technologien trugen und tragen wesentlich dazu bei, die Kommunikation und den Zugriff auf Informationen zu ermöglichen oder zu erleichtern: die mobile, drahtlose Kommunikation (Mobilfunkkommunikation) und der Zugang zu weltweit verbreiteten Informationen im Internet. Durch die Verbreitung der Mobilfunkkommunikation ist es heute möglich, an nahezu jedem Ort der Welt erreichbar zu sein oder selbst mit Anderen zu kommunizieren. Unterstützt wird dies durch satellitenbasierte Kommunikation, die weltweit verfügbar ist[1], über funksenderbasierte Systeme, bei denen sich die Erreichbarkeit über mehrere Länder erstreckt[2], oder Funksysteme, die einen kleinen Bereich, z. B. ein Gebäude, abdecken[3]. Diese Systeme dienen hauptsächlich der Sprachkommunikation, auch wenn meist Datendienste in zumindest beschränktem Umfang zur Verfügung stehen. Die rasante Verbreitung der Mobilfunkkommunikation lässt sich daran sehen, dass es 1999 weltweit bereits 490 Millionen registrierte mobile Endgeräte gab, allein in Deutschland waren es 23,5 Millionen mobile Endgeräte [Int99]. Laut Presseberichten gab es in Deutschland im Jahr 2000 bereits 48 Millionen mobile Endgeräte, was einer Steigerungsrate von über 100% entspricht.

Durch das Internet, einem weltweiten Computernetz, waren zunächst hauptsächlich militärische und wissenschaftliche Einrichtungen miteinander verbunden, um einen gegenseitigen Informationsaustausch zu ermöglichen [Com91]. In den letzten Jahren rückte das Internet immer weiter in viele Bereiche des Lebens vor. Für Firmen und Institutionen ist das Internet ein Präsentationsmedium,

---

[1] International Maritime Satellite Organization (INMARSAT), Globalstar, IRIDIUM, ...

[2] GSM, Interim Standard (Telecommunications Industry Association) (IS)-95, IS-136, ...

[3] Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT), Personal Handyphone Service (PHS), GSM-Cordless Telephony System (CTS), ...

Privatpersonen suchen über das Internet Informationen oder nutzen es zur Unterhaltung. Auch Handel oder Bankgeschäfte werden über das Internet abgewickelt. Nach Pressemitteilungen von IDC gab es Ende 2000 fast 338 Millionen Internetnutzer, fast dreimal so viel wie im Jahr zuvor [Mar]. Die von den 18 Millionen im Juli 2000 in Deutschland registrierten Internetnutzern am häufigsten genutzten Dienste des Internet waren das Versenden elektronischer Nachrichten (engl.: Electronic Mail, E-Mail) und Informationsabfragen durch den Dienst World Wide Web (WWW) [GfK00].

Der Zugriff auf das Internet vom mobilen Endgerät aus ist eine neue Entwicklung in der Kommunikationstechnik. Bei diesem mobilen Zugriff ist es oft wünschenswert, dass Anwendungen ohne Änderungen und mit demselben Verhalten, wie es der Nutzer bei Anwendungen von nicht mobilen Endgeräten aus gewohnt ist, eingesetzt und angewendet werden können. Notwendig sind hierfür Möglichkeiten der schnellen Datenübertragung und eine für Anwendungen nahezu transparente Verbindung zwischen dem Internet und dem mobilen Endgerät. Die Kommunikationstechnik muss dazu die sich aus der Funkübertragung und der Mobilität der Endgeräte ergebenden Übertragungscharakteristika soweit möglich vor den Anwendungen verbergen.

Neben der klassischen, drahtgebundenen Telefonie (engl.: Public Switched Telephone Network (PSTN)) und der Mobilfunktelefonie gewinnt eine weitere Art der Kommunikation an Bedeutung: die IP-Telefonie (engl.: Voice over IP, VoIP). Diese Telefonie, d. h. das Telefonieren über IP-basierte Datennetze, wird sowohl in lokalen Netzen (Intranet) als auch über das Internet (Internet-Telefonie) eingesetzt [Unt]. Der private Zugang zum Internet steht derzeit im Vergleich zu den normalen Telefonkosten zu relativ günstigen Konditionen zur Verfügung. Die Kosten sind dabei unabhängig davon wohin die Verbindung im Internet geht. Deshalb bietet sich mit der Internet-Telefonie eine kostengünstige Möglichkeit des Telefonierens an, insbesondere für Fern- oder Auslandsgespräche [Sea96]. Auch die guten Integrationsmöglichkeiten der Internet-Telefonie in Computeranwendungen (Elektronisches Telefonbuch, Anruf aus World Wide Web (WWW)-Seiten heraus, ...) ist ein Grund warum diese Art der Telefonie immer häufiger eingesetzt wird.

1.1 Problemstellung

Entwickler neuer Kommunikationstechnologien und Betreiber von Kommunikationsnetzen müssen die zur Verfügung stehende Übertragungsrate der Funkübertragung effizient einsetzen. Nur so kann dem wachsenden Bedarf an mobiler Sprach- und Datenkommunikation entsprochen und das Kommunikationsnetz wirtschaftlich und nutzerfreundlich betrieben werden.

Bei der klassischen Telefonie wie auch bei der Mobilfunktelefonie wird für eine bidirektionale Sprachverbindung in beide Richtungen jeweils ein eigenständiger, für die Dauer der Verbindung bestehender Kanal verwendet (Sprachkanal). Untersuchungen zeigen, dass bei typischen Telefongesprächen meist nur einer der Teilnehmer spricht. Damit gibt es auf den jeweiligen Sprachkanälen der Verbindung Sprachphasen während denen Sprachinformation übertragen wird, und Ruhephasen während denen es, von Nebengeräuschen abgesehen, ruhig ist [Sau90], [Vol98]. Die Belegung eines Kanals während Ruhephasen führt zu einer Verschwendung von Ressourcen, die anderweitig genutzt werden könnten. Diese Verschwendung verursacht Kosten und kann insbesondere beim Mobilfunk zu Engpässen führen. Aufgrund staatlicher Regulierung und technischer Randbedingungen stehen nicht beliebig viele Frequenzbänder zur Verfügung. Pro Frequenzband kann nur eine begrenzte Anzahl von Sprach- und Datenkanälen realisiert werden. Dem gegenüber steht die stark ansteigende Zahl von Mobilfunkteilnehmern. Dies führt dazu, dass z. B. in Ballungsräumen oder bei Großveranstaltungen nicht genügend Sprachkanäle zur Verfügung gestellt werden können. Damit müssen Verbindungswünsche abgelehnt werden, obwohl andererseits in den Ruhephasen der Kommunikation Ressourcen zur Verfügung stünden. Diese Ablehnung von Verbindungswünschen senkt die Kundenzufriedenheit und erhöht die Kosten für Netzbetreiber und Kunden.

Durchgehende IP-Verbindungen zwischen mobilen Endgeräten und dem Internet tragen der wachsenden Bedeutung der IP-Telefonie und des mobilen Zugangs zum Internet Rechnung. Für einige Anwendungen ist es neben der Anzahl durchgehender IP-Verbindungen notwendig, bei der Übertragung Dienstgütemerkmale wie eine Untergrenze für die Übertragungsrate oder eine Obergrenze der Verzögerung anzugeben. So liegt die mangelhafte Sprachqualität der IP-Telefonie unter anderem an dem derzeit am häufigsten verwendeten Übertragungsprotokoll, der Version 4 des IP. Bei diesem Protokoll ist es nicht möglich, für bestimmte Daten Dienstgütemerkmale einzuhalten. Erst durch den Einsatz neuer Protokolle wie IP Version 6 oder dem Resource Reservation Protocol (RSVP) können diese Anforderungen von IP-basierten Netzen erfüllt werden. Die Möglichkeit, Dienstgütemerkmale für die Übertragung bestimmter Daten einzuhalten, ist nicht nur für Sprachübertragung von Interesse. Auch Anwendungen wie interaktive Multimediadienste, kooperative Spiele oder die Möglichkeit verschiedener Qualitätsstufen des Internetzugangs können davon profitieren. Sollen derartige Anwendungen von mobilen Endgeräten aus nutzbar sein, müssen auch Mobilfunknetze Dienstgütemerkmale unterstützen.

In dieser Arbeit wird ein neuer Vorschlag, das ‘All-IP-Mobilfunknetz’, vorgestellt und untersucht. Bei diesem System werden die Ressourcen der Funkübertragung effizient genutzt, indem Ruhephasen in Sprachverbindungen für die Übertragung anderer Informationen genutzt werden. Das durchgehend IP-basierte System garantiert, soweit möglich, für Anwendungen wie IP-basierter Telefonie oder Zugang zum Internet die jeweils gewünschte Dienstgüte. Das All-IP-Mobilfunknetz wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

1.2 Lösungsansatz

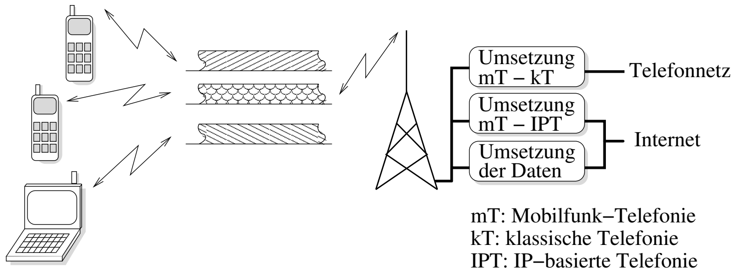
Das All-IP-Mobilfunknetz ermöglicht die Bereitstellung einer Ende-zu-Ende Dienstgüte für IP-basierte Anwendungen auf mobilen Endgeräten. Durch die Sprachpausenunterdrückung bei Sprachverbindungen werden Kanäle nicht mehr exklusiv belegt, sondern nur, wenn Sprachinformation zu übertragen ist.

In Abbildung 1.1(a) ist schematisch der Aufbau eines heute üblichen Mobilfunknetzes dargestellt, wobei nur die für die Sprach- und Datenkanäle relevanten Elemente dargestellt sind. Jede Verbindung zu einem mobilen Endgerät benötigt einen Kanal der Funkübertragung (Funkkanal[4]). Sprachverbindungen werden entweder zur klassischen Telefonie (Festnetz mit 64 kbit/s-Kanälen) oder zur IP-Telefonie umgesetzt, Datenpakete werden durch eine spezielle Einheit zur Übertragung durch das IP-basierte Internet vorbereitet. Abbildung 1.1(b) zeigt, ebenfalls stark vereinfacht, die in dieser Arbeit entworfene Struktur des All-IP-Mobilfunknetzes. Über einen Funkkanal werden Sprache und Daten paketiert übertragen und zum Internet weitergeleitet. Die zu einer IP-basierten Telefonieverbindung gehörenden Sprachdaten werden bezüglich der Kodierung der Sprache und der Verbindungssteuerung an das in der IP-Telefonie definierte Protokoll angepasst und in das Internet weitergeleitet. Sprachdaten, die zu einer klassischen Telefonieverbindung gehören, werden entsprechend an die leitungsvermittelte Übertragung angepasst. Nicht zu einer Sprachverbindung gehörende Daten werden direkt zum Internet weitergeleitet.

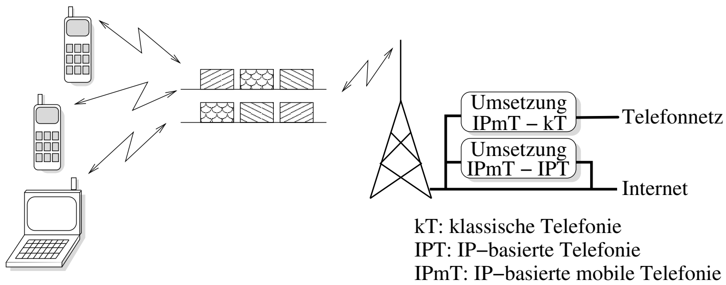
Ein Ziel bei der Entwicklung des All-IP-Mobilfunknetzes war es, bestehende Standards und Netzstrukturen unverändert zu übernehmen und lediglich an vorgesehenen Schnittstellen zu erweitern. So basiert das All-IP-Mobilfunknetz auf dem vor allem in Europa weit verbreiteten GSM-Standard (siehe Kapitel 3) und der darin mit GPRS gegebenen Möglichkeit, paketorientiert Daten zu übertragen [GL00a]. GPRS wird für das All-IP-Mobilfunknetz deshalb verwendet, da es die Anforderungen, die von technischer Seite aus an die Übertragungstechnologie gestellt werden, erfüllt. So sind im GPRS-Standard Dienstgütemechanismen vorgesehen, die im All-IP-Mobilfunknetz verwendet werden. Weiter kann ein GSM-Mobilfunknetz mit relativ wenig Aufwand auf GPRS umgerüstet werden. Auch stellt ein GPRS-basiertes Mobilfunknetz den Übergang zu zukünftigen Mobilfunksystemen wie dem Enhanced GPRS (EGPRS) oder dem Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) dar.

Allerdings deckt der GSM/GPRS-Standard nicht alle geforderten Punkte ab. Es fehlen die effektive Nutzung der Funkkanäle und die Möglichkeit der Vereinbarung von Ende-zu-Ende Dienstgüte. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, auf der Basis von GPRS Sprache effizient zu übertragen. Eine Möglichkeit, Ende-zu-Ende Dienstgüte für verschiede-

[4]Die Definition eines Funkkanals erfolgt in Abschnitt 3.5.



(a) Prinzip der Funkübertragung für GSM-basierte Mobilfunkkommunikation (schematisch)



(b) Prinzip der Funkübertragung des All-IP-Mobilfunknetz (schematisch)

Abbildung 1.1: (a) Heute übliches und (b) in dieser Arbeit verwendetes Prinzip der Funkübertragung

ne Anwendungen bereitzustellen, wird ebenfalls vorgestellt. Beim Entwurf des All-IP-Mobilfunknetzes wurden auch die mobilfunkspezifischen Randbedingungen wie die störanfällige Funkübertragung, die Mobilität der Endgeräte und Übergänge zu anderen Netzen wie dem Internet oder dem klassischen Telefonnetz berücksichtigt.

1.3 Überblick über die Arbeit

Im folgenden Kapitel werden einige Begriffe aus dem Bereich der Kommunikation eingeführt und für diese Arbeit relevante Techniken und Protokolle vorgestellt. So werden verschiedene Arten der Sprachkodierung und deren Eignung für die Übertragung über Funkstrecken diskutiert und das Kommunikationsprotokoll ISDN sowie die Protokollfamilie TCP/IP eingeführt. In Kapitel 3 wird der dem All-IP-Mobilfunknetz zugrundeliegende GSM Standard mit der Erweiterung GPRS beschrieben. Kapitel 5 beschreibt detailliert das entwickelte All-IP-Mobilfunknetz, dessen simulative Untersuchung und Bewertung in Kapitel 6 dargelegt wird. Die Arbeit wird im abschließenden Kapitel 7 zusammengefasst, und es werden einige Punkte der möglichen Weiterentwicklung genannt.

Kapitel 2 Einführung in die Kommunikation

In diesem Kapitel werden Begriffe der Kommunikation eingeführt, verschiedene Verkehrsarten charakterisiert und die Grundlagen der Kommunikation und von Kommunikationsnetzen beschrieben.

2.1 Dienste und Dienstgüte

Der Begriff Dienst bezieht sich in dieser Arbeit auf Kommunikationsdienste, die ein Kommunikationsnetz einem Nutzer zur Verfügung stellt.

> „Ein Telekommunikations-Dienst umfasst eine klar definierte Funktion des Netzes, welche durch technische, qualitative und rechtliche Merkmale näher festgelegt ist. Technische Merkmale sind durch eine Vielzahl von Parametern gekennzeichnet, die sich auf Funktionsumfang, Verbindungsprinzip, Vermittlungsprinzip, Datenübertragungsrate, standardisierte Übertragungsprotokolle und Schnittstellen u. ä. m. beziehen. Qualitative Merkmale werden in Form von Metriken angegeben, z. B. die Bitfehlerrate, der Verbindungsaufbauverzug oder Mittelwerte und Schwankungsbereiche der Ende-zu-Ende Verzögerung.“ [Küh98]

Die qualitativen Merkmale, die von einem Nutzer des Dienstes beobachtet werden können, werden auch unter dem Begriff Dienstgüte (engl.: Quality of Service (QoS)) zusammengefasst:

> „All quality features of a communication service from the viewpoint of a user (user perceivable).“ [Küh00]

Unterscheiden lassen sich Dienstgütemerkmale (Dienstgüteparameter) in technische und bedarfsorientierte Merkmale [Kec00]. Technische Dienstgütemerkmale beziehen sich auf die systembedingten Eigenschaften des Dienstes und hängen direkt von dem Netz ab, das den Dienst erbringt. Beispiele technischer Dienstgütemerkmale sind Datenübertragungsrate, Übertragungsverzögerung (engl.: Delay), Verzögerungschwankung (engl.: Jitter) und Fehler- oder Verlustrate der übertragenen Information.

Bedarfsorientierte Merkmale beschreiben die Charakteristika des Dienstes aus Nutzersicht, wie z. B. beim Telefoniedienst die Verständlichkeit der Sprache, die Identifikation des Sprechers (Klang der

Stimme), die Störungsfreiheit oder die Verfügbarkeit des Telefonnetzes. Da die Kommunikationsdienste durch technische Systeme und Netze erbracht werden, sind die bedarfsorientierten und die technischen Merkmale zwei Sichten eines Dienstes. Jedem Dienst sind unterschiedliche bedarfsorientierte Anforderungen zugewiesen, die von systemnahen Anwendungen in technische Anforderungen umgesetzt werden.

Ziel des Entwurfs eines Kommunikationsnetzes ist es, dass das entworfene Netz Informationen (Daten) von verschiedenen Anwendungen (Verkehrsströme) mit jeweils unterschiedlichen Dienstgüteparametern effizient übertragen kann.

Dienste lassen sich in interaktive und nicht-interaktive Dienste unterteilen. Interaktive, meist echtzeitkritische Dienste wie kooperative Spiele, interaktive Sprachdienste oder Bewegtbilddienste (Video) erfordern eine Übertragung mit möglichst geringen Verzögerungen und Verzögerungsschwankungen, da dies zu deutlichen Qualitätseinbußen des Dienstes führen würde. Interaktive Sprach- und Bewegtbilddienste sind in gewissen Grenzen unempfindlich gegen Übertragungsfehler oder Übertragungsverluste, während bei anderen interaktiven Multimediaanwendungen wie kooperativen Spielen eine fehlerfreie Übertragung erforderlich ist.

Nicht-interaktive Dienste erfordern meist eine fehlerfreie Übertragung der Daten, besitzen aber geringere Anforderungen bezüglich der Übertragungsverzögerung. Lange Verzögerungen wirken sich zwar auf die subjektive Qualität des Dienstes aus, beeinflussen aber nur in geringem Maße dessen Funktionalität.

2.2 Aspekte von Kommunikationsdiensten

Dieser Abschnitt führt in die Grundlagen der Kommunikation ein und stellt zwei Kommunikationssysteme – ISDN und IP-basierte Netze – vor. Kapitel 3 beschreibt für diese Arbeit wichtige Teile des Mobilfunkstandards GSM.

Zwei Definitionen zeigen die Breite des Begriffs Kommunikation:

> „Es ist nicht leicht, den Begriff der Kommunikation zu definieren. Jeder Mensch kann sich zwar etwas darunter vorstellen, aber kaum jemand wird in der Lage sein, erschöpfend darzulegen, was eigentlich damit gemeint ist.“ [Dit93]

> „Die Verständigung zwischen Menschen, Mensch und Maschine oder zwischen Maschinen. Die Kommunikation dient dem einseitigen oder wechselseitigen Austausch von Nachrichten in Form von Sprache, Text, Bildern oder Daten. Voraussetzung für Kommunikation sind Sender, Empfänger und eine gemeinsame Verständigungsweise (‘Sprache’), bei der direkten Kommunikation zudem ein Übertragungsweg (Kanal).“ [Lip94]

Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich Kommunikation auf den Austausch digitaler Informationen wie digitalisierte Sprache oder Daten zwischen Endgeräten. Diese bilden die Schnittstelle zwischen dem Kommunikationssystem und dem Menschen als Nutzer des Systems. Kommunikation ist durch verschiedene Merkmale wie verbindungsorientiert oder verbindungslos, gesichert oder ungesichert charakterisiert.

2.2.1 Charakteristika der Kommunikation

Bei der verbindungsorientierten Kommunikation wie der klassischen Telefonie wird vor der eigentlichen Kommunikation eine physikalische oder logische Verbindung (Kanal) zwischen den Kommunikationspartnern auf- und nach der Kommunikation wieder abgebaut. Diese Verbindung hat den Vorteil, dass die Informationen während der Übertragung wenig Wissen über den Weg oder das Ziel der Übertragung besitzen müssen. Der Verbindungsauf- und -abbau ist Teil der Signalisierung des Kommunikationsnetzes. Durch das Wissen der Zustände im Kommunikationsnetz können Mechanismen z. B. zur Steuerung der Netzlast realisiert werden. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass die Netzkomponenten leistungsfähiger und komplexer aufgebaut sein müssen, was insbesondere in großen Netzen zu Skalierungsproblemen führen kann. Weiter beansprucht der Auf- und Abbau der Verbindung Zeit, womit die Kommunikation eine Anfangsverzögerung erfährt. Ein Problem ist dies insbesondere bei der Kommunikation zwischen Rechnern, da hier Daten meist zeitlich unkorrelierten in einzelnen Einheiten (Pakete) übertragen werden (paketorientierte Datenübertragung). Für jedes Paket eine Verbindung auf- und abzubauen, führt neben der Verzögerung der Übertragung zu einem hohen Signalisieraufwand. Die Verbindung dauerhaft bestehen zu lassen, resultiert insbesondere wenn nur selten Pakete übertragen werden, in einer Verschwendung von Ressourcen wie Rechenkapazität und Speicherplatz in Netzknoten.

Aus diesen Gründen erfolgt die paketvermittelte Datenübermittlung auf der Vermittlungsschicht oft verbindungslos, d. h. es werden keine Verbindungen aufgebaut und jedes Paket trägt die Zielinformation mit sich. Die einzelnen Knoten des Netzes entscheiden für jedes Paket wie es zum Ziel übertragen werden soll (Routeing). Der Nachteil dieser Art der Datenübertragung ist, dass zum einen die Pakete größer werden, da die Zielinformation mit übertragen werden muss. Zum anderen müssen die Knoten des Netzes ausreichend leistungsfähig sein, um für jedes Paket eine oft aufwändige Wegewahl zum jeweiligen Ziel durchführen zu können.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, ob die Kommunikationsverbindung gesichert oder ungesichert verläuft. Bei der gesicherten Verbindung kommen die Informationen beim Empfänger so an wie sie gesendet wurden. Dies wird häufig über Quittierungen (engl.: Acknowledgements) erreicht, die der Empfänger zurück an den Sender schickt. Dieser kann daraufhin ggf. verloren gegangene oder fehlerhaft übertragene Informationen erneut senden. Bei der ungesicherten Kommunikation findet kein Austausch von Quittierungen statt, der Sender hat also keine Rückmeldung über die beim Empfänger angekommene Information.

2.2.2 Kommunikationsarchitekturen

Aufgrund der Komplexität heutiger Kommunikationssysteme sind in der Architektur eines Kommunikationssystems verschiedene Schichten definiert. Jede Schicht stellt der darüber liegenden Schicht mittels eines Dienstzugangspunktes (engl.: Service Access Point (SAP)) eine definierte Funktionalität zur Verfügung.

In allen an der Kommunikation beteiligten Systemen müssen Instanzen der jeweiligen Schichten vorhanden sein. Zwischen den Instanzen derselben Schicht sind feste Regeln (Peer-to-Peer Protokolle) definiert, nach denen die Kommunikation abläuft. „Ein [Peer-to-Peer] Protokoll beschreibt die Gesamtheit der Vereinbarungen zur Zusammenarbeit zwischen Funktionsblöcken (Instanzen, Entities) der gleichen Funktionsschicht“ [Küh01].

Bei paketvermittelnden Protokollen werden von höheren Schichten Protokolldateneinheiten (engl.: PDU) an die jeweils darunter liegende Schicht übergeben. Diese nehmen den Datenblock als Dienstdateneinheit (engl.: Service Data Unit (SDU)) entgegen und verarbeiten ihn. Meist werden vor der SDU (Header) oder am Ende der SDU (Trailer) protokollspezifische Informationen hinzugefügt. Durch diese Informationen erhält die Zielinstanz das notwendige Wissen zur Behandlung der Dateneinheiten. Die Informationen können Angaben wie Blocklänge oder Prüfsummen über den Datenblock sein, anhand derer die Zielinstanz feststellen kann, ob die Dateneinheit korrekt übertragen wurde. Abbildung 2.1 verdeutlicht die zwischen zwei Instanzen einer Schicht definierten Peer-to-Peer Protokolle. Protokollinformationen werden dabei nur am Anfang der Datenblöcke als Kopf hinzugefügt.

Elementare Protokollmechanismen sind verschiedene Formen von Quittierungen, Zeitüberwachungen verschiedener Vorgänge, Mechanismen zur Überwachung der Reihenfolge der Pakete und Flusssteuerungsmechanismen [Küh01].

2.2.3 Telefoniedienst

Die Telefonie stellt den Austausch von Sprachinformationen im Rahmen einer Sprachverbindung zwischen zwei oder mehr Endsystemen dar. Um die Anforderungen an Telefonnetze wie der effizienten Ausnutzung des Netzes oder eine hohe Sprachqualität erfüllen zu können, sind heutige

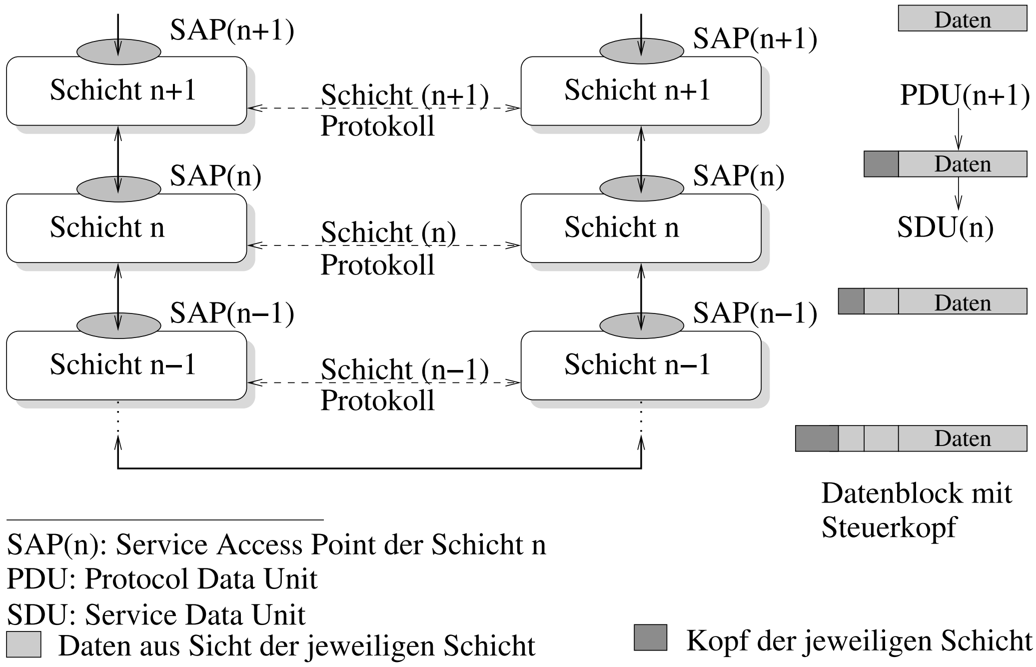


Abbildung 2.1: Schichten, Protokolle und Aufbau der Datenpakete eines Kommunikationsarchitekturmodells

Telefonnetze meist digitale Netze, d. h. die Sprache wird in digitaler Form übertragen. Ein Telefonnetz muss zwei Arten von Informationen übertragen: Die inhaltlichen Gesprächsinformationen und die Signalisierinformationen. Die Signalisierung dient dem Auf- und Abbau von Verbindungen und steuert weitere Dienste wie ‘Anrufweiterschaltung’, ‘Anklopfen bei Besetzt’ oder ‘Anrufbeantworter im Netz’. Im Vergleich zur analogen Telefonie, bei der die Signalisierung meist über dieselbe Verbindung wie die Gespräche geführt wurden (Inband-Signalisierung), steht in heutigen Telefonnetzen ein getrenntes Netz für die Signalisierung (Outband-Signalisierung) bereit, da durch die Dienstevielfalt und Nutzungshäufigkeit der Dienste die Inband-Signalisierung nicht mehr ausreichend leistungsfähig ist.

2.2.4 Sprachkodierung

Damit Sprache digital übertragen werden kann, muss die analoge Sprache in eine digitale Repräsentation überführt werden (Digitalisierung, Kodierung). Die dabei verwendeten Kodierverfahren lassen sich in drei Klassen einteilen: Signalformkodierer/-dekodierer (engl.: Waveform Codecs), Quellenkodierer/-dekodierer (engl.: Source Codecs) und Hybride Kodierer/Dekodierer (engl.: Hybrid Codecs). Alle Kodierer formen die z. B. durch ein Mikrofon erfasste kontinuierliche Sprache in eine diskrete Folge digitaler Daten (Datenstrom) um. Beim Dekodieren wird ein dem ursprünglichen Sprachsignal möglichst ähnliches Sprachsignal rekonstruiert. Unter Datenrate wird hier das

Volumen des Datenstroms pro Zeiteinheit des kodierten Sprachsignals verstanden. Die Eigenschaften der einzelnen Kodierer, soweit sie für die Arbeit relevant sind, werden im Folgenden beschrieben [Que97], [HJA], [Wüt98], [Var98].

2.2.4.1 Kodierung der Signalform

Signalformkodierer erfassen das Signal im Zeitbereich. Das analoge Signal wird zu diskreten Zeitpunkten abgetastet (Sampling) und die Amplitude des Signals in einen diskreten Wert gewandelt (Quantisierung), ohne die Art und Weise der Entstehung des Signals mit zu berücksichtigen. Dadurch sind die Signalformkodierer für verschiedene Signale, nicht nur Sprachsignale, einsetzbar, erzeugen aber einen relativ großen Datenstrom von meist mehr als 16 kbit/s. Bekannte Verfahren sind hier:

Pulse Code Modulation (PCM): Einfaches Verfahren, bei dem das Signal periodisch abgetastet wird und die jeweilige Amplitude des Signals als digitaler Wert übernommen wird. Die Datenrate lässt sich verringern, wenn der Wert nicht linear, sondern mittels einer logarithmischen Kennlinie komprimiert kodiert wird.

Differential Pulse Code Modulation (DPCM): Verfahren, bei dem sich die Datenrate verringert, da im Gegensatz zur PCM nicht der jeweilige Abtastwert, sondern lediglich der Unterschied des Abtastwertes zum letzten verwendet wird.

Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM): Bei diesem Verfahren wird neben der Abtastung des Signals wie bei der PCM eine Vorhersage für den abgetasteten Wert aus vorherigen Werten berechnet. Im Datenstrom werden dann lediglich die Differenzen des tatsächlichen zum vorhergesagten Wert übertragen.

Diese Verfahren werden eingesetzt, wenn eine hohe Sprachqualität erforderlich ist und eine ausreichende Datenrate zur Verfügung steht. So wird z. B. bei ISDN die PCM verwendet.

2.2.4.2 Kodierung der Sprachquelle

Quellenkodierer modellieren die menschliche Stimmbildung und kodieren das Sprachsignal durch Parametrisierung dieses Modells. Ein dabei häufig verwendetes Modell ist in Abbildung 2.2 gezeigt.

Der Vokaltrakt, der beim Menschen für die Erzeugung der Sprache zuständig ist, wird durch ein System von akustischen Röhren mit variablen Durchmessern modelliert. Dieses Röhrensystem lässt sich mit digitalen Filtern nachbilden, dessen Filterkoeffizienten den Röhrendurchmessern entsprechen. An den Eingang dieses Filters wird für stimmhafte Sprachlaute eine Folge von Dirac-Pulsen (Pitch) und für stimmlose Sprachlaute weißes Rauschen angelegt. Bei korrektem Eingangssignal und

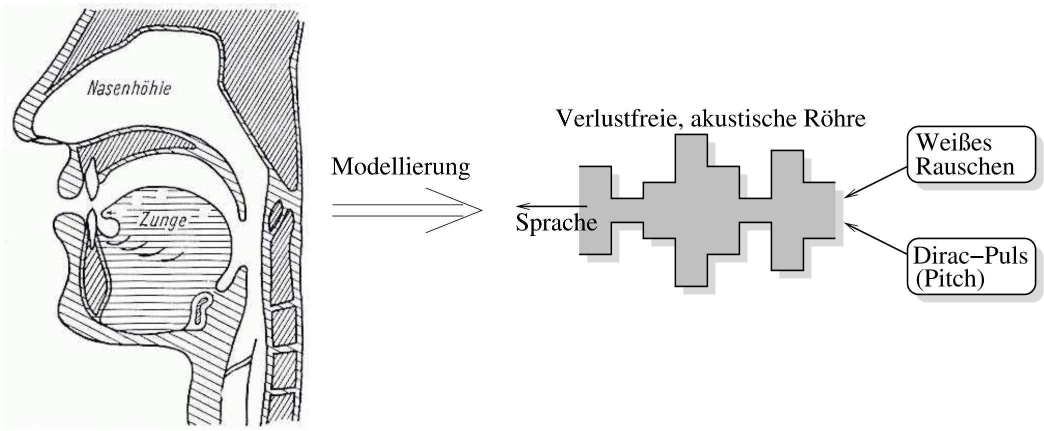


Abbildung 2.2: Modellierung des menschlichen Vokaltraktes durch akustische Röhren mit variablem Durchmesser [Wüt98] und [Ste53]

richtig eingestelltem Filter liefert der Filterausgang das nachgebildete Sprachsignal. Charakteristische Parameter für das Nachbilden von Vokalen (Klangbild) sind die Filterkoeffizienten [Wüt98].

Nach diesem Verfahren arbeitet der Linear Predictive Coding (LPC)-Kodierer, bei dem die Sprachsignale in kleine, zeitliche Segmente eingeteilt werden. Für jedes Segment werden die Parameter des Sprachmodelles ermittelt. Diese werden derart als Linearkombination von Parametern früherer Segmente ausgedrückt, dass eine möglichst gute Annäherung der Parameter erreicht wird. Die Koeffizienten der Linearkombination bilden den Datenstrom, der durch die Segmentbildung nicht kontinuierlich, sondern mit einer der Segmentbildung entsprechenden Rate (Sprachpaketrate) block- (paket-) weise entsteht (Sprachpaketstrom) [PM00a].

Nachteile dieses Verfahrens sind, dass die Sprache nach der Dekodierung oft künstlich klingt. Weiter können Geräusche, die nicht zur normalen Sprache gehören, nicht oder nur sehr begrenzt kodiert werden. Daher wurden hybride Sprachkodierungen entwickelt.

2.2.4.3 Hybride Sprachkodierung

Bei den hybriden Verfahren werden die Signalform- und die Quellenkodierung vereint. Dabei wird meist zunächst das ursprüngliche Signal mittels der LPC-Kodierung kodiert. Anschließend wird das Fehlersignal (Residualsignal), also die Differenz zwischen dem ursprünglichen und dem durch die LPC-Kodierung beschriebenen Signal, kodiert. Beim Residual Excited Linear Prediction (RELP)-Verfahren wird das Residualsignal mittels Signalformkodierung erfasst, Regular Pulse Excitation - Linear Predictive Coding (RPE-LPC)-Verfahren nähern das Residualsignal durch eine zyklische Pulsfolge an. Wird diese zyklische Pulsfolge über eine Langzeitvorhersage (engl.: Long-Term Prediction) bestimmt, erhält man den Regular Pulse Excitation - Long Term Prediction (RPE-LTP)-

Sprachkodierer, der bei guter Sprachqualität eine Datenrate zwischen 10 kbit/s und 13 kbit/s erzeugt und z. B. beim Mobilfunksystem GSM eingesetzt wird.

Bei Kodierern, die nach dem Code-Excited Linear Prediction (CELP)-Verfahren arbeiten, wird nicht ein an das Fehlersignal angenähertes Signal mitkodiert, sondern aus einer Tabelle (Codebook) mit Signalen dasjenige ausgewählt, das dem Fehlersignal am nächsten kommt. Somit taucht im Datenstrom lediglich der Tabellenindex, ein Skalierungsfaktor und die Parameter der LPC-Kodierung auf, was in Datenraten zwischen 4,8 kbit/s und 16 kbit/s resultiert. Bei dem in der International Telecommunication Union (ITU)-T Empfehlung G.728 [G728] definierten Kodierer nach dem CELP-Verfahren stehen 128 Signale zur Auswahl. Eine Variante davon, der Algebraic CELP (ACELP)-Kodierer, verwendet als Codebook eine algebraische Repräsentation des Signals, was insbesondere die Suche des geeigneten Signals beschleunigt.

Eine deutlich natürlichere Stimme trotz kleinerer Datenrate liefert der Sprachkodierer nach dem Mixed Excitation Linear Prediction (MELP)-Verfahren [MB95], [FS1017]. Dieses beruht auf dem CELP-Verfahren, erweitert aber die LPC-Kodierung um z. B. ein gemischtes Signal (Puls und Rauschen) für die Filter (engl.: Mixed Excitation) und aperiodische Pulsfolgen. Das Harmonic Vector Excitation Coding (HVXC)-Verfahren beruht ebenfalls auf dem CELP-Verfahren, betrachtet und analysiert aber das Fehlersignal als Frequenzspektrum und beschreibt es durch gewichtete Vektoren.

Die im letzten Abschnitt genannten Entwicklungen ermöglichen es, trotz geringer Anforderungen an die Datenrate der Übertragung, eine qualitativ hochwertige Sprachübertragung zu ermöglichen. Damit bieten sich diese Verfahren insbesondere für Sprachübertragung über Funkkanäle an.

2.2.5 Sprachpausenerkennung

Analysen von Sprache zeigen, dass 40% der Ruhephasen kürzer als 50 ms sind. Diese Ruhephasen treten meist zwischen Wortsilben auf [LU86], [Sau90]. Untersuchungen in diesen Arbeiten und von Gruber et al. [GS85] zeigen, dass nur Ruhephasen, die länger als 200 ms dauern, für die Übertragung anderer Daten effektiv verwendet werden können. Da für die Zugriffssteuerung des Übertragungskanals eine gewisse Zeit benötigt wird, müssen Pakete u. U. bis zur Übertragung zwischengespeichert oder verworfen (engl.: Front/Mid-End Clipping) werden. Dies führt dazu, dass beim Empfänger ungewollte Pausen in der Sprache entstehen. Diese Pausen können zwischen Wörtern oder Sätzen in gewissen Grenzen toleriert werden, zwischen Wortsilben werden derartige Pausen als sehr störend empfunden.

Für die Erkennung von Ruhephasen ab einer gewissen Länge gibt es im wesentlichen zwei Verfahren (vgl. Abbildung 2.3):

Hangover: Hierbei werden die Sprachphasen um eine konstante Zeit $\mathtt{t}_{\mathtt{Hangover}}$ (engl.: Hangover-Time) verlängert, was dazu führt, dass Ruhephasen, die kürzer als $\mathtt{t}_{\mathtt{Hangover}}$ sind, überbrückt und längere Ruhephasen um $\mathtt{t}_{\mathtt{Hangover}}$ verkürzt werden.

Fill-In: Bei dieser Methode werden die Sprachblöcke um eine konstante Zeit $\mathtt{t}_{\mathtt{Fillin}}$ (engl.: Fill-In Time) verzögert. Ist am Ende eines verzögerten Sprachblocks die Pausenzeit im unverzögerten Signal zu Ende, wird die Pausenzeit überbrückt. Dies führt dazu, dass die Sprache um $\mathtt{t}_{\mathtt{Fillin}}$ verzögert wird, die Pausenzeiten größer als $\mathtt{t}_{\mathtt{Fillin}}$ werden dabei nicht verkürzt.

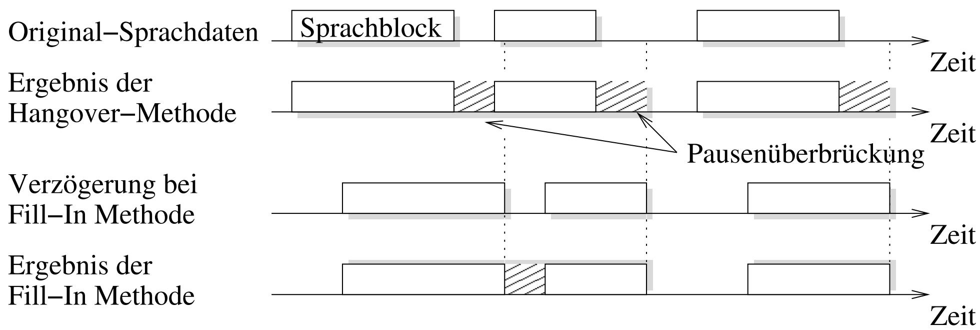


Abbildung 2.3: Vergleich der Verfahren zur Erkennung von Ruhephasen

Entsteht beim Empfänger der Sprache in den Pausen eine völlige Ruhe, wird dies als störend empfunden, da die gewohnten Hintergrundgeräusche fehlen. Daher werden beim Empfänger in den Sprachpausen oft künstlich Hintergrundgeräusche (engl.: Comfort Noise) erzeugt.

2.3 ISDN-basierte Kommunikation

Die ITU-T Empfehlung I.120 [I120] stellt einen Rahmen von Empfehlungen für die digitale Kommunikation über das öffentliche Fernsprechnetz (ISDN) dar. Da das herkömmliche, analoge Fernsprechnetz hauptsächlich für Sprachdienste eingesetzt wurde, ist ISDN auch ein wichtiger Schritt, die wachsende Nachfrage nach Datenübertragung zwischen Rechnern zu erfüllen. Die Gründe für die Einführung eines digitalen Kommunikationsnetzes wie dem ISDN sind eine fehlerfreiere Übertragung von Sprache und Daten. Des Weiteren bietet ISDN für die Übertragung digitaler Daten eine höhere Datenrate als die in ihrer Übertragungsbandbreite auf 3400 Hz beschränkte analoge Telefontechnik. Auch der Verbindungsaufbau erfolgt deutlich schneller als beim analogen Fernsprechnetz. Damit lassen sich mit ISDN verschiedene Dienste wie Telefonie, Datenübertragungen, E-Mails, Fax und Video über einen Teilnehmeranschluss nutzen.

2.3.1 Teilnehmeranschlussbereich

Beim ISDN-Netz wird zwischen dem Teilnehmeranschluss und dem Zwischenamtsbereich unterschieden, was in Abbildung 2.4 verdeutlicht ist. Seit 1993 gibt es einen europäischen Standard des European Telecommunications Standards Institute (ETSI), das Euro-ISDN, bei dem zwei Teilnehmerzugänge definiert sind:

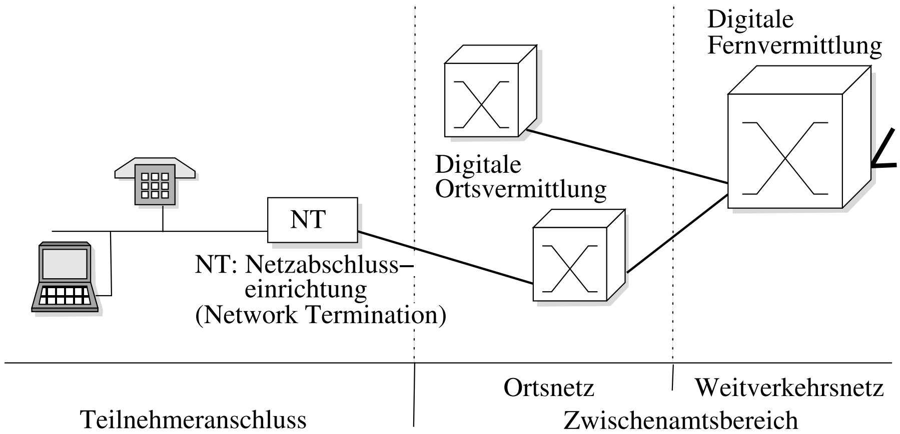


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau eines ISDN-Netzes

Basisanschluss (engl.: Basic Access): Wird oft synonym mit der Bezeichnung ISDN benutzt und bezeichnet eine digitale Übertragungsleitung, die aus drei unabhängigen Kanälen besteht: zwei Nutzdatenkanäle (B-Kanäle) mit einer Datenrate von je 64 kbit/s und einen für Signalisierung vorgesehenen Kanal (D-Kanal) mit einer Datenrate von 16 kbit/s. Für den Signalisierkanal ist das Protokoll Euro Digital Subscriber Signalling System No.1 (E-DSS1) definiert. Die beiden Nutzdatenkanäle können unabhängig voneinander für die Übertragung von Daten oder Sprache oder gebündelt als ein Nutzdatenkanal mit einer Datenrate von 128 kbit/s verwendet werden.

Primärratenanschluss (engl.: Primary Rate Access): Definiert die Datenübertragungen mit höheren Datenraten. Dabei stehen 30 Nutzkanäle und ein Signalisierkanal mit jeweils einer Datenrate von 64 kbit/s zur Verfügung.

2.3.2 Zwischenamtsbereich

Der Zwischenamtsbereich eines ISDN-Netzes wird, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, in das Nutzkanalnetz und das Signalisiernetz unterteilt. Im Nutzkanalnetz sind Nutzkanäle mit einer Datenrate von je 64 kbit/s definiert. Die Signalisierung wird über ein eigenständiges, auf dem Signalling System No. 7 (SS7)-Protokoll basierenden Netz realisiert.

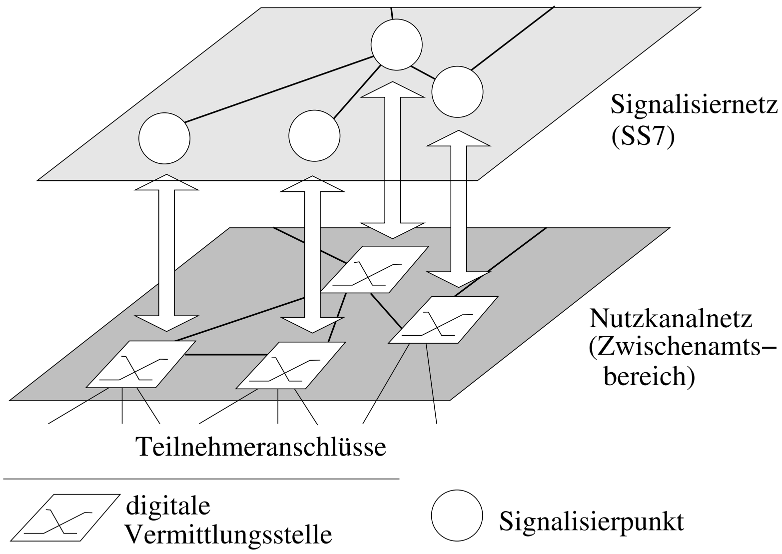


Abbildung 2.5: Unterteilung des Zwischenamtsbereichs eines ISDN-Netzes in Nutzkanalnetz und Signalisiernetz

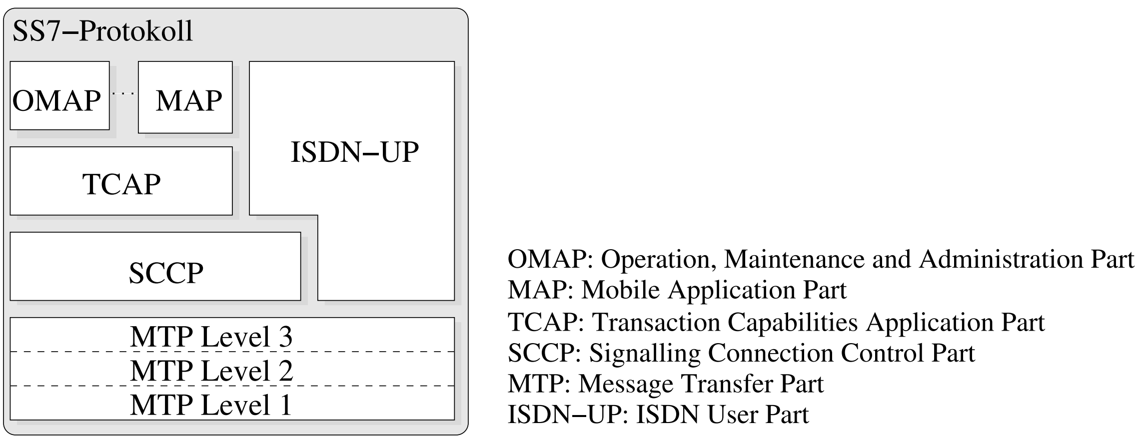


Abbildung 2.6: Protokollschichten des SS7

In Abbildung 2.6 sind die Schichten des SS7-Protokolls dargestellt. Die Funktionen der einzelnen Schichten sind:

Message Transfer Part (MTP): Übermittelt verbindungslos Signalisiermeldungen zwischen den Netzknoten. Beinhaltet Fehlererkennungs- und -korrekturmechanismen und sorgt bei Ausfällen oder Überlastungen von Knoten oder Wegen dafür, dass der Verkehr entsprechend umgeleitet bzw. gedrosselt wird [Q701].

Signalling Connection Control Part (SCCP): Ermöglicht das Routeing von Signalisiermeldungen anhand globaler Namen (engl.: Global Title) und damit die Übertragung von Signalisiermeldungen auch über Netzgrenzen [Q711].

ISDN-User Part: Steuerung des Auf- und Abbaus von Nutzkanalverbindungen und Unterstützung bei der Realisierung von Dienstmerkmalen [Q764].

Transaction Capabilities Application Part (TCAP): Unterstützt den Zugriff auf Datenbanken und Dienstefunktionen durch die Bereitstellung eines Transaktionsmechanismus [Q771].

Mobile Application Part (MAP): Unterstützt die Mobilität von Teilnehmern und mobilen Endgeräten [GSM0902].

Operation, Maintenance and Administration Part (OMAP): Unterstützt den Betrieb und die Wartung von Netzeinrichtungen [Q756].

2.4 IP-basierte Kommunikation

1969 entwickelte die Advanced Research Projects Agency (ARPA), die heutige Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), das Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), mit dem ursprünglich vier Computer miteinander verbunden waren. Ziel war es, eine Reihe von Protokollen zu entwerfen, mit denen Netze aus Computern unabhängig von ihrer Hardware oder dem Betriebssystem aufgebaut werden können. Das heutige Internet basiert auf der damals entworfenen Protokollfamilie (IP-Protokollfamilie) für die Übertragung von Daten wie dem Internet Protocol (IP), dem Transmission Control Protocol (TCP) und dem User Datagram Protocol (UDP). Abbildung 2.7 zeigt das IP-Architekturmodell der IP-Protokollfamilie.

Das IP-Architekturmodell erlaubt es, anstelle der Netzzugangsschicht und der Bitübertragungsschicht weitere Architekturmodelle, die ihrerseits aus mehreren Schichten bestehen können, einzusetzen. So können IP-Datagramme z. B. mittels des Asynchronous Transfer Mode (ATM) übertragen werden.

Neben den Endknoten, in denen alle Architekturschichten vorhanden sind, finden auch Transitknoten Verwendung. Diese Transitknoten realisieren nur einen Teil der Architekturschichten und dienen dazu, einen Übergang zwischen Übermittlungsabschnitten mit gleicher Protokollarchitektur (Switch,

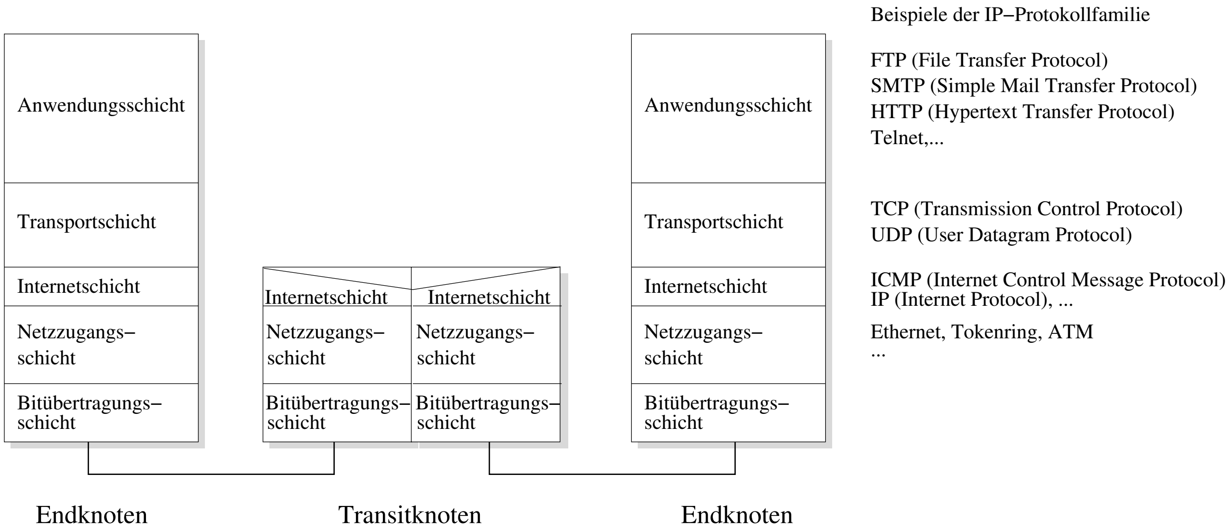


Abbildung 2.7: Architekturmodell der IP-Protokollfamilie mit Endknoten und Transitknoten

Router) oder Netzen mit gleicher oder unterschiedlicher Protokollarchitektur (Gateway) zu ermöglichen. So kann z. B. auf der Netzzugangsschicht zwischen einem Endknoten und dem Transitknoten Ethernet, zwischen dem Transitknoten und dem anderen Endknoten ein Tokenring-Netz eingesetzt werden. Beim IP-Architekturmodell ist lediglich eine Ende-zu-Ende Verlässlichkeit definiert, d. h. nur am SAP des TCP steht eine genaue Kopie der gesendeten Daten zur Verfügung.

2.4.1 Übertragungsprotokolle

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Protokolle der IP-Protokollfamilie kurz vorgestellt: das IP der Internetschicht, das TCP, das UDP und das Real-Time Transport Protocol (RTP) der Transportschicht sowie Protokolle der Anwendungsschicht.

2.4.1.1 Internet Protocol (IP)

Die Hauptaufgabe der Internetschicht ist es, Datagramme – die kleinsten Übertragungseinheiten des IP – verbindungslos und unquittiert zu übertragen. Dabei können Quelle und Ziel der Kommunikation in verschiedenen, miteinander verbundenen Netzen liegen. Ein Netz ist dabei eine Menge von Rechnern, die auf der Ebene der Netzzugangsschicht untereinander direkt kommunizieren können. Spezielle Transitknoten, die Router, verbinden diese Netze. Die Router bestimmen für jedes Datagramm getrennt den Weg zum Ziel. Datagramme können dabei in falscher Reihenfolge eintreffen oder unterschiedliche Verzögerungen bei der Übertragung erfahren. IP überträgt Datagramme nach dem Best-Effort Prinzip, d. h. so gut wie momentan möglich, und bietet keine Unterstützung für Dienstgüteparameter bei der Übertragung.

Der Standard für das IP [RFC791], zusammen mit unterstützenden Protokollen wie dem Address Resolution Protocol (ARP) oder dem Internet Control Message Protocol (ICMP), definieren das Datagrammformat, die Adressierung, die Adressauflösung, die Datagrammbehandlung, das Routeing und die Fehlererkennung. Es kann auf verschiedenen Realisierungen der Netzzugangsschicht aufsetzen und bietet höheren Schichten eine davon unabhängige Schnittstelle (SAP). IP in dieser Arbeit bezieht sich, soweit nicht anders genannt, auf die derzeit am weitesten verbreitete Version 4 (IPv4).

Ein IP-Datagramm kann maximal 2^{16} Oktetts (Byte) lang sein, wird aber meist durch die maximale PDU-Größe der Netzzugangsschichten begrenzt. So erlaubt z. B. Ethernet eine maximale Größe von 1518 Oktett. Sind die Datagramme für die Netzzugangsschicht zu groß, werden sie in der Internetschicht in kleinere Datagramme aufgeteilt (segmentiert) bzw. wieder zusammengesetzt (reassembliert). Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau eines IP-Datagramms, Tabelle 2.1 fasst die Bedeutung der Parameter des IP-Datagrammkopfes zusammen.

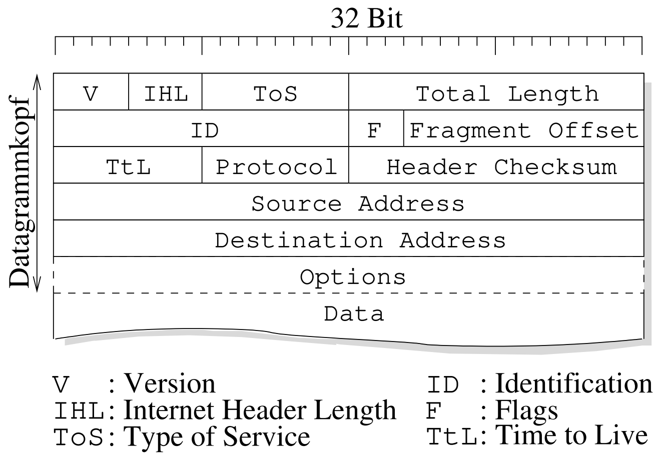


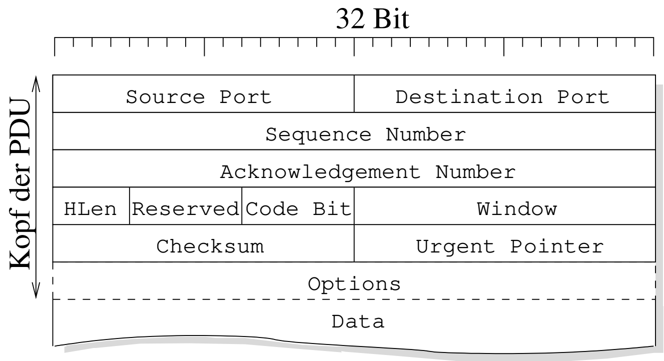
Abbildung 2.8: Format des IP-Datagramms

2.4.1.2 Transmission Control Protocol (TCP)

TCP [RFC793] stellt höheren Schichten einen verbindungsorientierten, fehlerfreien Transportkanal zur Verfügung, d. h. die Daten kommen übertragungsfehlerfrei in der richtigen Reihenfolge ohne Verluste am Ziel an. Eine ebenfalls definierte Flusssteuerung regelt über einen auf Byteebene arbeitenden Fenstermechanismus die Menge der Daten, die über das Netz gesendet werden.

Feld	Bedeutung
`V`	Version des IP
`IHL`	Länge des Datagrammkopfs in 4-Byte-Worten
`ToS`	Steuer- oder Reservierungsinformationen
`Total Length`	Länge des gesamten Datagramms
`ID`	Parameter für die Segmentierung
`F`	
`Fragment Offset`	
`TtL`	Maximale Anzahl von Übertragungsabschnitten (Hops)
`Protocol`	Protokoll der Transportschicht (TCP, UDP, ...)
`Header Checksum`	16 Bit-Prüfsumme über den Datagrammkopf
Adressfelder	Quell- und Zieladresse des Datagramms
`Options`	Informationen für Steuer-, Debug- und Routeingzwecke

Tabelle 2.1: Parameter des IP-Datagrammkopfes



`HLen`: Header Length

Abbildung 2.9: Format einer TCP-PDU

Die Adressierung der Quelle und des Ziels eines TCP-Kanals erfolgt über das Adresspaar IP-Adresse und Portnummer[1], wobei die Portnummer innerhalb eines Rechners die (Software-) Instanz angibt, für die die PDU bestimmt ist. Abbildung 2.9 zeigt den Aufbau der TCP-PDU, Tabelle 2.2 die Bedeutung der Parameter des Kopfes der TCP-PDU.

2.4.1.3 User Datagram Protocol (UDP)

Im Gegensatz zu TCP bietet UDP [RFC768] einen verbindungslosen, unquittierten Transport an. Die Adressierung der Quelle und des Ziels erfolgt ebenfalls über das Adresspaar IP-Adresse und Portnummer. UDP garantiert lediglich, dass die empfangenen Datagramme selbst mit hoher Wahr-

[1]Das Adresspaar wird auch als Socket bezeichnet, wobei ein Socket noch die Angabe des Protokolls wie TCP oder UDP beinhaltet.

Feld	Bedeutung
Portnummern	Quell- und Ziel TCP-Portnummern
`Sequence Number`	Eindeutige Kennzeichnung de TCP-PDU
`Acknowledgement Number`	Nummer der als nächstes erwarteten Quittierung
`HLen`	Länge des Kopfes in 4-Byte-Worten
`Code Bit`	Art (Klasse) der Nutzdaten
`Window`	Aktuelle Fenstergröße des Senders in Oktett
`Checksum`	Prüfsumme über TCP-PDU
`Urgent Pointer`	Priorität für z. B. TCP-Steuermeldungen
`Options`	Informationen für Kontroll- und Debugzwecke

Tabelle 2.2: Parameter einer TCP-PDU

Feld	Bedeutung
Portnummern	Quell- und Ziel UDP-Portnummern
`Length`	Länge des UDP-Datagramms
`Checksum`	optionale[2]Prüfsumme über UDP-Datagramm

Tabelle 2.3: Parameter des UDP-Datagrammkopfes

scheinlichkeit fehlerfrei sind, Datagrammverluste, -verdopplungen oder Reihenfolgevertauschungen können auftreten.

Abbildung 2.10 zeigt den Aufbau des UDP-Datagramms, Tabelle 2.3 führt die Bedeutung der Parameter des UDP-Datagrammkopfes auf.

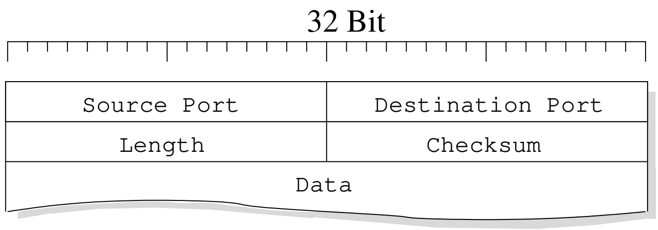


Abbildung 2.10: Format eines UDP-Datagramms

2.4.1.4 Real-Time Transport Protocol (RTP) und Real-Time Transport Control Protocol (RTCP)

Die Protokolle TCP und UDP bieten keine Unterstützung für echtzeitkritische Anwendungen wie die Garantie von Dienstgüteparametern. Daher entwickelte die Audio/Video Transport Group (AVT) der Internet Engineering Task Force (IETF) Protokolle, die diese Unterstützung bieten. Ein Ergeb-

[2] Ist das Feld mit dem Wert 0 belegt, wurde keine Berechnung der Prüfsumme durchgeführt.

nis dieser Aktivitäten ist das RTP [RFC1889], das Daten-PDUs mit Zeit- und Steuerinformationen versieht [Liu97]. Damit kann die empfangende RTP-Instanz die Daten bis zu einem gewissen Grad zeitlich korrekt, verzögerungsschwankungsbefreit ausliefern. Das Real-Time Transport Control Protocol (RTCP) dient der Steuerung von Anwendungen. So werden vom Empfänger RTCP-PDUs zurück an den Sender geschickt, die Angaben wie Verlustrate oder Übertragungszeit zurückmelden.

RTP kann für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an das Protokoll stellen. Die Flexibilität wird durch die Möglichkeit erreicht, Parameter durch ein Profil zu setzen und damit das Protokoll auf eine bestimmte Anwendungsklasse und Umgebung einzustellen. So gibt es beispielsweise für Audioübertragungen spezielle Profile, mit denen die Art der Kodierung und die Interpretation bestimmter Felder im RTP-PDU-Kopf definiert oder die Verwendung des darunterliegenden Transportprotokolls festgelegt sind.

Die Protokolle RTP und RTCP arbeiten ungesichert und verbindungslos. Es sind keine Mechanismen vorgesehen, die Auslieferung der PDUs innerhalb einer vorgegebenen Zeit sicherzustellen oder andere Dienstgüteparameter zu garantieren. Auch wird weder eine reihenfolgegemäße Auslieferung der PDUs, noch deren Auslieferung überhaupt garantiert. Allerdings unterstützt RTP die Möglichkeit, Reihenfolgenummern zu verwenden, die es dem Endsystem erlauben, die korrekte PDU-Reihenfolge zu rekonstruieren. Die Protokolle gehen nicht von einer gesicherten Übertragung der PDUs aus. So wird RTP meist zusammen mit UDP[3] eingesetzt, da im Vergleich zu TCP weniger Daten im PDU-Kopf übertragen werden müssen (Overhead). Auch sind einige Mechanismen von TCP wie die wiederholte Übertragung fehlerhaft empfangener PDUs nicht für die Übertragung echtzeitkritischer Daten geeignet.

Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau der RTP-PDU, Tabelle 2.4 zeigt die Bedeutung des Parameter des RTP-PDU-Kopfes.

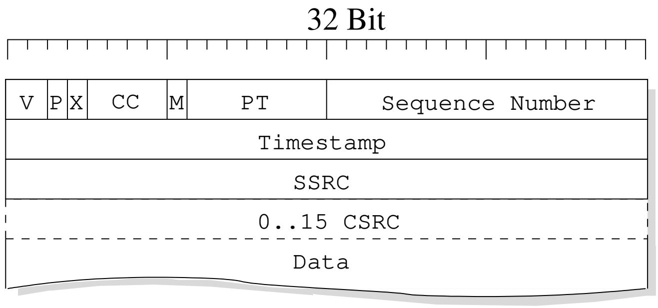
2.4.2 Protokolle der Anwendungsschicht

Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Protokolle der Anwendungsschicht eingeführt.

2.4.2.1 Hypertext Transfer Protocol (HTTP)

Das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) [RFC1945] dient der Übertragung von Hypermedia Informationen des WWW-Dienstes und basiert auf einem asymmetrischen Anfrage/Antwort-Paradigma. Dadurch ergibt sich für jede Verbindung die Rollenverteilung von Dienstnutzer und Diensterbringer.

[3] Möglich ist auch die Übertragung über andere Transportprotokolle wie dem ATM Adaptation Layer (AAL)-5 Protokoll.



`V`: Padding Bit
`P`: Version
`X`: Extension
`CC`: CSRC Counter
`M`: Marker
`PT`: Synchronization Source
`SSRC`: Contributing Source
`CSRC`: Payload Type

Abbildung 2.11: Format einer RTP-PDU

Feld	Bedeutung
`V`	Versionsnummer des RTP
`P`	’1’: PDU enthält Padding- (Füll-) Bits
`X`	’1’: Eine Erweiterung des PDU-Kopfes folgt
`CC`	Anzahl der CSRC-Anhänge
`M`	Bedeutung Profilabhängig
`PT`	Format der Nutzdaten
`Sequence Number`	Reihenfolgenummer, eindeutige Kennung der PDU
`Timestamp`	Absendezeitpunkt der PDU
`SSRC`	Kennung der Quelle für Synchronisation
`CSRC`	An der Nutzlast beteiligte Quellen (optional)

Tabelle 2.4: Parameter des RTP-PDU-Kopfes

Der Diensterbringer wird dabei über den Uniform Resource Locator (URL) adressiert. Der Dienstnutzer baut eine Verbindung zu einem Diensterbringer auf und setzt eine Anfrage mit Angabe der Art der Anfrage, der gewünschten Information, der verwendeten Protokollversion und Angaben über den Dienstnutzer ab. Optional können weitere Informationen wie die erwartete Dateiversion oder ein Nachrichteninhalt mitgesendet werden. Der Diensterbringer antwortet mit einer Statuszeile, die die Protokollversion und einen Code zur Angabe, ob die Anfrage bedient werden kann, enthält. Darauf können Metainformationen und der eigentliche Nachrichteninhalt folgen. Für die Übertragung der Anfragen bzw. Antworten wird das TCP verwendet.

2.4.2.2 File Transfer Protocol (FTP)

Um Dateien zwischen Rechnern zu übertragen, wird das File Transfer Protocol (FTP) [RFC959] verwendet, das dafür im Wesentlichen die beiden Befehle `put` und `get` für die jeweilige Übertragungsrichtung zur Verfügung stellt. FTP setzt auf dem TCP auf und arbeitet asymmetrisch, unterscheidet also zwischen Dienstnutzer und Diensterbringer. Die Festlegung der Parameter für die Übertragung und die Steuerung der Operationen erfolgt durch den Dienstnutzer. Dabei wird zwischen Steuer- und Datenverbindung unterschieden. Die Unterscheidung kann dabei je nach Modus nur logisch oder über verschiedene Sockets realisiert sein. Vor der eigentlichen Übertragung der Datei wird über die Steuerverbindung eine Authentisierung des Dienstnutzers durchgeführt.

2.4.3 Tunnelprotokolle

Tunnelprotokolle erlauben es, Datenpakete eines Netzes `A` über ein Netz `B` zu übertragen (engl.: Tunneling). Spezielle Netzknoten des Netzes `B` sorgen dafür, dass PDUs des Netzes `A` in PDUs des Netzes `B` verpackt[4], entsprechend adressiert und übertragen werden. Diese Übertragung ist transparent für Nutzer des Netzes `A`, d. h. die Nutzer müssen sich nicht um Typ oder Eigenschaften des Netzes `B` oder den Aufbau der Tunnel kümmern.

Durch das Tunneling können z. B. IP-Netze aufgebaut werden, die über serielle Modem-Leitungen (Point-to-Point Protocol (PPP) bzw. Point to Point Tunneling Protocol (PPTP)) oder ATM-basierte Netze arbeiten. Auch können abgeschlossene IP-Netze mit eigenem IP-Adressraum aufgebaut werden, die durch andere IP-Netze, z. B. dem Internet, realisiert werden (Virtual Private Network (VPN)). Dieses IP-Tunneling [RFC2003] beruht darauf, dass dem zu transportierenden IP-Datagramm in einem Netzknoten des Netzes `B` ein neuer IP-Datagrammkopf vorangestellt wird. Der Kopf enthält als Quelladresse die Adresse dieses Netzknotens und als Zieladresse einen Netzknoten, der den Endpunkt des Tunnels bildet und das transportierte Datagramm wieder entpackt, also den Tunnel-Datagrammkopf entfernt. Das Datagramm wird dann wie gewohnt im Zielnetz seinem Empfänger zugestellt. Der Tunnel verhält sich damit wie eine Direktverbindung zwischen den beiden Netzknoten des Tunnels.

2.4.4 IP-Telefonie nach H.323

Um eine Zusammenarbeit der Hard- und Softwarekomponenten der IP-Telefonie zu gewährleisten, verabschiedete die ITU-T Anfang 1998 die Version 2 der Empfehlung H.323 [H323] für ‘paketbasierte Multimediakommunikationssysteme’ (engl.: Packet-Based Multimedia Communications Systems). Basierend auf dieser Empfehlung einigten sich die Mitglieder des VoIP-Forums, dem Vertreter der meisten Kommunikationsunternehmen angehören, auf ein Implementation Agreement (IA) zur Audioübertragung in IP-basierten Netzen.

[4]Dabei wird hier angenommen, dass das Netz `B` ebenfalls ein paketvermittelndes Netz ist.

Die Empfehlung H.323 ist als Rahmenempfehlung entwickelt, in dem für die verschiedenen Bereiche der paketbasierten Telefonie weitere Empfehlungen angegeben sind. Diese beschreiben Endgeräte und andere Instanzen, die Multimediakommunikationsdienste über paketbasierte Netze wie IP-Netze[5], die von sich aus keine garantierte Dienstgüte (QoS) zur Verfügung stellen können, ermöglichen. Instanzen des H.323 unterstützen u. a. Echtzeitaudio-, Video- und Datenübertragung. Die Unterstützung von Sprachübertragung (Audio) ist vorgeschrieben, während Daten- und Videoübertragung wahlweise unterstützt werden können. Weitere Informationen über H.323 finden sich bei Toga et al. [TO99], Pauler [Pau98] und Reid [Rei99].

Die wesentlichen Bestandteile eines auf der Empfehlung H.323 basierenden Netzes sind:

Endgeräte: Sie bieten Anwendern den Zugang zu Kommunikationsdiensten. Zentraler Bestandteil ist dabei der Sprachkodierer (engl.: Voice Codec). In H.323 sind verschiedene Kodierer definiert, jedes Endgerät muss mindestens den PCM-Kodierer nach der ITU-T Empfehlung G.711 unterstützen[6], weitere Sprachkodierer (wie in G.723.1 oder G.729 definiert) sind optional. Im VoIP-Forum wird der in G.723.1 definierte Sprachkodierer bevorzugt.

Gateway: Das Gateway ist die Schnittstelle zwischen dem paketbasierten Netz und dem meist ISDN-basierten Telefonnetz. Es übernimmt im paketbasierten Netz die Aushandlung der Kommunikationsfähigkeiten der beteiligten Geräte, den Aufbau und das Auslösen der Verbindung und mittels des Registration, Admission and Status (RAS)-Dienstes die Anmeldung am Gatekeeper. Auf der Seite des Telefonnetzes werden die für ISDN üblichen Empfehlungen wie E-DSS1 und/oder SS7 unterstützt. Die Umsetzung der Signalisierung zwischen H.323-Signalisierung und SS7-Signalisierung ermöglicht es Nutzern, eine gewohnte Umgebung vorzufinden, d. h. eine gewohnte Telefonnummer zu wählen oder Dienste wie 'Rückruf bei Besetzt' zu nutzen. Das Gateway nimmt, neben der Signalisierung, auch die Anpassung der Sprach- und Videodaten vor.

Gatekeeper: Der Gatekeeper dient als zentrale Steuerungsinstanz für Verbindungen in einem H.323-basierten Kommunikationsnetz. Der Einsatz eines Gatekeepers ist optional. Ist er vorhanden, übernimmt er das Datenratenmanagement, die Autorisierung und Authentisierung von Endgeräten und Gateways und die Umsetzung von z. B. IP-Adressen auf ISDN-konforme Rufnummern nach der ITU-T Empfehlung E.164 und umgekehrt. Auch kann der Gatekeeper, da er Informationen über alle Gespräche führt, die Gesprächsdatenerfassung zur Entgeltabrechnung durchführen.

[5]In H.323 findet sich keine Festlegung bezüglich des Netztyps, auch ATM, FDDI oder Token Ring sind möglich. In diesem Bericht wird im Weiteren aber von IP-basierten Netzen ausgegangen.

[6]G.711 wird auch im ISDN verwendet und benötigt bei einer Bandbreite des Sprachsignals von 3,1 kHz 64 kbit/s Übertragungsrate.

Multipoint Control Unit (MCU): Durch die MCU werden Konferenzen zwischen drei oder mehr H.323-Endgeräten oder Gateways unterstützt. Die MCU überwacht dabei die verwendeten Ressourcen wie die Bandbreite der Verbindung und handelt zwischen den Endgeräten die eingesetzten Komponenten wie die verwendeten Sprachkodierer aus.

2.4.5 Dienstgüte-Architekturen

Da auf den genannten Protokollen IP, UDP und TCP basierende Netze prinzipiell nach dem Best-Effort Prinzip arbeiten, können nur sehr eingeschränkt interaktive Anwendungen über derartige Netze abgewickelt werden. Protokolle wie RTP ermöglichen es dem Empfänger lediglich, die gesendeten Datenpakete zeitrichtig höheren Protokollschichten zur Verfügung zu stellen und dem Sender Rückmeldung über die Qualität der Übertragung zu geben. Sie beinhalten aber keinerlei Mechanismen, die Übertragung bestimmter Datenpakete zu beeinflussen. Dafür wurden von der IETF zwei Architekturen – Integrated Services (IntServ) und Differentiated Services (DiffServ) – entwickelt, die eine gewisse Unterstützung für echtzeitkritische Übertragung von Daten bieten. Eine der Hauptunterschiede der beiden Architekturen ist, dass IntServ Dienstgüte-Parameter wie Bandbreite absolut zur Verfügung stellen kann, während DiffServ verschiedene Verkehrsströme lediglich relativ zueinander behandeln kann. Die beiden Architekturen werden im Folgenden eingeführt.

2.4.5.1 IntServ

Das seit 1994 von IETF entwickelte Architekturmodell IntServ [RFC1633] umfasst sowohl ein integriertes Dienstgüte-Modell, das eine Klassifikation von Anwendungen und eine Definition von Diensten beinhaltet, als auch ein Rahmenwerk für die Implementierung. Der Ausgangspunkt der Architektur ist die explizite Verwaltung der für die Übertragung notwendigen Ressourcen im Netz, um Dienstgüte-Anforderungen erfüllen zu können. Dazu ist es zum einen notwendig, Ressourcen reservieren und den Verkehrsströmen zuteilen zu können, zum anderen muss eine Zugangskontrolle dafür sorgen, dass , abgesehen vom Best-Effort Service, nur der Verkehr in das Netz zugelassen wird, für den eine Reservierung vorgenommen wurde. Bei IntServ wird für jeden Verkehrsstrom, der Anforderungen an die Dienstgüte hat, auf dem Pfad zwischen Sender und Empfänger in jedem Knoten explizit eine Reservierung für diese Dienstgüte-Anforderungen vorgenommen.

Die IntServ Architektur bietet drei Dienste (engl.: Services) an:

Guaranteed Service: Dieser Dienst garantiert für Echtzeitanwendungen eine bestimmte Mindestdatenrate und Obergrenze für die Verzögerung.

Controlled-Load Service: Bietet für tolerantere Echtzeitanwendungen ein Verhalten, das dem Dienst 'Best-Effort Service' bei unbelasteten Netz entspricht. Er realisiert also keine garantierten Dienstgüte-Parameter, aber eine bevorzugte Behandlung des Verkehrs.

Best-Effort Service: Die nicht durch die beiden anderen Dienste benötigten Ressourcen werden unter den Anwendungen dieses Dienstes aufgeteilt. Der Dienst entspricht dem Verhalten eines normalen IP-basierten Netzes.

Die Nachteile der Architektur sind neben dem Signalisieraufwand für die Reservierungen, dass in jedem Knoten des Netzes für jeden Verkehrsstrom, der über diesen Knoten fließt, Informationen über diesen Verkehrsstrom gehalten werden müssen. Des Weiteren müssen diese Knoten jedes IP-Datagramm klassifizieren, einer Reservierung zuordnen und bestimmen, ob es noch innerhalb des vereinbarten Verkehrsvertrages ist. Dies erfordert eine hohe Komplexität der Knoten des Netzes und senkt die Leistungsfähigkeit bei einer großen Zahl von Reservierungen. Damit stellt sich die Frage, ob sich Netze nach diesem Prinzip hinsichtlich der Größe skalieren lassen.

2.4.5.2 DiffServ

Seit 1998 entwickelt die IETF die Architektur DiffServ [RFC2475], die die genannten Nachteile von IntServ umgeht. Diese Architektur sieht nur in den Knoten am Netzrand (engl.: Boundary Nodes, Edge-Router) komplexe Funktionen für die Klassifizierung und Markierung der IP-Datagramme vor. Liegt das IP-Datagramm innerhalb eines für diese Klasse vereinbarten Verkehrsvertrages (Service Level Agreement (SLA)), wird es mit einer bestimmten Markierung, dem Differentiated Service Codepoint (DSCP), versehen und in das Netz weitergeleitet. Die Knoten im Netzinnern (engl.: Interior Nodes) sehen lediglich aufgrund der Markierung zusammengefasste (aggregierte) Verkehrsströme, die anhand eines Weiterleitungmusters, dem Per-Hop Behavior (PHB), entsprechend behandelt werden.

Es müssen also in keinem Netzknoten Informationen oder Reservierungen über einzelne Verkehrsströme gespeichert oder Reservierungen explizit angefordert werden. Allerdings kann das Architekturmodell DiffServ keine absoluten Dienstgüte-Anforderungen für einzelne Verkehrsströme erfüllen, da zum einen keine Reservierungen bestehen und zum anderen im Netz für die Knoten lediglich zusammengefasste Verkehrsströme zu sehen sind. Es ist also wichtig, entsprechend der Weiterleitungsmuster die Verkehrsverträge an den Netzrandknoten so auszulegen, dass im Netz den einzelnen Verkehren ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen [GP01].

Kapitel 3 Das Mobilfunksystem GSM

Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Aspekte des Mobilfunksystems GSM diskutiert. Dabei wird insbesondere auf die bei GSM definierte Möglichkeit der paketorientierten Datenübertragung mittels GPRS eingegangen.

3.1 Einführung

Bereits 1982 wurde in der Conference Européenne des Administration des Postes et des Télécommunications (CEPT) die Gruppe ‘Groupe Spéciale Mobile (GSM)’ mit dem Ziel gebildet, einen europäischen Standard für ein öffentliches, zellulares Mobilfunksystem zu entwickeln. 1989 wurde die Verantwortung für den Standard der ETSI übertragen, die 1990 die Phase I der GSM-Spezifikationen veröffentlichte. 1993 gab es in 22 Ländern 36 GSM-Netze, derzeit sind in 169 Ländern weltweit über 401 GSM-Netze in Betrieb[1] [GSM01].

Der GSM-Standard umfasst heute neben der mobilen Telefonie Datendienste wie High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD), General Packet Radio Service (GPRS), Enhanced GPRS (EGPRS) und schnurlose, digitale Telefonie mittels des Cordless Telephony System (CTS).

3.2 Zellulares Mobilfunksystem

Bei GSM als einem zellularen Mobilfunksystem ist die geographische Abdeckungsfläche in einzelne Zellen mit einem Durchmesser zwischen 300 m und 35 km aufgeteilt. Jeder Zelle ist eine bestimmte Menge von Funkfrequenzen zugeteilt, die in einem bestimmten Abstand von Zellen wieder verwendet werden können. Da die Signalstärke des Sendesignals mit der Entfernung zum Sender überproportional abnimmt, sind Störungen durch Sender mit derselben Frequenz in entfernten Zellen ausreichend gering. Durch diese Frequenzwiederverwendung (engl.: Frequency Reuse) können

[1] Inklusive Digital Cellular System 1800 (DCS1800) und Digital Cellular System 1900 (DCS1900), zweier auf dem GSM-Standard beruhende Standards, die im Wesentlichen auf anderen Frequenzbändern arbeiten.

deutlich mehr Funkverbindungen realisiert werden, als wenn das gesamte Abdeckungsgebiet ohne räumliche Unterteilung versorgt werden würde.

Für die modellhafte Betrachtung werden die Zellen meist als Hexagone dargestellt [Wal98b], [Stü99b]. Zellen werden dabei zu Clustern zusammengefasst, innerhalb derer Funkfrequenzen nicht mehrfach verwendet werden. Abbildung 3.1 zeigt ein Modell eines zellularen Mobilfunknetzes mit einer Clustergröße von sieben. Zellen mit derselben Nummer deuten an, dass in diesen Zellen dieselben Funkfrequenzen verwendet werden. Je größer ein Cluster gewählt wird, desto weniger Störungen von Zellen mit denselben Funkfrequenzen treten auf. Allerdings stehen dann, bei gleich bleibender Gesamtzahl von Funkfrequenzen, weniger nutzbare Funkfrequenzen pro Zelle zur Verfügung.

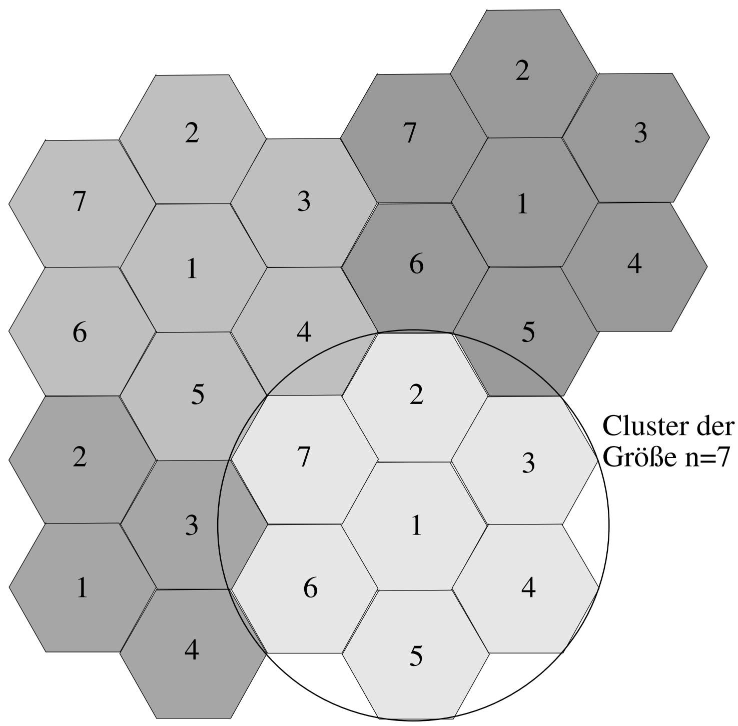
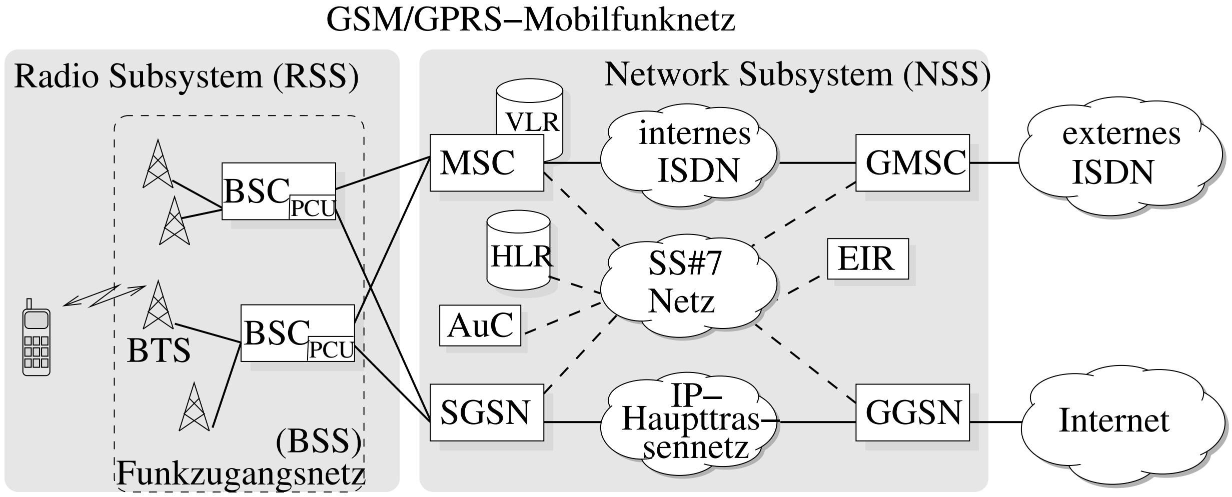


Abbildung 3.1: Modell eines zellularen Mobilfunknetzes mit einer Clustergröße von n=7

Insbesondere für das Mobilitätsmanagement (siehe Abschnitt 3.6.1) werden bei GSM mehrere Zellen zu einer Location Area (LA) zusammengefasst. Bei GPRS ist zusätzlich die Routeing Area (RA) definiert, die ebenfalls aus mehreren Zellen besteht, immer aber aus einer Untermenge von Zellen einer LA.

3.3 Systemarchitektur

Abbildung 3.2 zeigt die Systemarchitektur eines GSM/GPRS-basierten Mobilfunknetzes mit den wichtigsten Netzkomponenten. Das Mobilfunknetz lässt sich in drei Untersysteme (engl.: Subsystems) unterteilen:



BSS: Base Station System
BTS: Base Transceiver Station
BSC: Base Station Controller
MSC: Mobile Switching Centre
GMSC: Gateway MSC
VLR: Visitor Location Register
HLR: Home Location Register
AuC: Authentication Centre
EIR: Equipment Identity Register
PCU: Packet Control Unit
SGSN: Serving GPRS Support Node
GGSN: Gateway GPRS Support Node
—— Sprach– und Datenverbindungen
– – · Signalisierverbindungen

Abbildung 3.2: Netzarchitektur des GSM/GPRS-Mobilfunknetzes

Radio Subsystem (RSS): Zuständig für die Funkübertragung und die Zuteilung der Funkressourcen an die einzelnen Teilnehmer. Das RSS besteht neben den mobilen Endgeräten aus dem Base Station System (BSS), das das gesamte Funkzugangsnetz, bestehend aus den Base Transceiver Station (BTS) und den Base Station Controller (BSC), umfasst. Der BSC ist für die Verwaltung der Funkressourcen wie die Freigabe oder Reservierung einzelner Funkkanäle zuständig, während die BTS die Sende- und Empfangsanlage, einschließlich der Antennen und der nötigen Signalverarbeitung, enthält[2].

Network Subsystem (NSS): Realisiert einerseits den Festnetzteil des Mobilfunknetzes und ist andererseits Teil des Übergangsnetzes zwischen dem Mobilfunknetz und anderen öffentlichen Netzen. Zu den Hauptkomponenten des NSS zählen das Mobile Switching Centre (MSC), das Visitor Location Register (VLR), das Home Location Register (HLR), das Equipment Identity Register (EIR) und das Authentication Centre (AuC). Das MSC erfüllt als digitale Vermittlungsstelle alle Aufgaben, die zur Gesprächsvermittlung und Dienstesteuerung im Netz nötig

[2] Je nach Hersteller sind die Funktionalitäten unterschiedlich zwischen BTS und BSC verteilt.

sind. Weitere Funktionalitäten beinhalten die Teilnehmermobilität[3], die Authentisierung der Teilnehmer sowie die Generierung von Entgeltdaten. Die einem MSC zugeordnete Datenbank VLR dient der Verwaltung von Teilnehmern, die im jeweiligen MSC-Servicebereich aktiv sind. Der Servicebereich eines MSC erstreckt sich dabei über mehrere, dem MSC zugeordnete BSC. Das HLR als zentrale Datenbank speichert alle relevanten Daten eines registrierten Teilnehmers wie z. B. Rufnummer, Teilnehmeridentität und abonnierte Basis- und Zusatzdienste. Weiter werden temporäre Daten gehalten, die zum Verbindungsaufbau notwendig sind wie Informationen über den MSC-Servicebereich, in dem sich der Teilnehmer aktuell aufhält. Verlässt ein Teilnehmer einen MSC-Servicebereich, werden entsprechende Änderung an den Daten im alten und neuen VLR und im HLR durchgeführt. AuC und EIR erfüllen sicherheitsrelevante Aufgaben wie die Authentisierung der Teilnehmer und der mobilen Endgeräte. Verbunden sind die einzelnen Komponenten über ein ISDN-basiertes Festnetz für die Übertragung von Nutzdaten (Sprache und verbindungsorientierte Datendienste) und über ein auf dem SS7-Standard basierendes Signalisiernetz.

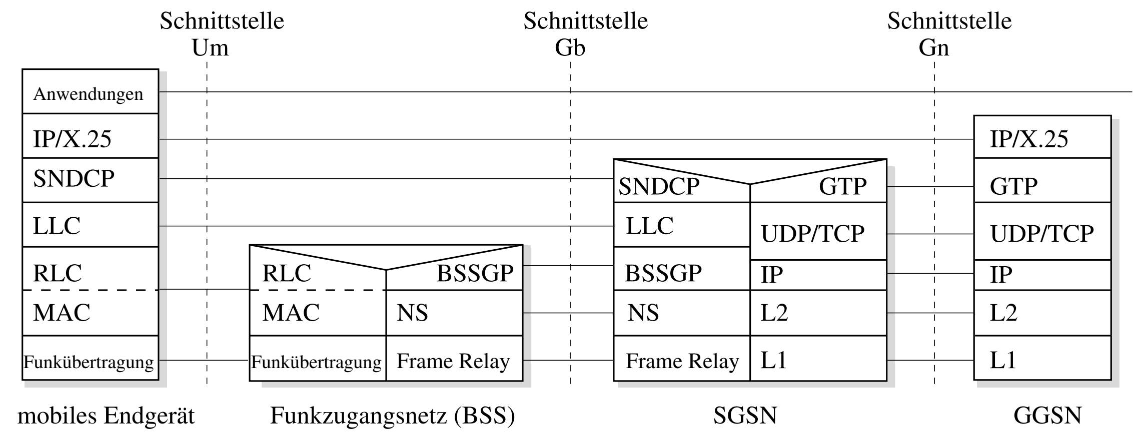
Operation Subsystem (OSS): Umfasst alle für Betrieb und Wartung wichtigen Funktionen und bildet für den Netzbetreiber die Managementplattform für das gesamte Netz. Aus Gründen der Übersicht wurde das OSS nicht in Abbildung 3.2 aufgenommen.

Mit der Einführung des GPRS kann das BSS des bestehenden GSM-Netzes im Wesentlichen weiter genutzt werden. Lediglich im Festnetz muss ein Teilnetz hinzugefügt werden (GPRS-Festnetz). Weiter wird der BSC um eine Packet Control Unit (PCU) erweitert, die den Verkehr auftrennt bzw. zusammenführt. Der Sprachverkehr und verbindungsorientierte Datendienste gehen weiterhin zum MSC, der paketorientierte Datenverkehr wird von der PCU zum Serving GPRS Support Node (SGSN) geleitet. Dieser übernimmt für paketvermittelte Datendienste im Wesentlichen dieselben Funktionen wie das MSC für Sprache und verbindungsorientierte Datendienste. Vom SGSN werden die Daten über ein IP-basiertes Haupttrassennetz (engl.: Backbone) zum Gateway GPRS Support Node (GGSN) geleitet. Der GGSN fungiert als IP-Router mit Teilnehmermobilitätsunterstützung und stellt den Übergang zum Internet, zu anderen GPRS-Netzen oder zu z. B. firmeninternen Netzen (engl.: Intranet) dar. Für die Teilnehmerlokalisierung und die Mobilitätsunterstützung greifen die GPRS Support Node (GSN)[4] auf Informationen des VLR und des HLR zurück und sind ebenfalls an das Signalisiernetz angeschlossen.

[3]Der Begriff Teilnehmer bezieht sich hier auf einen Kommunikationspartner mit mobilem Endgerät.
[4]Überbegriff für die Netzknoten des GPRS-Festnetzes: SGSN und GGSN.

3.4 Protokollarchitektur

Die GSM/GPRS-Protokollarchitektur ist in mehrere Protokollschichten unterteilt. Unterschieden wird zwischen den Protokollen zur Übertragung von Nutzdaten (Sprache, Daten) und den Protokollen für die Signalisierung. Im Folgenden werden die Protokollschichten des GPRS dargelegt, die für die vorliegende Arbeit relevant sind [GSM0360c]. Abbildung 3.3 zeigt den Protokollstapel für die Übertragung von Nutzdaten zwischen dem mobilen Endgerät und dem GGSN, d. h. dem gesamten Übertragungabschnitt der Nutzdaten innerhalb des GPRS-Netzes.



SNDCP: Subnetwork Dependent Convergence Protocol
LLC: Logical Link Control
RLC: Radio Link Control
MAC: Medium Access Control
BSS: Base Station System
L1, L2: Bei GPRS nicht näher spezifizierte Schichten

BSSGP: BSS GPRS Protocol
NS: Network Service
GTP: GPRS Tunneling Protocol
UDP: User Datagram Protocol
TCP: Transmission Control Protocol
IP: Internet Protocol

Abbildung 3.3: Protokollschichten für die Übertragung von Nutzdaten bei GPRS zwischen mobilem Endgerät, SGSN und GGSN

Abbildung 3.4 zeigt die Protokollschichten für die Übertragung von Signalisiermeldungen zwischen dem mobilen Endgerät und dem SGSN. In Abbildung 3.5 sind die Protokollschichten für die Übertragung von Signalisiermeldungen zwischen den GSN und den Netzknoten des GSM-Netzes (HLR, EIR, . . .), die über das Signalisiernetz angebunden sind, dargestellt.

Die Aufgaben der einzelnen Protokollschichten, mit Ausnahme der Schichten des SS7, die bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurden, werden im Folgenden dargelegt:

Funkübertragung: Die GPRS-Funkübertragung kann in zwei Unterschichten unterteilt werden: In den `Physical Radio Frequency Layer` und in den `Physical Link Layer`. Der `Physical Radio Frequency Layer` ist u. a. für die Modulation des zu sendenden bzw. die Demodulation des empfangenen Funksignals zuständig. Einen physikalischen

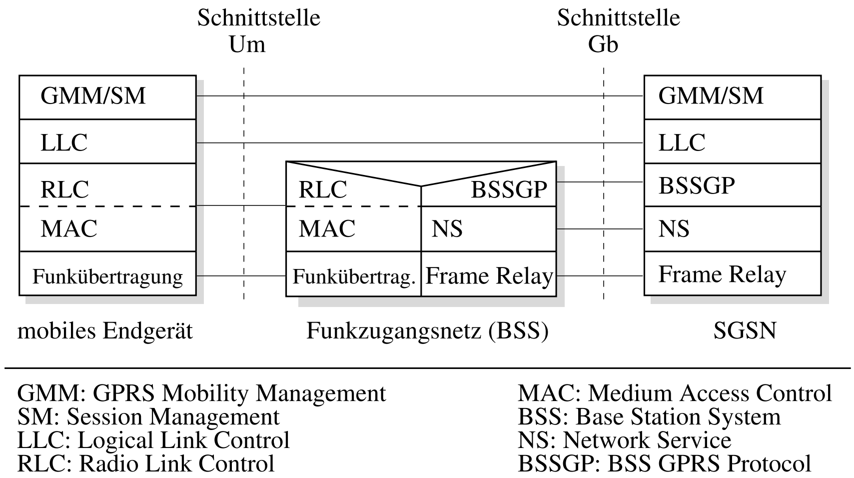
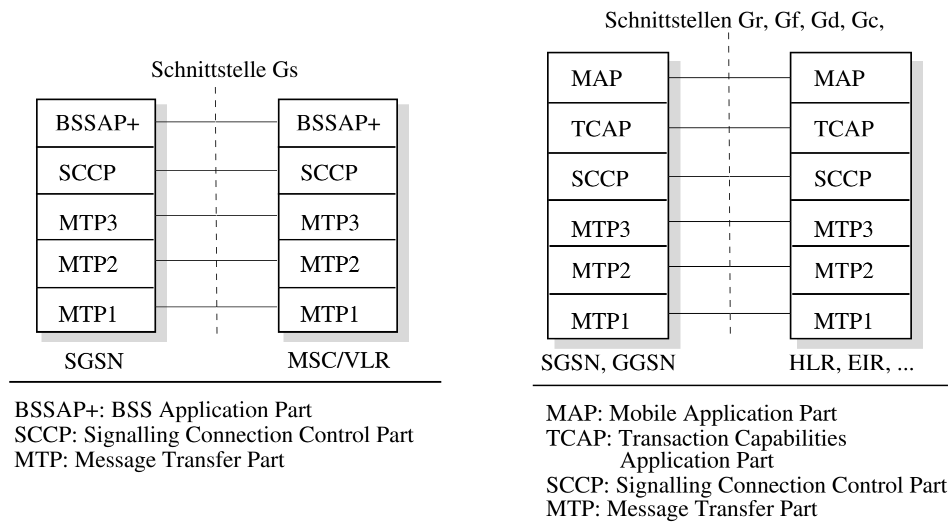


Abbildung 3.4: GPRS-Protokollschichten für die Signalisierung zwischen mobilem Endgerät und SGSN



(a) Übertragung zwischen SGSN und MSC bzw. VLR

(b) Übertragung zwischen SGSN bzw. GGSN und HLR, EIR, …

Abbildung 3.5: GPRS-Protokollschichten für Signalisierung zwischen SGSN, GGSN und den über SS7 angebundenen Netzknoten

Übertragungskanal stellt der `Physical Link Layer` der MAC-Schicht zur Verfügung, erzeugt also z. B. beim Empfänger aus den einzelnen Bit des `Physical Radio Frequency Layer` Datenblöcke und erkennt bzw. korrigiert soweit möglich Übertragungsfehler [GSM0501].

Frame Relay: Zwischen dem SGSN und dem BSS definiertes Übertragungsprotokoll [T1606].

Medium Access Control (MAC): Regelt den Zugriff der mobilen Endgeräte auf die gemeinsam genutzten Ressourcen der Funkübertragung wie die Reservierung und Nutzung eines oder mehrerer physikalischer Kanäle (siehe Abschnitt 3.5.8). Die MAC definiert eine Reihe logischer Kanäle (siehe Abschnitt 3.5.5) für die Übertragung von Nutzdaten und Signaliermeldungen, die auf physikalische Kanäle abgebildet werden. Weiter sorgt die MAC bei einer Übertragung vom mobilen Endgerät dafür, dass die Zugriffswünsche mehrerer mobiler Endgeräte zum BSS übertragen, die physikalischen und logischen Kanäle entsprechend verteilt und den mobilen Endgeräten zugewiesen werden [GSM0460].

Network Service (NS): Überträgt PDUs zwischen dem SGSN und dem BSS über eine Frame-Relay Verbindung [GSM0816].

Radio Link Control (RLC): Stellt zusammen mit der MAC Dienste zur Verfügung, um PDUs höherer Schichten zwischen mobilen Endgeräten und dem BSS zu übertragen. Eine direkte Übertragung zwischen zwei mobilen Endgeräten ist nicht möglich. Für die Übertragung stehen ein gesicherter (`Acknowledged Mode`) und ein ungesicherter Modus (`Unacknowledged Mode`) zur Verfügung. Die RLC ist für die Aufteilung (Segmentierung) und Wiederzusammensetzung (Reassemblierung) von PDUs in bzw. aus RLC/MAC-Blöcken zuständig, deren Größe abhängig vom aktuellen Zustand des Funkkanals ist (siehe Abschnitt 3.5.7). Weiter sorgt die RLC im gesicherten Modus dafür, dass fehlerhaft empfangene RLC/MAC-Blöcke erneut übertragen werden (Backward Error Correction (BEC) mittels Automatic Request for Retransmission (ARQ)) [GSM0460].

BSS GPRS Protocol (BSSGP): Stellt neben der Übertragung von Nutzdaten und Signaliermeldungen Dienste zur Verfügung, die die Synchronisation zwischen BSS und SGSN ermöglichen und dem SGSN (Status-) Informationen über die Funkübertragung bereitstellen [GSM0818].

Logical Link Control (LLC): Stellt der Vermittlungsschicht einen hochverfügbaren, geschützten Übertragungskanal zur Verfügung. Der LLC ist im Wesentlichen unabhängig von der Funkübertragung, so dass auch andere Verfahren für die Funkübertragung wie EGPRS oder UMTS eingesetzt werden können. Der zur Verfügung gestellte Übertragungskanal kann dabei entweder in einem gesicherten oder in einen ungesicherten Modus betrieben werden. Durch kryptographische Methoden (Ciphering) ist eine Vertraulichkeit des Übertragungskanals gegeben [GSM0464].

Subnetwork Dependent Convergence Protocol (SNDCP): Abstrahiert zwischen den Protokollen der Sicherungsschicht und höheren Protokollschichten wie IP oder X.25 [X25]. So ist z. B. die maximale PDU-Länge für Anwendungen nicht durch die maximale PDU-Länge der Sicherungsschicht begrenzt. SNDCP bietet höheren Schichten sowohl einen gesicherten als auch einen ungesicherten Übertragungsdienst an. Weiter sind in diesem Protokoll Komprimierungsalgorithmen für Daten- und PDU-Köpfe definiert, die eine effiziente Funkübertragung ermöglichen [GSM0465].

GPRS Tunneling Protocol (GTP): Transportiert durch einen geschützten Tunnel Nutzdaten und Signalisiermeldungen zwischen den GSN im IP-basierten Haupttrassennetz des GPRS. Dabei wird jeder GPRS-Verbindung (PDP-Kontext) eines mobilen Endgerätes eine eindeutige Kennung, der Tunnel Identifier (TID), zugewiesen. Dieser ermöglicht eine Zuordnung der Daten und Meldungen zu einer Verbindung. Der PDP-Kontext bildet eine logische Verbindung für die Anwendungen zwischen dem mobilen Endgerät und dem GGSN, definiert durch das mobile Endgerät und einem eindeutigen SAP innerhalb des mobilen Endgerätes. Jedem PDP-Kontext können neben einer PDP-Adresse weitere Parameter für die Dienstgüte oder die Übertragung zugewiesen werden [GSM0960].

3.5 Physikalische und logische Kanäle

In diesem Abschnitt werden die GPRS-spezifischen Eigenschaften der Funkübertragung und die Bereitstellung von physikalischen und logischen Kanälen für die Übertragung von Daten und Signalisiermeldungen beschrieben. Die Frequenz- und Multiplexstruktur sowie der Aufbau der physikalischen Kanäle sind dabei für GSM, GPRS und EGPRS dieselben. Zusätzlich wurden für GPRS und EGPRS neue logische Kanäle und für EGPRS ein neues Modulationsverfahren (Eight Phase Shift Keying (8-PSK)) definiert.

3.5.1 Modulationsverfahren

Für GSM und GPRS ist das Modulationsverfahren Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) definiert, bei dem jedes Symbol 1 Bit repräsentiert. Symbol (Schritt) bezeichnet dabei eine Amplituden/Phasen-Kombination des Funksignals. Das GMSK-Verfahren basiert auf dem Minimum Shift Keying (MSK)-Verfahren, das durch einen Gaußschen Tiefpassfilter erweitert wird, der die notwendige Bandbreite der Funkübertragung reduziert.

3.5.2 Frequenz- und Multiplexstruktur

Damit die Funkressourcen gleichzeitig von verschiedenen mobilen Endgeräten genutzt werden können, werden durch Vielfachzugriffsverfahren (engl.: Multiple Access) mehrere unabhängige, physikalische Kanäle zur Verfügung gestellt. Als Verfahren wird eine Kombination aus Zeitmultiplex (engl.: Time Division Multiple Access (TDMA)) und Frequenzmultiplex (engl.: Frequency Division Multiple Access (FDMA)) eingesetzt. Die zur Verfügung stehende Bandbreite wird in verschiedene Trägerfrequenzen unterteilt (FDMA). Jede dieser Trägerfrequenzen ist weiter durch Zeitschlitze (engl.: Timeslot (TS)) in der Zeit unterteilt (TDMA).

Die ITU-T, die die internationale Einteilung von Funkfrequenzen verwaltet, stellt für GSM das Spektrum von 890-915 MHz für den Verkehr vom mobilen Endgerät (Uplink) und 935-960 MHz für den Verkehr zum mobilen Endgerät (Downlink) zur Verfügung.

Das jeweils zur Verfügung stehende Frequenzband von 25 MHz wird in 124 Trägerfrequenzen (Radio Frequency Channel (RFCH)) mit jeweils einer Bandbreite von 200 kHz aufgeteilt, die verbleibende Bandbreite von 200 kHz wird nicht genutzt und dient als Schutzband zu benachbarten Frequenzbändern. Jeder dieser RFCH wird durch Zeitmultiplex in acht sich zyklisch wiederholende Zeitschlitze mit einer Dauer von jeweils $\frac{15}{26}$ ms unterteilt. Diese acht Zeitschlitze werden zu einem $\frac{120}{26}$ ms dauernden TDMA-Rahmen (engl.: TDMA-Frame) zusammengefasst, was in Abbildung 3.6 verdeutlicht ist.

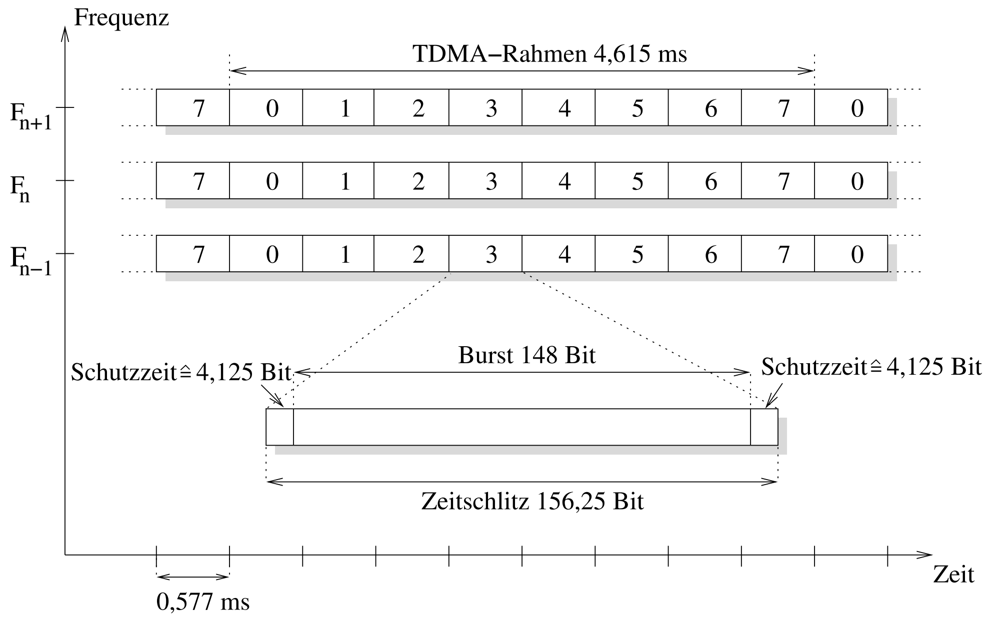


Abbildung 3.6: Vielfachzugriffsverfahren durch Zeit- und Frequenzmultiplex bei GSM

3.5.3 Burststruktur

In jedem Zeitschlitz ist ein so genannter Burst eingebettet, der den physikalischen Inhalt (engl.: Physical Content) eines Zeitschlitzes repräsentiert. Bei der GMSK-Modulation können dabei 148 Bit, bei der 8-PSK-Modulation 444 Bit übertragen werden. Der Burst ist um 0,031 ms (≙ 8,25 Bit) kürzer als ein Zeitschlitz, was als Schutzzeit (engl.: Guard Time) gegen Überlappungen zwischen aufeinander folgenden Bursts verwendet wird (siehe Abbildung 3.6).

In GSM sind fünf Bursts definiert (siehe Abbildung 3.7):

Frequency Correction Burst (F-Burst): Ermöglicht dem mobilen Endgerät seine Frequenz mit der des BSS abzugleichen und so die Übertragungsqualität zu erhöhen.

Dummy Burst: Wird übertragen, wenn keine Daten zur Übertragung anliegen.

Normal Burst (N-Burst): Übertragung von Nutzdaten und Signalisiermeldungen. Es ist je eine Version für die GMSK-Modulation und die 8-PSK-Modulation definiert.

Synchronisation Burst (S-Burst): Zeitliche Synchronisation zwischen Basisstation und mobilem Endgerät.

Access Burst (A-Burst): Übermittelt den Verbindungsaufbauwunsch eines mobilen Endgerätes. Dieser Burst ist kürzer als die anderen, um Störungen durch nicht synchrone mobile Endgeräte zu vermeiden.

3.5.4 Physikalische Kanäle

Ein physikalischer Kanal (engl.: Physical Channel) ist definiert durch eine feste Zeitschlitznummer (Timeslot Number (TN)) innerhalb eines TDMA-Rahmens und einer zeitlichen Abfolge von TDMA-Rahmen (engl.: TDMA-Frame Sequence). Diese Abfolge der TDMA-Rahmen ist durch eine Funktion bestimmt (engl.: Radio Frequence Channel Sequence), die aus verschiedenen Parametern jedem TDMA-Rahmen eine Funkfrequenz zuordnet (Abschnitt 5.4 und 5.5 in [GSM0502c]). Bei GSM, GPRS und EGPRS wird kein oder das langsame Frequenzsprungverfahren (engl.: Slow Frequency Hopping (SFH)) mit wahlweise zyklischem oder nicht-zyklischem Wechsel der Frequenzen verwendet. Beim Frequenzsprungverfahren werden die Daten nicht über eine fest zugeordnete Frequenz, sondern über mehrere Frequenzen übertragen. Ist eine Frequenz gestört, gehen nicht alle zu übertragenden Daten verloren, sondern nur ein Teil. Durch den Einsatz von Fehlerkorrekturverfahren wie Forward Error Correction (FEC) können die teilweise gestört empfangenen Daten rekonstruiert werden, so dass beim Empfänger wieder die vollständige Information zur Verfügung steht. Untersuchungen darüber finden sich u. a. bei Joyce et al. [JIL97] und Olofsson et al. [ONS95]. Ein weiterer

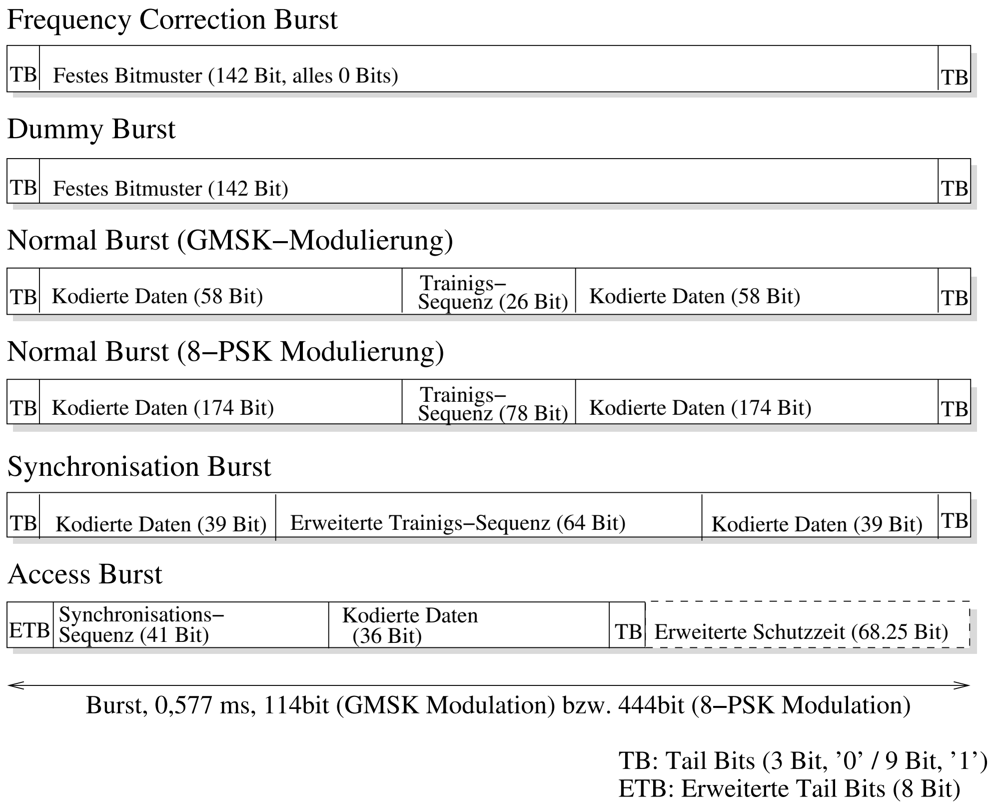


Abbildung 3.7: Bei GSM definierte Burstarten

FN	0	1	2	3	4	...
Frequenz	F_{n-1}	F_{n+1}	F_n	F_{n-1}	F_{n+1}	...

Tabelle 3.1: Beispiel einer Frequenzsprungsequenz

Effekt des Frequenzsprungverfahrens ist, dass eine gewisse Abhörsicherheit des Funkkanals erreicht wird.

Das Beispiel in Abbildung 3.8 verdeutlicht das Verfahren. Der eingezeichnete physikalische Kanal ist bestimmt durch die Zeitschlitznummer zwei und der in Tabelle 3.1 gezeigten Frequenzsprungsequenz.

3.5.5 Logische Kanäle bei GPRS

Die bei GPRS definierten logischen Kanäle lassen sich in zwei Gruppen unterteilen [GSM0502c]:

Verkehrskanäle (engl.: Packet Data Traffic Channel (PDTCH)): Sie sind bei GPRS grundsätzlich unidirektional und dienen der Übertragung von Nutzdaten zwischen dem mobilen Endgerät und der Basisstation. Definiert sind Vollratenkanäle (PDTCH/F) und Halbratenkanäle (PDTCH/H), die die halbe Übertragungskapazität zur Verfügung stellen. Aufgrund der dyna-

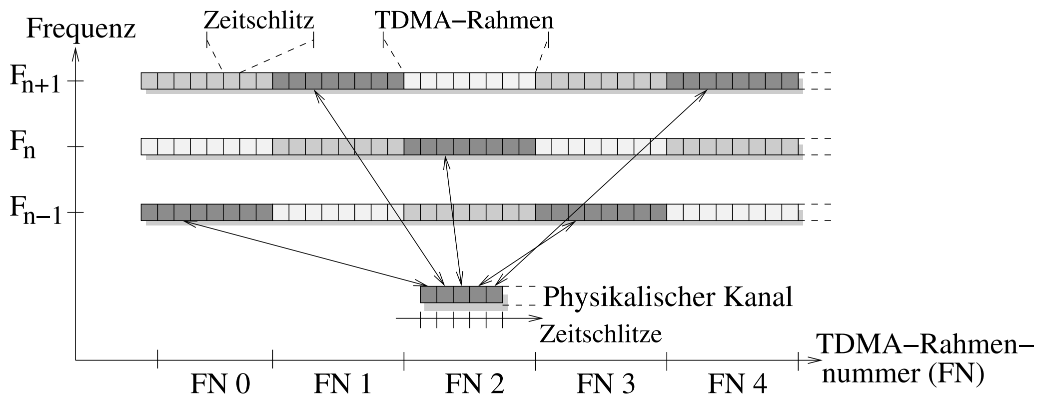


Abbildung 3.8: Beispiel für das bei GSM verwendete Frequenzsprungverfahren

mischen Kanalzuteilung bei GPRS lässt sich für die Vollratenverkehrskanäle lediglich eine maximale Übertragungsrate von 22,8 kbit/s angeben.

Steuerkanäle (engl.: Control Channel): Dienen der Übertragung von GPRS-Signalisiermeldungen oder der Synchronisation und lassen sich in drei Untergruppen unterteilen (in Klammer ist jeweils der dafür definierte Burst angegeben)

- **Broadcast Channels**:
  - **Packet Broadcast Control Channel (PBCCH)**: Überträgt allgemeine Informationen über die BTS, die Kanalstruktur und GPRS-spezifische Informationen. (Normal Burst)
  - **Frequency Correction Channel (FCCH)**: Ermöglicht es dem mobilen Endgerät, Frequenzkorrekturen vorzunehmen. (Frequency Correction Burst)
  - **Synchronization Channel (SCH)**: Überträgt die Identität der BTS (Base Transceiver Station Identity Code (BSIC)) und Informationen über die Rahmensynchronisation. (Synchronisation Burst)
- **Common Control Channel (CCCH)**:
  - **Packet Paging Channel (PPCH)**: Dient dem BSS dazu, das mobile Endgerät bei vom Festnetz kommenden Daten anzusprechen. (Normal Burst)
  - **Packet Random Access Channel (PRACH)**: Erlaubt es dem mobilen Endgerät eine Kanalanforderung an das BSS zu stellen. (Access Burst)
  - **Packet Access Grant Channel (PAGCH)**: Zuweisung eines vom mobilen Endgerät angeforderten Kanals durch das BSS. (Normal Burst)
  - **Packet Notification Channel (PNCH)**: Bekanntgabe einer Datenübertragung an alle mobile Endgeräte (Point-to-Multipoint (PTM)) durch das BSS. (Normal Burst)
- **Dedicated Control Channels**:

- **Packet Associated Control Channel (PACCH)**: Bidirektionaler, einem PDTCH zugeordneter Kanal zur Übertragung von Informationen (Signalisierung, Ressourcenzuweisung, ...) für ein bestimmtes mobiles Endgerät. (Normal Burst)
- **Packet Timing Advance Control Channel (PTCCH)**: Zeitliche Synchronisation der TDMA-Rahmen. (Access Burst, Normal Burst)

3.5.6 Abbildung logischer Kanäle auf physikalische Kanäle

Jeder physikalische Kanal kann einen oder mehrere logische Kanäle tragen. Teilen sich mehrere logische Kanäle einen physikalischen Kanal, werden die logischen Kanäle durch eine Kanalunternummer (engl.: Subchannel Number) unterschieden.

Zur zeitlichen Strukturierung der physikalischen Kanäle werden TDMA-Rahmen zu größeren Rahmen zusammengefasst. Ein Mehrfachrahmen (engl.: Multiframe) besteht bei GSM aus 26 oder 51 aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen (26-Mehrfachrahmen oder 51-Mehrfachrahmen). Bei GPRS bilden zwei 26-Mehrfachrahmen einen 52-Mehrfachrahmen. Ein Superrahmen (engl.: Superframe) ist aus 51 26-Mehrfachrahmen oder 26 51-Mehrfachrahmen zusammengesetzt, was 1326 TDMA-Rahmen oder einer Dauer von 6,12 Sekunden entspricht. 2048 Superrahmen bilden einen Hyperrahmen (engl.: Hyperframe), der damit aus $26 * 51 * 2048 = 2\,715\,648$ TDMA-Rahmen besteht. Die TDMA-Rahmen eines Hyperrahmens werden durch die TDMA-Rahmennummer (engl.: TDMA Frame Number) zwischen 0 und 2 715 647 durchnummeriert.

Die Rahmen für die Übertragung vom mobilen Endgerät werden drei Zeitschlitze nach den entsprechenden Rahmen der Übertragung zum mobilen Endgerät gesendet, so dass den mobilen Endgeräten ausreichend Zeit zum Wechsel der Übertragungsrichtung bleibt.

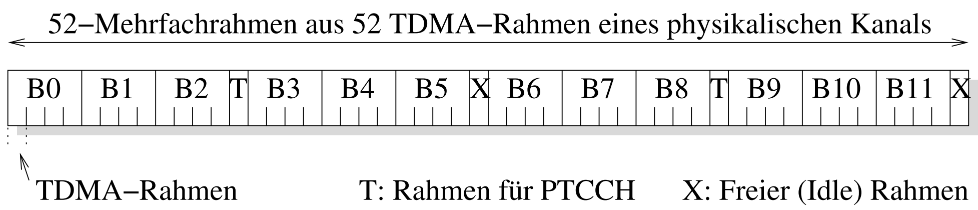


Abbildung 3.9: Aufbau eines 52-Mehrfachrahmens bei GPRS

Der 52-Mehrfachrahmen wird aus 12 Radioblöcken (B0 - B11) gebildet, die aus jeweils vier aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen eines physikalischen Kanals bestehen (siehe Abbildung 3.9). Zwischen diesen Radioblöcken liegen zwei TDMA-Rahmen, die den PTCCH bilden und zwei unbenutzte TDMA-Rahmen. Im Mittel ergibt sich, dass pro physikalischem Kanal alle 20 ms ein Radioblock übertragen wird. Ein Verkehrskanal wird aus der Abfolge B0, B1, B2, ..., B11 gebildet. Die logischen Steuerkanäle werden durch die Sequenz B0, B6, B3, B9, B1, B7, B4, B10, B2, B8, B5, B11 blockverschachtelt (engl.: Block-Interleaving), was in Abbildung 3.10 gezeigt ist. Bei der Bit- oder Blockverschachtelung werden allgemein aufeinanderfolgende Bit bzw. Radioblöcke der originalen Daten nach einer bestimmten Vorschrift vertauscht. Dadurch sind bei Büschelfehlern (engl.: Burst Error), also Übertragungsfehlern, die mehrere aufeinander folgende Bit-/Radioblöcke der übertragenen Daten betreffen, die Fehler in den Daten gestreut. Die Fehlerkorrekturverfahren können damit Übertragungsfehler besser korrigieren.

Die Sequenz von Radioblöcken können sich mehrere logische Kanäle teilen, wobei ein Wechsel des logischen Kanals nur an den Blockgrenzen erfolgen kann.

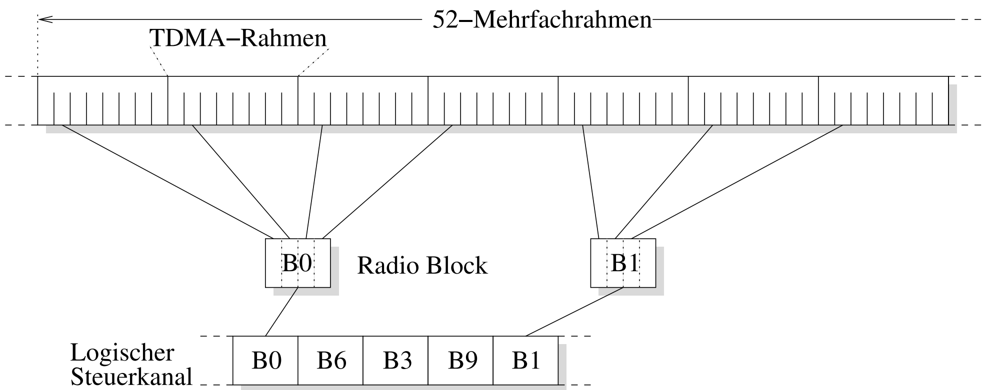


Abbildung 3.10: Blockverschachtelung der Radioblöcke des 52-Mehrfachrahmens für Steuerkanälen bei GPRS. Dem Steuerkanal ist dabei jeweils der zweite Zeitschlitz eines TDMA-Rahmens zugewiesen

3.5.7 Kodierung logischer Kanäle

Bevor Daten über die Luftschnittstelle übertragen werden, wird ihnen redundante Information hinzugefügt, um Übertragungsfehler, bedingt durch Störungen an der Luftschnittstelle, erkennen und bis zu einem gewissen Grad beheben zu können. Um den Anforderungen verschiedener Datenströme und wechselnden Gegebenheiten der Funkübertragung gerecht zu werden, wurden für GSM, GPRS und EGPRS verschiedene Verfahren zur Erkennung und Behebung von Übertragungsfehlern definiert.

Allen logischen Kanälen gemeinsam ist, dass sowohl blockorientiert arbeitende Kodierverfahren als auch eine Umsortierung der Daten (engl.: Reordering) sowie Bit- und Blockverschachtelung eingesetzt werden. Bei GSM werden die ursprünglichen Daten zunächst durch eine systematische Block-kodierung (engl.: Systematic Block Code) zu Informationswörtern (engl.: Words of Information) mit Paritätsbit zusammengefasst. Verwendet werden dabei sowohl zyklische Codes (engl.: Cyclic Codes) für Sprach- und einige Steuerkanäle, als auch verkürzte, binäre, zyklische Blockcodes (Fire Code) für Steuerkanäle; Kanäle für die verbindungsorientierte Datenübertragung werden nur durch Paritätsbits ergänzt. In einem zweiten Schritt werden diese Informationswörter zusammen mit den Paritätsbit (engl.: Parity Bit) mittels Faltung (engl.: Convolutional Code) kodiert. Bei den meisten logischen Kanälen werden 456 Bit große, kodierte Datenblöcke in vier Normal Bursts zu jeweils 114 Bit übertragen.

GPRS definiert für Verkehrskanäle vier Kodierschemata (engl.: Coding Scheme (CS)) CS-1 - CS-4. Für die meisten Steuerkanäle wird das Kodierschema CS-1 benutzt, für den Access Burst sind zwei Kodierschemata definiert.

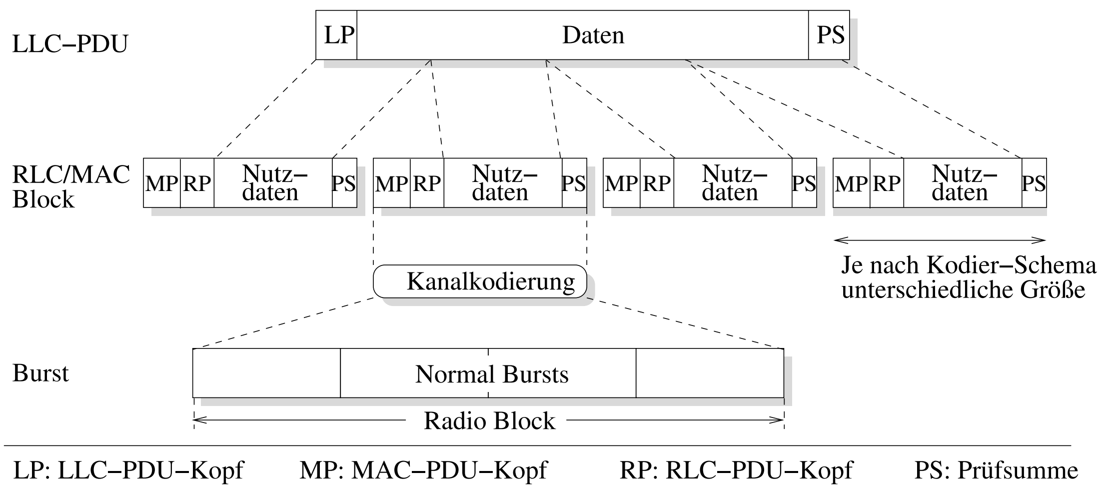


Abbildung 3.11: Aufteilung einer LLC-PDU auf mehrere RLC/MAC-Blöcke, die jeweils in vier Bursts übertragen werden

Die verschiedenen Kodierschemata besitzen eine unterschiedliche Redundanz in den Nutzdaten und können somit unterschiedlich gut Übertragungsfehler ausgleichen. CS-1 besitzt die meiste Redundanz und ist somit am robustesten gegen Übertragungsfehler, CS-4 besitzt keine Redundanz in den Nutzdaten. Da die kodierten Radioblöcke immer dieselbe Größe besitzen, können je nach Kodierschema unterschiedlich große RLC/MAC-Blöcke in einem Radioblock übertragen werden. Ein RLC/MAC-Block besteht dabei, wie in Abbildung 3.11 gezeigt, aus einem MAC-PDU-Kopf, einem RLC-PDU-Kopf, den eigentlichen Nutzdaten – bei Verkehrskanälen Segmente einer LLC-PDU, bei Steuermeldungen die entsprechenden Meldungen – und einer Prüfsumme über den RLC/MAC-Block (Block Check Sequence (BCS)).

Bei der Kanalkodierung (Kodierung eines RLC/MAC-Blocks) der Kodierschemata CS-1 bis CS-3 wird zunächst mittels eines Faltungskodierers mit der Rate 1/2 Redundanz hinzugefügt (siehe Abbildung 3.12). Anschließend werden bei den Kodierschemata CS-2 und CS-3 durch Punktierung (engl.: Puncturing) redundante Daten wieder entfernt, um eine höhere Nutzdatenrate zu erhalten. Für das Kodierschema CS-4 wird keine Kodierung eingesetzt. Tabelle 3.2 fasst die wichtigsten Parameter der Kanalkodierung für die Kodierschemata zusammen. Der unkodierte MAC-PDU-Kopf umfasst 3 Bit, der RLC-PDU-Kopf mindestens 24 Bit. Überträgt der RLC/MAC-Block Daten aus mehr als einer LLC-PDU, verlängert sich der RLC-PDU-Kopf um jeweils 8 Bit. Die Nettodatenrate in Tabelle 3.2 bezieht sich dabei auf die zur Verfügung stehende Länge der Nutzdaten mal 50 RLC/MAC-Blöcke pro Sekunde[5].

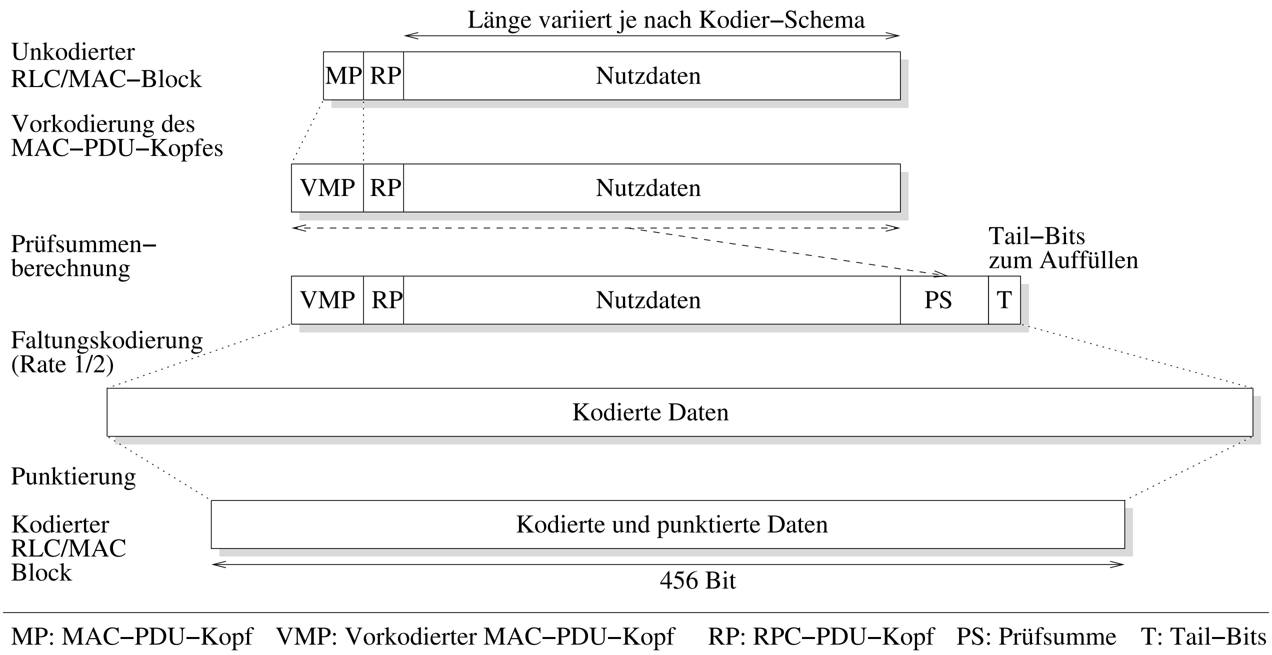


Abbildung 3.12: Kanalkodierung bei GPRS

Schema	Länge Nutzdaten	Länge vorkodierter MAC-PDU-Kopf	Länge Prüfsumme	Anzahl Tailbit	Anzahl punktierter Bit	Nettodatenrate
CS-1	157 Bit	3 Bit	40 Bit	4 Bit	0 Bit	7,85 kbit/s
CS-2	244 Bit	6 Bit	16 Bit	4 Bit	132 Bit	12,2 kbit/s
CS-3	288 Bit	6 Bit	16 Bit	4 Bit	220 Bit	14,4 kbit/s
CS-4	404 Bit	12 Bit	16 Bit	0 Bit	0 Bit	20,2 kbit/s

Tabelle 3.2: Parameter der Kodierungsschema bei GPRS

[5]Pro physikalischem Kanal kann alle 20 ms ein RLC/MAC-Block übertragen werden.

3.5.8 Bündelung logischer Kanäle

Damit Anwendungen eine ausreichende Datenrate zur Verfügung steht, können bis zu acht Verkehrskanäle gebündelt werden (engl.: Multislot Configuration, siehe Abschnitt 6.4.2 in [GSM0502c]). Diesen müssen verschiedene TS, also unterschiedliche TN, aber dieselben Funkparameter zugewiesen werden. Sie besitzen also dieselbe Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN), falls kein Frequenzsprungverfahren verwendet wird, bzw. dieselbe Mobile (RFCH) Allocation (MA), Mobile Allocation Index Offset (MAIO) und Hopping Sequence (Generator) Number (HSN) falls das Frequenzsprungverfahren verwendet wird und weisen dieselbe Trainingssequenz auf. Alle Kanäle eines Kanalbündels liegen somit auf derselben Frequenz. Wird das Frequenzsprungverfahren verwendet, ändert sich diese Frequenz nach jedem TDMA-Rahmen.

3.6 Netzmanagement

Die für die Steuerung und Verwaltung eines GPRS-basierten Mobilfunknetzes nötigen Funktionalitäten lassen sich in vier Bereiche unterteilen [GSM0360c]:

Mobility Management Functionality: Beeinflusst, inwieweit die Position des mobilen Endgerätes im Netz bekannt ist und steuert damit die Erreichbarkeit des mobilen Endgerätes vom Festnetz aus. Es bestimmt, ob eine Übertragung von Daten vom und zum mobilen Endgerät möglich ist.

Network Management Functionality: Stellt Funktionen bereit, um den Betrieb und die Wartung des Netzes (engl.: Operation and Maintainence) zu unterstützen.

Radio Resource Management Functionality: Stellt innerhalb einer Zelle bestimmte Frequenzen für die Funkübertragung zur Verfügung und bestimmt, welche der Frequenzen welchem Dienst (GSM, GPRS, ...) fest zugewiesen werden. Ist des Weiteren zuständig für die Zuweisung und den Wechsel der Zelle bei sich bewegenden mobilen Endgeräten.

Packet Routeing and Transfer Functionality: Verwaltet PDP-Kontexte, weist also einer Verbindung eine PDP-Adresse (z. B. IP-Adressen, falls IP als PDP verwendet wird) zu, ordnet der Verbindung einen GGSN zu und initiiert den Aufbau einer Tunnelverbindung zwischen dem aktuell zuständigen SGSN und dem GGSN.

Die beiden für diese Arbeit wichtigen Funktionalitäten, die `Mobility Management Functionality` und die `Packet Routeing and Transfer Functionality`, werden im Folgenden näher erläutert.

3.6.1 Mobility Management Functionality

Jedes mobile Endgerät befindet sich bezüglich des Mobilitätsmanagements in einem der drei Zustände:

IDLE: Das mobile Endgerät ist nicht beim GPRS-Netz angemeldet, somit ist z. B. dessen Position nicht bekannt und Daten können weder vom noch zum mobilen Endgerät übertragen werden.

STANDBY: Das mobile Endgerät ist beim GPRS-Netz angemeldet (GPRS-Attached) und die Position des mobilen Endgerätes ist dem Netz auf RA-Ebene, nicht auf Zellebene, bekannt. Ein PDP-Kontext (siehe Abschnitt 3.6.2) kann aktiviert oder deaktiviert werden, Daten können in diesem Zustand nicht gesendet oder empfangen werden.

READY: Das mobile Endgerät ist beim GPRS-Netz angemeldet (engl.: GPRS-Attached) und hat von diesem eine eindeutige Kennung erhalten. Die Position des mobilen Endgerätes ist dem Netz bekannt, aktuell werden Daten vom oder zum mobilen Endgerät übertragen oder Daten wurden innerhalb der durch den `Ready Timer` bestimmten Zeit übertragen.

Die wichtigsten Übergänge zwischen den Zuständen sind in Abbildung 3.13 gezeigt.

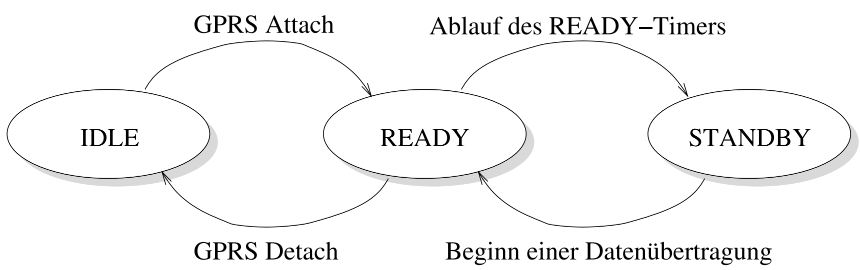


Abbildung 3.13: Zustände und Übergänge beim Mobilitätsmanagement im GPRS

Die beiden Funktionen `GPRS Attach` und `GPRS Detach`, die dem An- und Abmelden des mobilen Endgerätes beim GPRS-Netz dienen, sind ausführlich in [GSM0360c] beschrieben und werden hier nur soweit eingeführt, wie sie für die Arbeit wichtig sind. Hat der SGSN Daten an ein mobiles Endgerät zu senden, das im Zustand `STANDBY` ist, sendet das SGSN einen `Paging Request` innerhalb der RA, in der sich das mobile Endgerät befindet, aus (Paging). Das mobile Endgerät initiiert daraufhin eine Datenübertragung an das BSS, wechselt also in den Zustand `READY` und ist somit bereit, Daten vom SGSN zu empfangen. Befindet sich das mobile Endgerät im Zustand `IDLE`, ist es für den SGSN nicht erreichbar.

3.6.1.1 GPRS Attach

Durch diese Funktion meldet sich ein mobiles Endgerät, eindeutig bestimmt durch die International Mobile Subscriber Identity (IMSI), beim GPRS-Netz an. Abbildung 3.14 zeigt die wichtigsten Meldungen, die zwischen dem mobilen Endgerät und den Festnetzknoten definiert sind. Dabei wird von einer reinen Anmeldung beim GPRS-Netz ausgegangen und davon, dass das mobile Endgerät nicht bei anderen SGSN oder MSC gemeldet ist. Nach der Anfrage (`Attach Request`) des mobilen Endgerätes beim zuständigen SGSN findet eine Identifizierung und Authentisierung statt. Danach meldet der SGSN an das HLR, dass sich das mobile Endgerät in seinem Zuständigkeitsbereich befindet (`Update Location`). Das HLR sendet daraufhin Informationen über das mobile Endgerät an den zuständigen SGSN (`Insert Subscriber Data`), der den Erfolg der Anmeldung an das mobile Endgerät weiterleitet (`Attach Accept`).

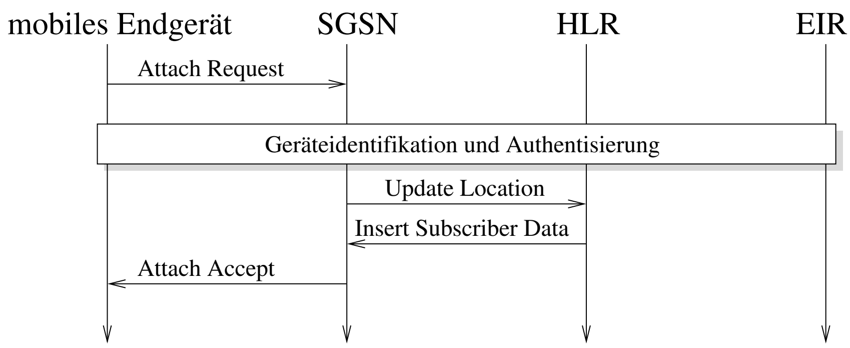


Abbildung 3.14: Vereinfachter Meldungsfluss der `GPRS Attach` Funktion

3.6.1.2 GPRS Detach

Die `GPRS Detach`-Funktion kann sowohl vom mobilen Endgerät als auch vom SGSN aus ausgelöst werden. Initiiert das mobile Endgerät die Funktion, sendet es einen `Detach Request` an den SGSN, der den zuständigen GGSN wegen eventuell noch bestehender PDP-Kontexte (siehe Abschnitt 3.6.2) über die Abmeldung informiert. Zur Quittierung schickt der SGSN eine `Detach Accept`-Meldung an das mobile Endgerät.

Wird die Funktion vom SGSN aus ausgelöst, wird sowohl der GGSN davon benachrichtigt als auch eine `Detach Request`-Meldung an das mobile Endgerät gesendet, das die Abmeldung mit einer `Detach Accept`-Meldung beantwortet.

3.6.2 Packet Routeing and Transfer Functionality

Durch die Aktivierung eines oder mehrerer PDP-Kontexte bekommt das mobile Endgerät eine oder mehrere PDP-Adressen (IP-, X.25-, … Adresse) zugewiesen. Weiter wird für jeden PDP-Kontext ein GGSN bestimmt und eine Verbindung (Tunnel) zwischen dem zuständigen SGSN und dem ausgewählten GGSN über das Haupttrassennetz aufgebaut. Damit ist das mobile Endgerät in der Lage, Daten zu senden oder zu empfangen. Die eindeutige Identifikation der PDP-Kontexte eines mobilen Endgerätes erfolgt über die Network Layer Service Access Point Identifier (NSAPI), dem Zugangspunkt des SNDCP für Protokolle höherer Schichten. Bezüglich der Packet Routeing and Transfer Functionality sind für ein mobiles Endgerät zwei Zustände definiert: `INACTIVE` und `ACTIVE`. In den Zustand `ACTIVE`, d. h. ein oder mehrere PDP-Kontexte sind aktiviert, kann das mobile Endgerät durch die Funktion `Activate PDP Context` gelangen, in den Zustand `INACTIVE` durch die Funktion `Deactivate PDP Context` oder dadurch, dass der Zustand des Mobilitätsmanagements nach `IDLE` wechselt. Beide Funktionen können dabei sowohl vom mobilen Endgerät als auch vom SGSN oder vom GGSN aus gestartet werden. In dieser Arbeit wird im Weiteren davon ausgegangen, dass sie vom mobilen Endgerät aus initiiert werden.

3.6.2.1 Activate PDP Context

Abbildung 3.15 zeigt die Meldungen, die für die Aktivierung eines PDP-Kontextes vom mobilen Endgerät aus definiert sind.

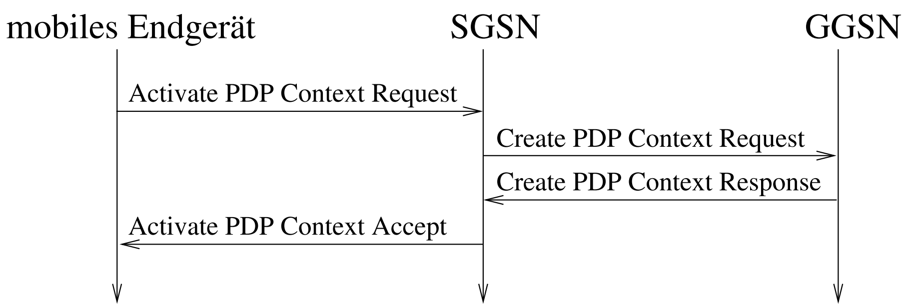


Abbildung 3.15: Vereinfachter Meldungsfluss der `Activate PDP Context`-Funktion (ohne Sicherheitsfunktionen) vom mobilen Endgerät aus

Das mobile Endgerät schickt den Aktivierungswunsch an den zuständigen SGSN. Hat das mobile Endgerät für diesen PDP-Kontext eine statisch zugewiesene PDP-Adresse, wird diese mitgeschickt. Im Falle einer dynamisch zugewiesenen PDP-Adresse bekommt das mobile Endgerät eine Adresse vom GGSN. Erhält der SGSN die `Activate PDP Context Request`-Meldung, bestimmt er einen GGSN und generiert eine TID für die bidirektionale Übertragung von Daten (Tunnelung) zwischen dem SGSN und dem GGSN über das Haupttrassennetz. Der TID wird dabei aus der IMSI und dem NSAPI, den das mobile Endgerät mitgeliefert hat, generiert. Erhält der GGSN einen `Create PDP Context Request`, weist er, im Falle einer dynamischen Vergabe der PDP-Adresse, dem Kontext eine PDP-Adresse zu und trägt in einer Tabelle die PDP-Adresse zusammen mit der Adresse des zuständigen SGSN ein. Damit können von außen kommende PDUs an das mobile Endgerät weitergeleitet werden. Vom mobilen Endgerät können mit dem PDP-Aktivierungswunsch auch Dienstgüteanforderungen an den SGSN bzw. GGSN übermittelt werden, die von den GSN für diesen Kontext übernommen, verändert oder abgelehnt werden können. Der GGSN sendet in der `Create PDP Context Response`-Meldung u. a. die dynamisch zugeteilte PDP-Adresse und die akzeptierten Dienstgüteparameter zurück an den SGSN, der sie weiter an das mobile Endgerät leitet. Mit dem Empfang der `Activate PDP Context Accept`-Meldung geht das mobile Endgerät, wenn es zuvor im Zustand `INACTIVE` war, in den Zustand `ACTIVE` über und kann Daten über diesen PDP-Kontext senden oder empfangen.

3.6.2.2 Deactivate PDP Kontext

Der Meldungsfluss beim Deaktivieren eines PDP-Kontextes ist, wie Abbildung 3.16 zeigt, ähnlich dem der Aktivierung. Sowohl im SGSN als auch im GGSN werden die Einträge für diesen PDP-Kontext gelöscht. Im Falle der dynamischen Vergabe der PDP-Adressen wird die dem PDP-Kontext zugewiesene Adresse wieder frei.

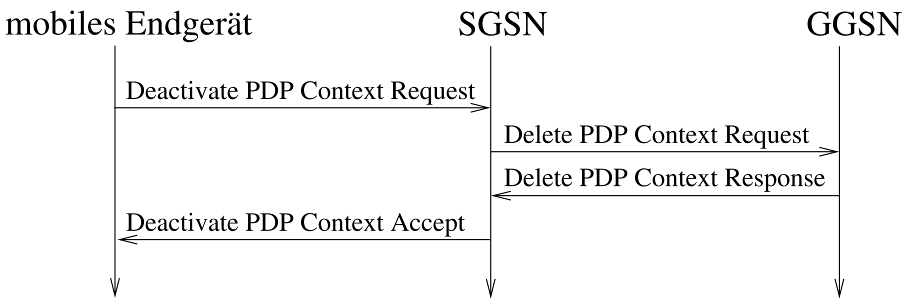


Abbildung 3.16: Vereinfachter Meldungsfluss der `Deactivation PDP Context`-Funktion (ohne Sicherheitsfunktionen) vom mobilen Endgerät aus

3.7 Management der Funkübertragung

In diesem Abschnitt wird die Aufteilung der zur Verfügung stehenden Funkressourcen auf die einzelnen mobilen Endgeräte diskutiert. Dabei kann bei GPRS für jeden Zeitschlitz einzeln eine Zuordnung zu einem mobilen Endgerät erfolgen. Steht eine PDU zur Funkübertragung an, wird eine logische Verbindung (Temporary Block Flow (TBF)) zwischen dem BSS und dem mobilen Endgerät aufgebaut. Dieser logischen Verbindung werden vom BSS Zeitschlitze zugeordnet. Dabei werden dem TBF entweder fest ein oder mehrere Zeitschlitze in aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen (`Fixed Allocation`) oder dynamisch Zeitschlitze (`Dynamic Allocation` oder `Extended Dynamic Allocation`) zugewiesen.

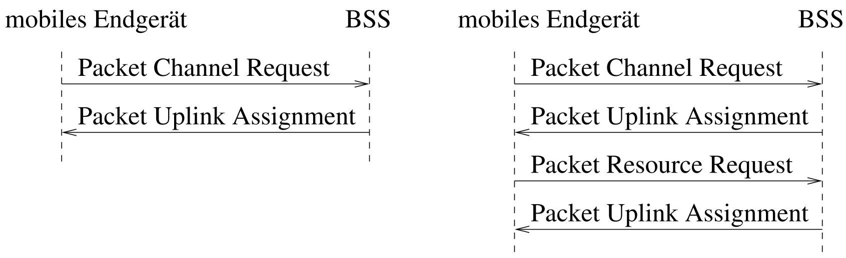
Für die Funkübertragung vom mobilen Endgerät aus wird bei der dynamischen Vergabe der Zeitschlitze beim Aufbau des TBF dem mobilen Endgerät ein drei Bit langer Code, das Uplink State Flag (USF), zugewiesen. Will das BSS dynamisch dem mobilen Endgerät einen Zeitschlitz zuweisen, sendet es das USF zum mobilen Endgerät, das daraufhin die Daten im zugewiesenen Zeitschlitz übertragen kann. Bei der erweiterten dynamischen Zuweisung von Zeitschlitzen können durch das Senden des USF mehrere Zeitschlitze eines TDMA-Rahmens zugewiesen werden. Für die Funkübertragung zum mobilen Endgerät wird beim Aufbau des TBF dem mobilen Endgerät eine eindeutige Kennzeichnung des TBF, die Temporary Flow Identity (TFI), mitgeteilt. Anhand dieser TFI, die auch mit allen übertragenen PDUs mitgesendet wird, kann vom mobilen Endgerät festgestellt werden, welche von dem BSS gesendeten PDUs für das Endgerät bestimmt sind.

Bezüglich der Dauer eines TBF gibt es zwei Varianten. Beim `Close-Ended TBF` wird beim Aufbau des TBF fest vereinbart wie viele Daten übertragen werden sollen. Das Ende des `Open-Ended TBF` wird dagegen durch eine `Countdown Procedure` dynamisch bestimmt. Stehen bei einem `Open-Ended TBF` fünfzehn[6] oder weniger RLC/MAC-Blöcke zur Übertragung an, beginnt ununterbrechbar ein Countdown, d. h. nur noch diese anstehenden Blöcke werden in diesem TBF übertragen.

Weiter kann ein TBF entweder im gesicherten oder im ungesicherten Modus betrieben werden. Im gesicherten Modus werden fehlerhaft empfangene RLC/MAC-Blöcke erneut übertragen und beim Empfänger die übertragenen Daten wieder korrekt zusammengesetzt. Im ungesicherten Modus werden fehlerhaft empfangene RLC/MAC-Blöcke lediglich als solche gekennzeichnet und an höhere Protokollschichten weitergegeben.

Für den Aufbau eines TBF vom mobilen Endgerät aus sind ein einstufiges und ein zweistufiges Verfahren definiert. Beim einstufigen Verfahren `One Phase Access`, das nicht für TBF im un-

[6] Systemweit einheitlich bestimmt durch den Parameter `BS_CV_MAX`.



(a) Einstufiger Aufbau eines TBF (b) Zweistufiger Aufbau eines TBF

Abbildung 3.17: Zwei Möglichkeiten des Aufbaus eines TBF vom mobilen Endgerät aus

gesicherten Modus erlaubt ist, werden, wie Abbildung 3.17(a) zeigt, zwei Meldungen zwischen mobilem Endgerät und BSS ausgetauscht. Dadurch können nur wenige Parameter, die z. B. die gewünschte Dienstgüte des TBF spezifizieren, übertragen werden. Soll ein `Close-Ended TBF` aufgebaut werden, kann dabei nur ein `Short Access TBF` aufgebaut werden, der aus maximal acht RLC/MAC-Blöcken besteht. Beim zweistufigen Verfahren `Two Phase Access` werden vier Meldungen ausgetauscht (siehe Abbildung 3.17(b)), wodurch deutlich mehr Zeit für den Aufbau eines TBF benötigt wird, dafür aber mehr den TBF spezifizierende Parameter übertragen werden können.

Für den Aufbau eines TBF von dem BSS aus muss sich das mobile Endgerät im Zustand `READY` befinden. Das BSS sendet eine `Packet Downlink Assignment`-Meldung, in dem die notwendigen Parameter für den TBF, wie z. B. der TFI, enthalten sind. Das mobile Endgerät kann mit einer `Packet Control Acknowledgement`-Meldung den Aufbau des TBF quittieren. Beendet wird der TBF durch ein Flag im letzten übertragenen Datenblock.

3.8 Besonderheiten der Luftschnittstelle

Die Funkübertragung ist gekennzeichnet durch eine hohe Zahl von Übertragungsfehlern, insbesondere von burstartigen Fehlern, die durch Rauschen oder Abschattungen, Mehrfachausbreitungen, Interferenzen und Dopplerverschiebung der Funkwellen verursacht werden. Zeichnet man die nutzbare Empfangsleistung eines sich bewegenden mobilen Endgerätes auf, ergibt sich eine Kurve wie in Abbildung 3.18. Dabei lassen sich zwei Effekte unterscheiden: ein sich langsam und ein sich schnell verändernder Effekt mit starken Einbrüchen der Empfangsleistung.

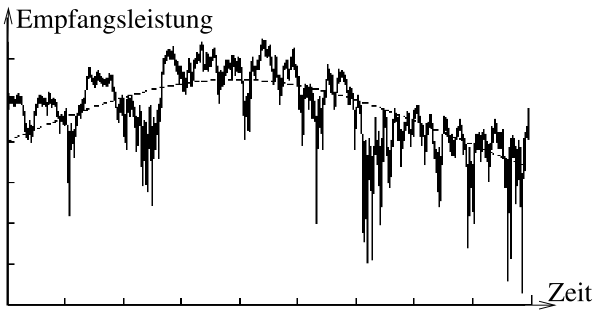


Abbildung 3.18: Zeitabhängige Empfangsleistung bei sich bewegendem mobilen Endgerät (entnommen Sorge [Sor98])

Der sich langsam verändernde Effekt ist auf großflächige Bewegungen des mobilen Endgerätes und die daraus resultierenden Abschattungen von Funkwellen z. B. durch Gebäude oder Geländeformationen zurückzuführen.

Durch kleine Bewegungen und Folgen der Mehrwegeausbreitung lässt sich der schnell verändernde Effekt erklären. Funkwellen erreichen den Empfänger nicht nur direkt, sondern auch indirekt durch Reflexionen, Streuungen und Beugungen an z. B. Gebäuden oder Geländeformationen. Die verschiedenen Pfade der Funkwellen überlagern sich konstruktiv oder destruktiv, d. h. die Wellen verstärken sich oder schwächen sich ab (Rayleigh Fading). Durch kleine Positionsänderungen des mobilen Endgerätes verändern sich die Pfadlängen und somit die Phasenlagen der einzelnen Funkwellen. Durch diese wechselnden Beeinflussungen weist die Stärke des empfangenen Signals starke Schwankungen auf.

Weitere Gründe für Empfangsstörungen sind die durch die Bewegung eines mobilen Endgerätes auftretende Dopplerverschiebung (engl.: Doppler Shift) und Interferenzen mit anderen Funkwellen. Dabei wird zwischen Interferenzen durch Funkwellen benachbarter Frequenzbänder (engl.: Adjacent Channel Interference) und Interferenzen durch Funkwellen derselben Frequenz, die von anderen Sendern abgestrahlt werden (engl.: Co-Channel Interference), unterschieden [Cal88]. Rauschen, erzeugt durch die Umgebung wie Funken in Motoren oder Maschinen, oder thermische Effekte im Sender oder Empfänger beeinträchtigen den Empfang weiter.

Die Effekte der Mehrwegeausbreitung und der Interferenzen sind frequenzabhängig, d. h. am selben Ort wird die Empfangsstärke bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich beeinflusst. Dadurch kann durch ständiges Variieren der Frequenz eines Funkkanals, d. h. durch Frequenzsprungverfahren, ein besseres Empfangsbild erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss von Störungen auf die Übertragung zu verringern, ist die Bit- oder Blockverschachtelung der Daten bei der Funkübertragung.

Kapitel 4 Vergleichbare Ansätze in der Literatur

Die Möglichkeit, Sprache paketorientiert zu übertragen, wurde für leitungsgebundene Systeme in der Forschung eingehend untersucht [Sau90]. Für die Funkübertragung nach dem GPRS-Standard finden sich eine Reihe von Untersuchungen, in denen die erreichbaren Paketraten, Paketfehlerraten oder Durchsatzraten angegeben werden [LT01b], [LT01a]. Bei diesen simulativen oder analytischen Untersuchungen sind die bestimmenden Faktoren die Wahl des Modulationsverfahrens bei der Funkübertragung, die Kodierung der Daten bzw. die Auswahl der Kodierschemata und die Qualität der Funkübertragung.

Relativ wenige Arbeiten widmen sich der effizienten Übertragung von Daten und der Möglichkeit, Obergrenzen für die Verzögerung oder Untergrenzen für die Datenrate für bestimmte Verkehre angeben zu können. Als Probleme bei der Funkübertragung, insbesondere von verzögerungskritischen Daten, werden die lange Verzögerung für die Anforderung eines Funkkanals, die beschränkte Bandbreite und die Fehlerhäufigkeit bei der Funkübertragung genannt. Als Lösungen werden häufig Änderungen am Zugriffsverfahren für die Funkkanäle vorgeschlagen. Weiter werden neue Kodierschemata entwickelt, die speziell für die Übertragung von Sprache geeignet sind. Beide Maßnahmen erfordern Änderungen des GPRS-Protokolls. Für die effiziente Nutzung der Funkkanäle wird meist die Sprachpausenunterdrückung eingesetzt, so dass während Ruhephasen keine oder zumindest weniger Daten als während der Sprachphase übertragen werden müssen.

Fabri et al. [FKTD99] schlägt ein neues Kodierschema für paketierte Sprache vor, das aus dem GSM-Standard übernommen wurde. Dabei werden die vom Sprachkodierer erzeugten Sprachdaten in drei Klassen eingeteilt, da einige Daten für eine gute Sprachqualität mehr, andere weniger wichtig sind. Gehen die weniger wichtigen Daten bei der Funkübertragung verloren, sinkt zwar die Sprachqualität, die Sprache bleibt aber verständlich. Entsprechend ihrer Wichtigkeit werden die Daten unterschiedlich stark mit redundanten Informationen für die Funkübertragung kodiert, so dass bei Übertragungsfehlern die wichtigeren Daten besser rekonstruiert werden können. Dieses für GPRS neue Kodierschema wird bei Fabri et al. unabhängig von der Qualität des Funkkanals eingesetzt. Neben dem neuen Kodierschema werden auch Protokollfelder, die in der LLC-Schicht an die Sprachdaten angehängt werden, um für die Sprachübertragung nicht notwendigen Felder gekürzt. Damit sinkt die bei der Funkübertragung notwendige Datenrate. Sowohl das neue Kodierschema als auch die neue Definition des LLC-PDU-Kopfes bedingen eine Änderung des GPRS-Standards. Weiter gehen Fabri et al. nicht auf die entstehenden Verzögerungen durch den Verbindungsaufbau ein. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Funkkanal für die Übertragung der Sprachdaten vollständig belegt wird. Damit können Sprachpakete, die sich während der Verzögerung bei der Anforderung des Funkkanals für die Übertragung angestaut haben, nicht gesammelt übertragen werden.

Das Problem der Verzögerung durch die Anforderung eines Funkkanals wird bei Demetrescu et al. [DSB+99] durch einen dem Polling ähnlichen Mechanismus gelöst. Während in Sprachphasen das mobile Endgerät alle 20 ms ein Sprachpaket sendet, erhält es während Ruhephasen vom BSS nur alle 40 ms die Gelegenheit, ein Paket zu übertragen. Beginnt eine Sprachphase, kann es in diesen Paketen dem BSS mitteilen, dass wieder Sprachdaten anstehen. Das BSS ermöglicht daraufhin der Verbindung wieder eine Übertragung alle 20 ms. Die Kodierung der Sprachdaten und die Einteilung in drei Klassen wird wie bei Fabri et al. nach dem GSM-Standard vorgenommen. Ebenfalls werden durch Reduzierungen der PDU-Köpfe der LLC- und der RLC/MAC-Schicht die nötige Datenrate der Funküberrtagung gesenkt. Neben den Änderungen des GPRS-Standards ist dabei nachteilig, dass die Effizienz des Verfahrens begrenzt ist. Soll die Verzögerung zu Beginn von Sprachphasen ausreichend gering sein, muss in Ruhephasen alle 40 ms ein Paket übertragen werden. Damit wird während Ruhephasen immer noch ein halber Funkkanal für die Sprachverbindung belegt.

Schieder et al. [SL00] untersucht das Protokoll EGPRS und schlägt dafür drei Mechanismen vor, mit denen die Verzögerung durch die Anforderung des Funkkanals reduziert werden kann. Ein Ziel ist dabei, effizient mit den Ressourcen der Funkübertragung umzugehen, so dass bei gleicher Anzahl von Sprachverbindungen weniger Funkkanäle als bei GSM benötigt werden. Beim ersten Mechanismus wird zu Beginn von Ruhephasen der Sprachkanal nicht sofort freigegeben, sondern noch einige Zeit belegt. Dauert die Ruhepause nur kurz, ist der Funkkanal also noch belegt, können die Sprachdaten sofort übertragen werden, ohne dass Verzögerungen durch die Anforderung eines neuen TBF entstehen. Dieses Verfahren entspricht einer Unterdrückung kurzer Ruhephasen. Der zweite Mechanismus entspricht dem bei Demetrescu et al. beschriebenen, dem Polling ähnlichen Verfahren. Auch hier wird vorgeschlagen, in Ruhephasen nur alle 40 ms ein Paket zu übertragen. Um dabei nicht unnötig Ressourcen zu verschwenden, wird als dritter Mechanismus eine neues Paketformat für die Funkübertragung definiert. Hat das mobile Endgerät neben den Sprachdaten noch andere Daten zu übertragen, können in Ruhephasen drei Bursts eines Radio-Blocks für die Übertragung dieser Daten verwendet werden. Nur der vierte Burst des Radio-Blocks wird für das Polling verwendet. Somit ist dieses Verfahren der Übertragung nur dann effizient, wenn vom mobilen Endgerät neben der Sprache andere Daten zu übertragen sind. Weiter muss bei Verwendung von GPRS für die Sprachübertragung aufgrund der notwendigen Datenrate das Kodierschema CS-4 verwendet werden. Dies führt bei schlechten Bedingungen der Funkübertragung zu einer hohen Fehlerrate bei der Übertragung.

Auch Qiu et al. [QCC+00b], [QCC+00a] schlägt Änderungen am EGPRS-Protokoll vor. Durch neu definierte, logische Kanäle, die einen schnellen Beginn der Funkübertragung ermöglichen, können verzögerungskritische Daten wie Sprachdaten mit geringen Anfangsverzögerungen übertragen werden. Die Anforderung eines Funkkanals entspricht dem des einstufigen Verfahrens bei GPRS. Es werden den Meldungen lediglich einige Parameter wie Qualitätsmerkmale oder der Temporary Logical Link Identity (TLLI) hinzugefügt, die den Meldungen beim einstufigen Verfahren bei GPRS fehlen. Als neue Kanäle werden der Fast-Packet Access Channel (PACH), der Fast-PAGCH und der Fast-Packet Polling Channel (PPCH) definiert. Der Fast-PACH arbeitet dabei im Wesentlichen wie der PRACH bei GPRS, nur dass er exklusiv den verzögerungskritischen Anforderungen zur Verfügung steht. Die entsprechende Antwort auf die Anforderung eines Funkkanals wird über den Fast-PAGCH-Kanal an das mobile Endgerät übertragen. Der Fast-PPCH wird im Rahmen eines ähnlichen Zugriffsverfahrens benutzt wie es in den beiden vorigen Abschnitten beschrieben wurde. Die Arbeit von Qiu et al. beschäftigt sich mit neuen Zugriffsverfahren, ohne auf sonstige Dienstmerkmale der Funkübertragung einzugehen. Neben den zusätzlich notwendigen logischen Kanälen lässt sich auch hier wegen des Zugriffsverfahrens nur eine begrenzte Effizienz der Funkkanalausnutzung erreichen.

Einen ähnlichen Weg wie Qiu et al. schlägt Balachandran et al. [BDR+00] für ein EGPRS-basiertes Mobilfunksystem und das darin definierte GSM EDGE Radio Access Network (GERAN) vor. Durch neu definierte Kanäle der Funkübertragung und spezielle Zugriffsverfahren auf diese Kanäle können verschiedene Verkehrsklassen mit unterschiedlichen QoS-Anforderungen effizient übertragen werden.

Göran et al. [GOST00] und Subbiah et al. [SR00] geben eine Übersicht über Sprachdienste und deren Anforderungen an zukünftige Mobilfunknetze wie EGPRS und UMTS. Dabei wird die Notwendigkeit effizienter PDU-Kopfkomprimierung genannt, um den Steuerdatenanteil insbesondere bei kleinen Sprachpaketen zu minimieren und die Ressourcen der Luftschnittstelle effizient verwenden zu können. Auch wird auf die Notwendigkeit schneller Zugriffsverfahren eingegangen, um die entstehenden Zugriffsverzögerungen kleiner als 150 ms zu halten. Weiter wird vorgeschlagen, im Festnetz Transportprotokolle einzusetzen, die wie z. B. ATM eine Garantie der Dienstgüte ermöglichen, um eine ausreichende Dienstgüte zu erreichen.

Lakaniemi et al. [LP00] untersucht die Sprachqualität bei der Funkübertragung von Sprachdaten. Er vergleicht dabei wie verschiedene Sprachkodierer auf auftretende Paketverluste reagieren. Verglichen werden die Sprachkodierer des GSM-Standards und die Sprachkodierer nach den ITU-T Empfehlungen G.723.1 und G.729. Die dabei entstehenden Datenraten liegen zwischen 4,75 und

7,95 kbit/s, so dass unter Einsatz einer Paketkopfkomprimierung das CS-1 oder CS-2 eingesetzt werden kann. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere der Sprachkodierer nach der ITU-T Empfehlung G.723.1 und einige in GSM definierte Sprachkodierer unter Mobilfunkbedingungen eine recht schlechte Sprachqualität liefern.

Wang et al. [WMGL98] kommt bei ihren Untersuchungen der Mobilfunksysteme IS-95, IS-136 und International Mobile Telecommunications 2000 (IMT 2000) zu dem Schluss, dass es sich nicht lohnt, in Mobilfunknetzen Sprache paketorientiert zu übertragen. Als Gründe werden genannt, dass die verbindungsorientierte Übertragung von Sprache ausreichend effizient ist und der Aufwand für eine qualitativ hochwertige Übertragung paketierter Sprache zu hoch ist. Der Aufwand kommt durch die Notwendigkeit, geringe Verzögerungen realisieren zu müssen. Auch müssen die durch die Mobilität hervorgerufenen Effekte wie Zellenwechsel während Gesprächen aufwändig ausgeglichen werden. Weiter wird angeführt, dass bei der paketorientierten Übertragung der Kunde pro Paket relativ viel zahlen muss und die Gespräche daher teurer werden. Auch der Aufwand für die Paketkopfkomprimierung wird als zu hoch eingestuft. Aufgrund eigener Untersuchungen im Rahmen der eigenen Arbeit zeigt sich, dass die Einsparungen an Ressourcen der Luftschnittstelle beträchtlich sind und die technischen Probleme wie Verzögerung, Zellwechsel und Paketkopfkomprimierung lösbar sind. Die Preisgestaltung ist kein grundsätzliches Kriterium und kann sich aufgrund wirtschaftlicher Bedingungen schnell ändern.

In der Literatur finden sich einige Arbeiten, die sich mit Dienstgüte-Mechanismen im Festnetz eines Mobilfunknetzes beschäftigen. Puuskari [Puu99] präsentiert einige grundsätzliche Überlegungen für die Realisierung von Dienstgüte in GPRS- und UMTS-basierten Mobilfunknetzen. Neben der Nennung von in den Standards definierten Dienstgüte-Merkmalen der Funkübertragung wird der Verkehr in vier Serviceklassen aufgeteilt: First Class Services, Business Class Services, Tourist Class Services und Cargo Services. Diese vier Klassen unterscheiden sich, in absteigender Reihenfolge, bezüglich ihrer Priorität und den Anforderungen an die Obergrenze der Verzögerung bzw. die Verzögerungsschwankung. Dabei wird nicht näher auf die Charakteristiken der Verkehre eingegangen. Weiter werden von Puuskari Möglichkeiten genannt wie die Dienstgüte-Architekturen IntServ und DiffServ im Umfeld des GPRS eingesetzt werden können.

Chaskar et al. [CK01] beschreibt die Realisierung von Dienstgüte insbesondere in UMTS-basierten Mobilfunknetzen durch den Einsatz des Multiprotocol Label Switching (MPLS)-Protokolls und der Dienstgüte-Architektur DiffServ. Die den einzelnen Datenpaketen zugewiesenen DSCP der DiffServ-Architektur werden als Label des MPLS-Protokolls verwendet. Der Aufbau der MPLS-Pfade, die Vergabe der Label und der DSCP werden parallel zum Aufbau der PDP-Kontexte realisiert. Der Verkehr wird dabei, abhängig von der Empfindlichkeit bezüglich Verzögerungen, in eine der vier Klassen Conversational, Streaming, Interactive und Background eingeteilt.

Priggouris et al. [PM00b] vergleicht die beiden Dienstgüte-Architekturen DiffServ und IntServ bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz in einem GPRS-basierten Mobilfunknetz miteinander. Für IntServ wird der Aufbau der Reservierungen in Zusammenhang mit dem GPRS-Protokoll beschrieben. Weiter wird simulativ eine Realisierung von Dienstgüte mittels der Dienstgüte-Architektur IntServ untersucht.

In der Literatur wurde kein detaillierter Entwurf eines Mobilfunksystems gefunden, der die Übertragung von Sprache unterstützt und eine durchgehende Dienstgüte realisiert. Diese Punkte werden in dieser Arbeit ausgearbeitet, wobei darauf geachtet wurde, dass möglichst keine Änderungen an bestehenden Standards, insbesondere dem GPRS, notwendig werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem hier entworfenen System die Anforderungen der Sprachkommunikation durch paketorientierte Mobilfunknetze erfüllt werden und insbesondere Sprachdaten effizient übertragen werden.

Kapitel 5 Architektur des All-IP-Mobilfunknetzes

Die Dienste Telefonie (engl.: Telephony Service) und Datenübertragung vom bzw. zum mobilen Endgerät sollen vom All-IP-Mobilfunknetz bereitgestellt werden. Wie diese Dienste mit wählbarer Dienstgüte effektiv vom All-IP-Mobilfunknetz erbracht werden können, ist Inhalt dieses Kapitels.

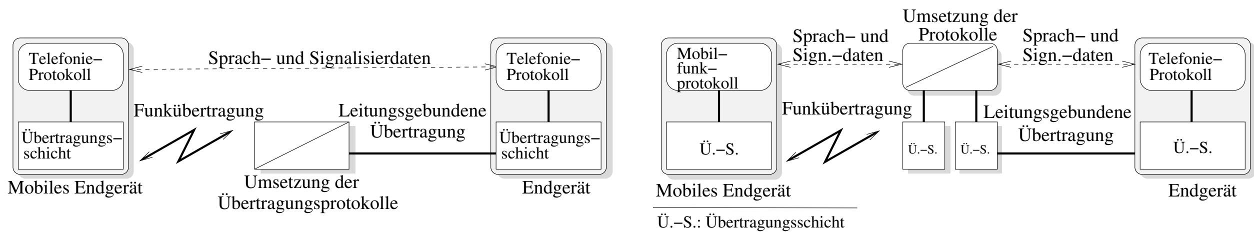
Im folgenden Abschnitt werden der prinzipielle Aufbau, die Randbedingungen und die Abgrenzungen des entworfenen Systems dargelegt. In weiteren Abschnitten wird auf die Übertragung von Sprachdaten und die Verbindungssteuerung eingegangen. Weiter wird aufgezeigt wie im All-IP-Mobilfunknetz eine durchgehende Dienstgüte für Sprach- und Datenanwendungen realisiert werden kann.

5.1 Einführung

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die Konzeption des All-IP-Mobilfunknetzes. Neben verschiedenen Szenarien der Telefonie wird das Erbringen der Dienstgüte im All-IP-Mobilfunknetz genauer betrachtet.

5.1.1 Telefonie-Szenarien

Zunächst lassen sich zwei Telefonie-Szenarien für mobile Endgeräte unterscheiden. Bei dem ersten Szenario bildet die Funkübertragung eine für Anwendungen transparente Übertragung aller nötigen Sprachdaten und Signalisiermeldungen. Die Funkübertragung nimmt keinen Einfluss auf die zwischen den Endgeräten verwendeten Protokolle oder die Übertragung der Sprachdaten. Dieses Prinzip findet sich z. B. bei Protokollen für die schnurlose Telefonie. Beim zweiten Szenario wird ein spezielles, an die Randbedingungen der Funkübertragung angepasstes Protokoll für die Telefonie verwendet. Im Festnetz findet eine Umsetzung zwischen diesem Protokoll und den im Festnetz üblichen Protokollen wie ISDN oder IP-Telefonie statt. Abbildung 5.1(a+b) verdeutlicht die beiden Szenarien.



(a) Szenario 1: Für die Anwendung transparente Übertragung der Sprach- und Signalisierdaten über den Funkkanal

(b) Szenario 2: Verwendung eines speziellen Protokolls für die Funkübertragung

Abbildung 5.1: Zwei Telefonie-Szenarien für das All-IP-Mobilfunknetz

Die Definition des All-IP-Mobilfunknetzes erfolgt entsprechend dem zweiten Szenario, da eine Lösung nach dem ersten Szenario einige Nachteile mit sich bringt. So ist aufgrund der Randbedingungen der Funkübertragung bei einer effizienten Verwendung der Funkressourcen die Auswahl und Nutzung der Telefonieprotokolle eingeschränkt. Beispielsweise ist die Realisierung einer 64 kbit/s Verbindung wie sie ISDN vorsieht nur mit erheblichem Aufwand möglich. Die Alternative ist die Einführung eines speziellen Mobilfunkprotokolls, das bis zu den Endgeräten, die am Festnetz angeschlossen sind, definiert ist. Dies würde bedeuten, dass alle Endgeräte des Festnetzes entweder zwei Protokolle (z. B. ISDN und Mobilfunkprotokoll) verstehen müssen oder im Festnetz generell das Mobilfunkprotokoll verwendet wird. Somit ist eine Lösung nach dem ersten Szenario unter den gegebenen Randbedingunen nicht praktikabel.

In Abschnitt 5.2 wird ein für die Telefonie über ein GPRS-basiertes Mobilfunknetz entworfenes Protokoll (All-IP-Mobilfunkprotokoll) vorgestellt; Abschnitt 5.3 beschreibt die effiziente Sprachübertragung im All-IP-Mobilfunknetz. Auf dem GPRS-Protokoll aufsetzend werden IPv4, UDP und RTP/RTCP eingesetzt. Bezüglich externer Telefonieprotokolle werden ISDN und IP-Telefonie nach H.323 berücksichtigt. Eine Anpassung an andere Protokolle für IP-Telefonie wie das Session Initiation Protocol (SIP) [RFC2543], [SR99] kann einfach vorgenommen werden, da keine tiefe Verzahnung des All-IP-Mobilfunkprotokolls mit dem Protokoll des Festnetzes notwendig ist.

5.1.2 Dienstgüte im All-IP-Mobilfunknetz

Betrachtet man die in Abbildung 5.2 (Seite 63) gezeigte Konzeption des All-IP-Mobilfunknetzes, können im IP-basierten Haupttrassennetz vier Gruppen von Verkehren identifiziert werden:

- **IP Signalisiermeldungen:** Sie dienen der Steuerung der GPRS-spezifischen Kommunikation zwischen SGSN und GGSN sowie der Verbindungssteuerung der Telefonie.

- **SS7 Signalisiermeldungen:** Signalisiermeldungen des SS7, die über das IP-basierte Haupttrassennetz übertragen werden. Realisiert werden kann dies z. B. durch
  - das von der IETF Working Group (WG) SIGTRAN entworfene Stream Control Transmission Protocol (SCTP) [RFC2719], [RFC2960]. Eine Analyse des SCTP und Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit finden sich z. B. bei Mayer et al. [MK98] und Rabe [Rab00].
  - die von Nortel Networks entwickelte Protokollfamilie IPS7 [Zie99].
  - das von der ITU-T definierte Service Specific Connection Oriented Protocol in a Multilink and Connectionless Environment (SSCOPMCE) (Anhang C in [Q2111]), das eine verbindungsorientierte Übertragung über verbindungslose Netze spezifiziert.

  Beteiligt sind dabei im Wesentlichen die Netzknoten, die das GSM-Mobilitätsmanagement nutzen und dafür Zugriff auf die Daten, die in den entsprechenden Registern gespeichert sind, benötigen. Untersuchungen über die bei GPRS anfallenden Signalisiermeldungen finden sich u. a. bei Mayer [May00], Meier-Hellstern et al. [MAO92] und Pollini et al. [PMHG95].

- **Nutzdaten mit Dienstgüteanforderungen:** Nutzdaten mit Dienstgüteanforderungen wie Zuverlässigkeit, eine untere Grenze der Datenrate, verlustfreie Übertragung oder Anforderungen an die Sicherheit oder Vertraulichkeit der Übertragung.

- **Nutzdaten ohne Dienstgüteanforderungen**

Dienstgüte ist zunächst zwischen den Endknoten einer Kommunikationsverbindung definiert. Da in dieser Arbeit nur das All-IP-Mobilfunknetz betrachtet wird, wird hier die Dienstgüte zwischen zwei mobilen Endgeräten im selben All-IP-Mobilfunknetz oder einem mobilen Endgerät und den Übergängen in externe Netze betrachtet.

Dienstgüte unterstützende Übertragungsprotokolle wie IPv6 sind im GPRS-Standard nicht vorgesehen. Daher werden die auf IPv4 aufsetzenden Architekturmodelle DiffServ und IntServ für die Verwendung im All-IP-Mobilfunknetz diskutiert (Abschnitt 5.4). Kriterien sind dabei, ob alle Anforderungen an die Dienstgüte der verschiedenen Verkehrsgruppen unter den Randbedingungen eines Mobilfunknetzes erfüllt werden. Weiter wird vorgestellt wie insbesondere für die Nutzdaten die Abbildung der Dienstgüteparameter im Haupttrassennetz auf die Dienstgüteparameter der Funkübertragung erfolgen kann.

Eine Besonderheit der Übertragung von Nutzdaten und Signalisiermeldungen liegt in einem Mobilfunknetz in der Mobilität der Endgeräte begründet. Beim Festnetz sind die Anzahl und Lage der Endgeräte und damit meist auch der im Mittel entstehende Verkehr relativ konstant. Bei Mobilfunknetzen ergeben sich kurzfristige, lokale Anstiege des Verkehrsaufkommens durch z. B.

Großveranstaltungen, Staus, Unfälle o. ä. Auch bei derartigen Schwankungen des Verkehrsaufkommens sollte die für die jeweiligen Verkehre notwendige Dienstgüte bereitgestellt werden. Dazu können entweder ausreichend viele Ressourcen vorhanden sein, oder es müssen Mechanismen zur Aufteilung der vorhandenen Ressourcen an die einzelnen Verkehre realisiert werden. Der Aufbau eines IP-Netzes mit großer Kapazität ist zwar realisierbar, führt aber zu einer Verschwendung von Ressourcen. Dimensioniert man das Netz entsprechend der mittleren Verkehrslast, müssen Mechanismen dafür sorgen, dass in Hochlastphasen Verkehre mit höherer Priorität wie Signalisiermeldungen weiter übertragen werden. Niederpriore Datenverkehre können verworfen oder verzögert werden. Idealerweise wird man das Netz zwischen diesen beiden Extremen planen und realisieren.

Eine weitere Besonderheit bei Mobilfunknetzen ist der Wechsel der zuständigen Mobilfunkzelle. Insbesondere bei einer aktiven Verbindung (Telefonieverbindungen oder Datenübertragung) muss diese und somit die durch die Verbindung gebundenen Ressourcen mitgeführt werden. Auf diesen Punkt geht Abschnitt 5.5.1 näher ein.

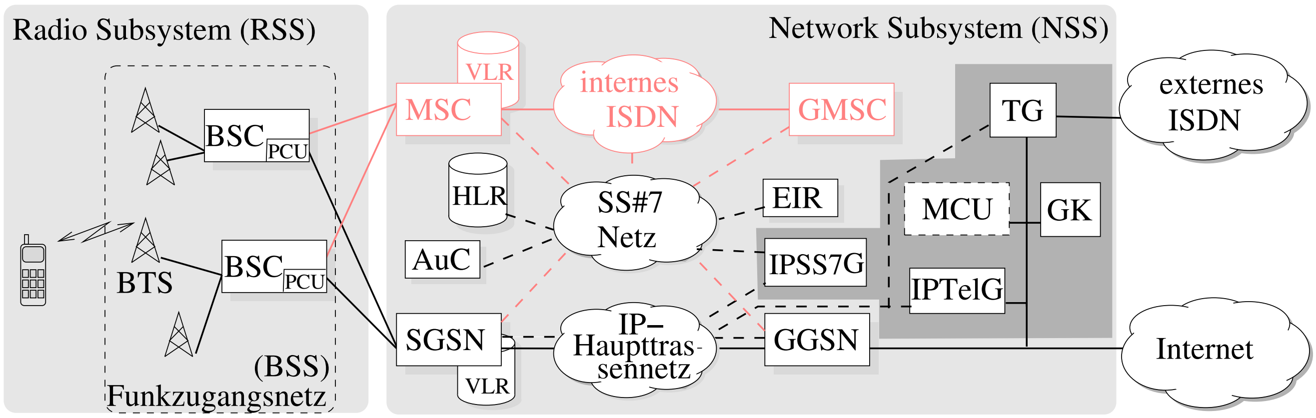
5.2 Konzeption des All-IP-Mobilfunknetzes

Abbildung 5.2 zeigt die Systemkonzeption. Im Vergleich zum Aufbau des GSM/GPRS-Netzes (Abbildung 3.2 auf Seite 31) wird der Teil des GSM-Festnetzes, der verbindungsorientierte Dienste erbringt, nicht benötigt. Für H.323 basierte IP-Telefonie sind spezielle Netzknoten nötig. Dies ist der Netzknoten Gatekeeper (GK) und bei Bedarf der Netzknoten MCU für Konferenzverbindungen. Ergänzt wird das Netz durch drei Netzübergangseinrichtungen (engl.: Gateway).

Der Übergang zwischen dem All-IP-Mobilfunkprotokoll und der IP-Telefonie wird durch das IP-Telefony-Gateway (IPTelG) gebildet. Das Telefonie-Gateway (TG) bildet entsprechend den Übergang zur ISDN-basierten Telefonie. Dabei findet jeweils sowohl eine Anpassung der Signalisierung als auch der Kodierung und Übertragungsart der Sprachdaten statt.

Die Signalisierung zwischen den GPRS/GSM-Netzknoten basiert, mit Ausnahme der Signalisierung zwischen SGSN und GGSN, auf dem SS7-Protokoll. Damit in den GSN und in den Netzübergangseinrichtungen TG und IPTelG kein SS7-Protokoll implementiert werden muss, wird SCTP eingesetzt. Damit müssen diese Knoten nicht direkt an das SS7-Netz angeschlossen sein. Die Netzübergangseinrichtung IP-SS7-Gateway (IPSS7G) ermöglicht den Übergang von der SCTP-basierten Übertragung der Signalisiermeldungen zur MTP-basierten Übertragung des SS7.

Für die Übertragung der Sprache zwischen dem TG bzw. dem IPTelG und dem mobilen Endgerät würde es prinzipiell reichen, die reinen Sprachdaten ohne weitere Protokollinformationen zu übertragen. Der GPRS-Standard sieht allerdings nur eine Übertragung von IP-Datagrammen oder



BSS: Base Station System
BTS: Base Transceiver Station
BSC: Base Station Controller
PCU: Packet Control Unit
MSC: Mobile Switching Centre
GMSC: Gateway MSC
—— Sprach– und Datenverbindungen

VLR: Visitor Location Register
HLR: Home Location Register
AuC: Authentication Centre
EIR: Equipment Identity Register
SGSN: Serving GPRS Support Node
GGSN: Gateway GPRS Support Node
– – – Signalisierverbindungen

GK: Gatekeeper (H.323)
MCU: Multipoint Control Unit
TG: Telefonie–Gateway
IPTelG: IP–Telefonie–Gateway
IPSS7G: IP–SS7–Gateway
Neue Knoten des All–IP–Mobilfunknetzes

Abbildung 5.2: Systemkonzeption des All-IP-Mobilfunknetzes

X.25-Paketen vor. Eine auf dem Octet Stream Protocol (OSP) basierende Datenübertragung sieht das GPRS-Protokoll lediglich für die Übertragung vom mobilen Endgerät zum GGSN vor. OSP kann somit nicht für die bidirektionale Sprachübertragung eingesetzt werden.

5.3 Telefonie im All-IP-Mobilfunknetz

Für die Sprachübertragung muss der Sprachkodierer so ausgewählt werden, dass bei einer ausreichend kleinen Verarbeitungsverzögerung die im Funkkanal zur Verfügung stehende Datenrate nicht überschritten wird. Außerdem muss nach der Dekodierung der Sprache beim Empfänger trotz Übertragungsfehler eine ausreichende Sprachqualität zur Verfügung stehen [LP00], [GOST00]. Weiter müssen die Parameter des Übertragungsprotokolls, hier des GPRS-Protokolls, so eingestellt sein, dass die im Funkkanal vorhandenen Ressourcen effizient genutzt werden. Dabei müssen die Anforderungen an die Übertragung von Sprache wie die Obergrenze der Verzögerung (150 ms, siehe Abschnitt 5.3.3.2) und Verzögerungsschwankung der Sprachpakete berücksichtigt werden [PDLZ99].

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Auswahl und Bewertung eines geeigneten Sprachkodierers und die protokolltechnische Realisierung der effizienten Übertragung von Sprachdaten mittels des GPRS-Protokolls.

5.3.1 Kodierung von Sprache

In dieser Arbeit wurden die Sprachqualität und die Anfälligkeit der Sprachqualität gegenüber PDU-Verlusten von vier Sprachkodierern miteinander verglichen. Bei der Auswahl der Sprachkodierer für die Untersuchung wurden nur Implementierungen berücksichtigt, deren kodierter Sprachpaketstrom die im Funkkanal zur Verfügung stehende Datenrate von 6,2 kbit/s (vgl. Abschnitt 5.3.3.1.3) nicht überschreitet. Auch mussten die entsprechenden Programme, die die Beispiel-Sprachdaten nach dem jeweiligen Verfahren kodieren und dekodieren, verfügbar sein. Weiter wurden nur Verfahren betrachtet, die in einer gewissen Weise standardisiert sind, um eine Reproduzierbarkeit der Untersuchung und Anwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Es wurden im Rahmen dieser Arbeit teilweise von den Standards abweichende Anpassungen an die Gegebenheiten des GPRS-Systems vorgenommen, wie z. B. die Anpassung an eine Sprachpaketrate von 1/20 ms, die für die Übertragung durch GPRS am geeignetsten ist[1]. Detaillierte Beschreibungen und Vergleiche weiterer Sprachkodierer, die besonders für den Einsatz in niederbitratigen Übertragungskanälen wie einem Funkkanal geeignet sind, finden sich u. a. bei Iida et al. [IKTO00], Cox et al. [CK96], Lakaniemi et al. [LP00] und Noll [Nol99]. Corbun et al. [CAS98] untersucht den bei GSM definierten Sprachkodierer Adaptive Multi-Rate (AMR). Bagwell [Bag98] bietet eine Übersicht über verschiedene Sprach- und Audiokodierungen und oft verwendete Dateiformate.

Auf eine standardisierte Beurteilung der Sprachkodierer z. B. durch Hörmodelle nach ITU-T Empfehlungen P.861 und P.862, Qualitätseinteilungen nach dem Mean Opinion Score (MOS)-Modell [CK96] oder ITU-T Empfehlung G.113 [G113] wurde in dieser Arbeit verzichtet. Der Grund dafür ist, dass keine allgemein gültigen, mit anderen Untersuchungen vergleichbare Aussagen über die Sprachkodierer angestrebt wurde, sondern lediglich die hier untersuchten Sprachkodierer unter bestimmten Bedingungen miteinander verglichen wurden.

Untersucht wurden die Sprachkodierer `melp`, `mp4_par`, `mp4_celp` und `723_54`. Der Sprachkodierer `melp` [Pha], [MB95] beruht auf dem MELP-Verfahren mit den im amerikanischen Standard FS 1017 genannten Parametern. Diese sind eine Datenrate der kodierten Sprachdaten von 2,4 kbit/s, eine arithmetische Verzögerung von 45 ms und eine Sprachpaketrate von 1/22,5 ms. Der Sprachkodierer wurde für die Untersuchung auf eine Sprachpaketrate von 1/20 ms angepasst, wodurch sich die Datenrate auf 2,7 kbit/s erhöht. Die Sprachkodierer `mp4_par` und `mp4_celp` sind im Rahmen des MPEG4-Audio Standards definiert [MPEG4]. Der `mp4_par` Sprachkodierer arbeitet nach dem HVXC-Verfahren und erzeugt eine Datenrate von wahlweise 2 kbit/s oder 4 kbit/s bei jeweils einer Sprachpaketrate von 1/20 ms. Der `mp4_celp` Sprachkodierer arbeitet nach dem CELP-Verfahren und erzeugt Datenraten zwischen 3,85 kbit/s und 12,2 kbit/s bei unterschiedlichen Sprachpaketraten. Für die Untersuchung wurde für den `mp4_par` Sprachkodierer eine Datenrate von 4 kbit/s

[1] Wie in Abschnitt 3.5.6 beschrieben, kann pro PDTCH alle 20 ms ein RLC/MAC übertragen werden.

Sprachkodierer	Datenrate	Sprachpaketrate	arithmetische Verzögerung
`melp`	2,7 kbit/s	1/20 ms	45 ms
`mp4_par`	4 kbit/s	1/20 ms	20 ms
`mp4_celp`	5,5 kbit/s	1/30 ms	35 ms
`723_54`	5,4 kbit/s	1/30 ms	37,5 ms

Tabelle 5.1: Die untersuchten Sprachkodierer und ihre wichtigsten Parameter

eingestellt, für den `mp4_celp` Sprachkodierer eine Datenrate von 5,5 kbit/s, was zu einer Sprachpaketrate von 1/30 ms führt. Als vierter Sprachkodierer wurde der im ITU-T Standard G.723.1 definierte Sprachkodierer `723_54` mit einer Datenrate von 5,3 kbit/s untersucht. Er arbeitet nach dem ACELP-Verfahren bei einer Sprachpaketrate von 1/30 ms. In Tabelle 5.1 sind die Sprachkodierer und ihre wichtigsten Parameter zusammengefasst.

Das für die vergleichende Untersuchung der Sprachkodierer verwendete Sprachbeispiel [Spe] hat eine Länge von 21,4 Sekunden, was bei einer Sprachpaketrate von 1/20 ms 1071 Sprachpaketen entspricht. Das Sprachbeispiel enthält kurze, englische Sprachsequenzen, die von zwei männlichen und zwei weiblichen Personen gesprochen wurden. Der Stimmfrequenzumfang wurde auf die beim Telefon üblichen 3400 Hz [Nol99] begrenzt.

Für die Untersuchung in dieser Arbeit wurde das Sprachbeispiel vom jeweiligen Sprachkodierer kodiert. In der dabei entstehenden Folge kodierter Sprachpakete wurden einige als fehlerhaft markiert (siehe Abbildung 5.3), was den Übertragungsfehlern entspricht. Diese veränderte Folge von Sprachpaketen wurde von den jeweiligen Sprachdekodierern wieder in eine Folge von Sprachabtastwerten umgewandelt, deren Höreindruck subjektiv beurteilt wurde. Die Markierung der Fehlerhaftigkeit der Sprachpakete wurde zunächst dadurch realisiert, dass alle Bit des kodierten Sprachpaketes auf ‘1’ gesetzt wurden. Die so veränderten Sprachpakete wurden von den jeweiligen Sprachdekodierern als fehlerhaft erkannt, und es wurde dekodiererspezifisch darauf reagiert. In einer zweiten Versuchsreihe wurden die fehlerhaften Sprachpakete durch das jeweils direkt davor korrekt übertragene Sprachpaket ersetzt, so dass die Sprachdekodierer selbst keinen Übertragungsfehler erkannten. Bei den in der Untersuchung verwendeten Implementierungen der Sprachdekodierer ergab durchgehend die zweite Versuchsreihe die subjektiv besseren Ergebnisse. Diese hängen auch von der Implementierung der Dekodierer ab [Nol99].

Für die Untersuchung der Sprachkodierer wurden unterschiedliche mittlere PDU-Fehlerhäufigkeiten (Block Error Rate (BLER)) angenommen, um die Eignung der Sprachkodierer bei verschiedenen Gegebenheiten der Funkübertragung vergleichen zu können. Unter PDU wird hier ein RLC/MAC-Block verstanden (siehe Abschnitt 3.5.6). Die mittleren PDU-Fehlerraten wurden zwischen keinem Übertragungsfehler und Übertragungen, bei denen im Mittel jedes zweite Sprachpaket fehlerhaft übertragen wird, variiert. Die fehlerhaften Sprachpakete waren dabei zufällig verteilt, um eine

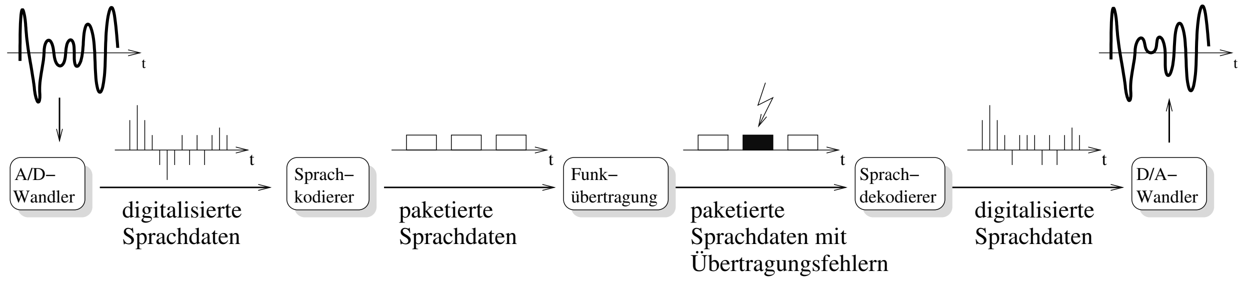


Abbildung 5.3: Modell zur vergleichenden Untersuchung verschiedener Sprachkodierer

möglichst realitätsnahe Untersuchung zu ermöglichen[2]. Für jeden der vier Sprachkodierer wurde durch vergleichende Hörtests die maximale PDU-Fehlerrate ermittelt, bei der die Sprachqualität der Sprachkodierer gleich und als ausreichend gut empfunden wurde.

Vergleicht man die vier nach dem Kodieren und Dekodieren entstandenen Sprachbeispiele in dem Fall miteinander, dass keine Übertragungsfehler auftreten, so schneidet subjektiv der Sprachkodierer `mp4_par` am besten ab. Er wird gefolgt vom `melp`-, `723_54`- und dem `mp4_celp`-Sprachkodierer. Der `mp4_celp` wurde aufgrund des schlechten Ergebnisses im übertragungsfehlerfreien Fall nicht weiter untersucht. Erhöht man die PDU-Fehlerrate, ergibt sich eine ähnliche Reihenfolge. Die `melp`- und `mp4_par`-Sprachkodierer bleiben bei einer PDU-Fehlerrate von 0,23 noch gut verständlich. Das vom `723_54` dekodierte Sprachbeispiel ist bereits bei einer PDU-Fehlerrate von 0,16 schwer zu verstehen. Vergleicht man bei einer PDU-Fehlerrate von 0,23 die beiden Sprachkodierer `melp` und `mp4_par` miteinander, liefert der `melp`-Sprachkodierer das beste Ergebnis. Da dieser Sprachkodierer mit einer Datenrate von nur 2,4 kbit/s auskommt, im Funkkanal aber 6,2 kbit/s zur Verfügung stehen, ist noch Raum für Verbesserungen des Sprachkodierers.[3] So kann die noch verfügbare Datenrate für Fehlerkorrekturverfahren genutzt werden. Dazu muss im GPRS-Protokoll der LLC-Schicht die ungeschützte (engl.: Unprotected) Übertragung genutzt werden, d. h. fehlerhafte PDUs dürfen nicht verworfen werden.

Aus diesem Hörvergleich lässt sich eine maximale PDU-Fehlerrate von 0,23 entnehmen, bei der noch eine gute Sprachqualität erreicht werden kann. Daraus lassen sich, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, die optimalen Grenzen der in GPRS definierten Kodierschemata für die Funkübertragung festlegen.

[2]Durch das bei GSM/GPRS verwendete langsame Frequenzsprungverfahren tritt keine zeitliche Häufung der PDU-Fehler (burstartige Fehler) auf.

[3]Oder es können zusätzliche Daten übertragen werden.

5.3.2 Parametrisierung der Kodierschemata

Jedes der vier in GPRS definierten Kodierschemata CS-1 bis CS-4 (vgl. Abschnitt 3.5.7) besitzt eine spezifische Abhängigkeit der PDU-Fehlerrate von der nutzbaren Empfangsleistung. Dabei sind insbesondere der relative Abstand zwischen Empfangsstärke des Signals und dem Rauschen (Signal to Noise Ratio (SNR)) und der relative Abstand zwischen der Empfangsstärke des Nutzsignals und der Empfangsstärke von Störsignalen gleicher Frequenz (Carrier to Interference (Ratio) (C/I)) von Bedeutung. Da die SNR im Wesentlichen von der Stärke der Abstrahlung der Sender bestimmt wird [Stü99b] und im Allgemeinen die C/I der bestimmende Faktor ist [Wal98b], [Stü99b], wird im Folgenden nur die C/I betrachtet.

Die Beziehung zwischen der PDU-Fehlerrate und der C/I (Abbildung 5.4) wird für die Untersuchung aus Veröffentlichungen [KMM00], [TWN01] und Untersuchungen von Mobilfunkgeräte-Herstellern abgeleitet. Die verwendeten Kurven entstanden aus Simulationen der Bitübertragungsschicht (Funkkanal) und berücksichtigen die GSM/GPRS-spezifischen Eigenheiten wie das langsame Frequenzsprungverfahren und die im Standard definierten Modulationsverfahren und Kodierschemata. Für die Untersuchungen werden die in Abbildung 5.4 gezeigten Kurven zugrunde gelegt. Sie gelten für ein sich mit 50 km/h bewegendes mobiles Endgerät in einer ebenen, städtischen Umgebung und einer Funkfrequenz von 900 MHz.

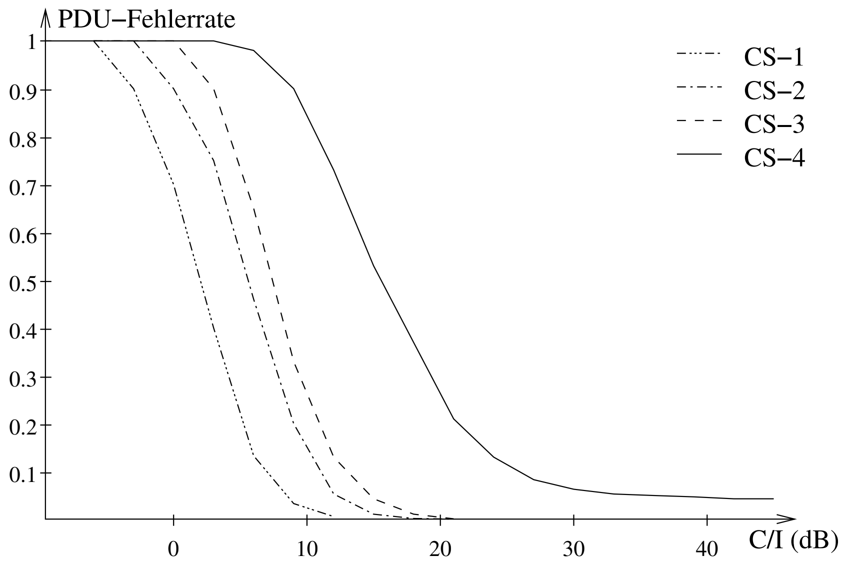


Abbildung 5.4: Abhängigkeit der PDU-Fehlerrate vom C/I-Wert für die vier Kodierschemata bei GPRS

Welches Kodierschema bei welchem C/I-Wert am besten geeignet ist, hängt von den Anforderungen der Anwendungen ab. Wählt man die Grenzen zwischen den Kodierschemata so, dass erst bei relativ hohem C/I gewechselt wird, treten weniger PDU-Verluste auf, da CS-1 mehr Bitfehler als CS-4 kompensieren kann. Dafür ist die zur Verfügung stehende Datenrate geringer. Die mittlere, zur Verfügung stehende Datenrate lässt sich maximieren, da sich die Datenrate aus der Anzahl der fehlerfreien PDUs multipliziert mit der Anzahl der Nutzdaten pro PDU ermitteln lässt.

Für die Sprachübertragung sollten die Grenzen der Kodierschemata so gewählt werden, dass eine minimale PDU-Verlustrate resultiert. Wie in Abschnitt 5.3.3.1.3 beschrieben, ist die Übertragung paketierter Sprache über einen CS-1 kodierten Funkkanal ineffektiv, da aufgrund der dabei zur Verfügung stehenden Datenrate zwei Funkkanäle verwendet werden müssten. CS-2 ist daher das geeignetste Kodierschema, wenn nur paketierte Sprache zu übertragen ist.

Da im All-IP-Mobilfunknetz neben der Sprache auch Daten übertragen werden sollen, werden die Grenzen zwischen den Kodierschemata so gewählt, dass eine PDU-Fehlerrate von 0,23 soweit möglich nicht überschritten, aber eine möglichst hohe Datenrate erreicht wird. Die C/I-Werte für die Grenzen zeigen Abbildung 5.5 und Tabelle 5.2. Für C/I-Werte $> 4{,}5$ dB bleibt die PDU-Fehlerrate unter 0,23.

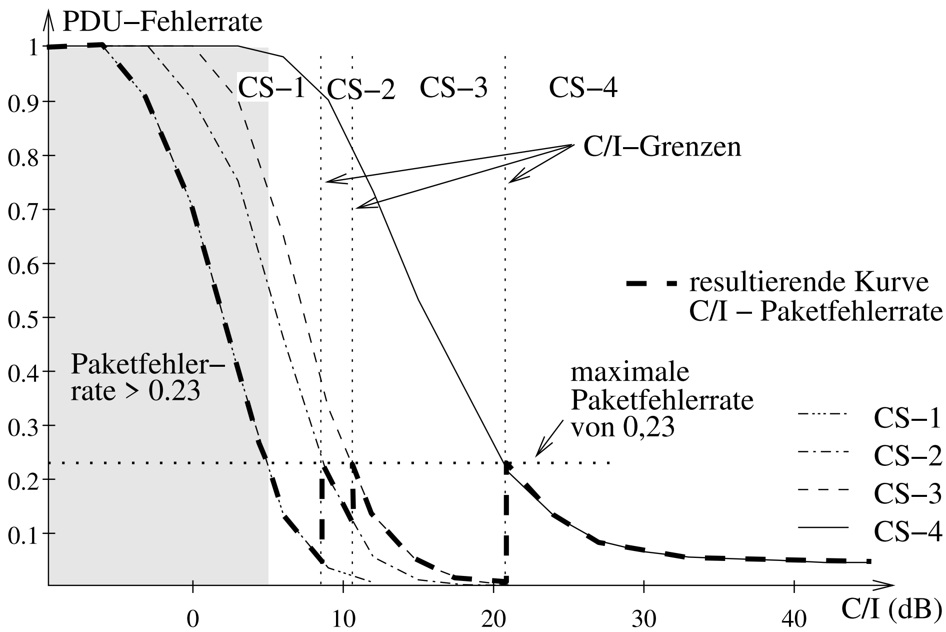


Abbildung 5.5: Ermittlung der Grenzen der vier Kodierschemata für eine maximale – soweit möglich – PDU-Fehlerrate von 0,23

Bereich des C/I [dB]	Kodierschema
C/I ≤ 9 dB	CS-1
9 dB < C/I ≤ 10,7 dB	CS-2
10,7 dB < C/I ≤ 21 dB	CS-3
21 dB < C/I	CS-4

Tabelle 5.2: Für die Untersuchung bezüglich der maximalen PDU-Fehlerrate von 0,23 verwendete Grenzen der Kodierschemata

Betrachtet man die maximale Datenrate als Kriterium bei der Wahl der Grenzen der Kodierschemata, finden sich in der Literatur die in Tabelle 5.3 angegebenen Werte [QGF99], [KMM00], [HMS98]. Da sie aber von anderen Kurven der C/I - PDU-Fehlerrate ausgehen, können sie für die vorliegende Untersuchung nur eingeschränkt verwendet werden. Die Bestimmung der Grenzen erfolgt in dieser Arbeit durch ein vereinfachtes Verfahren, das die Effekte der Wiederübertragung fehlerhafter PDUs nicht berücksichtigt, aber für die vergleichende Untersuchung in dieser Arbeit ausreichend ist. Multipliziert man die PDU-Rate nicht gefälschter Pakete mit der Menge der Nutzdaten pro PDU, erhält man den in Abbildung 5.6 gezeigten mittleren Durchsatz eines Kodierschemas bei einem bestimmten C/I in Oktett pro Block. Ebenfalls in Abbildung 5.6 eingezeichnet sind die Grenzen zwischen den Kodierschemata, die jeweils den höchsten mittleren Durchsatz liefern. Diese in Tabelle 5.4 zusammengefassten Grenzen werden in der weiteren Untersuchung als für Datenübertragung optimierte Grenzen der Kodierschemata verwendet.

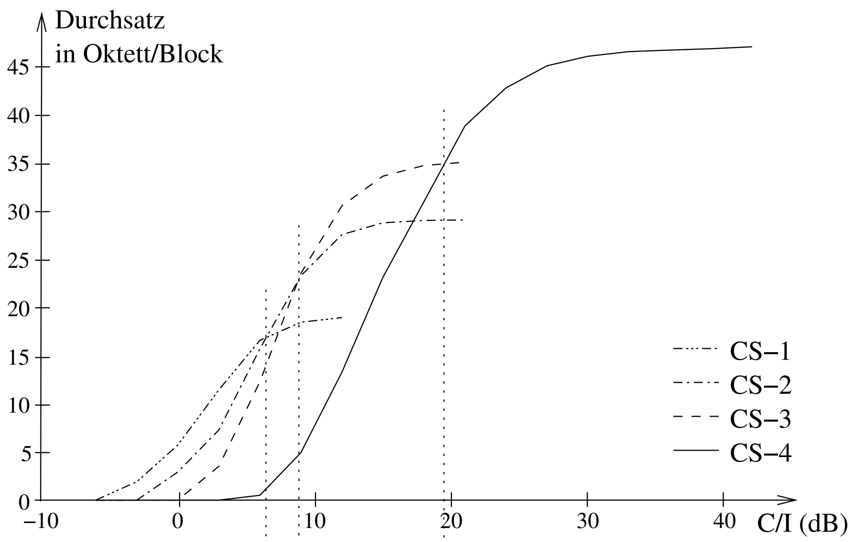


Abbildung 5.6: Mittlerer Durchsatz in Oktett pro Block der vier Kodierschemata von GPRS

dB Bereich	Kodierschema
C/I ≤ 6 dB	CS-1
6 dB < C/I ≤ 10 dB	CS-2
10 dB < C/I ≤ 17 dB	CS-3
17 dB < C/I	CS-4

Tabelle 5.3: Aus der Literatur entnommene Grenzen der GPRS-Kodierschemata

dB Bereich	Kodierschema
C/I ≤ 6,5 dB	CS-1
6,5 dB < C/I ≤ 8,8 dB	CS-2
8,8 dB < C/I ≤ 19,5 dB	CS-3
19,5 dB < C/I	CS-4

Tabelle 5.4: Für die Untersuchung bezüglich der höchsten Datenrate verwendete Grenzen der Kodierschemata

Es wird bei dieser Arbeit generell von einer idealen Auswahl des Kodierschemas ausgegangen. Dabei weiß der Sender zu Beginn des Sendevorgangs den zu erwartenden mittleren C/I-Wert und wählt aufgrund dessen das geeignetste Kodierschema aus.

5.3.3 Übertragung von Sprache über GPRS

Die effiziente Übertragung von Sprachpaketen über den Funkkanal und eine für die Sprachübertragung geeignete Zugriffssteuerung des Funkkanals werden im Folgenden diskutiert. Einer effizienten Übertragung der Sprachpakete steht zunächst eine Menge an Protokollinformationen entgegen, die mit jeder PDU im Kopf übertragen werden. Im Vergleich zu den eigentlichen Nutzdaten, hier den kodierten Sprachdaten, machen sie ca. die 7,5fache Datenmenge aus[4].

5.3.3.1 Komprimierung der PDU-Köpfe

Abbildung 5.7 zeigt die Protokollschichten, welche die kodierten Sprachdaten durchlaufen. Ebenfalls abgebildet ist in etwa maßstäblich die Menge an Protokollinformationen, die den zu übertragenden Sprachdaten durch die einzelnen Protokollschichten hinzugefügt werden [PH99], [WMGL98]. Nicht eingezeichnet sind die Protokollinformationen, die durch die RLC/MAC-Protokollschicht des GPRS hinzukommen, da sie in dieser Arbeit bereits bei den Größen der für die Übertragung zur Verfügung stehenden RLC/MAC-Blöcke berücksichtigt werden.

Eine Analyse der Protokollinformationen zeigt, dass viele Informationen während einer Sprachübertragung konstant bleiben, vom Empfänger selbst bestimmt werden können oder sich vorhersehbar ändern. Das Verfahren der Komprimierung der PDU-Köpfe nutzt diese Eigenschaften aus [Moi00] und überträgt die sich nicht verändernden Informationen nur einmal am Anfang der Übertragung. In allen weiteren PDUs werden nur die Informationen übertragen, die bei jeder PDU unterschiedlich sind. Bei der Dekomprimierung können die Protokollinformationen, zumindest semantisch, voll-

[4]Der `melp`-Sprachkodierer mit einer Datenrate von 2,7 kbit/s erzeugt alle 20 ms eine PDU der Größe 54 Bit, dazu kommen 40 Oktett RTP/UDP/IP-Protokollinformationen und 11 Oktett GPRS-Protokollinformationen.

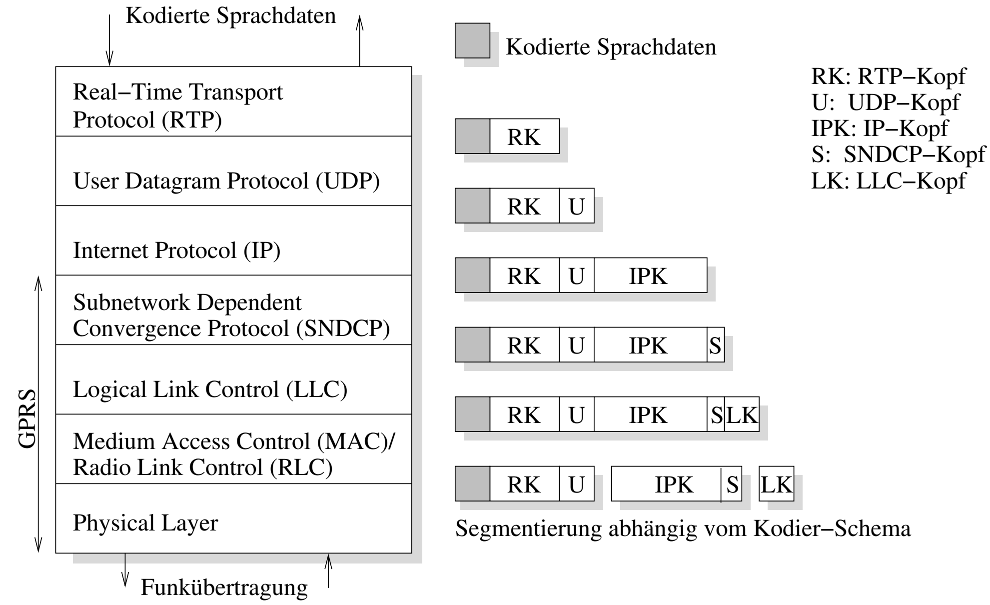


Abbildung 5.7: Protokollschichten für die Übertragung paketierter Sprachdaten über den Funkkanal

ständig wiederhergestellt werden. Verwendet man das im RFC 2508 [RFC2508] standardisierte Verfahren zur Komprimierung von PDU-Köpfen, müssen pro Sprachpaket statt 51 Oktett Protokollinformationen (40 Oktett RTP/UDP/IP- und 11 Oktett GPRS-Protokollinformationen) nur 13 Oktett übertragen werden [IKTO00], [LP00]. Protokollinformationen, die sich von PDU zu PDU nur leicht ändern, werden bei dem genannten Verfahren nicht als absoluter Wert übertragen, sondern nur die Veränderung der Information im Vergleich zur vorhergehenden PDU. Geht eine PDU verloren, können diese Informationen nicht korrekt wiederhergestellt werden und müssen wiederholt übertragen werden. Diese wiederholte Übertragung ist aufgrund des aufwändigen und langsamen Übertragungsverfahrens eines Funkkanals ineffizient und insbesondere bei der Übertragung von verzögerungskritischen Daten wie Sprache ungeeignet [GOST00], [LP00], [ROHC].

Das von Göran et al. [GOST00], [ROCCO] entworfene Komprimierungsverfahren Robust Checksum-based Header Compression (ROCCO) ist speziell für fehleranfällige Übertragungswege wie einem Mobilfunkkanal ausgelegt. Die einzelnen PDUs werden bei ROCCO mit einer Prüfsumme versehen. Erkennt der Empfänger anhand der Prüfsumme eine fehlerhafte PDU, wird über mehrere Schleifen versucht, die richtige Information wiederherzustellen. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall der Sprachübertragung über GPRS ist das Verfahren ungeeignet. Die Verzögerungen, die durch das iterative ‘Raten’ der fehlerhaften Bits entsteht, sind zu groß. Weiter sollte das Fehlerkorrekturverfahren in den Sprachkodierern implementiert werden, da dort genauere Informationen über die Semantik der Nutzdaten vorliegen (siehe Abschnitt 5.3.3.1.4).

In einem Entwurf der IETF WG ROHC wird für PDU-Köpfe das Komprimierungsverfahren Robust Header Compression (ROHC) vorgeschlagen [ROHC]. Es ist insbesondere für Übertragungsstrecken mit hoher Fehlerhäufigkeit und langen Laufzeiten ausgelegt. Dieses Verfahren erfüllt grundsätzlich die Anforderungen der Übertragung paketierter Sprache über GPRS, ist aber aufgrund der Allgemeingültigkeit für verschiedene Anforderungen relativ komplex.

Das von Le et al. [LCLZ00] vorgeschlagene Verfahren der Komprimierung von PDU-Köpfen ist ebenfalls für Übertragungsstrecken mit hoher Fehlerhäufigkeit und langen Laufzeiten ausgelegt. Es arbeitet adaptiv, was zur Folge hat, dass abhängig von der Fehlerrate der Übertragungsstrecke verschieden starke Komprimierungen des PDU-Kopfes eingesetzt werden. Da im vorliegenden Fall die Sprachpakete aber immer in einem RLC/MAC-PDU übertragen werden, ist die minimale Komprimierung festgelegt, so dass das adaptive Verfahren nur unter Einschränkungen eingesetzt werden kann. In dieser Arbeit wird daher ein einfaches Verfahren für die Komprimierung der PDU-Köpfe vorgeschlagen, das in diesem Abschnitt beschrieben wird.

5.3.3.1.1 Protokollinformationsfelder Im Folgenden werden die Protokollinformationen der Schichten RTP, UDP und IP dahingehend untersucht, welche Informationen wie häufig übertragen werden müssen [ROHC].

RTP Abbildung 2.11 auf Seite 24 zeigt das Format des RTP-Kopfes. Die in der PDU enthaltenen Nutzdaten besitzen, bestimmt durch den Sprachkodierer, immer dieselbe Größe und dieselbe Quelle. Daher sind die Felder `V`, `P`, `X`, `CC`, `PT` und `SSRC` während einer Übertragung mit denselben Werten belegt. Da nur eine Quelle beteiligt ist, wird das optionale Feld `CSRC` nicht benötigt. Das Feld `M` wird von RTP z. B. verwendet, um das Ende einer Sprachphase zu markieren. Da der Sprachkodierer die PDUs in fester zeitlicher Abfolge erzeugt, lassen sich die beiden Werte `Sequence Number` und `Timestamp` ineinander umrechnen, wenn man davon ausgeht, dass die `Sequence Number` zu Beginn der Übertragung bei Null beginnt und kontinuierlich hochgezählt wird. Um eine ganze Anzahl von Oktett für den PDU-Kopf zu erhalten, werden von dem Feld `Sequence Number` nur die unteren 15 Bit übertragen, das 16te Bit wird vom Empfänger ermittelt. Zu Problemen wegen Uneindeutigkeit kann dies nur führen, wenn mehr als 2^{15} PDUs hintereinander verloren gehen, was einem Ausfall von mehr als 10 Minuten entspricht. Somit müssen in jeder PDU 16 Bit für die Felder `M` und `Sequence` übertragen werden.

UDP Abbildung 2.10 auf Seite 22 zeigt das Format des UDP-Kopfes. Die Portnummern des Ziels und der Quelle sind während der Übertragung konstant, müssen aber einmal zu Beginn übertragen werden. Die PDU-`Length` ist ebenfalls konstant und durch den Sprachkodierer vorgegeben. Die

Prüfsumme muss nicht übertragen werden, da die tieferen Schichten des GPRS bereits eine Prüfsumme über die PDU berechnen. Die UDP-Prüfsumme kann daher bei der Dekomprimierung des PDU-Kopfes berechnet werden. Somit müssen vom UDP-Protokoll einmalig vier Oktett übertragen werden.

IP Abbildung 2.8 auf Seite 20 zeigt das Datagrammkopfformat des IP Version 4. Die Längenfelder (`IHL` und `Total Length`) des IP-Datagrammkopfes bleiben während einer Übertragung von Sprachdaten konstant und sind beim Empfänger rekonstruierbar, da die Größe der Nutzdaten konstant bleibt und keine optionalen IP-Parameter übertragen werden. Da keine Fragmentierung der Daten auf IP-Ebene stattfindet, sind die Felder `F` und `Fragment Offset` bekannt und fest. Auch die Felder `V`, `Protocol` und `ToS` können für den vorliegenden Fall als konstant und vorbestimmt angenommen werden. Auch wenn von externen Netzen ankommende IP-Datagramme unterschiedliche `ToS`-Informationen enthalten können, kann für den letzten Abschnitt der Übertragung, der Funkstrecke, ein fester, vordefinierter Wert angenommen werden. Einmalig zu Beginn der Übertragung müssen die Felder `TtL`, `Destination Address` und die `Source Address` übertragen werden. Die Reihenfolgenummer, die im `ID`-Feld übertragen wird, kann im IP nach verschiedenen Verfahren vergeben werden. Somit muss der Wert bei jedem Datagramm übertragen werden.

5.3.3.1.2 Entwurf der Komprimierung von PDU-Köpfen Die Parameter für die Komprimierung von PDU-Köpfen lassen sich in vier Klassen einteilen:

RP: Vom Empfänger selbständig rekonstruierbare Parameter

KP: Parameter, die für die gesamte Zeit, die ein mobiles Endgerät beim All-IP-Mobilfunknetz angemeldet ist, konstant bleiben

VP: Verbindungs-Parameter, die für eine Verbindung gelten

PP: PDU-Parameter, die für jede Sprach-PDU spezifisch sind

Tabelle 5.5 gibt für alle Parameter der RTP/UDP/IP-Köpfe die Parameterklasse an. Es ergeben sich 104 Bit ($\widehat{=}$ 13 Oktett), die einmalig zu Beginn jeder Telefonieverbindung an die Instanzen der PDU-Kopfkomprimierung des SNDCP im mobilen Endgerät und im SGSN übertragen werden müssen. Dies geschieht über die Exchange Identifier (XID)-Parameter mittels des SNDCP-Primitives `SN-XID` [GSM0465] und muss vom mobilen Endgerät aus erfolgen. Mit jeder PDU müssen 32 Bit ($\widehat{=}$ 4 Oktett) über den Funkkanal übertragen werden. Die der Parameterklasse KP zugeordneten Parameter (83 Bit) können bei der Anmeldung des mobilen Endgerätes beim All-IP-Mobilfunknetz (Attach Procedure) bestimmt und den Instanzen der PDU-Kopfkomprimierung übermittelt werden. Ob die 8 Bit des Verkehrsklassenparameters des IP konstant oder für jede Verbindung bestimmbar ist, kann je nach Anwendungsfall gewählt werden.

Protokoll	Feld	Länge	Parameterklasse
RTP	`V`	2 Bit	KP
	`P`	1 Bit	KP
	`X`	1 Bit	KP
	`CC`	4 Bit	KP
	`M`	1 Bit	PP
	`PT`	7 Bit	KP
	`Sequence Number`	15 Bit (16 Bit)	PP
	`Timestamp`	32 Bit	RP
	`SSRC`	32 Bit	VP
UDP	`Source Port`	16 Bit	VP
	`Destination Port`	16 Bit	VP
	`Length`	16 Bit	RP
	`Checksum`	16 Bit	RP
IP	`V`	4 Bit	KP
	`IHL`	4 Bit	RP
	`ToS`	8 Bit	KP (VP)
	`Total Length`	16 Bit	RP
	`ID`	16 Bit	PP
	`F`	3 Bit	KP
	`Fragment Offset`	13 Bit	KP
	`TtL`	8 Bit	VP
	`Protocol`	8 Bit	KP
	`Header Checksum`	16 Bit	RP
	`Source Address`	32 Bit	KP
	`Destination Address`	32 Bit	VP

Tabelle 5.5: Einteilung der Parameter der PDU-Köpfe in die Parameterklassen

Kodierschema	Bruttoblockgröße	Nettoblockgröße	Resultierende Datenrate
CS-1	157 Bit	37 Bit	1,85 kbit/s
CS-2	244 Bit	124 Bit	6,2 kbit/s
CS-3	288 Bit	168 Bit	8,4 kbit/s
CS-4	404 Bit	284 Bit	14,2 kbit/s

Tabelle 5.6: Für die Nutzdaten zur Verfügung stehenden Datenraten bei den einzelnen Kodierschemata von GPRS

5.3.3.1.3 Resultierende Randbedingungen Zu den in jeder PDU zu übertragenden 32 Bit aus dem RTP/UDP/IP-PDU-Kopf kommen noch 11 Oktett aus den PDU-Köpfen der SNDCP- und LLC-Protokollschichten. Die damit für die Nutzdaten bei den einzelnen Kodierschemata zur Verfügung stehenden Datenraten sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Aus der Tabelle 5.6 ist ersichtlich, dass die bei Verwendung des CS-1 zur Verfügung stehende Datenrate von 1,85 kbit/s selbst bei Verwendung des Sprachkodierers `melp` zu gering für die Übertragung der Sprachdaten ist. Sollte aufgrund der schlechten Qualität der Funkübertragung CS-1 verwendet werden (C/I kleiner 9 dB, vgl. Abschnitt 5.3.2), muss entweder CS-2 verwendet und somit eine höhere PDU-Fehlerrate in Kauf genommen werden oder ein zweiter Funkkanal für die Übertragung der Sprachdaten verwendet werden.

Die Verwendung eines zweiten Funkkanals führt zu einer ineffizienten Ausnutzung der Ressourcen der Funkübertragung. Da aufgrund des Zugriffsprotokolls der Funkübertragung das Anfordern eines neuen Funkkanals einige Zeit dauert, kann die Anforderung nicht erst erfolgen, wenn aufgrund der schlechten Übertragungsqualität ein weiterer Funkkanal benötigt wird. Es müsste für die Verbindung, sobald sich eine schlechtere Qualität abzeichnet, ein zusätzlicher Funkkanal angefordert und bereitgehalten werden. Dieser ist bis zum wirklichen Einsatz ungenutzt, kann aber nicht von anderen Verbindungen genutzt werden. Daher wird im All-IP-Mobilfunknetz auch für C/I-Werte kleiner als 9 dB das CS-2 verwendet.

5.3.3.1.4 Einbettung in GPRS Grundsätzlich sollte die PDU-Kopfkomprimierung in einer möglichst niederen Protokollschicht (vgl. Abbildung 5.7) erfolgen, da damit die meiste Protokollinformation zur Komprimierung zur Verfügung steht und nach der Komprimierung nur wenige Informationen hinzu kommen. Da es aber ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist, möglichst keine Änderungen am GPRS-Protokoll vorzunehmen, wird die Komprimierung in der SNDCP-Schicht des GPRS vorgeschlagen. Hier sieht das GPRS bereits vor, PDU-Kopf- oder Nutzdatenkomprimierung einzubinden. Allerdings können so nur die Protokollinformationen des RTP, UDP und IP komprimiert werden.

Von der Nutzdatenkomprimierung (Abschnitt 6.6 in [GSM0465]) wird hier kein Gebrauch gemacht, da die Nutzdaten, also die kodierte und paketierte Sprache, bereits hochkomprimiert ist. Weitere Verzögerungen der Übertragung durch die Komprimierung sind im Vergleich zum Effekt der Komprimierung zu teuer. Des Weiteren ändert sich durch die zusätzliche Komprimierung auch die Anfälligkeit des Datenstroms gegenüber Übertragungsfehlern. Für PDU-Kopfkomprimierung ist im GPRS-Standard als bisher einziges Verfahren RFC 1144 [RFC1144] definiert, der die Komprimierung von TCP/IP-Köpfe beschreibt (Abschnitt 6.5 in [GSM0465]).

Prinzipiell ist es auch möglich, zwischen der IP- und der SNDCP-Schicht eine Zwischenschicht für die Komprimierung von PDU-Köpfen einzufügen. Dabei würde dieselbe Protokollinformationsmenge zur Komprimierung zur Verfügung stehen, und es müsste an dieser Stelle keine Erweiterung im GPRS-Standard vorgenommen werden. Allerdings wird durch die Komprimierung auch die im IP-Datagrammkopf stehende Zielinformation komprimiert, die auf der Festnetzseite von Routeingprotokollen benötigt wird. Somit müsste im GGSN beim Übergang in oder von externen Netzen ebenfalls eine Zwischenschicht für die Komprimierung der PDU-Köpfe eingefügt werden, was wiederum einen Eingriff in das GPRS-Protokoll bedeuten würde.

5.3.3.2 Sprachübertragung im GPRS-Protokoll

In der Empfehlung G.114 der ITU-T [G114] wird eine Verzögerung der Sprache bei Einsatz von Echounterdrückungsmechanismen von maximal 150 ms als akzeptabel für Telefonieanwendungen angesehen. Heutige Mobilfunksysteme bieten typischerweise eine Verzögerung der Sprache von weniger als 100 ms [GOST00], [Tur00]. Im All-IP-Mobilfunknetz sollte die Verzögerung der Sprache unter den 150 ms der Empfehlungen der ITU-T liegen. Allgemein setzt sich die Verzögerung zusammen aus:

Paketieren und Kodieren der Sprache: Zusammenfassen der Sprachabtastwerte zu Sprachpaketen (algorithmische Verzögerung (engl.: Algorithmic Delay)) und Kodierung der Sprachpakete (Verarbeitungsverzögerung (engl.: Processing Delay)). Zusätzlich benötigen einige Verfahren zur Verbesserung der Sprachqualität weitere Sprachabtastwerte (Look-Ahead). Der Sprachkodierer `melp` besitzt eine algorithmische Verzögerung von 45 ms, die Verarbeitungsverzögerung ist implementierungsabhängig.

Übertragung über den Funkkanal: Die bei der Funkübertragung z. B. durch die Anforderung eines Funkkanals entstehenden Verzögerungen werden im Folgenden behandelt.

Übertragung über das Festnetz: Wurde die PDU von der BSS empfangen, muss sie weiter bis zum Gesprächspartner übertragen werden. Für diese Verzögerung werden hier 10 ms angesetzt [G114] und beinhaltet die Übertragung, Laufzeiten und Pufferzeiten.

Dekodieren der Sprache: Die Dekodierung der Sprache ist abhängig vom Sprachkodierer, die benötigte Zeit (engl.: Processing Delay) ist i. Allg. so kurz, dass sie hier vernachlässigt werden kann.

Die Verzögerung durch die Funkübertragung lässt sich in zwei additive Verzögerungen aufteilen: die Zeit für die Reservierung eines Funkkanals und die eigentliche Funkübertragung. Die Verzögerung durch die Übertragung ist deterministisch und für beide Richtungen dieselbe. Jedes Sprachpaket passt in einen RLC/MAC Block, der in vier Bursts übertragen wird. Die Verzögerung durch die Übertragung entspricht demzufolge der Dauer von vier Bursts, also 20 ms. Dazu addiert sich noch die mittlere Zugriffsverzögerung. Diese lässt sich durch Synchronisation des Sprachkodierers weitgehend reduzieren.

Die Verzögerung für die Reservierung eines Funkkanals tritt zu Beginn von Sprachphasen auf. Das Aktivieren des mobilen Endgerätes fällt nicht ins Gewicht, da nach GPRS-Standard das mobile Endgerät nach der Übertragung der letzten Daten eine bestimmte Zeit im `Ready`-Modus bleibt (Ready-Timer, Abschnitt 6.2.2 in [GSM0360c]). D. h. das mobile Endgerät befindet sich nach Übertragung der Verbindungssteuermeldungen zu Beginn der Verbindung bzw. nach der Übertragung der letzten Sprachpakete bei Ruhephasen im `Ready`-Modus.

5.3.3.2.1 Übertragung vom mobilen Endgerät Der TBF-Modus, der einer Übertragung von Sprachdaten am ehesten entspricht, ist der ungesicherte TBF mit offenem Ende (engl.: Non-Acknowledged, Open-Ended), da i. Allg. das Ende der Sprachübertragung nicht vorherbestimmbar ist. Dabei startet die `Countdown Procedure`, sobald weniger als im Parameter `BS_CV_MAX` angegebene RLC/MAC Blöcke zur Übertragung anstehen. Der Parameter `BS_CV_MAX` gilt dabei global für eine Zelle des Mobilfunknetzes, kann also nicht speziell für diese Art von Verbindung angepasst werden (Abschnitt 12.24 und 11.2.18 in [GSM0460]). Bei der Übertragung der Sprachdaten steht meist nur ein RLC/MAC Block zur Übertragung an, so dass ständig ein TBF auf- und abgebaut werden würde. Da dies einen hohen Aufwand an Signalisierung erzeugen würde, wird der Modus TBF mit festem Ende (engl.: Closed-Ended) verwendet. Dabei tritt das Problem auf, dass im Voraus nicht bekannt ist wie lange die Sprachphase dauert und wieviel Sprachpakete somit übertragen werden müssen. Im All-IP-Mobilfunknetz wird immer für eine bestimmte Anzahl von Sprachpaketen, in dieser Arbeit als Parameter `AIMF_TBF_LÄNGE` bezeichnet, ein TBF aufgebaut. Ist die Sprachübertragung früher zu Ende, verfallen die unnötig reservierten Zeitschlitze. Dauert die Sprachübertragung länger, wird erneut ein TBF aufgebaut. Eine Verlängerung eines bestehenden TBF ist im Standard nicht vorgesehen (Abschnitt 8.1.1.1 in [GSM0460]), der vorzeitige Abbruch eines vom mobilen Endgerät ausgehenden TBF ist nur vom SGSN aus möglich (Abschnitt 8.1.1.4 in [GSM0460]). Eine geeignete Wahl des Parameters `AIMF_TBF_LÄNGE` ist Gegenstand der Untersuchungen in Abschnitt 6.3.

Der Standard sieht für den Aufbau eines ungesicherten TBF den Aufbau über zwei Phasen (engl.: Two Phase Access) vor (Abschnitt 7.1.2.1 in [GSM0460]). Der schnelle Verbindungsaufbau (engl.: Short Access) und der Aufbau mit nur einer Phase (engl.: One Phase Access) kann nur für gesicherte TBF verwendet werden.

5.3.3.2.2 Übertragung zum mobilen Endgerät In der Richtung zum mobilen Endgerät sind keine TBF-Modi definiert. Zu Beginn teilt das BSS dem mobilen Endgerät den oder die Funkkanäle mit, über die es sendet. Wann die im BSS zum Senden anstehenden Daten übertragen werden, hängt vom im BSS implementierten Scheduler ab. Geht man wie oben erwähnt davon aus, dass sich das mobile Endgerät im `Ready`-Modus befindet, tritt bei dieser Übertragung nur eine geringe Verzögerung durch das Senden der `Packet Downlink Assignment`-Meldung auf. Es müssen keine Reservierungen angefordert und keine Verbindungen aufgebaut werden.

5.3.3.2.3 Übertragung auf höheren Protokollschichten Auf der LLC-Schicht wird für die Übertragung der Sprachdaten der ungesicherte und ungeschützte Modus (engl.: Non-Acknowledged and Unprotected) verwendet. Die Sprachdaten werden in nummerierten, ungesicherten Informationsrahmen (engl.: Numbered Unconfirmed Information Frames) übertragen. Die Übertragung der ungesicherten Rahmen erfolgt im Linkstatus `TLLI Assigned/ADM State`, bei dem keine Verbindung auf LLC-Ebene aufgebaut wird, so dass hier keine weitere Verzögerung auftritt. Der für die Übertragung nötige TLLI wird beim Aufbau der PDP-Kontexte (siehe Abschnitt 5.3.4) bestimmt und zwischen dem mobilen Endgerät und dem SGSN ausgetauscht (LLC-Primitiv `LLGMM-ASSIGN`).

Ähnliches gilt für die SNDCP-Schicht. Die Sprachpakete werden ungesichert als `SN-UNIDATA` übertragen, ohne dass eine Verbindung aufgebaut werden muss. Verzögerungen der Sprachpakete entstehen lediglich durch die PDU-Kopfkomprimierung und -dekomprimierung, die dieser Schicht zugeordnet sind.

Auch für die über GPRS liegenden Schichten IP und UDP gilt, dass keine Verbindungen aufgebaut werden müssen. Somit entstehen keine weiteren Verzögerungen. Für die Steuerung der RTP-Verbindung über das RTCP müssen zu Beginn einer Verbindung Informationen ausgetauscht werden (`canonical name`, PDU-Zähler, zeitliche Synchronisation). Diese Informationen können entweder bereits während des Verbindungsaufbaus oder parallel zur Reservierung des Funkkanals über den für Signalisiermeldungen vorgesehenen PDP-Kontext (siehe Abschnitt 5.3.4) übertragen werden.

5.3.3.2.4 Ausnutzung von Parallelität beim Verbindungsaufbau Um die Verzögerung bis zur Übertragung des ersten Spachpaketes zu verkürzen, wird vorgeschlagen, den TBF bereits anzufordern, solange der Sprachkodierer noch das erste Sprachpaket erzeugt. Dazu muss vom Sprachkodierer ein Signal erzeugt werden, das beim Eintreffen des ersten Sprachabtastwertes die Anforderung eines TBF veranlasst. Dieses Verfahren kann immer zu Beginn von Sprachphasen zum Einsatz kommen.

Sind die durch die Anforderung eines Funkkanals entstehenden Verzögerungen für die Dienstgüteanforderung der Verbindung zu lang, kann ein TBF angefordert werden, bevor Sprachdaten zur Übertragung anliegen. Der TBF für Sprachdaten kann bereits während der Phase der Verbindungssteuerung angefordert werden. Während Ruhephasen kann nach einer mittleren Dauer der Ruhephasen ein Funkkanal angefordert werden. Ist die Ruhephase früher zu Ende, muss der TBF zu Beginn der Sprachphase angefordert werden, was zu einer größeren Verzögerung führt. Ein Nachteil bei der vorzeitigen Anforderung ist, dass Ressourcen der Funkübertragung verschwendet werden. Dies tritt auf, da der TBF aufgebaut wird, bevor Sprachdaten zu übertragen sind oder der TBF nicht benötigt wird, da z. B. der gerufene Teilnehmer die Verbindung nicht annimmt.

5.3.3.2.5 GPRS-Signalisierkanäle Neben den Funkkanälen für die Übertragung der Sprachdaten werden auch Funkkanäle für die GPRS-Signalisierung benötigt. Bezüglich der Verzögerung beim Aufbau eines TBF ist der logische Kanal PRACH von besonderer Bedeutung. Über diesen Kanal fordern alle mobilen Endgeräte in freiem Zugriff die TBF an. Dadurch kann es zu Kollisionen kommen, insbesondere wenn die TBF der Sprachübertragung sehr kurz sind und somit häufig neue TBF angefordert werden müssen. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der PRACH während aller 12 Blöcke eines 52-Mehrfachrahmens (siehe Abschnitt 3.5.6) zur Verfügung steht. Dazu muss der Parameter `BS_PRACH_BLKS` auf den Wert 12 gesetzt werden (Abschnitt 6.3.2.2.3 in [GSM0502c]). Die Auswirkungen häufiger Kollisionen werden in Abschnitt 6.2.2.1 untersucht.

5.3.3.3 Überbrückung kurzer Ruhephasen

Wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben, sollten kurze Ruhephasen überbrückt werden. Da eine zusätzliche Verzögerung der Sprache bei der Verwendung der Fill-In-Methode zu einer Beeinträchtigung der Sprachqualität führen würde, wird hier eine Mischung der beiden Methoden Fill-In und Hangover vorgeschlagen. Prinzipiell wird die Hangover-Methode eingesetzt, allerdings nicht mit einer konstanten Zeit $\mathtt{t}_{\mathtt{Hangover}}$, sondern mit der Zeit, die sich aus der ‘Restlaufzeit’ $\mathtt{t'}_{\mathtt{Hangover}}$ des TBF mit fester Länge am Ende einer Sprachphase ergibt. Ist die Ruhephase kürzer als $\mathtt{t'}_{\mathtt{Hangover}}$, kann der noch bestehende TBF weiter für die Übertragung verwendet werden. Durch diese Abwandlung der Hangover-Methode muss im System keine weitere Erweiterung vorgenommen werden, da sich die Überbrückung kleiner Ruhephasen automatisch aus dem Übertragungsverfahren ergibt.

Ist die Zeit $\mathtt{t'}_{\mathtt{Hangover}}$ sehr kurz, werden entsprechend kurze Ruhephasen nicht überbrückt. Um dies zu vermeiden, kann die Eigenschaft des Systems genutzt werden, dass für die Kodierung des Sprachsignals, wie oben beschrieben, 45 ms (`melp`-Sprachkodierer) benötigt werden. Diese Zeit kann als $\mathtt{t}_{\mathtt{Fillin}}$ der Fill-In-Methode interpretiert werden. Der Ausgang des Sprachkodierers wird als verzögertes Sprachmuster im Vergleich zu den originalen Sprachdaten verwendet. Durch die Kombination der beiden Methoden wird erreicht, dass alle Ruhephasen, die kürzer als die Verzögerungszeit des Sprachkodierers sind, überbrückt werden. Ist $\mathtt{t'}_{\mathtt{Hangover}}$ größer als diese Zeit, werden auch Ruhephasen der Dauer $\mathtt{t'}_{\mathtt{Hangover}}$ unterdrückt. Gruber et al. [GS85] empfiehlt, mindestens Ruhephasen, die kürzer als 150 ms dauern, zu unterdrücken. Nach Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird diese Unterdrückung mit dem vorgestellten, kombinierten Verfahren in über 95% der Fälle erreicht. D. h. in weniger als 5% der Fälle ist die Sprachpause kürzer als 150 ms.

5.3.3.4 Analytische Bewertung der Sprachübertragung

Für die Anforderung eines Funkkanals vom mobilen Endgerät aus wird wie oben beschrieben das zweistufige Verfahren verwendet. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass die für den Aufbau eines TBF nötigen logischen Kanäle PRACH, PAGCH und PACCH den ersten Zeitschlitz eines TDMA-Rahmens (TN 0) belegen. Weiter soll das BSS höchstens vier Zeitschlitze (ca. 2,5 ms) und das mobile Endgerät höchstens acht Zeitschlitze (ca. 5 ms) benötigen, um auf ankommende Signalisiermeldungen zu reagieren. Damit ergibt sich, wie Abbildung 5.8 zeigt, eine minimale Verzögerung für die Anforderung eines TBF von 58,7 ms und eine maximale Verzögerung im kollisionsfreien Fall von 73,7 ms.

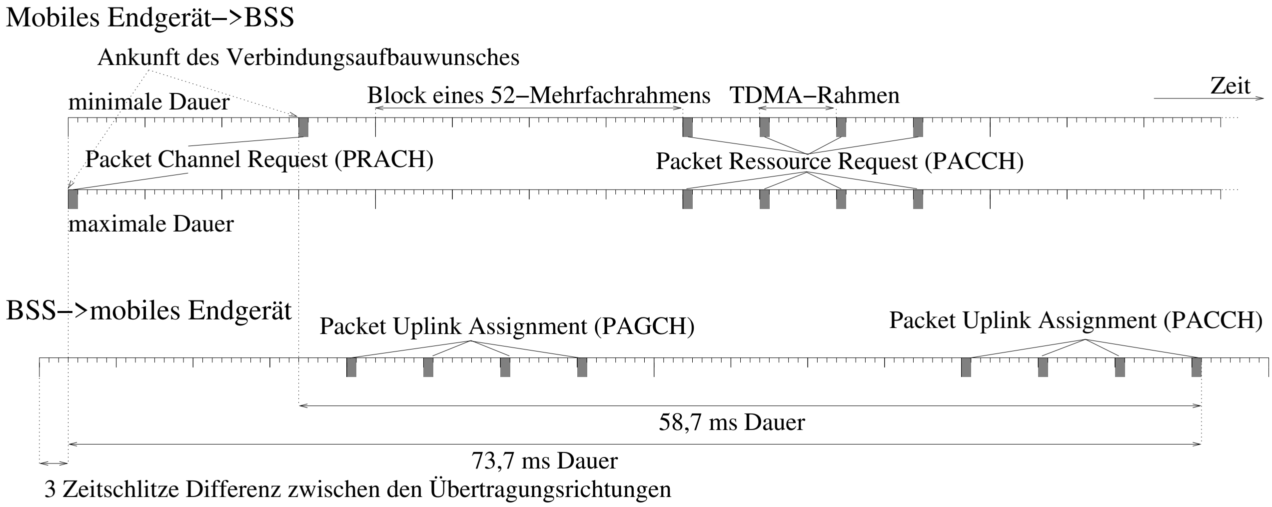


Abbildung 5.8: Minimale und maximale Dauer für die Anforderung eines TBF im kollisionsfreien Fall

Zusammen mit der Übertragungszeit eines Sprachpaketes ergibt sich somit mindestens eine Verzögerung von etwa 79 ms[5]. Die Verzögerung durch den Sprachkodierer addiert sich, wie in Abschnitt 5.3.3.2.4 beschrieben, nicht hinzu. Die während der Anforderung des Funkkanals angehäuften Sprachpakete können je nach aktuellem Kodierschema schneller übertragen werden. Da sie aber beim Empfänger isochron im 20 ms Takt dekodiert werden, ändert sich nichts an der resultierenden, gesamten Verzögerung. Schwankungen in der Verzögerung oder zusätzliche Verzögerungen, die z. B. durch die erneute Anforderung eines TBF auftreten, sind beim Empfänger nicht mehr sichtbar. Dies gilt zumindest, solange sie nicht größer als die Verzögerung beim ersten Aufbau des Übertragungskanals sind (siehe Abbildung 5.9). Ansonsten treten die Verzögerungen zumindest nicht so deutlich auf. Die aus diesen künstlichen Sprachpausen resultierenden Auswirkungen auf die Sprachqualität wurden von Gruber et al. [GS85] untersucht. Zu erwarten sind Pausen, die der Verzögerung des Sprachkodierers entsprechen, also im vorliegenden Fall etwa 45 ms. Entsprechend der Untersuchungen von Gruber et al. sind die Auswirkungen auf die Sprachqualität gering, solange derartige Pausen nicht öfter als ca. 10 mal pro Minute auftreten. Zu Beachten ist dabei, dass die beim Empfänger nach einer Ruhephase der Sprache verzögert ankommenden Sprachpakete nicht verworfen, sondern weiterhin isochron ausgespielt werden.

[5] 58,7 ms für die Anforderung eines Kanals und 20 ms Übertragungszeit.

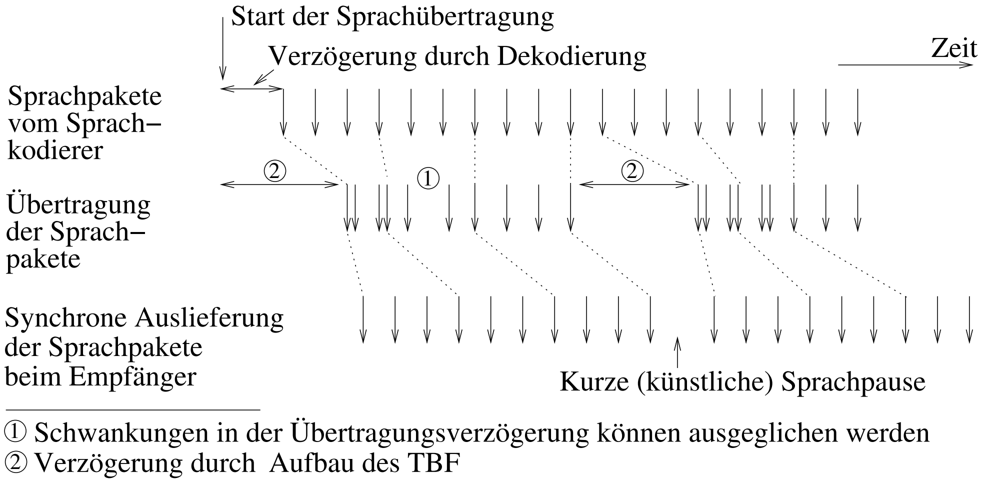


Abbildung 5.9: Verzögerung bei der Übertragung von Sprachpaketen

In der Richtung der Übertragung zum mobilen Endgerät ist die Verzögerung für die Anforderungen des Funkkanals nur etwa halb so lang, da nur zwei Meldungen ausgetauscht werden müssen. Eine der beiden Meldungen, die `Packet Control Acknowledgement`-Meldung, ist dabei optional. Damit ergibt sich eine Verzögerung bis zur Übertragung von 40 ms (optional 20 ms). In dieser Richtung der Übertragung fehlt die Möglichkeit, bereits während der Kodierung der Sprachdaten mit der Reservierung zu beginnen. Daher müssen hier die 45 ms der Verzögerung für die Sprachkodierung (`melp`-Sprachkodierer) hinzuaddiert werden, so dass sich in etwa dieselbe Verzögerung ergibt wie für die umgekehrte Richtung der Übertragung.

Die Verzögerung für die Anforderung eines oder mehrerer Funkkanäle gelten für jede Art von Datenübertragung. Es sei denn, für die Datenübertragung im gesicherten Modus wird der schnelle Verbindungsaufbau bzw. die Anforderung eines Funkkanals in einer Phase verwendet.

Eine Möglichkeit, die subjektive Verzögerung beim Sprachdialog zu reduzieren, ist das künstliche Abschneiden des Beginns einer Sprachphase um $\mathtt{t}_{FEC}$ (Front-End Clipping (FEC)). Dieses von Gruber et al. [GS85] und Gloss [Glo99] untersuchte Verfahren führt, wie Abbildung 5.10 zeigt, dazu, dass ein Dialogteilnehmer die Antwort seines Dialogpartners um $\mathtt{t}_{FEC}$ früher hört. Ist $\mathtt{t}_{FEC} < 1\%$ der Dauer der Sprachphase, ergibt sich nach Gruber et al. noch keine signifikante Verschlechterung des Sprachqualität. Nach Barceló et al. [BM96] sollte $\mathtt{t}_{FEC}$ in höchstens 2% der Fälle über 50 ms liegen.

Im folgenden Abschnitt wird eine Möglichkeit vorgestellt, mit kleinen Änderungen am GPRS-Protokoll diese Verzögerungen, insbesondere am Beginn von Sprachphasen, deutlich zu verkürzen.

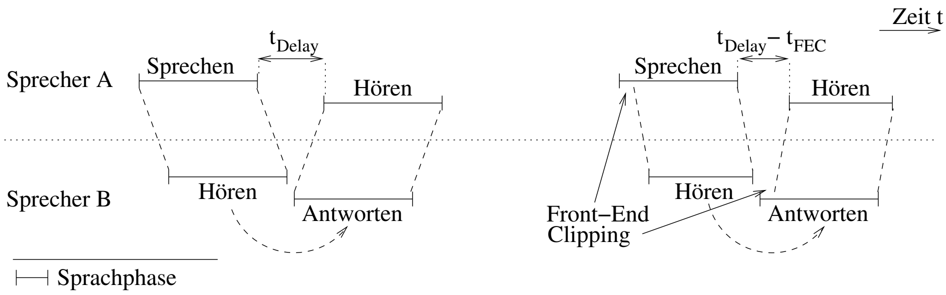


Abbildung 5.10: Auswirkungen des Front-End Clipping auf die Verzögerungen im Sprachdialog

5.3.3.5 Verkürzung der Zugriffsverzögerung durch Änderung des GPRS-Protokolls

Bei der hier vorgeschlagenen Änderung des GPRS-Protokolls wird der reservierte Funkkanal in Ruhephasen nicht freigegeben, kann aber in dieser Zeit für die Übertragung von Verkehren anderer mobiler Endgeräte verwendet werden. Liegen beim mobilen Endgerät wieder Sprachdaten an, reicht eine Meldung an das BSS und die an eine andere Verbindung 'verliehenen' Ressourcen werden wieder der ursprünglichen Sprachverbindung zugewiesen. Das mobile Endgerät kann sofort ohne Rückmeldung vom BSS die Sprachdaten übertragen. Die Meldung für die Wiederanforderung kann über den normalen oder einen speziell dafür reservierten PRACH übertragen werden.

Das BSS kann den während der Ruhephase nicht benötigten Funkkanal nur so an andere mobile Endgeräte vergeben, dass dieser TBF sofort abgebrochen oder auf einem anderen Funkkanal weitergeführt werden kann[6].

Die Änderungen, die im GPRS-Protokoll vorgenommen werden müssen, sind die Definition einer neuen Meldung für die schnelle Wiederanforderung, die über den PRACH übertragen wird. Weiter die Möglichkeit des BSS, die Verbindungsparameter zu speichern, um ohne weiteren Meldungsaustausch die Verbindung vom mobilen Endgerät wieder aktivieren zu können. Eine weitere Meldung wird benötigt, um dem BSS zu signalisieren, dass die bestehende Verbindung sofort beendet – ein TBF mit festem Ende (engl.: Closed Ended TBF) kann nach GPRS-Standard vom BSS aus abgebrochen werden – und die Verbindungsparameter gespeichert werden sollen. Dies entspricht einer Meldung des mobilen Endgerätes an das BSS, die für die Verbindung reservierten Ressourcen der Funkübertragung auf null zu reduzieren und bei Bedarf, also nach der Ruhephase, wieder zu erhöhen. Für die Verbindung vom SGSN zum mobilen Endgerät ist für Ruhephasen keine besondere Betrachtung nötig, da keine Ressourcen reserviert und Daten bei Bedarf übertragen werden.

Das genannte Verfahren eignet sich allgemein dafür, Verzögerungen für den Verbindungsaufbau zu verkürzen. So kann zu Beginn einer Telefonieverbindung, also noch während der Verbindungssteue-

[6] D. h. dynamischer Zugriffsmodus (engl.: Dynamic Allocation, Extended Dynamic Allocation) und Zuteilung des Funkkanals für jeweils nur einen RLC/MAC-Block (Parameter `USF_Granularity`).

rung, bereits eine Sprachverbindung aufgebaut werden. Sie wird wie in einer Ruhephase ausgesetzt und erst zu Beginn der eigentlichen Sprachübertragung aktiviert. Dadurch fällt die Verzögerung durch die Anforderung eines Kanals weg, ohne dass Ressourcen verschwendet werden. Dieses Verfahren kann auch dann angewendet werden, wenn das mobile Endgerät während einer Ruhephase die Mobilfunkzelle wechselt. Hier kann in der neuen Zelle sofort ein TBF aufgebaut und bis zu Beginn der Sprachphase ausgesetzt werden. Entsprechend muss in der alten Zelle der ausgesetzte TBF beendet werden.

Durch diese Änderung des GPRS-Protokolls kann die Verzögerung bis zu Beginn einer Übertragung auf ca. 30 ms (Übertragung der Wiederanforderungs-Meldung und warten auf freien Funkkanal) verkürzt werden.

5.3.4 Protokoll der Verbindungssteuerung

Im Folgenden wird angenommen, dass das mobile Endgerät beim GPRS-Netz registriert ist (GPRS-Attached, vgl. Abschnitt 3.6.1). Kommt ein Verbindungswunsch von außerhalb des All-IP-Mobilfunknetzes zu einem nicht im GPRS-Netz registrierten Endgerät, kann entsprechend zurücksignalisiert werden, dass der gewünschte Gesprächspartner nicht erreichbar ist. Die Netzübergangseinrichtung erkennt dies daran, dass kein PDP-Kontext eingerichtet ist, oder kann die Information durch eine Anfrage beim zuständigen HLR erhalten.

Für den Telefoniedienst werden pro mobilem Endgerät zwei PDP-Kontexte (vgl. Abschnitt 3.4) eingerichtet, womit auch zwei IP-Adressen zur Verfügung stehen. Ein PDP-Kontext dient der Übertragung von Meldungen der Verbindungssteuerung (Signalisierung), der zweite PDP-Kontext der Übertragung der paketierten Sprachdaten. Die beiden dem mobilen Endgerät zugewiesenen IP-Adressen sind nach außen für externe Netze nicht sichtbar. Sie werden von der entsprechenden Netzübergangseinrichtung verdeckt. Für die IP-Telefonie nach H.323 fungiert die IP-Adresse der Netzübergangseinrichtung als Zieladresse der Verbindung.

Der Übertragungsmodus des PDP-Kontextes für Sprache wurde in Abschnitt 5.3.3.2 beschrieben. Für die Übertragung von Signalisiermeldungen wird eine gesicherte Übertragung verwendet, um eine verlässliche Signalisierung zu gewährleisten. Da diese Meldungen meist kurz sind (weniger als acht RLC/MAC-Blöcke), kann der `Short Access` für die Anforderung eines Funkkanals verwendet werden.

Die beiden PDP-Kontexte werden beim Einschalten des mobilen Endgerätes nach der Registrierung im GPRS-Netz oder bei der Aktivierung des Telefoniedienstes im mobilen Endgerät mit den nötigen Parametern eingerichtet. Zusätzlich zum Einrichten der beiden PDP-Kontexte werden für den für die Übertragung der Sprachdaten vorgesehenen PDP-Kontext die Parameter für die PDU-Kopf-

Komprimierung (vgl. Abschnitt 5.3.3.1) gesetzt. Einer der Parameter ist die IP-Adresse der voreingestellten Netzübergangseinrichtung (IPTelG oder TG), da die Sprachpakete – nur diese durchlaufen die PDU-Kopfkomprimierung – als Zieladresse die Adresse dieser Netzübergangseinrichtung bekommen. Die Zieladresse des externen Endgerätes wird in der Netzübergangseinrichtung eingesetzt. Ändert sich die IP-Adresse der Netzübergangseinrichtung, wird die IP-Adresse der neuen Netzübergangseinrichtung durch eine entsprechende Meldung über den für die Verbindungssteuerung vorgesehenen PDP-Kontext dem mobilen Endgerät mitgeteilt. Will der Nutzer über ein bestimmtes Protokoll oder Netz telefonieren, z. B. IP-Telefonie statt ISDN, muss er die entsprechende Netzübergangseinrichtung ansprechen. Die IP-Adressen der Netzübergangseinrichtung sind dem mobilen Endgerät entweder bekannt oder sie müssen über eine Domain Name System (DNS)-Anfrage vom Festnetz angefordert werden. Ist die IP-Adresse der Netzübergangseinrichtung dem mobilen Endgerät bekannt, können die Parameter der PDU-Kopfkomprimierung entsprechend angepasst werden.

Die Verbindung zwischen den Netzübergangseinrichtungen und den SGSN erfolgt über TCP-Verbindungen für die gesicherte Übertragung der Signalisiermeldungen, bzw. über UDP für die Übertragung der Sprachdaten.

Das in dieser Arbeit entworfene Protokoll für die Verbindungssteuerung der Telefonie innerhalb des All-IP-Mobilfunknetzes dient dazu, den Verbindungsauf- und -abbau zu steuern. Der prinzipielle Ablauf der Verbindungssteuerung lehnt sich dabei an das ISDN-Protokoll bzw. an das H.323-Protokoll an. Der Verbindungsaufbau besteht aus einer Verbindungsaufbaumeldung (engl.: Setup Message), die das gerufene Endgerät mit einer Verbindungsaufbau-Quittierungsmeldung (engl.: Alerting Message) beantwortet. Nimmt der Teilnehmer die Verbindung an, wird dies durch eine Verbindungsannahme-Meldung (engl.: Connection Message) dem rufenden Endgerät mitgeteilt. Beendet werden kann die Verbindung von beiden Teilnehmern durch Senden der Verbindungsende-Meldung (engl.: Release Message), die für das externe Festnetz mit einer Verbindungsende-Quittierung (engl.: Release Complete Message) beantwortet wird.

Neben dem Verbindungsauf- und -abbau gibt es die Möglichkeit, weitere Informationen zu übertragen. Dies können z. B. Informationen für Dienste wie ‘Anklopfen’ oder ‘Anrufweiterleitung’, Gebühreninformationen oder zusätzlich zur Rufnummer eingegebene Ziffern sein. Treten bei der Verbindungssteuerung Fehler auf, laufen Zeitüberwachungen ab[7] oder treten sonstige Ereignisse ein[8], werden entsprechende Meldung an das mobile Endgerät bzw. die jeweiligen Netzübergangseinrichtungen gesendet.

Abbildung 5.11 zeigt das Signalisierzeitdiagramm für einen beispielhaften Ablauf eines erfolgreichen, vom Festnetz kommenden Verbindungswunsches. Die im Beispiel mit der IP-Adresse A

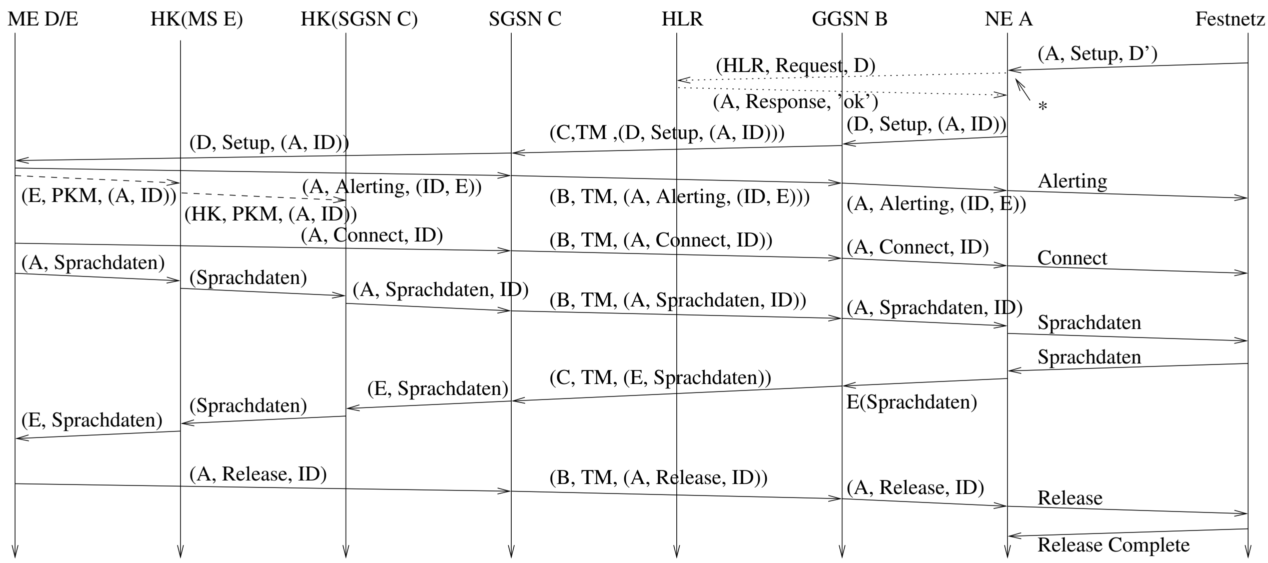
[7] Z. B. wenn der gerufene Teilnehmer nicht innerhalb einer bestimmten Zeit die Verbindung annimmt.
[8] Wie dass der Anschluss des gerufenen Teilnehmers besetzt ist.

gekennzeichnete Netzübergangseinrichtung erhält vom externen Netz einen Verbindungsaufbauwunsch. Der Zielteilnehmer ist, je nach externem Netz, durch eine Telefonnummer nach E.164 oder eine IP-Adresse adressiert. Die Netzübergangseinrichtung prüft die Zieladresse auf Gültigkeit (z. B. durch Anfrage beim HLR) und konvertiert sie ggf. (z. B. von der Telefonnummer nach E.164 in eine IP-Adresse). Anschließend wird eine Verbindungsaufbau-Meldung an das mobile Endgerät gesendet. Diese Meldung beinhaltet eine eindeutige Kennzeichnung (`ID`) der Verbindung – vergeben von der jeweiligen Netzübergangseinrichtung – und die IP-Adresse der jeweiligen Netzübergangseinrichtung. Das mobile Endgerät antwortet darauf mit einer Verbindungsaufbau-Quittierung, die neben der eindeutigen Kennzeichnung der Verbindung die IP-Adresse der Sprachverbindung des mobilen Endgerätes enthält. Gleichzeitig setzt das mobile Endgerät die Parameter der PDU-Kopfkomprimierung. Nimmt der Nutzer die Verbindung an, wird eine Verbindungsannahme-Meldung an die jeweilige Netzübergangseinrichtung gesendet. Jetzt können in beide Richtungen Sprachdaten übertragen werden. Die PDU-Kopfkomprimierung setzt die jeweils korrekten Parameter in die PDUs ein. Das Ende der Verbindung wird durch die Verbindungsabbau-Meldung beendet und kann vom Festnetz oder vom mobilen Endgerät aus gesendet werden. Um Ressourcen an der Funkschnittstelle zu sparen, wird die bei ISDN oder IP-Telefonie nach H.323 übliche Quittierung des Verbindungsabbaus nicht über die Funkschnittstelle übertragen.

Über IP-Telefonie nach dem H.323-Standard ankommende Verbindungsaufbauwünsche (H.225.0 SETUP) müssen als Zieladresse zunächst die IP-Adresse des IPTelG besitzen, bauen also eine Telefonieverbindung zum IPTelG auf. Diese Adresse kann der Quelle entweder bekannt sein oder kann durch eine Anfrage an den GK ermittelt werden. Des Weiteren muss in dem optionalen Informationselement `Called party number` der H.225.0 `Setup-Message` (H.225.0, Abschnitt 7.3.10) die Rufnummer des Zielteilnehmers eingetragen sein. Ist diese Rufnummer eine Telefonnummer nach E.164, kann der IPTelG durch eine Anfrage beim HLR die aktuelle IP-Adresse des Zielteilnehmers ermitteln und die Verbindungsaufbau-Meldung an diese Adresse senden.

Diese Art der Adressierung des mobilen Zielteilnehmers über eine Telefonnummer nach E.164 – im Gegensatz zur direkten Adressierung über eine IP-Adresse – ist deshalb sinnvoll, da bei der in GPRS häufig verwendeten dynamischen Vergabe der IP-Adressen für mobile Endgeräte keine feste IP-Adresse als Zieladresse für ein mobiles Endgerät vorhanden ist.

Abbildung 5.12 zeigt das Signalisierzeitdiagramm für einen beispielhaften Ablauf eines vom mobilen Endgerät ausgehenden Verbindungswunsches. In der vom mobilen Endgerät kommenden Verbindungsaufbau-Meldung ist entweder die Zieltelefonnummer oder die Ziel-IP-Adresse enthalten. Diese kann von der jeweiligen Netzübergangseinrichtung entsprechend umgesetzt werden. Die Netzübergangseinrichtung kann optional noch prüfen, ob das mobile Endgerät die Berechtigung zu telefonieren hat, und falls ja, ob es zu dieser Nummer telefonieren darf (engl.: Outgoing Call



(Zielknoten, Typ, Param.) : Meldung an Zielknoten mit Meldungstyp und Parametern
HK(MS E): PDU−Kopfkomprimierung im mobilen Endgerät E für Sprachdaten
HK(SGSN C): PDU−Kopfkomprimierung im SGSN C für mobiles Endgerät E
MS D/E: Mobiles Endgerät, IP−Adresse Signalisierung: D, Sprachpakete: E
NE A: Netzübergangseinheit mit IP−Adresse A

* Umsetzung D' nach D, z. B. Telefonnummer auf IP−Adresse

- - -> Meldungsfluß über GPRS−Primitive für Paketkopf−Komprimierung

Meldungstypen: TM: eingepackte Tunnelmeldung
PKM: Parameter der PDU−Kopfkomprimierung
Request: Anfrage an HLR, ob D erreicht werden kann
Response: Antwort vom HLR

Abbildung 5.11: Telefonieprotokoll für das All-IP-Mobilfunknetz: Signalisierzeitdiagramm des Verbindungsaufbaus zum mobilen Endgerät hin

Screening). Die eindeutige Kennzeichnung der Verbindung wird hier mit der Verbindungsaufbau-Quittierung übertragen. Nach deren Empfang kann das mobile Endgerät die Parameter der PDU-Kopfkomprimierung setzen.

Die IP-Zieladresse aller Meldungen und Sprachpakete vom mobilen Endgerät aus ist die IP-Adresse der jeweiligen Netzübergangseinrichtung. Diese IP-Adressen erhält das mobile Endgerät durch eine entsprechende DNS-Anfrage. Diese Anfrage kann entweder direkt vor dem Verbindungsaufbau gestellt werden oder das mobile Endgerät verwendet eine von einer früheren Anfrage bekannte Adresse. Ist diese von früher bekannte Adresse nicht mehr gültig, weil z. B. die Netzübergangseinrichtung nicht mehr erreichbar ist, muss eine aktuelle DNS-Anfrage gestellt werden.

Ausgehend vom All-IP-Mobilfunkprotokoll und den zu transportierenden Daten können zwei Meldungstypen definiert werden: Ein Meldungstyp für die Verbindungssteuerdaten und ein Typ für die Übertragung der Sprachdaten. Abbildung 5.13 zeigt den Aufbau der Meldungen. Bei der Übertragung der Signalisierung stehen vier Bit für die Kodierung des Typs der Meldung (siehe Tabelle 5.7) zur Verfügung. Über das Bit `P` kann angegeben werden, ob noch optionale Daten an die Meldung angehängt sind, z. B. um bei einer Fehlermeldung den Grund des Fehlers angeben zu können. Wei-

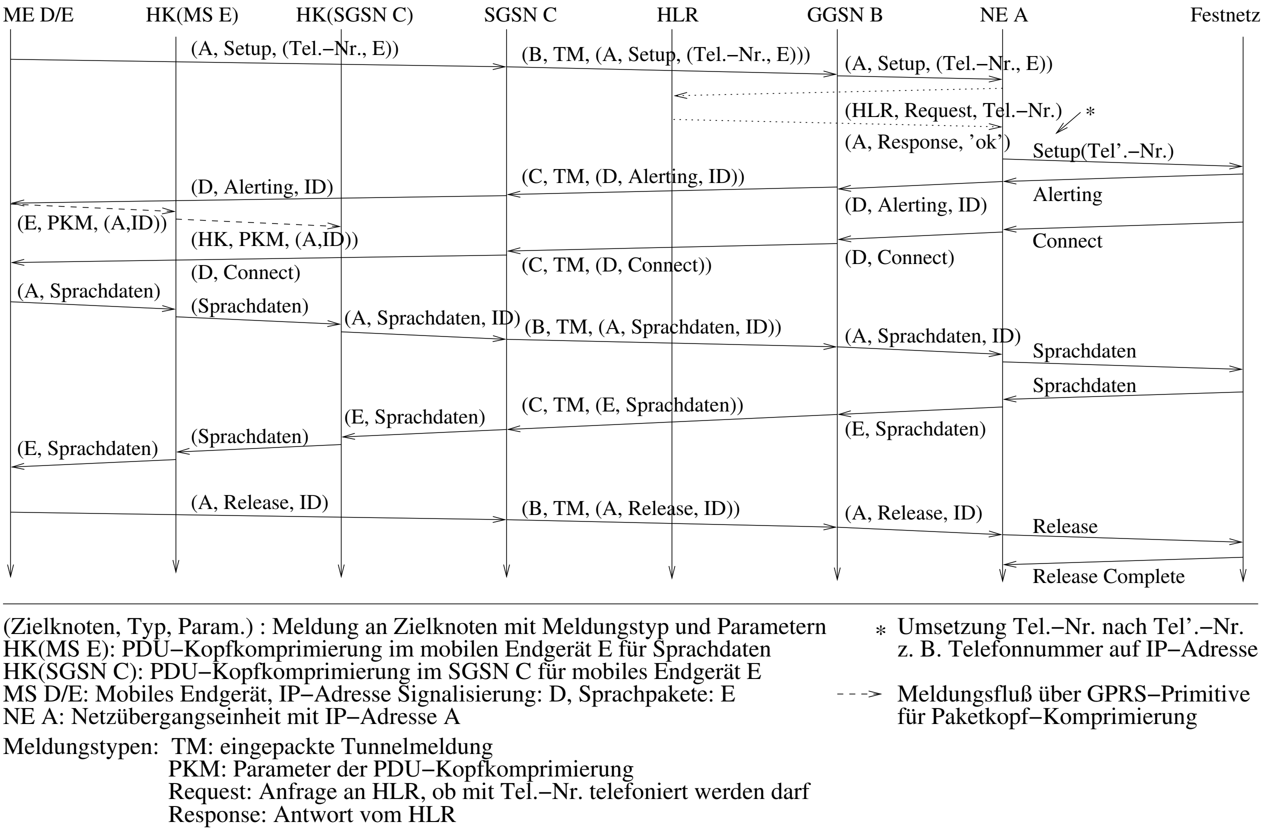


Abbildung 5.12: Telefonieprotokoll für das All-IP-Mobilfunknetz: Signalisierzeitdiagramm des Verbindungsaufbau vom mobilen Endgerät aus

Meldungstyp	Typ	Meldungstyp	Typ
`Setup`	0	`Besetzt`	8
`Alerting`	1	`Nummer ungültig`	9
`Connect`	2	`Nicht Erreichbar`	10
`Release`	3	`Fehler`	15

Tabelle 5.7: Definierte Signalisiermeldungstypen und ihre Kodierung im All-IP-Mobilfunkprotokoll

ter sind 24 Bit für die eindeutige Kennzeichnung der Verbindung definiert, um eine ausreichende Anzahl Verbindungen unterstützen zu können. Des Weiteren sind zwei Felder reserviert, in die IP-Adressen oder Rufnummern eingetragen werden können. Sind optionale Daten angehängt, kann in einem acht Bit breiten Feld die Länge dieser Daten in Oktett angegeben werden. In der Meldung für die Übertragung von Sprachdaten sind zunächst ebenfalls 24 Bit für die eindeutige Kennzeichnung der Verbindung definiert, anschließend folgen die Sprachdaten. Wird der in Abschnitt 5.3.1 vorgeschlagene Sprachkodierer `melp` verwendet, sind dies 54 Bit oder knapp sieben Oktett an Daten.

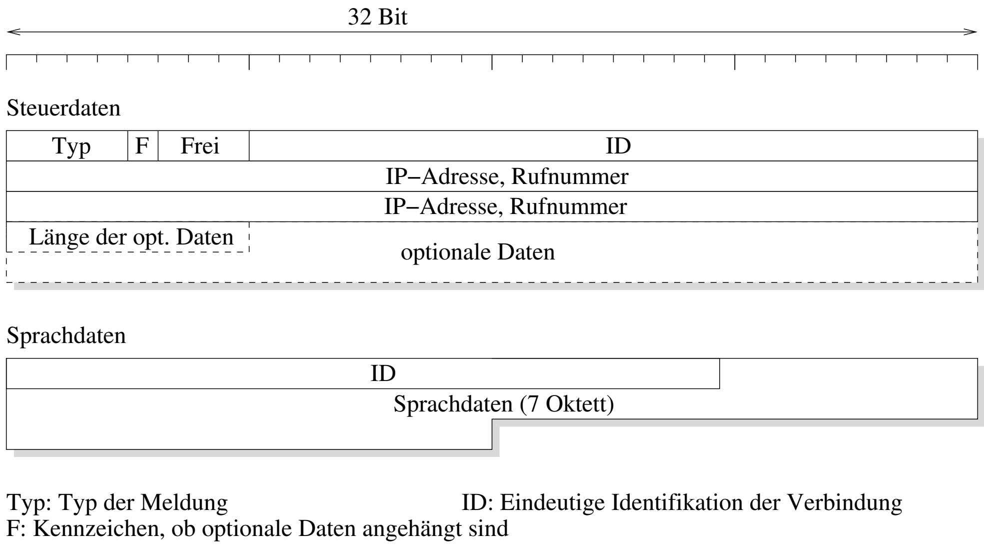


Abbildung 5.13: Zwei definierte Meldungen für das All-IP-Mobilfunkprotokoll für Signalisierung und Sprachdaten

5.4 Durchgehende Dienstgüte

In dieser Arbeit werden die beiden Architekturen IntServ und DiffServ für die Eignung im All-IP-Mobilfunknetz miteinander verglichen. Dafür werden zunächst die verschiedenen Arten der Verkehrsströme untersucht. Anschließend wird die am besten passende Architektur ausgewählt und die Einbettung in das All-IP-Mobilfunknetz beschrieben.

5.4.1 Klassifizierung der Verkehre

Zunächst sollen in diesem Abschnitt die im Festnetz des All-IP-Mobilfunknetzes auftretenden Verkehre bezüglich ihrer Dienstgüteanforderungen analysiert und klassifiziert werden. Ausgehend von der in Abschnitt 5.1.2 genannten Gruppierung des Verkehrs lassen sich Klassen mit spezifischen Dienstgüteparametern bilden.

Signalisierverkehr: Unabhängig von der Art und dem Protokoll der Signalisierung zeichnet sich der Signalisierverkehr durch einzelne, kleine PDUs (nach Mayer [May97] typischerweise kleiner als 100 Oktett) aus. Sie treten meist unkorreliert auf, da Signalisierszenarien nur wenige Meldungen umfassen und im Vergleich zur Meldungsgröße lange dauern. So werden z. B. beim ISDN- oder H.323-basierten Verbindungsauf- und -abbau zunächst zwei Meldungen ausgetauscht. Wenn der gerufene Teilnehmer die Verbindung annimmt, wird eine weitere Meldung gesendet und erst bei Beendigung der Verbindung werden erneut zwei Meldungen ausgetauscht.

Wichtig bei Signalisiermeldungen ist, dass sie mit minimaler Verzögerung übertragen werden und die Übertragung ohne Verluste, Verdopplungen oder Reihenfolgevertauschungen geschieht. Eine geringe Verzögerung ist wichtig, um eine schnelle Verbindungssteuerung zu gewährleisten. Speziell im Mobilfunk müssen Zellwechsel insbesondere während bestehender Verbindungen reibungslos und für den Nutzer unmerklich durchgeführt werden können.

Datenverkehr mit Dienstgüteanforderung: Je nach Anforderungen der Anwendung benötigen Verkehre spezielle Dienstgüteparameter. Typischerweise werden hier länger dauernde Verkehrsströme wie Sprachübertragungen oder andere Multimediadatenströme betrachtet. Auch Transaktionsdaten mit besonderen Ansprüchen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Übertragung fallen in diese Klasse.

Datenverkehr ohne Dienstgüteanforderung: Der Verkehr ohne besondere Dienstgüteanforderungen wird mit dem in IP-Netzen üblichen `Best-Effort` Verhalten übertragen. D. h. sie erfahren die aktuell verfügbare Dienstgüte. Im Sinne der Qualität der Dienste sollte bei der Dimensionierung des All-IP-Mobilfunknetzes und bei der Realisierung des Verfahrens zur Bereitstellung von Dienstgüte darauf geachtet werden, dass auch in Hochlastsituationen Verkehre dieser Klasse einen ausreichenden Anteil der Ressourcen zugeteilt bekommen.

5.4.2 Dienstgüte im Festnetz

Im folgenden Abschnitt wird dargelegt wie im Festnetzteil des All-IP-Mobilfunknetzes die Dienstgüte für die genannten Verkehrsklassen zur Verfügung gestellt werden können.

5.4.2.1 Auswahl der Dienstgütearchitektur

Als geeignetste Architektur für das All-IP-Mobilfunknetz stellte sich die DiffServ-Architektur heraus, mit der Dienstgüte in ausreichendem Maße zur Verfügung gestellt werden kann. DiffServ bietet die für ein Mobilfunknetz notwendige Flexibilität, ohne Ressourcen im Übermaß zu beanspruchen [AD01]. Die wichtigsten Gründe für diese Entscheidung sind:

Dynamisches Verhalten Ein Hauptargument gegen die IntServ-Architektur ist die mangelnde Anpassungsmöglichkeit an sich dynamisch verändernde Verkehrsströme. Eine bestehende Reservierung für die Datenrate eines Verkehrsstroms kann nicht erhöht werden, wenn keine Ressourcen mehr zur Verfügung stehen, da bestehende Reservierungen auch niedrigerer Priorität nicht unterbrochen bzw. reduziert werden können. Sinnvoller ist die Vorgehensweise, niederprioren Datenverkehr zu beschränken und z. B. dem Signalisierverkehr ausreichend Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Da in der DiffServ-Architektur nur relative Dienstgüte realisiert wird, kann z. B. dem Signalisierverkehr eine sehr hohe Priorität zugewiesen werden. Damit wird dieser Verkehr mit ausreichender Dienstgüte transportiert und in den überlasteten Knoten kann Verkehr niederer Priorität verworfen oder verzögert werden. Des Weiteren kann das der Klasse des Signalisierverkehrs entsprechende PHB derart ausgelegt werden, dass bei Überlast zur Drosselung der Verkehrslast bestimmte Signalisiermeldungen, z. B. Verbindungsaufbauwünsche, verworfen werden, während Signalisiermeldungen, die zu bereits bestehenden Verbindungen gehören, weiter übertragen werden. Ein ähnliches Verfahren zur Reduzierung des Verkehrs in Hochlastsituationen wurde für das SS7 vorgeschlagen und untersucht [MMZ94], [May97].

Neue Wege Durch die Mobilität der Endgeräte kommt es zu Wechseln der aktuellen Mobilfunkzelle. Tritt dabei zusätzlich ein Wechsel des für das mobile Endgerät zuständigen SGSN auf, müssen zum einen die PDUs vom GGSN über einen neuen Weg zum neuen SGSN transportiert werden. Zum anderen müssen noch nicht übertragene PDUs vom alten zum neuen SGSN nachgesendet werden (siehe auch Abschnitt 5.5.1). Für diese neuen Wege erst bei Bedarf Reservierungen anzulegen, ist wegen den damit verbundenen Verzögerungen problematisch. Für alle möglichen Wege Reservierungen vorzuhalten, führt zu einer Verschwendung von Ressourcen. Da bei DiffServ keine expliziten Reservierungen für Wege nötig sind, stellt sich bei DiffServ dieses Problem nicht.

Skalierbarkeit Das bei IntServ bekannte Problem der schlechten Skalierbarkeit – d. h. der Verwaltungsaufwand steigt bei höherem Verkehrsaufkommen insbesondere bei steigender Zahl von Verkehrsströmen stark an – tritt auch im Falle des All-IP-Mobilfunknetzes auf. Dies deshalb, da die Zahl der Signalisier- und Nutzdatenverbindungen nahezu linear mit der Anzahl der mobilen Endgeräte steigt. Durch geschickte Planung und Bündelung der Verkehrsströme lässt sich das Problem zwar reduzieren, nicht aber beseitigen. DiffServ kennt diese Probleme nicht oder nur sehr abgeschwächt.

Signalisieraufwand Der bei IntServ für den Aufbau von Reservierungen notwendige Signalisieraufwand und die damit verbundene Verzögerung der Nutzdaten kann nicht vernachlässigt werden. Signalisieraufwand fällt sowohl für neue Verkehrsverbindungen als auch im Falle neuer Wege bei Ausfall von Netzknoten oder Verbindungen an. Auch tritt bei Wegeänderungen z. B. in Folge von Ausfällen im Netz dasselbe Problem wie beim Punkt ‘dynamisches Verhalten’ auf. Aufgrund der Netzauslastung können u. U. für hochprioren Signalisierverkehr oder für wichtige Nutzdaten mit entsprechenden Dienstgüteanforderungen keine Reservierungen vorgenommen werden, so dass dieser Verkehr auf der neuen Route nicht oder nur mit Best-Effort Verhalten transportiert werden kann.

Die IntServ-Architektur bietet eine Garantie der Dienstgüte, während die DiffServ-Architektur Dienstgüte den Verkehren nur relativ zueinander nach bestimmten Vorgaben zuweisen kann. Bei einer ausreichenden Dimensionierung des IP-basierten Netzes kann aber bei Verwendung der DiffServ-Architektur die Dienstgüte mit einer gewissen Verlässlichkeit erreicht werden. Durch die Flexibilität und die oben genannten Punkte ist die DiffServ-Architektur trotz des Nachteils der fehlenden, absoluten Garantie für den Einsatz im All-IP-Mobilfunknetz am geeignetsten.

5.4.2.2 Parametrisierung

In diesem Abschnitt erfolgt eine Parametrisierung der DiffServ-Architektur, so dass die Dienstgüteanforderungen der oben genannten Verkehrsklassen erfüllt werden können.

Die Einteilung der IP-Datagramme in verschiedene Verkehrsklassen erfolgt durch die Zugangsrouter am Rand des IP-Netzes mittels der Zuweisung von DSCPs. Diesen DSCPs ordnen die IP-Router im Netz bestimmte PHB zu. Im RFC 2598 [RFC2598] wird das PHB `Expedited Forwarding` definiert, das dem Verkehr eine untere Grenze der Datenrate garantiert. Der RFC 2597 [RFC2597] beschreibt das PHB `Assured Forwarding`, das verschiedene Klassen innerhalb des PHB definiert und in jeder Klasse verschiedene Verwerfungsstufen erlaubt. Weiter ist ein Default-PHB mit dem DSCP ‘000000’ definiert, das dem im IP üblichen Best-Effort Verhalten entspricht. Ebenfalls im RFC 2597 sind zwei DSCP für `Network Control Traffic` vorgesehen, für die aber keine PHB spezifiziert sind.

Für das All-IP-Mobilfunknetz wird in dieser Arbeit die Zuordnung des Datenverkehrs ohne Dienstgüteanforderung zum PHB `Best-Effort` und die Zuordnung des Datenverkehr mit Dienstgüteanforderung zum PHB `Assured Forwarding` vorgeschlagen. Dabei können die unterschiedlichen Anforderungen der Verkehre den Klassen des `Assured Forwarding` zugeordnet werden. Damit stehen für die Anwendungen die Dienstgüteparameter Durchsatz und Verwerfungsstufe zur Charakterisierung des Verkehrs zur Verfügung. Es sind im RFC 2597 keine absoluten Werte für den Durchsatz und die Verwerfungsstufe angegeben, sondern lediglich eine Abstufung relativ zueinander. Für die Übertragung von Sprachpaketen ist der höchste Durchsatzwert und die beste Verwerfungsstufe mit den wenigsten Verlusten am geeignetsten. Sind für bestimmte Verkehre besondere Dienstgüteanforderungen wie Sicherheit nötig, können entsprechend neue DSCP und dazugehörige PHB definiert werden.

Für den Signalisierverkehr bietet sich die höchste Untergruppe des `Assured Forwarding`, das `Expedited Forwarding` oder die DSCP `Network Control Traffic` an, wobei für die letztgenannte Gruppe das PHB noch definiert werden muss. Das PHB `Expedited Forwarding` „can be used to build a low loss, low latency, low jitter, assured bandwidth, end-to-end service“ [RFC2598]. Die Anforderungen des Signalisierverkehrs sind, dass keine Verluste auftreten und eine variable Datenrate zur Verfügung steht. Die Verzögerungsschwankung ist dagegen weniger wichtig.

Auch ist es bei `Expedited Forwarding` nicht vorgesehen, im Überlastfall gezielt bestimmte Signalisiermeldungen (z. B. Verbindungsaufbauwünsche) zu verwerfen, um den Verkehr zu drosseln. Dieselben Argumente sprechen gegen die Verwendung einer Untergruppe des `Assured Forwarding`, so dass die Verwendung des DSCP `Network Control Traffic` für Signalisierverkehr im All-IP-Mobilfunknetz verwendet wird. Das entsprechende PHB ist durch die genannten Anforderungen des Signalisierverkehrs definiert. Die zwei für `Network Control Traffic` definierten DSCP können auf zwei unterschiedliche PHB abgebildet werden. So kann z. B. ein PHB so definiert sein, dass garantiert keine Meldungen verworfen werden. Der andere PHB beispielsweise derart, dass im Normalfall ebenfalls keine Meldungen verworfen werden, im Überlastfall aber bestimmte Meldungen, z. B. Verbindungsaufbauwünsche, zur Drosselung des Nutzverkehrs verworfen werden.

5.4.2.3 Einbettung in das GPRS-Festnetz

Die Netzrandknoten der DiffServ-Architektur klassifizieren und markieren von außen kommende Datagramme und passen ggf. den Verkehrsstrom den vereinbarten Verkehrsprofilen an. Sie liegen, zumindest logisch[9], zwischen den GSN und dem IP-basierten Haupttrassennetz. Dies verdeutlicht Abbildung 5.14.

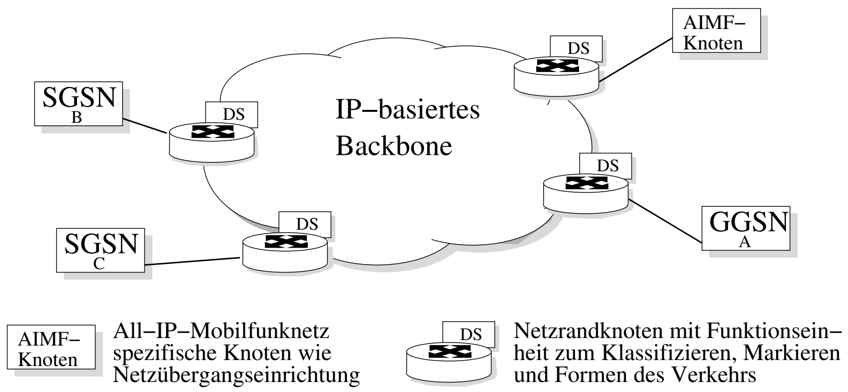


Abbildung 5.14: (Logische) Lage der Zugangsrouter im All-IP-Mobilfunknetz

Das zwischen den GSN verwendete Tunnelprotokoll GTP verpackt die eigentlichen IP-Datagramme und verdeckt somit die IP-Adressen, das `Type of Service (ToS)`-Feld und weitere Felder des IP-Datagrammkopfs nach außen hin. Dadurch können die Zugangsrouter bzw. die darin vorhandenen DiffServ-spezifischen Funktionseinheiten nicht mehr direkt die eigentlichen Datenpakete zwischen den Endknoten der Verbindung sehen. Somit können sie diese auch nicht den entsprechenden Verkehrsklassen zuordnen. Die Zugangsrouter sehen nur die aggregierten Verkehrsströme

[9] Physikalisch können sie in den SGSN- oder GGSN-Knoten integriert sein.

zwischen z. B. dem GGSN A und dem SGSN B oder dem SGSN C, nicht aber den Verkehrsstrom von Sprachdaten von und zu einem bestimmten mobilen Endgerät.

Der `Classifier` als die Funktionseinheit, die in den Zugangsroutern die ankommenden Datagramme klassifiziert, benötigt die Information, zu welchem Verkehrsstrom ein Datagramm gehört. Dann kann er entsprechend der vorgegebenen Klassifizierungsregeln (Traffic Conditioning Agreement (TCA)) die Vergabe des richtigen DSCP für das Datagramm veranlassen. Eingerichtet werden im All-IP-Mobilfunknetz die Klassifizierungsregeln in den einzelnen Zugangsroutern parallel zum Aufbau eines PDP-Kontextes. Mit dem Aufbau eines PDP-Kontextes wird dem mobilen Endgerät eine IP-Adresse für diesen Kontext zugewiesen. Diese kann zusammen mit den Dienstgüteparametern, die in der `Activate PDP-Context Request`-Meldung enthalten sind, für die Einrichtung der Klassifizierungsregel verwendet werden. Damit der `Classifier` die ankommenden Datagramme korrekt klassifizieren kann, muss er das Datagramm analysieren und die Parameter des IP-Datagrammkopfes des eingepackten Datagramms verwenden. Alternativ kann das Tunnelprotokoll so erweitert werden, dass in den äußeren IP-Datagrammköpfen in das DSCP-Feld vom Tunnelprotokoll ein entsprechender Wert eingetragen wird. Die erstgenannte Lösung hat den Nachteil, dass sie relativ aufwändig ist, da zunächst ermittelt werden muss, ob es sich um ein getunneltes IP-Datagramm handelt. IP-Datagramme, die z. B. zur GPRS-Signalisierung gehören, werden nicht getunnelt. Handelt es sich um ein getunneltes Datagramm, muss die Position des eingepackten IP-Datagrammkopfes bestimmt werden, bevor die zur Klassifizierung notwendigen Informationen ausgewertet werden können. Vorteil ist, dass im eingepackten IP-Datagrammkopf alle Informationen für die Klassifizierung des Datagramms zur Verfügung stehen. Die Klassifizierung kann somit bei Bedarf sehr differenziert erfolgen. Die zweite Lösung bedeutet eine Erweiterung des GPRS-Protokolls bzw. des verwendeten Tunnelprotokolls GTP. Die Lösung hat den Vorteil, dass nur der eigentliche IP-Datagrammkopf bei der Klassifizierung betrachtet werden muss. Dafür kann die Klassifizierung nur anhand des vom Tunnelprotokoll eingetragenen Wertes im DSCP-Feld des IP-Datagrammkopfes erfolgen. Abbildung 5.15 verdeutlicht die beiden Lösungsmöglichkeiten.

Wird die erstgenannte Lösung verwendet, kann die Klassifizierung eines Datagramms und die Zuweisung eines DSCP an dieses Datagramm nach Abbildung 5.16 erfolgen. Dabei wird hier für die Übertragung zum mobilen Endgerät die Zieladresse als Klassifizierungskriterium verwendet. Für die Übertragung vom mobilen Endgerät kann im entsprechenden Zugangsrouter die Absendeadresse für die Klassifizierung verwendet werden. Die Zieladresse ist dafür nicht geeignet, da beide Verkehrsströme als Ziel die entsprechenden Netzübergangseinrichtungen besitzen und damit keine Unterscheidung der Verkehrsströme getroffen werden kann. Gleichzeitig mit dem Aufbau der PDP-Kontexte werden den Zugangsroutern die Klassifizierungsregeln mitgeteilt. Den Datagrammen, die im eingepackten Datagrammkopf die dem PDP-Kontext für Signalisierung zugeordnete IP-Zieladresse tragen, werden der DSCP für Signalisiermeldungen zugewiesen. Entsprechend wei-

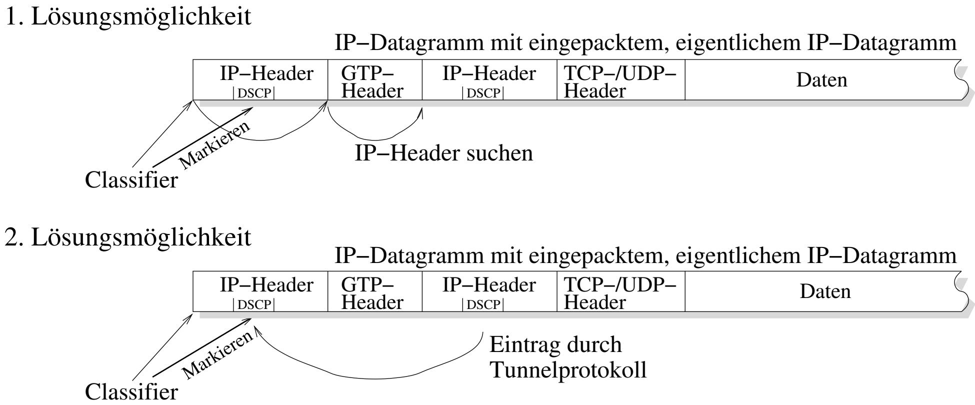


Abbildung 5.15: Die beiden Möglichkeiten des `Classifiers` zur Klassifizierung der Datagramme

sen Regeln den DSCP für Sprachdaten zu. Sind weitere PDP-Kontexte für Datenübertragungen aufgebaut, erfolgt ebenfalls eine entsprechende Zuordnung.

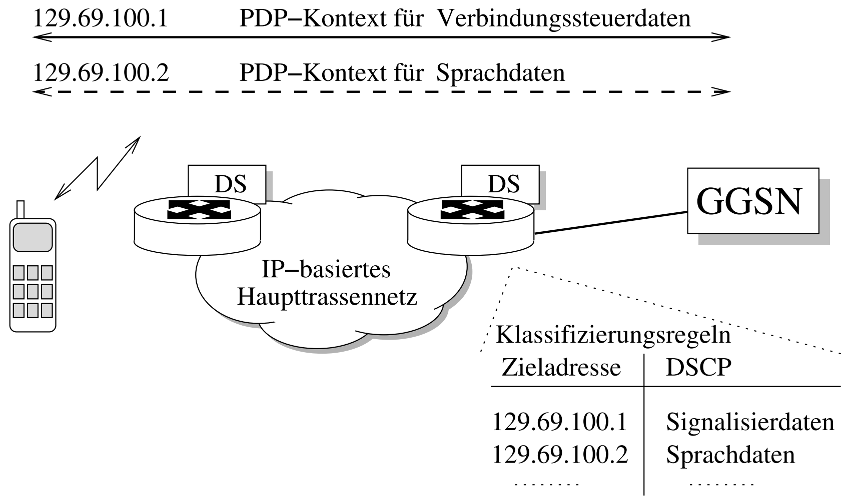


Abbildung 5.16: Beispielhafte Darstellung der Zuordnung von DSCP aufgrund der im eingepackten Datagrammkopf vorhandenen Zieladresse

Wird die zweitgenannte Lösung verwendet, sieht die Zuordnung nahezu identisch aus. Der einzige Unterschied ist, dass bei den Klassifizierungsregeln nicht die IP-Zieladresse, sondern der vom Tunnelprotokoll eingetragene DSCP oder eine vergleichbare Kennzeichnung für die Klassifizierung herangezogen wird.

Parameter	Wertebereich
Verzögerung	vier Klassen, eine davon Best-Effort
Zuverlässigkeit	fünf Klassen, siehe Tabelle 10.5.156 in [GSM0408]
Spitzendurchsatz	neun Stufen (max. 1000 - max. 256.000 Oktett pro Sekunde)
Mittlerer Durchsatz	Best-Effort, 18 Klassen (100 - 50.000.000 Oktett pro Stunde)
Priorität (engl.: Precedence)	drei Prioritäten

Tabelle 5.8: Dienstgüteparameter des IE `Quality of Service Profile` bzw. `Quality of Service` nach Tabelle 10.5.156 in [GSM0408]

5.4.3 Dienstgüte im Funkzugangsnetz

Nachdem im vorigen Abschnitt das IP-basierte Haupttrassennetz des All-IP-Mobilfunknetzes bezüglich Dienstgüte untersucht wurde, wird in diesem Abschnitt die Bereitstellung von Dienstgüte zwischen SGSN und mobilem Endgerät betrachtet.

5.4.3.1 Einleitung

Die Dienstgüte im Funkzugangsnetz des All-IP-Mobilfunknetzes kann an den folgenden Stellen beeinflusst werden:

PDP-Kontext Ebene: Bei der Aktivierung eines PDP-Kontextes kann das mobile Endgerät in der `Activate PDP Context Request`-Meldung die gewünschten Dienstgüteparameter angeben. Dazu dient der Parameter `QoS Requested`, der als Information Element (IE) `Quality of Service` kodiert ist (siehe Tabelle 5.8). Dieser Parameter wird weiter in der `Create PDP Context Request`-Meldung im IE `Quality of Service Profile` (siehe Tabelle 5.8) zum GGSN übertragen. Die GSN können die vom mobilen Endgerät spezifizierten Dienstgüteparameter übernehmen, verändern oder ablehnen. Entscheidend sind dabei die aktuelle Systemlast, die für diesen Nutzer generell vereinbarten Parameter oder z. B. eine für die Zelle oder die RA definierte maximale Anzahl gleichzeitig aktiver PDP-Kontexte.

TBF-Annahmesteuerung der Übertragung vom mobilen Endgerät: Beim Aufbau eines TBF in einer Phase (engl.: One Phase Access) kann lediglich die `Radio Priority` angegeben werden, während beim TBF-Aufbau in zwei Phasen (engl.: Two Phase Access) ein Packet Flow Identifier (PFI) angegeben werden kann. Diesem PFI ist i. Allg. ein Packet Flow Context (PFC) zugeordnet, der entweder voreingestellte oder beim Aufbau des PDP-Kontextes gesetzte Parameter beinhaltet. Teil des PFC ist das Aggregate BSS QoS Profile (ABQP), das die in Tabelle 5.8 genannten Dienstgüteparameter enthält. Liegt im BSS kein zum PFI passendes PFC vor, kann das PFC über die `Download BSS PFC`-Meldung vom SGSN angefordert werden.

Aufgrund der beim Aufbau des TBF übertragenen Radiopriorität oder den Dienstgüteparametern des PFC kann die Verbindungsanforderung

- erfüllt werden (`Packet Uplink Assignment`),
- in einen Wartezustand gesetzt werden, bis ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen (`Packet Queuing Notification`) oder
- abgelehnt werden (`Packet Access Reject`).

Flusssteuerung der Übertragung zum mobilen Endgerät: Bei der Übertragung zum mobilen Endgerät durchlaufen die Datenpakete in der BSS GPRS Protocol (BSSGP)-Schicht des SGSN eine zweistufige Flusssteuerung. Diese steuert zunächst den PDU-Fluss getrennt für jedes mobile Endgerät bzw. getrennt für jeden TLLI. Anschließend wird der aggregierte PDU-Fluss zu jedem BSS gesteuert. Gehören mehr als ein PDP-Kontext zu einem mobilen Endgerät, kann die Flusssteuerung nicht zwischen diesen unterscheiden. Sie werden folglich von der Flusssteuerung gleich behandelt. Die Flusssteuerung kann PDUs nur verzögern, nicht aber verwerfen. Sie dient somit zum einen dazu, das BSS von der Aufgabe der Pufferung ankommender PDUs zu entlasten. Zum anderen kann die Flusssteuerung auch Aufgaben der Dienstgütesteuerung übernehmen. Mit den zu übertragenden PDUs erhält das BSS entweder direkt Dienstgüteparameter (siehe Tabelle 5.8) oder indirekt über einen PFI. Abhängig von diesen Dienstgüteparametern und der aktuellen Situation der Funkübertragung kann das BSS die Flusssteuerungen im SGSN steuern und somit die Verbindungen zu den mobilen Endgeräten untereinander gewichten. Die Flusssteuerung kann allerdings nicht auf die schnell wechselnden Übertragungsbedingungen reagieren. Der Grund dafür ist, dass nach dem Standard die BSS höchstens alle C Sekunden ($1 < C < 10$) eine `Flow-Control PDU` an den SGSN zur Anpassung der Parameter der Flusssteuerung senden kann (Abschnitt 8.2.3.4 in [GSM0818]). Abbildung 5.17 verdeutlicht die zweistufige Flusssteuerung im SGSN.

RLC/MAC-Block Ebene: Die beschriebenen Dienstgüteparameter stehen dem BSS auch für die Verteilung der Ressourcen auf RLC/MAC-Block Ebene zur Verfügung. Ziel der Ressourcenverteilung auf dieser Ebene ist die Übertragung der Verkehrsströme entsprechend der Parameter ihrer Verkehrsklasse [SM01]. Wenn die Verbindung zu einem mobilen Endgerät schlecht ist, können z. B. entsprechend mehr Ressourcen für dieses mobile Endgerät bereitgestellt werden, um die vereinbarte Datenrate aufrecht zu halten.

Die Steuerung der Dienstgüte erfolgt, außer auf der Ebene des PDP-Kontextes, entweder auf der Basis der Radiopriorität oder aufgrund der Parameter aus Tabelle 5.8. Wird von der ersten Möglichkeit Gebrauch gemacht, findet in der LLC-Schicht die Abbildung der im PDP-Kontext spezifizierten Dienstgüteparameter auf die Radiopriorität statt. Diese Schicht hat somit einen gewissen Einfluss auf die angebotene Dienstgüte des Funkkanals.

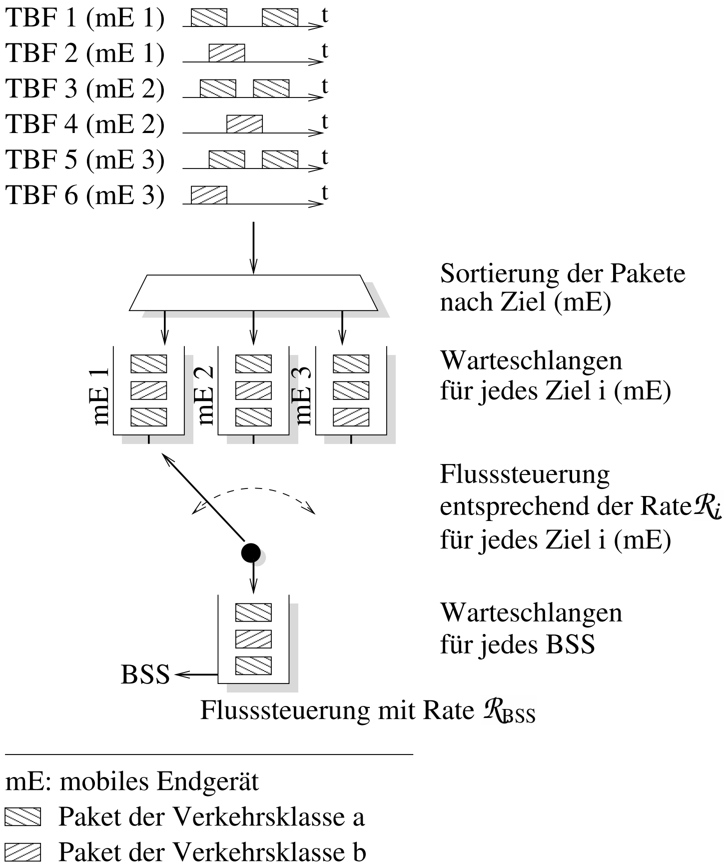


Abbildung 5.17: Zweistufige Flusssteuerung im SGSN für die Übertragung von PDUs zum mobilen Endgerät

Als Dienstgüteparameter der Funkübertragung für einen Verkehrsstrom i werden im All-IP-Mobilfunknetz die Prioritäten $\mathcal{P}_i$ und die Datenrate $\mathcal{B}_i$ verwendet. Für die Priorität stehen vier Abstufungen mit $\mathcal{P} = 4$ der höchsten Priorität zur Verfügung. Der Verkehrsklasse Best-Effort ist die niederste Priorität $\mathcal{P} = 1$ zugeordnet. Mit dieser Festlegung wird ein Mittelweg zwischen ausreichend detaillierter Beschreibung der Dienstgüte und einfachen Algorithmen für die Verteilung der Ressourcen gegangen.

Neben der Funkübertragung müssen die Daten noch vom BSS zum SGSN und umgekehrt übertragen werden. Diese Verbindung (Schnittstelle Gb) wird hier nicht näher betrachtet, da eine ausreichende Dimensionierung aus der der Funkübertragung zur Verfügung stehenden Datenrate $\mathcal{B}$ ableitbar ist. Eine Untersuchung über die Dimensionierung dieser Verbindung findet sich z. B. bei García et al. [GP00].

5.4.3.2 Algorithmen zur Bereitstellung der Dienstgüte

Die Algorithmen, die in der Funkübertragung des All-IP-Mobilfunknetzes für die Bereitstellung von Dienstgüte vorgeschlagen werden, sind im Folgenden beschrieben.

PDP-Kontext Ebene: Die Aktivierung eines PDP-Kontextes erfolgt i. Allg. nicht dann, wenn Daten zur Übertragung anstehen, sondern wenn ein mobiles Endgerät sich beim Netz anmeldet. Daher kann die aktuelle Auslastung des Netzes nicht oder nur sehr begrenzt als Basis für die Aushandlung des PDP-Kontextes verwendet werden. Durch Erfahrungswerte aus Messungen und analytischen oder simulativen Untersuchungen können aber Obergrenzen für z. B. die Anzahl gleichzeitig aktiver PDP-Kontexte aufgestellt werden. Durch derartige Beschränkungen kann weitgehend verhindert werden, dass Überlastungen der Funkübertragung auftreten.

TBF-Annahmesteuerung der Übertragung vom mobilen Endgerät: Seien $\mathcal{P}_i$ mit $1 \leq i \leq N$ die Prioritäten, $\mathcal{B}_i$ mit $1 \leq i \leq N$ die Datenrateanforderungen der bereits bestehenden N Verbindungen. $\mathcal{B}$ sei die insgesamt zur Verfügung stehende Datenrate. $\mathcal{P}_{neu}$ und $\mathcal{B}_{neu}$ geben die Priorität und die Datenrateanforderung der neuen Verbindung an. Die Summe der derzeit benötigten Datenrate ergibt sich somit zu

$$\mathcal{B}_{alt} = \sum_{i=1}^{N} \mathcal{B}_i \,, \quad \mathcal{B}_{alt} \leq \mathcal{B} \,.$$

Der Verbindungswunsch kann angenommen werden, falls mindestens eine der drei folgenden Gleichungen wahr ist:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{neu} &= \text{`Best-Effort'} && (5.1) \\ \mathcal{B}_{neu} &\leq \mathcal{B} - \mathcal{B}_{alt} && (5.2) \\ \mathcal{B}_{neu} &\leq \sum_{i \in \{j | (1 \leq j \leq N) \wedge (\mathcal{P}_j < \mathcal{P}_{neu})\}} \mathcal{B}_i \; + (\mathcal{B} - \mathcal{B}_{alt}) && (5.3) \end{aligned}$$

Ist nur Gleichung 5.3 wahr, müssen also niederpriore Verbindungen gekürzt werden, werden solange niederpriore Verbindungen auf Null reduziert, bis ausreichend Datenrate für die neue Verbindung zur Verfügung steht. Ist keine der drei Gleichungen wahr, wird die Anforderung entweder abgelehnt oder in eine Warteschlange eingereiht, je nachdem, ob diese Warteschlange bereits eine gewisse maximale Länge erreicht hat oder nicht. Abbildung 5.18 verdeutlicht den Algorithmus.

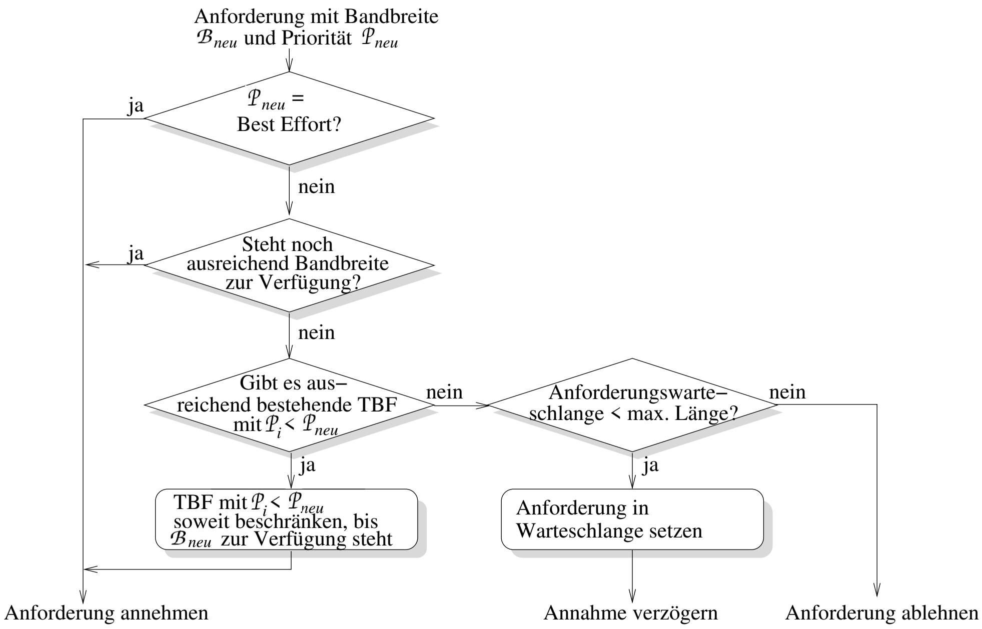


Abbildung 5.18: TBF-Annahmesteuerung bei der Anforderung eines TBF für die Übertragung vom mobilen Endgerät

Soll verhindert werden, dass die Datenrate niederprioren Verkehrs bis auf Null reduziert wird, kann Gleichung 5.3 durch Gleichung 5.4 ersetzt werden. Damit steht der Verbindung i mindestens die minimale Datenrate $\mathcal{B}_{i_{min}}$ zur Verfügung.

$$\mathcal{B}_{neu} \leq \sum_{i \in \{j | (1 \leq j \leq N) \wedge (\mathcal{P}_j < \mathcal{P}_{neu})\}} \max(\mathcal{B}_i - \mathcal{B}_{i_{min}}, 0) \ + (\mathcal{B} - \mathcal{B}_{alt}) \tag{5.4}$$

Flusssteuerung der Übertragung zum mobilen Endgerät: Die zweite Stufe der Flusssteuerung im SGSN (siehe Abbildung 5.17) sorgt im Wesentlichen dafür, dass im BSS nicht zu viele PDUs vor der Übertragung zwischengespeichert werden müssen. Durch die erste Stufe kann die Übertragung zu den einzelnen mobilen Endgeräten gewichtet werden. Ausschlaggebender Parameter ist dabei die Rate $\mathcal{R}_i$, mit der PDUs aus den einzelnen, den mobilen Endgeräten zugeordneten Warteschlangen weitergeleitet werden. Diese Rate entspricht der Datenrate der Verkehre zu den jeweiligen mobilen Endgeräten.

Sei im Folgenden mit $\mathcal{D}_{ij}$ die Datenrate und mit Q_{ij} die Priorität des j-ten PDP-Kontext zum mobilen Endgerät i bezeichnet. Werden über einen PDP-Kontext aktuell keine Daten übertragen, ist $\mathcal{D}_{ij}$ entsprechend Null. Sei weiter $Q_i = \max(Q_{ij} \ \ \forall j)$ die höchste Priorität aller PDP-Kontexte zum mobilen Endgerät i. $\mathcal{D}_i = \sum_j \mathcal{D}_{ij}$ bezeichnet die Datenrate, die insgesamt zum mobilen Endgerät i benötigt wird. $\mathcal{B}$ bezeichnet wieder die aktuell zur Verfügung stehende Datenrate der Funkübertragung. Dann lassen sich die $\mathcal{R}_i$ bestimmen mit:

$$\mathcal{R}_i = \begin{cases} 0 & \text{falls} \quad \mathcal{B} \leq \sum\limits_{k \in \{j | (1 \leq j \leq N) \wedge (Q_j > Q_i)\}} \mathcal{D}_k \\ \mathcal{D}_i \cdot \min(1, V_i) & \text{sonst} \end{cases} \tag{5.5}$$

$$\text{mit} \quad V_i = \frac{\mathcal{B} - \sum_{k \in \{j | (1 \leq j \leq N) \wedge (Q_j > Q_i)\}} \mathcal{D}_k}{\sum_{k \in \{j | (1 \leq j \leq N) \wedge (Q_j = Q_i)\}} \mathcal{D}_k} \tag{5.6}$$

V_i ist dabei das Verhältnis von für diese und kleinere Prioritätsklassen zur Verfügung stehender Datenrate zu der benötigten Datenrate der Prioritätsklasse Q_i.

Die Rate $\mathcal{R}_i$ ist Null, falls die zur Verfügung stehende Datenrate von höherprioren Verkehren benötigt wird. Ansonsten wird die nicht von höherprioren Verkehren benötigte Datenrate gleichmäßig auf die PDP-Kontexte aufgeteilt, wobei $\mathcal{R}_i$ maximal der gewünschten Datenrate $\mathcal{D}_i$ entspricht.

Neu bestimmt werden die $\mathcal{R}_i$ in periodischen Abständen. Ggf. können die $\mathcal{R}_i$ über mehrere Zyklen gemittelt werden, um kurzzeitige Schwankungen auszugleichen. Weiter kann der Algorithmus so angepasst werden, dass die $\mathcal{R}_i$ von niederprioren Verkehren nicht bis auf Null beschränkt werden, sondern immer eine minimale Rate aufweisen, solange Verkehr zur Übertragung ansteht.

Wie die Untersuchung der Dienstgütemechanismen in Abschnitt 6.2.3 zeigt, können sich bei diesem Verfahren Probleme ergeben. Dies z. B. dann, wenn Verkehrsströme durch die Reduzierung der Datenrate weniger als die für diesen Verkehr spezifizierte Mindestdatenrate erhalten. Bei einigen Verkehren, z. B. Sprachverkehr, ist es sinnvoller, Verkehrsströme zu einigen mobilen Endgeräten völlig auf Null zu reduzieren, so dass die verbleibenden Verkehre die nötige Mindestdatenrate erhalten.

RLC/MAC-Block Ebene: Aus der Anzahl der diesem BSS zugeteilten Frequenzen und den darauf definierten Übertragungskanälen (PDTCH) können die zur Verfügung stehenden Ressourcen für die Übertragung ermittelt werden. Aus Funkempfangsberichten können Informationen über die Funkqualität und somit das zu verwendende Kodierschema für die einzelnen mobilen Endgeräte abgeleitet werden. Zusammen mit den Dienstgüteanforderungen kann die nötige Übertragungsrate für die einzelnen mobilen Endgeräte bestimmt werden. Stehen genügend Übertragungsressourcen bereit, können die Verkehre den einzelnen Übertragungskanälen zugeteilt werden, wobei Wiederübertragungen von fehlerhaften Blöcken berücksichtigt werden müssen. Die verbleibenden Ressourcen werden den Best-Effort Verkehren zugeteilt.

Klasse	P_{max}(Verlust)	P_{max}(Verdopplung)	P_{max}(Reihenfolgefehler)	P_{max}(Fehler)
1	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
2	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}

Tabelle 5.9: Bei GPRS definierte Zuverlässigkeitsklassen mit den dafür festgelegten Obergrenzen der Wahrscheinlichkeiten für PDU-Verlust, PDU-Verdopplung, Reihenfolgefehler und PDU-Übertragungsfehler

Klasse	128 Oktett PDU		1024 Oktett PDU	
	Mittlere Verzögerung	95% Verzögerung	Mittlere Verzögerung	95% Verzögerung
1	< 0,5s	< 1,5s	< 2s	< 7s
2	< 5s	< 25s	< 15s	< 75s
3	< 50s	< 250s	< 75s	< 375s
4	Best-Effort	Best-Effort	Best-Effort	Best-Effort

Tabelle 5.10: Bei GPRS definierte Verzögerungsklassen, 95% Verzögerung gibt dabei den Wert an, unter dem 95% aller PDUs liegen müssen

5.4.4 Umsetzung der Dienstgüteparameter zwischen Funkzugangsnetz und Festnetz

Für Nutzdaten stehen wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben die PHB `Assured Forwarding` und `Best-Effort` zur Verfügung. Innerhalb des PHB `Assured Forwarding` sind vier Klassen mit jeweils drei Verwerfungsstufen definiert. Bei der Funkübertragung sind im All-IP-Mobilfunknetz wie im vorigen Abschnitt beschrieben die Parameter Datenrate und Priorität spezifiziert.

GPRS definiert eine feinere Abstufung der Dienstgüteparameter, insbesondere sind dabei explizite Werte oder Wertebereiche angegeben (Abschnitt 15.2 in [GSM0360c]). Definiert sind

- drei Prioritäten,
- drei Zuverlässigkeitsklassen, siehe Tabelle 5.9,
- vier Verzögerungsklassen, siehe Tabelle 5.10,
- neun Abstufungen des Spitzendurchsatzes zwischen 8 kbit/s und 2048 kbit/s und
- 19 Abstufungen des mittleren Durchsatzes zwischen 0,22bit/s und 111 kbit/s und Best-Effort.

Die Verzögerung bezieht sich auf die Übertragung innerhalb des GPRS-Netzes und schließt die Verzögerung durch das Anfordern eines Funkkanals mit ein. Der Durchsatz ist für die G_i- bzw. R-Schnittstelle definiert, also für die Schnittstellen, an denen IP-Datagramme sichtbar sind.

GPRS		DiffServ		
GPRS-Durchsatz	GPRS-Priorität	DiffServ-PHB	`Assured Forwarding`-Klasse	`Assured Forwarding`-Verwerfungsstufe
19,9 kbit/s[10]	$\mathcal{P} = 4$	`Assured Forwarding`	Klasse 1	Stufe 1
Datenrate $> \mathcal{B}_{\text{Grenz}}$	$\mathcal{P} = 4$	`Assured Forwarding`	Klasse 2	Stufe 1
	$\mathcal{P} = 3$			Stufe 2
	$\mathcal{P} = 2$			Stufe 3
Datenrate $< \mathcal{B}_{\text{Grenz}}$	$\mathcal{P} = 4$	`Assured Forwarding`	Klasse 3	Stufe 1
	$\mathcal{P} = 3$			Stufe 2
	$\mathcal{P} = 2$			Stufe 3
-	$\mathcal{P} = 1$	`Best-Effort`	-	-

Tabelle 5.11: Abbildung der GPRS-Dienstgüteparameter auf die DiffServ-Dienstgüteparameter. Die oberste Zeile gilt für den Sprachverkehr, der hier nicht in verschiedene Qualitätsklassen unterteilt ist

Die Dienstgüteparameter der DiffServ-Architektur werden wie folgt auf die Dienstgüteparameter des GPRS abgebildet: Für die Übertragung der Sprachdaten wird eine Klasse des PHB `Assured Forwarding` reserviert. Da in der DiffServ-Architektur keine absoluten Dienstgüteparameter garantiert werden, kann der Parameter Datenrate des GPRS nicht direkt abgebildet werden. Daher werden die verbleibenden zwei Klassen des PHB `Assured Forwarding` Datenverkehren mit einer Datenratenanforderung kleiner bzw. größer $\mathcal{B}_{\text{Grenz}}$ zugewiesen. Die Wahl des Parameters $\mathcal{B}_{\text{Grenz}}$ kann ja nach Anforderungen und Verkehrsaufkommen gewählt werden. Die drei Prioritätsstufen $\mathcal{P} \in \{2, 3, 4\}$ des GPRS werden auf die drei Verwerfungsstufen des PHB `Assured Forwarding` der DiffServ-Architektur abgebildet. Die Best-Effort Priorität $\mathcal{P} = 1$ wird auf den PHB `Best-Effort` abgebildet. Damit ergibt sich die in Tabelle 5.11 zusammengefasste Abbildung der Dienstgüteparameter.

5.5 Weitere Aspekte

In den folgenden Abschnitten werden weitere Aspekte des All-IP-Mobilfunknetzes behandelt, die für die Funktionalität und Einsatzfähigkeit eines Mobilfunknetzes relevant sind.

[10] Die Sprachpakete mit dem in Abschnitt 5.3.1 genannten Sprachkodierer `melp` benötigen eine Datenrate von 19.9 kbit/s (54 Bit Sprachdaten, 24 Bit `ID`, 40 Oktett RTP/UDP/IP-Header alle 20 ms).

5.5.1 Mobilität

Wechselt ein mobiles Endgerät die Mobilfunkzelle ohne dabei den Zuständigkeitsbereich des aktuellen SGSN zu verlassen, müssen keine Parameter des All-IP-Mobilfunknetzes geändert werden. Wird beim Zellwechsel eine RA-Grenze überschritten, tauschen das mobile Endgerät und das SGSN GPRS-spezifische Informationen aus. Wechselt das mobile Endgerät beim Zellwechsel auch gleichzeitig die Zuständigkeit des SGSN, müssen Parameter des All-IP-Mobilfunknetzes angepasst werden. Die nicht GPRS-spezifischen Knoten des All-IP-Mobilfunknetzes sind von dem Zellwechsel nicht betroffen, da sie an der Mobilitätsverwaltung nicht beteiligt sind und die mobilen Endgeräte ihre IP-Adressen nicht ändern.

Wechselt ein mobiles Endgerät den Zuständigkeitsbereich eines SGSN, initiiert es die `Inter SGSN Routeing Area Update Procedure` oder, falls GSM-Verbindungen betroffen sind, die `Combined RA/LA Inter SGSN Routeing Area Update Procedure` (Abschnitt 6.9.1 in [GSM0360c]). Durch diese Prozedur werden u. a. die bestehenden PDP-Kontexte zwischen dem mobilen Endgerät und den beteiligten GSN der neuen Situation angepasst. So erhält der zuständige GGSN u. a. die Adresse des neuen SGSN, über den das mobile Endgerät erreichbar ist. Für das All-IP-Mobilfunkprotokoll und die Übertragung von Sprach- oder Datenpaketen ändert sich durch den Wechsel zu einem neuen SGSN nichts, da der SGSN für die Übertragung dieser – aus Sicht des GPRS-Protokolls – Nutzdaten nicht sichtbar ist. Wird die Dienstgüte im Haupttrassennetz des All-IP-Mobilfunknetzes durch die DiffServ-Architektur realisiert, müssen nur dann Änderungen durchgeführt werden, wenn die `Classifier` der Zugangsrouter für die Klassifizierung der PDUs auch die Quell- oder Zieladressen, also die Adressen der GSN, verwenden.

Findet der Zell- und SGSN-Wechsel während einer vom mobilen Endgerät aus laufenden Übertragung von PDUs statt, müssen keine weiteren Aktualisierungen durchgeführt werden. Die PDUs werden wie gewohnt zum GGSN und von dort weiter transportiert. Unter Umständen auftretende Reihenfolgevertauschungen der IP-Datagramme müssen von Protokollen höherer Schichten (TCP, RTP, ...) erkannt und verarbeitet werden. Bei einer während des Wechsels laufenden Verbindung zum mobilen Endgerät müssen die im alten SGSN auf die Übertragung wartenden PDUs zum neuen SGSN weitergeleitet werden. Das gleiche gilt für PDUs, die sich mit der Zieladresse des alten SGSN im Haupttrassennetz befinden. Auch dabei müssen nur dann GPRS-spezifische Anpassungen vorgenommen werden, wenn die Klassifizierung der PDUs in den Zugangsroutern bei DiffServ mit auf der SGSN-Adresse beruht.

Besonders zu betrachten ist der Fall, wenn in der neuen Zelle nicht ausreichend Ressourcen für die gewünschte Dienstgüte der Verbindung zur Verfügung stehen. Wird die Dienstgüte im Haupttrassennetz durch die DiffServ-Architektur realisiert, bleibt die Dienstgüte für höherpriore Verkehre im

Wesentlichen erhalten. Dies allerdings auf Kosten niederpriorer Verkehre, die entsprechend reduziert werden. Erfolgt die Zuordnung der Funkkanäle bzw. der zur Verfügung stehenden Frequenzen zu einer Zelle statisch, wird wie im Haupttrassennetz im Wesentlichen die Dienstgüte der niederprioren Verkehre zugunsten der höherprioren Verkehre reduziert. Bei dynamischer Zuordnung der Frequenzen zu einer Zelle können bei nicht ausreichenden Ressourcen im Funkzugangsnetz Frequenzen aus einem Pool freier Frequenzen an die Zelle gebunden werden. Untersuchungen dieser dynamischen Zuordnung von Frequenzen zu Zellen finden sich u. a. bei Znati et al. [ZK00], Andrews et al. [ABD$^+$98], Li et al. [LYWW99], Yeung et al. [YY00] und Casoni et al. [CIM00].

Reichen Ressourcen im Festnetzteil oder bei der Funkübertragung durch neue oder durch Zellwechsel übertragene Verbindungen nicht aus, können je nach Anforderungen des Netzanbieters andere Strategien verfolgt werden. So können z. B. niederpriore Verkehre geschützt werden, wenn neue Verbindungen oder von anderen Zellen kommende Verbindungen abgelehnt bzw. abgebrochen werden.

5.5.2 Entgelterfassung

Die Abrechnung der Nutzung von Diensten des All-IP-Mobilfunknetzes kann entweder für Sprach- und Datendienste getrennt oder gemeinsam erfolgen. Sprachdienste in GSM- oder ISDN-basierten Netzen werden in der Regel über die Dauer und die Distanz der Verbindung abgerechnet. Die Kosten für Gespräche über PSTN wie dem ISDN-basierten Telefonnetz sind meist nach Uhrzeit, Netzbetreiber und Entfernung unterschiedlich. Datendienste werden bei GPRS dagegen anhand der übertragenen Datenmenge abgerechnet (Abschnitt 4 in [GSM0360c]). Die Übertragung von Daten, speziell im Internet, ist nicht entfernungs- oder zonenabhängig, sondern, je nach Anbieter des Internetzugangs, pauschal, uhrzeit- oder datenmengenabhängig[ML97a].

Im GPRS-Standard sind für die Erfassung der Abrechnungsdaten die GSN bzw. die logische Einheit Charging Gateway Functionality (CGF) vorgesehen. Die von den SGSN im CGF abgelegten Abrechnungsdaten umfassen u. a. die Nutzung der Funkübertragung für jedes mobile Endgerät, während die GGSN u. a. die Nutzung der Schnittstelle zu externen Datennetzen erfasst [GSM1215]. Erfassung von Informationen über den Inhalt der Datenpakete oder die Zugehörigkeit der Datenpakete zu bestimmten Verkehrsströmen ist im GPRS-Protokoll nicht vorgesehen. Informationen über den Gegenanschluss können von den GSN im All-IP-Mobilfunknetz nicht ermittelt werden, da die Sprachpakete innerhalb des All-IP-Mobilfunknetzes als Ziel- oder Absendeadresse die Adresse der Netzübergangseinrichtungen haben. Neben der Erfassung von Abrechnungsdaten auf Datenpaketebene können im All-IP-Mobilfunknetz von den Netzübergangseinrichtungen TG und IPTelG Abrechnungsdaten auf Telefonieverbindungsebene in externen Netz erfasst werden. Beispiele dafür sind die Dauer, die Herkunft oder das Ziel der Verbindung.

Obwohl eine Telefonieverbindung im All-IP-Mobilfunknetz nur dann Ressourcen verbraucht, wenn (Sprach-) Daten übertragen werden und das gesamte Netz auf der Übertragung von PDUs basiert, ist die Abrechnung von Telefonieverbindungen über die Dauer der Verbindungen sinnvoll. Zum einen ist dann bekannt, was das Gespräch kosten wird, unabhängig von der Verteilung der Sprach- und Ruhephasen des Sprachverbindung. Dies entspricht dem bekannten Abrechnungsverfahren[11]. Zum anderen kann die Telefonieverbindung, je nach externem Netz und Lage des Gegenanschlusses, verschieden berechnet werden. Dies ist möglich, da die Netzübergangseinrichtungen, die die Gesprächsdaten auf Verbindungsebene erfassen, die Rufnummer im externen Netz kennen. Handelt es sich um eine IP-basierte Telefonieverbindung, kann die Abrechnung je nach Bedarf des Betreibers erfolgen. Die PDU-Daten von den GSN als auch die Verbindungsdaten von der Netzübergangseinrichtungen IPTelG sind verfügbar. Von den Abrechnungsdaten der GSN können diejenigen für die Berechnung der Kosten für Datenverkehr herangezogen werden, die als Ziel- oder Absendeadresse nicht eine der Netzübergangseinrichtungen, sondern einen Knoten in einem externen Netz besitzen. Die Abrechnung von Datenübertragungen und Telefonieverbindungen in IP-basierte externe Netze hängt auch von den Abrechnungsverfahren der externen Netzbetreiber ab (siehe u. a. bei Reichl et al. [RLS99], Stiller et al. [SBGP99], McKnight et al. [ML97a]).

[11] Ohne besondere Maßnahmen fehlt bei der Telefonie über das All-IP-Mobilfunknetz ein Gebührenimpuls oder ein ähnliches Mittel zur Kontrolle der Gesprächs- oder Verbindungskosten.

Kapitel 6 Untersuchung und Parametrisierung

Nach dem Architekturentwurf des All-IP-Mobilfunknetzes folgt in diesem Kapitel die Untersuchung bezüglich der Effizienz des entworfenen Netzes. Dazu wird das All-IP-Mobilfunknetz auf Modelle abgebildet und diese werden simulativ untersucht. Anhand der Ergebnisse werden Systemparameter bestimmt.

6.1 Methodik und Modellbildung

Ein Simulationsmodell ist ein „Modell des Systems, welches der Simulation zugrunde liegt und die wesentlichen Merkmale des Verkehrs, der Systemstruktur, der Ablaufstruktur und der Ablauflogik des Systems nachbildet“ [ITG97]. Die Abbildung der einzelnen Komponenten des Systems auf Modelle führt im Vergleich zum realen System zu einer deutlich geringeren Komplexität. Die Modelle besitzen aber alle wesentlichen Parameter und Charakteristika. Mit diesen Modellen können durch die Simulation Abläufe des realen Systems nachgebildet werden. Die Methodik der zeittreuen Simulation und die für die Untersuchung verwendeten Modelle werden im Folgenden eingeführt.

6.1.1 Methode der Simulation

Bei der zeittreuen, ereignisgesteuerten Simulation werden Abläufe eines realen Systems durch Ereignisse, die eine für die Untersuchung relevante Änderung des Systemzustandes bewirken, nachgebildet. Bei einem Kommunikationsnetz ist dies z. B. die Ankunft einer Meldung in einer Protokollschicht oder der Ablauf einer Zeitüberwachung (engl.: Timer). Die Ereignisse sind mit Zeitstempeln versehen und bilden eine geordnete Liste mit dem Zeitstempel als Maß (Kalender). Das Simulationsprogramm arbeitet diese geordnete Liste ab, wobei Ereignisse Folgeereignisse bewirken können, die wiederum in den Kalender eingetragen werden. Die Zeiträume zwischen Ereignissen können übersprungen werden, da keine für die Untersuchung relevanten Änderungen des Systemzustandes auftreten.

Während der Simulation können bestimmte Kenngrößen erfasst und statistisch ausgewertet werden. Um neben Mittelwerten von Kenngrößen weitere statistische Aussagen wie Vertrauensintervalle bestimmen zu können, wird die Simulation in mehrere Phasen unterteilt. Der Warmlaufphase (Transient Phase), während der sich im simulierten System ein mittlerer Zustand einstellt (Einschwingvorgang), folgen mehrere Teiltests (Batches). Am Ende eines jeden Teiltestes werden Mittelwerte gebildet, aus denen mittels der Student-t-Verteilung [LK91] ein Mittelwert und das Vertrauensintervall berechnet wird. Das Vertrauensintervall als ein Indiz für die Aussagefähigkeit des Mittelwertes ist in dieser Arbeit das Intervall, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% (95% Percentil) der zu erwartende Wert liegt.

Das zeitliche Verhalten der Abläufe im All-IP-Mobilfunknetz ist für die vorliegende Untersuchung relevant und das System lässt sich ausreichend genau anhand diskreter Ereignisse beschreiben. Daher wird für die Untersuchung die zeittreue, ereignisgesteuerte Simulation verwendet. Es wurden drei Modelle entworfen:

- das Modell `SteuerSim`, das den Fluss von Steuermeldungen bei der Funkübertragung untersucht. Weiter können damit Parameter wie die nötige Anzahl an Steuerkanälen für die Funkübertragung bestimmt werden.
- das `DienstgüteSim`-Modell für die Untersuchung der Dienstgütemechanismen des Funkzugangsnetzes bei verschiedenen Auslastungen des Systems.
- das deutlich komplexere Modell `GesamtSim` für die Untersuchung des gesamten All-IP-Mobilfunknetzes und für die detaillierte Beobachtung der Übertragung von Nutzdaten insbesondere an der Luftschnittstelle.

Die drei Simulationsmodelle basieren auf Warteschlangenmodellen. Diese Modelle bestehen aus Verarbeitungseinheiten (engl.: Server), die die Verarbeitung der Meldungen nachbilden. Diesen Einheiten werden Bearbeitungszeiten zugewiesen, die nach statistischen Verteilungen ermittelt werden. Vorgeschaltet sind ihnen Warteschlangen (engl.: Queue), in denen ankommende Meldungen bis zu ihrer Verarbeitung zwischengespeichert werden. Die Meldungen werden nach bestimmten Mustern in Generatoren erzeugt. Senken (engl.: Sink) nehmen am Ende das Warteschlangenmodells die Meldungen auf und generieren statistische Informationen wie z. B. Laufzeiten der Meldungen.

Die Simulationsprogramme wurden nach objektorientierten Gesichtspunkten in C++ entwickelt. Zur Unterstützung wurde die am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung der Universität Stuttgart entwickelte C++-Bibliothek `SimLib`[1] in der Version 2.2 [Koc94], [KL94], [Bod99] verwendet.

[1] Die `Simlib` enthält parametrisierbare Klassen, um ereignisgesteuerte Simulationsmodelle zu erstellen, den Ablauf zu steuern und Simulationsergebnisse zu sammeln.

6.1.2 Verkehrsmodell

Neben der Modellierung des Systems muss auch der Sprach- und Datenverkehr realistisch durch Verkehrsmodelle nachgebildet werden. Die Verkehrscharakteristik hat dabei erheblichen Einfluss auf das Verhalten und die Leistungsfähigkeit des Systems [Che99]. In dieser Arbeit werden drei Arten von Verkehren berücksichtigt:

- Sprachverkehr (Telefonie)
- Datenverkehr: Austausch größerer, blockartiger Datenmengen (FTP-Datenübertragung)
- Datenverkehr: Austausch burstartig auftretender Datenmengen (WWW-Verkehr).

Ein übergreifendes Modell repräsentiert einen Anwender bzw. ein mobiles Endgerät und steuert, wann der Anwender welche Art von Verkehr erzeugt. Abbildung 6.1 zeigt das übergreifende Modell als endlichen Automaten.

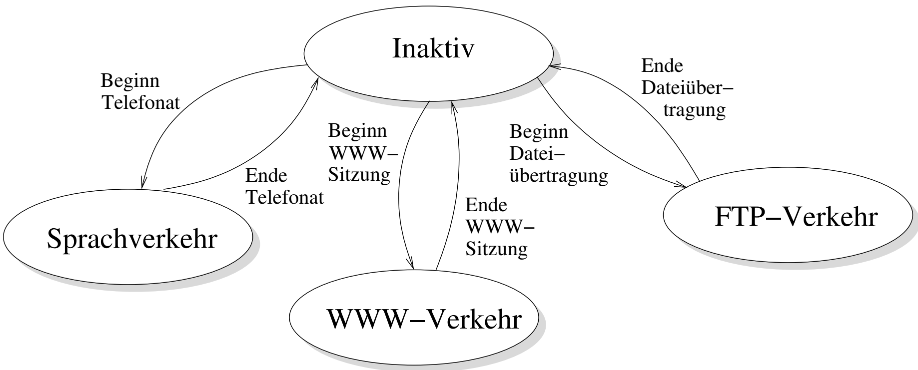


Abbildung 6.1: Übergreifendes Verkehrsmodell eines Endgerätes für die simulative Untersuchung des All-IP-Mobilfunknetzes

Das Verkehrsmodell beschreibt die zeitliche Charakteristik der Generierung von IP-Datagrammen, die dem Systemmodell als Eingabe dienen. Für die Parameter der Teilmodelle wurden realistische, meist durch Messungen ermittelte Werte verwendet. Lediglich im übergreifenden Verkehrsmodell wurde die Dauer der inaktiven Phase deutlich verkürzt. Dies war notwendig, um den Multiplex-Effekt beobachten zu können, ohne die Simulationszeit und den Speicherbedarf der Simulation übermäßig ansteigen zu lassen. Ein verkehrserzeugender Generator der Simulation repräsentiert somit näherungsweise das aggregierte Verhalten mehrerer mobiler Endgeräte. Die Dauer der inaktiven Phase wird als negativ-exponentiell verteilt mit dem Mittelwert $\mu = 300$ Sekunden angenommen.

Phase	Parameter in Sekunden	Verteilungsfunktion
Sprachverkehr	$\mu = 120$ [2]	Negativ-Exponentiell
WWW-Verkehr	$\mu = 25,8\,,\ \sigma = 78,7$	Lognormal
Inaktive Phase	$\mu = 300$	Negativ-Exponentiell

Tabelle 6.1: Verteilungen und Parameter der Verteilungen für das übergreifende Verkehrsmodell

Phase	Mittelwert μ	Verteilungsfunktion
Sprachphase	1,11 Sekunden	Negativ-Exponentiell
Ruhephase	2,4 Sekunden	verschoben Negativ-Exponentiell

Tabelle 6.2: Parameter des Sprachmodells [LU86]

Tabelle 6.1 zeigt die Verteilungen und Parameter der Verteilungen, die die Dauern der aktiven und inaktiven Phasen angeben.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilmodelle des Verkehrsmodells vorgestellt.

6.1.2.1 Verkehrsmodell für Sprache

Das Modell unterscheidet während des Gesprächs zwischen Sprachphasen (engl.: Talkspurt) und Ruhephasen (engl.: Silence). Für jeden der Gesprächspartner wird getrennt eine Folge dieser Sprach- und Ruhephasen durch Zufallsgeneratoren ermittelt (Talkspurt-Silence-Modell). K. Sauer [Sau90] schlägt in seiner Arbeit ein komplexeres Modell vor, das die Abhängigkeiten der beiden Sprecher bezüglich der Sprach- und Ruhephasen berücksichtigt. Da für die Untersuchung der Funkübertragung lediglich das Verhältnis der Sprach- und Ruhephasen relevant ist, wird hier diese Abhängigkeit zugunsten eines einfacheren Modells nicht berücksichtigt. Auch für die Untersuchung des Festnetzteils kann diese Abhängigkeit vernachlässigt werden, da hier sehr viele Verkehrsströme zusammentreffen und durch das statistische Multiplexen die Abhängigkeiten nicht mehr relevant sind.

Die Parameter des Sprachmodells sind die mittleren Längen für die Sprach- und Ruhephasen sowie deren Verteilungsfunktion. Die verwendeten Parameter sind Untersuchungen von Lee und Un [LU86] entnommen. Dabei werden Ruhephasen, die kürzer als 200 ms sind, nicht berücksichtigt. Für die Erkennung von Ruhephasen wird vereinfachend das Fill-in-Verfahren verwendet (vgl. Abschnitt 5.3.3.3). Damit ergeben sich die in Tabelle 6.2 genannten Parameter für das Sprachmodell. Erzeugt wird in Sprachphasen alle 20 ms ein 11 Oktett großes IP-Datagramm (siehe Abschnitt 5.3.3).

[2] Der Mittelwert der Gesprächsdauer stammt aus Messungen von Netzbetreibern an realen Systemen.

6.1.2.2 Verkehrsmodell für World Wide Web (WWW)

In diesem Modell arbeitet das mobile Endgerät als Browser, nicht als WWW-Server. Der Verkehr ist somit durch kleine IP-Datagramme vom mobilen Endgerät (Anforderung einer Seite) und mehrere größere Datenpakete (WWW-Seite, ggf. bestehend aus mehreren Teilen) zum mobilen Endgerät charakterisiert. Nicht berücksichtigt werden hier die Steuermeldungen für den Auf- und Abbau von TCP-Verbindungen.

Für die Modellierung von WWW-Verkehr wird ein dreistufiges Modell verwendet [RLGPC$^+$99]:

Sitzungsstufe (engl.: Session Level): Beschreibt das Verhalten bezüglich des Öffnens und Schließens des Browsers. Damit wird abgebildet wie lange ein Anwender den Dienst nutzt und wieviel Zeit zwischen den Nutzungen liegt.

Seitenstufe (engl.: Page Level): Beschreibt wie oft und in welchem zeitlichen Abstand ein Anwender innerhalb einer Sitzung eine neue Seite anfordert.

Paketstufe (engl.: Packet Level): Beschreibt die Größe, die Anzahl und den Ankunftsabstand von IP-Datagrammen, die für eine Seite übertragen werden.

Die Wahl fiel auf dieses Modell, da es, im Gegensatz zu z. B. fraktalen Modellen, über wenige Parameter an die jeweiligen zu untersuchenden Bedingungen angepasst werden kann. Diese Parameter sind in Tabelle 6.3 aufgelistet und wurden von Reyes-Lecuona et al. [RLGPC$^+$99] aus Messungen an realen Systemen gewonnen.

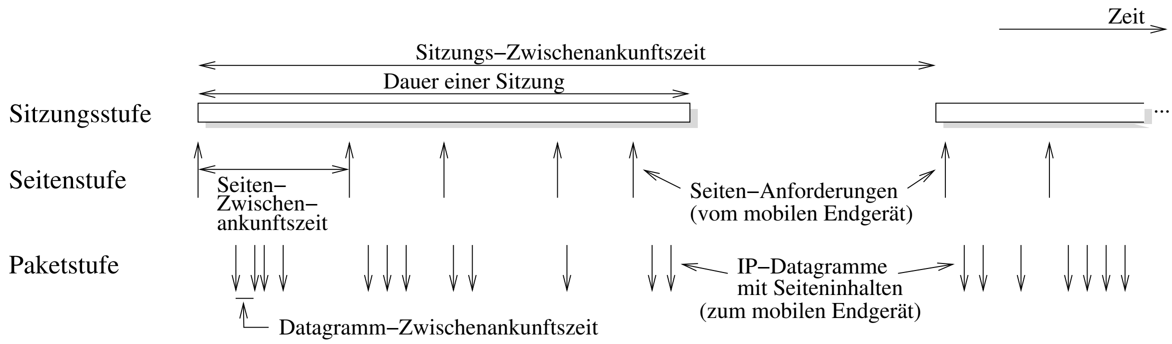


Abbildung 6.2: Dreistufiges Verkehrsmodell für WWW-Verkehr

Stufe	Parameter	Parameter	Verteilungsfunktion
Sitzung	Sitzungs-Zwischenankunftszeit	-	-[3]
	Seiten pro Sitzung	$\mu = 25,8$ $\sigma = 78,7$	Lognormal
Seiten	Seiten-Zwischen-ankunftszeit (Sek.)	$\alpha = 35,3$ $\beta = 147,4$	Gamma
	Seitengröße (Oktett)	$\alpha = 1,7$ $\beta = 30458$	Pareto
Paket	Datagramm-Zwischen-ankunftszeit (Sek.)	$\mu = 0,73$	Negativ-Exponentiell
	Datagrammgröße zum mobilen Endgerät[4]	560 Oktett: 30% 1500 Oktett: 70%	Multimodal
	Datagrammgröße vom mobilen Endgerät	40-45 Oktett	Gleich

Tabelle 6.3: Parameter der drei Stufen des WWW-Modells [RLGPC+99]

6.1.2.3 Verkehrsmodell für FTP

Bei der FTP-Datenübertragung werden größere Datenpakete in jeweils nur einer Richtung übertragen. Dabei werden hier weder die Steuermeldungen der FTP- noch der TCP-Verbindung berücksichtigt.

Im Verkehrsmodell für FTP wird ein IP-Datagramm generiert, dessen Größe Lognormal mit dem Mittelwert $\mu = 1500$ (in Oktett) und der Standardabweichung $\sigma = 200$ verteilt ist.

6.1.3 Modellierung des Funkkanals

Ein weiteres Modell beschreibt die Veränderungen der Übertragungscharakteristik bei der Bewegung eines mobilen Endgerätes durch eine Mobilfunkzelle. Das Modell ist in drei Teilmodelle unterteilt (siehe Abbildung 6.3):

Bewegungsmodell: Bestimmt zu jedem Zeitpunkt den Abstand des mobilen Endgerätes zum Sender des Nutzsignals und zu den Sendern der Störsignale bezüglich der betrachteten Verbindung.

[3] Die Mittelwerte sind sehr stark umgebungsabhängig und typischerweise um Größenordnungen größer als die anderen Werte der Tabelle. In dieser Untersuchung entspricht die aktive Verkehrsphase des übergreifenden Verkehrsmodells der Sitzungsdauer.

[4] 40-45 Oktett große IP-Datagramme sind typischerweise WWW-Anfragen oder Bestätigungspakete (engl.: Acknowledgements). Da in der Untersuchung der WWW-Verkehr nur in eine Richtung verläuft, fließen die Anfragen und Bestätigungen in der Richtung vom mobilen Endgerät. Die IP-Datagramme mit den WWW-Seiten (PDU-Größen 560 Oktett bzw. 1500 Oktett) fließen in der Richtung zum mobilen Endgerät [Kus98]. Hier weicht das Modell vereinfachend von dem von Reyes-Lecuona et al. [RLGPC+99] beschriebenen Modell ab.

Ausbreitungsmodell: Beschreibt die Ausbreitung der Funkwellen. Als variabler Eingangsparameter erhält es den Aufenthaltsort des mobilen Endgerätes relativ zu den Sendern und bestimmt damit den C/I-Wert. Dabei werden Ausbreitungsverluste durch die Entfernung und Abschattungen (Slow-Fading-Effekte) berücksichtigt, nicht jedoch die Fast-Fading-Effekte, die durch Mehrwegeausbreitung entstehen.

Fehlermodell: Beschreibt die PDU-Fehlerrate eines sich bewegenden mobilen Endgerätes.

Die drei Teilmodelle werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

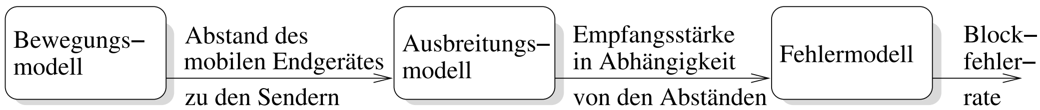


Abbildung 6.3: Modell für die Untersuchung des Funkkanals eines Mobilfunknetzes

In der Literatur werden zur Beschreibung eines Funkkanals oft das Gilbert-Elliot Modell [EW99] [LB99] oder daraus abgeleitete Modelle [ZK99] verwendet. Diese Modelle beschreiben über ein Markoff-Modell mit zwei Zuständen 'Gut' und 'Schlecht' oder eine erweiterte Markoff-Kette mit mehreren Zuständen das Bitfehlerverhalten eines Funkkanals. Damit lässt sich insbesondere die burstartige Verteilung von Übertragungsfehlern beschreiben. Dieses Modell kommt hier nicht zur Verwendung, da die Häufung der Bitfehler innerhalb eines Übertragungsblocks bereits im Fehlermodell berücksichtigt wird. Die Büschelförmigkeit von Übertragungsfehlern auf Blockebene tritt bei GSM/GPRS wegen des langsamen Frequenzsprungverfahrens nicht oder nur sehr begrenzt auf [Lap94].

6.1.3.1 Bewegungsmodell

Für die geografische Beschreibung einer Funkzelle wird ein regelmäßiges Sechseck verwendet (siehe Abschnitt 3.2). Die Clustergröße von drei führt zu einer dichten Verteilung von Sendern derselben Frequenz und somit zu einer starken Störung des Hauptsenders durch benachbarte Sender. Abbildung 6.4 zeigt das in dieser Arbeit verwendete Modell des Mobilfunknetzes. In der Mitte befindet sich, dunkelgrau unterlegt, die Zelle, die im Weiteren genauer betrachtet wird. Die sechs außenliegenden, hellgrau unterlegten Zellen sind solche, deren Sender auf derselben Frequenz senden wie der Sender der mittleren Zelle. Im Modell wird nur eine Frequenz betrachtet, d. h. Beeinflussungen durch Sender in Nachbarzellen mit anderen Frequenzen werden nicht betrachtet. Der Sender steht bei allen Zellen im jeweiligen Mittelpunkt der Zellen und strahlt mit derselben Leistung in alle Richtungen gleichermaßen ab (isotrope Sender). Betrachtet man nur die Ausbreitungscharakteristik von

Funkwellen, d. h. den relativen Verlust an Sendeleistung zwischen Sender und Empfänger, muss nur eine Richtung betrachtet werden, da das Verhalten der Wellen symmetrisch ist. In dieser Arbeit wird im Weiteren die feststehende Antenne als Sender, das mobile Endgerät als Empfänger betrachtet.

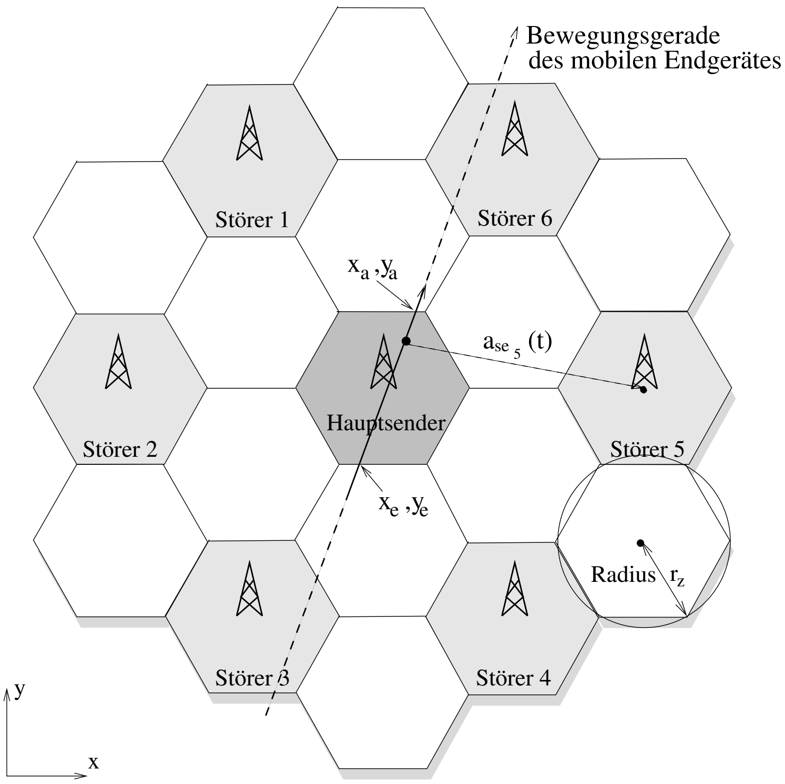


Abbildung 6.4: Modell des Mobilfunknetzes

Für das mobile Endgerät wird eine gleichförmige Geschwindigkeit auf einer geraden Linie durch die betrachtete Zelle angenommen, wobei die Bewegungsrichtung von links unten nach rechts oben verläuft. Der Winkel und die horizontale Lage der Bewegung sind variabel. Mittels der die Bewegung beschreibenden Geradengleichung 6.1

$$y_m(x) = mx_m + c \qquad \text{mit } m \text{ Steigung der Geraden} \qquad (6.1)$$
$$c \text{ Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse}$$

und dem Radius r_z des Kreises, der näherungsweise das Sechseck der Zelle beschreibt, können der Eintrittspunkt x_e, y_e des mobilen Endgerätes in die Zelle, bzw. der Austrittspunkt x_a, y_a aus der Zelle berechnet werden. Dem Modell der Funkzellen wird dabei ein zweidimensionales, kartesisches Koordinatensystem zugrunde gelegt, d. h. es werden keine Höheninformationen berücksichtigt. Bewegt sich das mobile Endgerät mit der Geschwindigkeit v_m, lässt sich die aktuelle Position des mobilen Endgerätes $x_m(t), y_m(t)$ und der Abstand $a_{se_i}(t)$ zwischen dem mobilen Endgerät und den einzelnen Sendern i in Abhängigkeit von der Zeit t bestimmen.

6.1.3.2 Ausbreitungsmodell

Ausbreitungsverluste, die durch die räumliche Trennung zwischen Sender und Empfänger entstehen, reduzieren die abgestrahlte Sendeleistung. Weiter verhindern oder beeinträchtigen Objekte, die zwischen Sender und Empfänger stehen wie Häuser oder Bodenerhebungen, dass die Funkwellen den Empfänger direkt erreichen. Diese Abschattung von Funkwellen ist, im Gegensatz zu den Verlusten durch Ausbreitung, stark abhängig von der Beschaffenheit und Bebauung des betrachteten Gebietes. Eine Übersicht über verschiedene Modelle bietet Neskovic et al. [NNP00] und Fleury et al. [FL96].

Relativ exakte Verfahren, die z. B. auf Ray-Tracing-Techniken beruhen ([KGW+99], Kapitel 4 in [COS]), benötigen als Eingabeparameter die genaue Lage, Form, Größe und Beschaffenheit aller für die Funkausbreitung relevanter Objekte.

Bei allgemeineren Modellen wird, abhängig von einer allgemeinen Beschaffenheit der Umgebung wie 'städtisches Gebiet' oder 'freie Landschaft', ein mittlerer Verlust der Sendeleistung berechnet. Die Schwankung der im Modell angenommenen Verluste durch Abschattung kann mittels einer logarithmischen Normalverteilung um diesen mittleren Wert nachgebildet werden [TWN01], [TSM97].

Um den mittleren Verlust der Sendeleistung zu berechnen, werden in der Literatur zwei Modelle vorgeschlagen (Abschnitt 4.4 in [COS], [GSM0330]). Dies ist ein auf dem Hata-Modell [Hat80] basierendes Modell (COST231-Hata-Model) und ein auf Arbeiten von Walfisch und Ikegami [WB88], [IYU84] basierendes Modell (COST231-Walfisch-Ikegami-Model). Letzteres benötigt als Parameter mittlere Werte für die Höhe von Gebäuden, Straßenbreite, Straßenausrichtung und Abstand von Gebäuden. Da diese Angaben im allgemeinen Fall fehlen, wird in dieser Arbeit das COST231-Hata-Model verwendet [TSM97]. Als Parameter fließen die Frequenz f, der Abstand zwischen Sender i und Empfänger $a_{se_i}(t)$, die Höhe der Sendeantenne h_s und die Höhe der Empfangsantenne h_e ein. Für Frequenzen unter 1 GHz gelten für den Übertragungsverlust L_l die bei Hata [Hat80] entnommenen Formeln 6.2 bis 6.3, für höhere Frequenzen die aus dem COST 231 Final Report [COS] übernommene Formel 6.4. Alle Formeln sind aus Messungen in realen Umgebungen abgeleitet [OOKF68]. Angenommen werden dabei isotrophe Antennen und ein nahezu ebenes Gelände. Der Übertragungsverlust L_{l_i} bzw. L_{lo_i} wird in der Einheit dB berechnet und bezeichnet den Verlust durch die Ausbreitung von Funkwellen.

Für städtisches Gebiet gilt:

$$L_{l_i} = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_s - b(h_e) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_s) \log_{10} a_{se_i} \tag{6.2}$$

mit $b(h_e)$ für große Städte

$$b(h_e) = 3,2(\log_{10} 11,75 h_e)^2 - 4,97$$

Für offenes Gelände gilt:

$$L_{lo_i} = L_{l_i} - 4,78(\log_{10} f)^2 + 18,33 \log_{10} f - 40,94 \tag{6.3}$$

mit f in MHz, 400 MHz $\leq f \leq$ 1500 Mhz
h_s in m, 30 m $\leq h_s \leq$ 200 m
h_e in m, 1 m $\leq h_e \leq$ 10 m
a_{se_i} in km, 1 km $\leq a_{se_i} \leq$ 20 km, $i \in \{\text{Alle Sender}\}$

Für Frequenzen zwischen 1,5 GHz und 2 GHz gilt die im COST 231 Final Report [COS] angegebene Formel:

$$L_{l_i} = 46,3 + 33,9 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_s - b(h_e) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_s) \log_{10} a_{se_i} + C_m \tag{6.4}$$

mit C_m = 3 dB für große Städte und C_m = 0 dB sonst.

Die logarithmische Normal-Verteilung, die die Schwankungen des Übertragungsverlustes nachbildet, besitzt die Verteilungsdichte-Funktion (VDF):

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp \frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \tag{6.5}$$

mit μ dem Mittelwert und σ der Standardabweichung. Im vorliegenden Fall wird durch die logarithmische Normalverteilung der zusätzliche Übertragungsverlust durch Abschattung bezogen auf den mittleren Übertragungsverlust ausgedrückt. Daher setzt man den Mittelwert der logarithmischen Normalverteilung auf 0 dB [PL95]. Damit ergibt sich:

$$L_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp \frac{(\ln t)^2}{2\sigma^2} \tag{6.6}$$

6.1.3.3 Fehlermodell

Aus dem Bewegungsmodell und dem Ausbreitungsmodell kann der mittlere Übertragungsverlust zwischen einem Sender und einem Empfänger abgeleitet werden. Zusätzlich zu diesem Übertragungsverlust müssen für eine realistische Betrachtung noch Verluste durch Mehrwegausbreitung, Dopplerverschiebung u. a. berücksichtigt werden. Damit kann das Verhältnis C/I angegeben werden. Mit Kenntnis der Modulationsart, der Kodierschemata und der eingesetzten Fehlerkorrekturverfahren kann weiter die mittlere PDU-Fehlerrate bestimmt werden. Diese Bestimmung wird wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben für die vorliegende Arbeit aus Veröffentlichungen und Untersuchungen von Mobilfunkgeräte-Herstellern abgeleitet. Um die in Abbildung 5.5 gezeigte resultierende Kurve besser handhaben zu können, wird sie im Modell durch Geraden angenähert.

6.1.3.4 Parametrisierung der Teilmodelle

Für die Untersuchung werden die Geländeformationen einer größeren Stadt (Zellradius r_z = 5 km) und des freien Geländes (Zellradius r_z = 15 km) betrachtet. Die Koordinaten des Hauptsenders werden als (50,50) mit der Einheit km angenommen. Für die Bewegungsgleichung (Gleichung 6.1) des mobilen Endgerätes werden die Werte m = 2 und c = -52 angenommen (siehe Abbildung 6.4). Für einen Zellradius von 5 km ergibt sich eine Strecke von 9,8 km innerhalb der Zelle. Dies entspricht bei einer angenommenen Geschwindigkeit des mobilen Endgerätes von 50 km/h einer Aufenthaltsdauer in der Zelle von 11,8 Minuten. Bei einem Zellradius von 15 km und einer Geschwindigkeit des mobilen Endgerätes von 100 km/h ergibt sich eine Strecke von 29,9 km innerhalb der Zelle und eine Aufenthaltsdauer von 18 Minuten.

Als Frequenz wird 900 MHz (GSM) angenommen, wobei für die vorliegende Untersuchung die Frequenz in gewissen Grenzen keinen Einfluss hat. Dies deshalb, da die Frequenz für alle Sender (Hauptsender und Störsender) gleich ist und die Frequenz zwar die absolute Empfangsleistung beeinflusst (SNR-Wert), aber nicht oder nur gering das Verhältnis C/I. Für die Höhe der Sendeantenne werden 30 m, was etwa der Höhe eines Hausdaches entspricht, und für die Höhe der Empfangsantenne 2 m angesetzt.

In der Literatur wird bei der logarithmischen Normal-Verteilung für σ ein Wert von 6 dB angegeben [ONS95], [TWN01]. Calhoun (Seite 211ff in [Cal88]) gibt als maximalen Verlust durch Abschattung einen Wert von 20 dB an, was auch im Modell dieser Arbeit als maximaler Verlust verwendet wird. Die Verluste durch Abschattungen ändern sich nur relativ langsam. Dies kommt daher, dass störende Objekte wie Häuser typischerweise deutlich größer als der vom mobilen Endgerät während einer PDU-Übertragung zurückgelegte Weg sind. Daher wird nur nach jedem 100sten Burst, also umgerechnet alle 0,5 Sekunden, ein neuer Wert über eine entsprechende Zufallsverteilung bestimmt [TSM97].

6.1.4 Simulationsmodell

Die drei Simulationsmodelle `SteuerSim`, `DienstgüteSim` und `GesamtSim` werden im Folgenden näher beschrieben.

6.1.4.1 Simulationsmodell `SteuerSim`

Das Modell `SteuerSim` bildet die Funkübertragung von Signalisiermeldungen vom mobilen Endgerät zum BSS nach. Da die Anforderung eines Übertragungskanals in dieser Richtung komplexer ist als in der Gegenrichtung, wird im Modell insbesondere diese Übertragungsrichtung betrachtet. Das Verkehrsmodell initiiert dabei Meldungen, die eine Übertragung an der Luftschnittstelle vom mobilen Endgerät aus initiieren. Das Modell des mobilen Endgerätes erzeugt daraus, je nach Klasse des Verkehrsstroms, eine Folge von Signalisiermeldungen, die übertragen werden. Die Klasse des Verkehrsstroms legt dabei fest, ob es sich um eine gesicherte, verbindungsorientierte Übertragung (FTP- und WWW-Verkehr) oder um eine ungesicherte Übertragung (Sprachübertragung) handelt. Für Letztere muss auf höheren Schichten keine Verbindung aufgebaut werden. Die RLC/MAC-Schicht baut dagegen immer eine Verbindung (TBF) auf, je nach Verkehrsklasse in einem einstufigen (FTP- und WWW-Verkehr) oder zweistufigen (Sprachverkehr) Verfahren.

Um diese Verbindungsaufbaumechanismen auf verschiedenen Schichten nachbilden zu können, wurde vereinfacht auch die Übertragungsrichtung zum mobilen Endgerät nachgebildet. Um das Modell überschaubar zu halten, wurden Bestätigungsmeldungen (engl.: Acknowledgements) nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Signalisiermeldungen korrekt übertragen werden. Fehler bei der Funkübertragung fließen nur insoweit ein, als dass die angenommene Zeit, die die Nutzdaten zur Übertragung benötigen, Fehler berücksichtigt. Die Größe der IP-Datagramme ist derart gewählt, dass weder auf der SNDCP-Schicht noch auf der LLC-Schicht segmentiert werden muss.

Abbildung 6.5 zeigt das Warteschlangenmodell der `SteuerSim`. Dabei lassen sich zunächst vier Gruppen – Verkehrsquellen, mobiles Endgerät, Funkkanal und BSS – unterscheiden. Das mobile Endgerät ist weiter unterteilt in die Übertragungsrichtungen vom und zum mobilen Endgerät und in Verarbeitungseinheiten (engl.: Server), die die einzelnen Protokollschichten widerspiegeln. Durch die gestrichelten Linien werden getriggerte Protokollereignisse zur Erzeugung von Meldungen angezeigt.

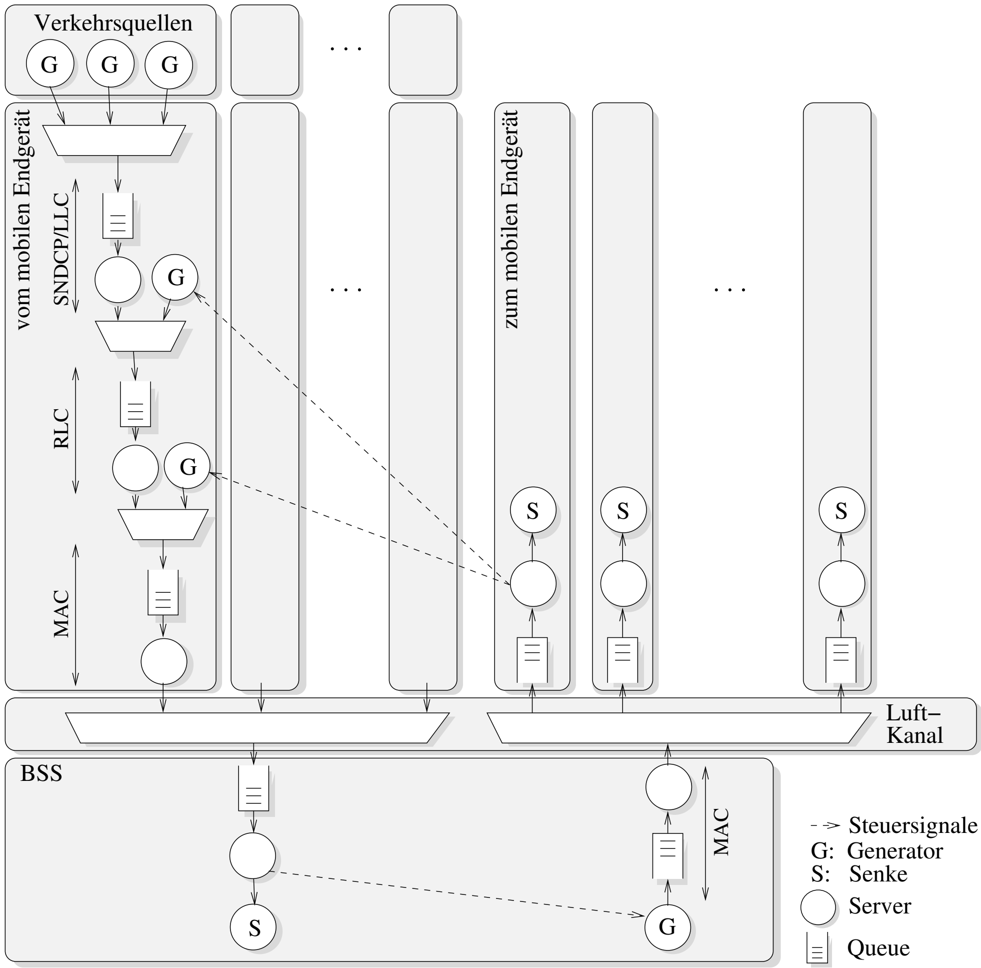


Abbildung 6.5: Simulationsmodell `SteuerSim`

Welche Meldungen im Modell in den einzelnen Protokollschichten anfallen, zeigt Abbildung 6.6. Erfasst werden beim Simulationslauf die in Tabelle 6.4 genannten Parameter.

6.1.4.2 Simulationsmodell `DienstgüteSim`

Dieses Simulationsmodell dient der Untersuchung der in Abschnitt 5.4.3.2 beschriebenen Mechanismen zur Dienstgüteunterstützung im Funkzugangsnetz des All-IP-Mobilfunknetzes. Dabei wird die Flusssteuerung und die Verteilung von Funkressourcen in der MAC-Schicht nachgebildet. Abbildung 6.7 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells.

Jedes mobile Endgerät erzeugt einen oder mehrere Verkehrsströme unterschiedlicher Priorität. Deren PDUs werden von der Flusssteuerung in den entsprechenden Puffern zwischengespeichert. Entsprechend der für jedes mobile Endgerät eingestellten Rate werden die PDUs aus den Puffern entnommen und in die für jede Prioritätsklasse vorgesehenen Puffer der MAC-Ressourcenzuteilung

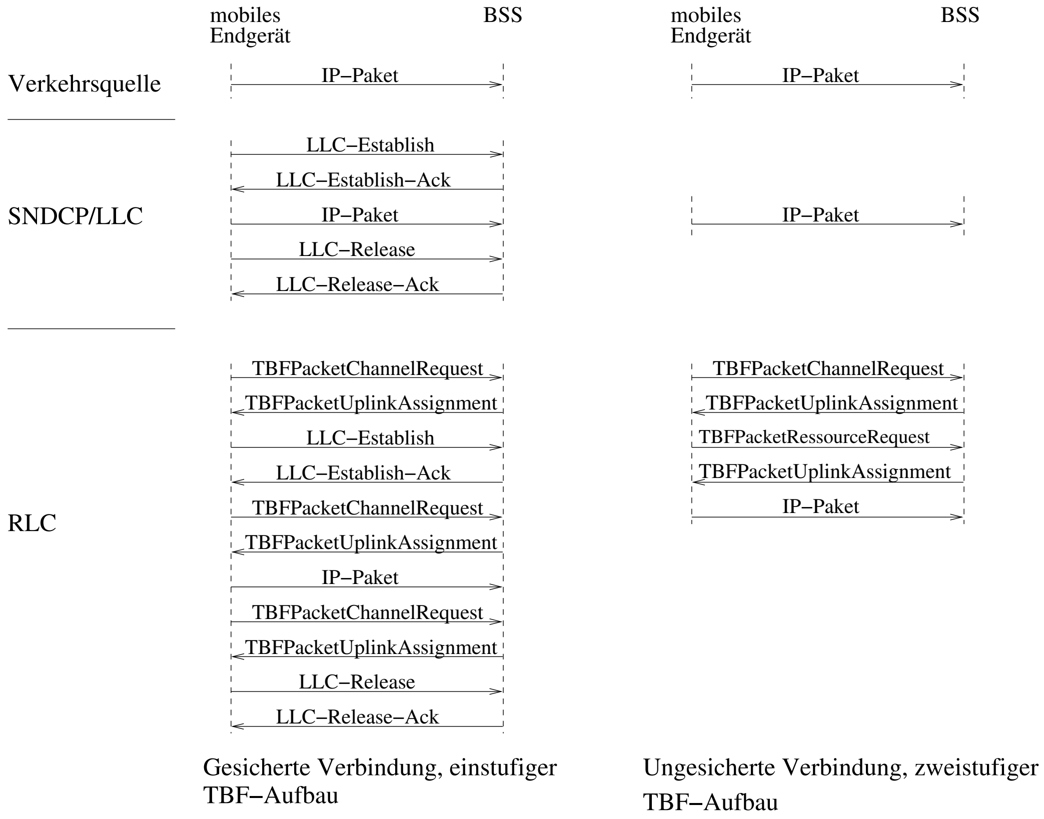


Abbildung 6.6: Meldungsfluss im Simulationsmodell `SteuerSim`

Messgröße	Bedeutung
Anteil Ruhephase	Wieviel Prozent der Sprachübertragung sind Ruhephasen und damit für andere Verkehre nutzbar. Dabei wird der Overhead durch die TBF fester Länge (Parameter `AIMF_TBF_LÄNGE`) mit berücksichtigt.
WWW-Verzögerung	Zeit, bis ein dem WWW-Verkehr zugeordnetes IP-Datagramm das BSS erreicht.
FTP-Verzögerung	Zeit, bis ein dem FTP-Verkehr zugeordnetes IP-Datagramm das BSS erreicht.
Sprachverzögerung	Zeit, bis ein dem Sprachverkehr zugeordnetes IP-Datagramm das BSS erreicht.
Häufigkeit von Kollisionen	Anteil der TBF-Anforderungen, die auf dem PRACH zu Kollisionen führen.
Anzahl Nutzkanäle	Wieviel Nutzkanäle der Funkübertragung mindestens gebraucht werden, um den Verkehr ohne Zwischenspeicherung übertragen zu können.
Anzahl Nutzkanäle ohne Ruhephase	Wieviel Nutzkanäle der Funkübertragung mindestens benötigt werden, um den Verkehr ohne Verluste oder Verzögerungen übertragen zu können, wenn die Ruhephase der Sprachübertragung nicht genutzt werden.

Tabelle 6.4: Im Simulationslauf des Simulationsmodells `SteuerSim` erfassbare Kenngrößen

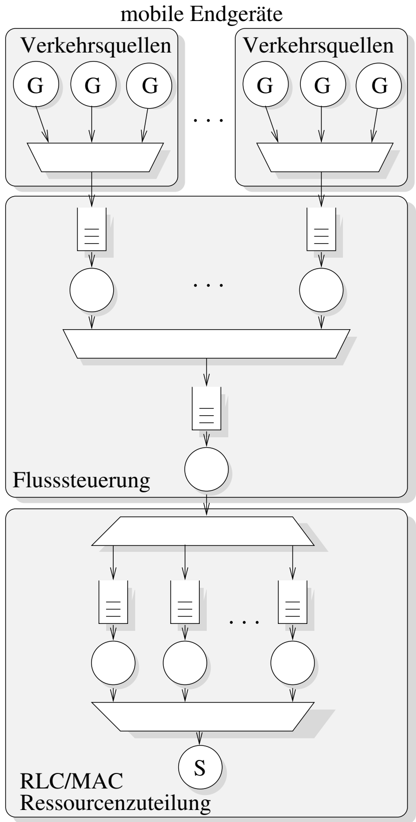


Abbildung 6.7: Simulationsmodell `DienstgüteSim`

eingeschrieben. Je nach der für jede Prioritätsklasse eingestellten Rate werden die PDUs im Modell zusammengefasst an die Senke übergeben. Diese ermittelt dann die Durchlaufzeiten der PDUs.

6.1.4.3 Simulationsmodell `GesamtSim`

Im Simulationsmodell `GesamtSim` ist neben Steuer- und Signalisiermeldungen die Übertragung von Nutzdaten vom und zum mobilen Endgerät modelliert. Dabei wird nicht nur die Funkübertragung, sondern das gesamte All-IP-Mobilfunknetz berücksichtigt. Auch das Auftreten von Übertragungsfehlern der Funkübertragung von Nutzdaten ist nachgebildet. Dabei werden bei der gesicherten Übertragung fehlerhafte PDUs erneut übertragen. Lediglich die Signalisiermeldungen werden weiterhin als fehlerfrei übertragen angenommen, um die Komplexität der Simulation nicht weiter zu erhöhen. Weiter wird davon ausgegangen, dass es bei der Anforderung von TBFs auf dem PRACH nicht zu Kollisionen kommt. Dies gilt annähernd bei ausreichender Dimensionierung der Anzahl der Steuerkanäle. Untersuchungen mit Berücksichtigung von Kollisionen finden sich in Abschnitt 6.2.2.3. Als Modell der Funkübertragung wird das in Abschnitt 6.1.3 beschriebene Modell verwendet. Dabei bewegen sich die einzelnen mobilen Endgeräte ständig und durchlaufen so verschiedene Qualitäten der Funkübertragung.

Verschiedenen Verkehrsarten können unterschiedliche Prioritäten zugewiesen werden. Damit kann das Zusammenspiel von Dienstgütemechanismen untersucht werden. Des Weiteren können Verkehrsklassen bei der Funkübertragung mehr als ein Funkkanal zugewiesen werden (Kanalbündelung), um einen höheren Durchsatz zu erreichen. Parameter, die durch das GPRS-Protokoll festgelegt sind, wie z. B. die Größe des RLC/MAC-Fensters, können einfach verändert werden. So können die Auswirkungen auf das Netz beobachtet werden.

6.2 Untersuchung von Teilkomponenten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung des vorgeschlagenen Sprachkodierers, der Effizienz der Funkübertragung und die Wirksamkeit der Dienstgütesteuerung diskutiert.

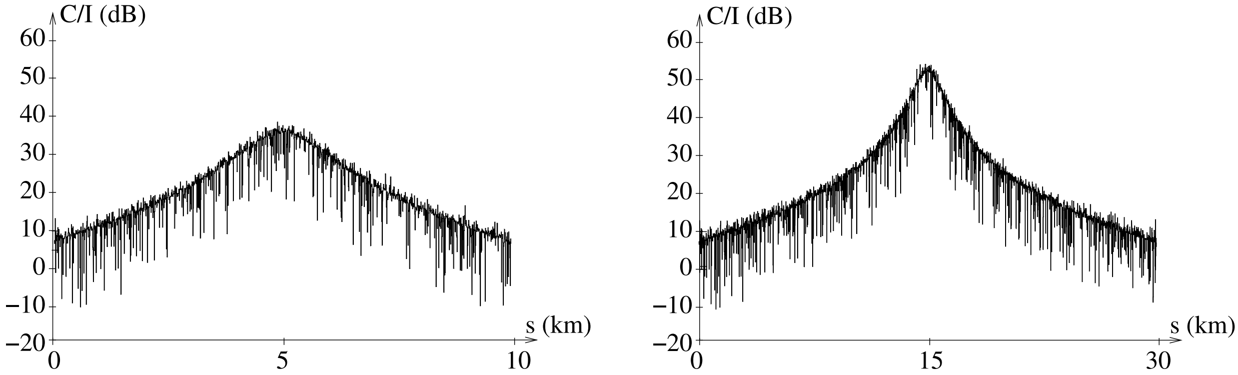
6.2.1 Vergleichende Bewertung des Sprachkodierers

Anhand des Funkkanalmodells wird der Sprachkodierer `melp` mit dem heute in GSM verbreiteten Sprachkodierer `gsm_fr` als Referenz verglichen [Teca], [GSM0610]. Der Sprachkodierer `gsm_fr` kommt aufgrund der hohen erforderlichen Datenrate von 13 kbit/s nicht für das All-IP-Mobilfunknetz in Frage.

Abbildung 6.8 zeigt die C/I-Verhältnisse eines sich durch eine Mobilfunkzelle (Radius 5 km bzw. 15 km) bewegenden mobilen Endgerätes. Sie basieren auf dem in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen Modell des Funkkanals. Deutlich erkennbar ist der starke Abfall des C/I-Wertes am Rand der Zelle. Der Grund ist die Entfernung von dem in der Zellenmitte stehenden Sender und die damit verbundenen Übertragungsverluste. Nicht berücksichtigt wird dabei, dass unter Umständen am Zellrand der Sender einer Nachbarzelle eine bessere Empfangsqualität liefern kann. Das mobile Endgerät könnte dann bereits vor dem virtuellen, nur im Modell eindeutig vorhandenen Zellrand auf einen anderen Sender wechseln. Das C/I-Verhältnis ist im Zentrum der Zelle mit Radius 15 km deutlich höher als im Zentrum der Zelle mit Radius 5 km. Der Grund ist, dass sich das mobile Endgerät dort relativ zum Zellradius und somit relativ zu den Störsendern näher am eigentlichen Sender befindet[5].

Aus den in Abbildung 6.8 gezeigten Kurven und dem Fehlermodell lässt sich die in Abbildung 6.9 gezeigte PDU-Fehlerrate bestimmen. Dabei werden die für Sprachübertragung bestimmten Grenzen der Kodierschemata verwendet.

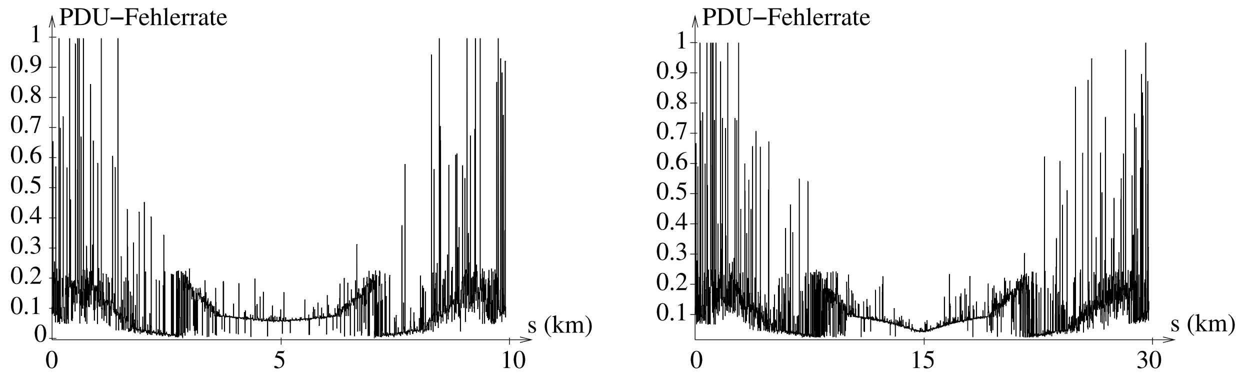
[5] Die Bewegungsgerade des mobilen Endgerätes ist für die beiden betrachteten Zellen dieselbe.



(a) Zellradius 5 km

(b) Zellradius 15 km

Abbildung 6.8: C/I in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke s bei der Bewegung durch die Mobilfunkzelle



(a) Zellradius 5 km

(b) Zellradius 15 km

Abbildung 6.9: PDU-Fehlerrate in Abhängigkeit von der durchfahrenen Strecke s mit für Sprachübertragung optimierten Grenzen der Kodierschemata

Die deutlich sichtbaren Sprünge in der PDU-Fehlerrate insbesondere bei den Streckenpunkten 2,7 km und 7,3 km (bzw. 8 km und 22 km) sind durch den Wechsel des Kodierschemas begründet. Die PDU-Fehlerrate bleibt häufig unter der gewünschten maximalen PDU-Fehlerrate von 0,23. Insbesondere in den Randzonen der Mobilfunkzelle steigt die PDU-Fehlerrate zeitweise auf 1, d. h. während dieser Zeit werden keine PDUs korrekt empfangen. Bei dem Zellradius von 15 km zeigt sich in der Zellmitte, entsprechend den C/I-Werten, eine geringere PDU-Verlustrate.

Das in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Sprachbeispiel wird auch für die subjektive Bewertung des Sprachkodierers in diesem Abschnitt verwendet. Die Übertragung des Sprachbeispiels wird dabei an fünf Abschnitten auf der Strecke durch die Zelle (Radius 5 km) untersucht. Das Sprachbeispiel wird

Nummer	Übertragungsblöcke	entsprechender Streckenabschnitt in km
1	0 - 1070	0 - 0,29
2	4000 - 5070	1,1 - 1,39
3	8000 - 9070	2,2 - 2,49
4	12000 - 13070	3,3 - 3,59
5	17200 - 18270	4,7 - 4,99

Tabelle 6.5: Bereiche, aus denen die Werte der PDU-Fehlerraten zum Vergleich der Sprachkodierer stammen

sowohl vom Sprachkodierer `melp` als auch vom Sprachkodierer `gsm_fr` kodiert. Aus der Kurve aus Abbildung 6.9(a) werden fünf Abschnitte der Länge 1071 Blöcken herausgelöst. Mit dieser PDU-Fehlerrate wird für jede kodierte Sprach-PDU des Sprachbeispiels bestimmt, ob die PDU übertragen oder gestört wird. Die entstehende Folge von korrekten und als fehlerhaft markierten Sprach-PDUs wird anschließend von den entsprechenden Sprachdekodierern wieder dekodiert und der subjektive Höreindruck verglichen.

Der Weg von der Zellgrenze bis zum Zellmittelpunkt ist annähernd symmetrisch zum Weg vom Zellmittelpunkt zur gegenüberliegenden Zellgrenze. Daher werden die fünf Folgen der PDU-Fehlerrate aus der ersten Hälfte des Weges durch die Zelle entnommen. Tabelle 6.5 gibt die Bereiche in Übertragungsblöcken und die entsprechenden Streckenpunkte der einzelnen Folgen der PDU-Fehlerraten an.

Vergleicht man subjektiv die Ergebnisse der beiden Sprachkodierer miteinander, klingen die Sprachbeispiele des `gsm_fr` Sprachkodierers natürlicher. Die Sprachbeispiele des `melp` Sprachkodierers sind dagegen besser verständlich. Insbesondere bei starken PDU-Verlusten wie sie am Zellrand auftreten ist das Ergebnis des `melp` Sprachkodierers deutlich besser zu verstehen, obwohl die Stimmen leicht metallisch und künstlich klingen.

Als Ergebnis der Untersuchung lässt sich zusammenfassen, dass der nach dem MELP-Verfahren arbeitende Sprachkodierer deutlich weniger Datenrate bei der Funkübertragung benötigt als der in GSM definierte Sprachkodierer. Die Sprachqualität und Verständlichkeit der übertragenen Sprache bleibt auch bei hohen Übertragungsstörungen ausreichend gut. Sie ist mit der Sprachqualität, die heutige Mobilfunknetze bieten, vergleichbar. Auch wenn die hier beschriebene Untersuchung nur die subjektiven Ergebnisse von Hörtests widerspiegeln, zeigt es sich, dass heutige Sprachkodierer trotz geringer Anforderungen an die Datenrate eine gute Sprachqualität liefern.

Parameter	Bedeutung	Wertebereich
$\mathcal{V}$	Verkehrsmix: Anteil des Sprachverkehrs, WWW-Verkehrs und FTP-Verkehrs am Gesamtverkehr.	Siehe Tabelle 6.7
$\mathcal{E}$	Anzahl der in einer Zelle angenommenen mobilen Endgeräte.	$\mathcal{E} \in \{1, 50, 100, 150, 200, 300\}$
`ATL`	Parameter `AIMF_TBF_LÄNGE`, Länge des TBF mit festem Ende für die Sprachübertragung in der Einheit RLC/MAC-Blöcke, siehe Abschnitt 5.3.3.2.1.	`ATL` $\in \{10, 30, 50, 75, 100\}$
$\mathcal{Z}_s$	Anzahl der für die Übertragung von Signalisiermeldungen zum mobilen Endgerät zur Verfügung stehenden Funkkanäle. In der Untersuchung werden diese Kanäle lediglich für den Aufbau der TBF verwendet.	$\mathcal{Z}_s \in \{2, 3, 4\}$

Tabelle 6.6: Parameter der Simulation zur Untersuchung der Effizienz des All-IP-Mobilfunknetzes

Verkehrsmix	Anteil Sprachverkehr	Anteil WWW-Verkehr	Anteil FTP-Verkehr
$\mathcal{V}_1$	30%	60%	10%
$\mathcal{V}_2$	50%	40%	10%
$\mathcal{V}_3$	70%	25%	5%

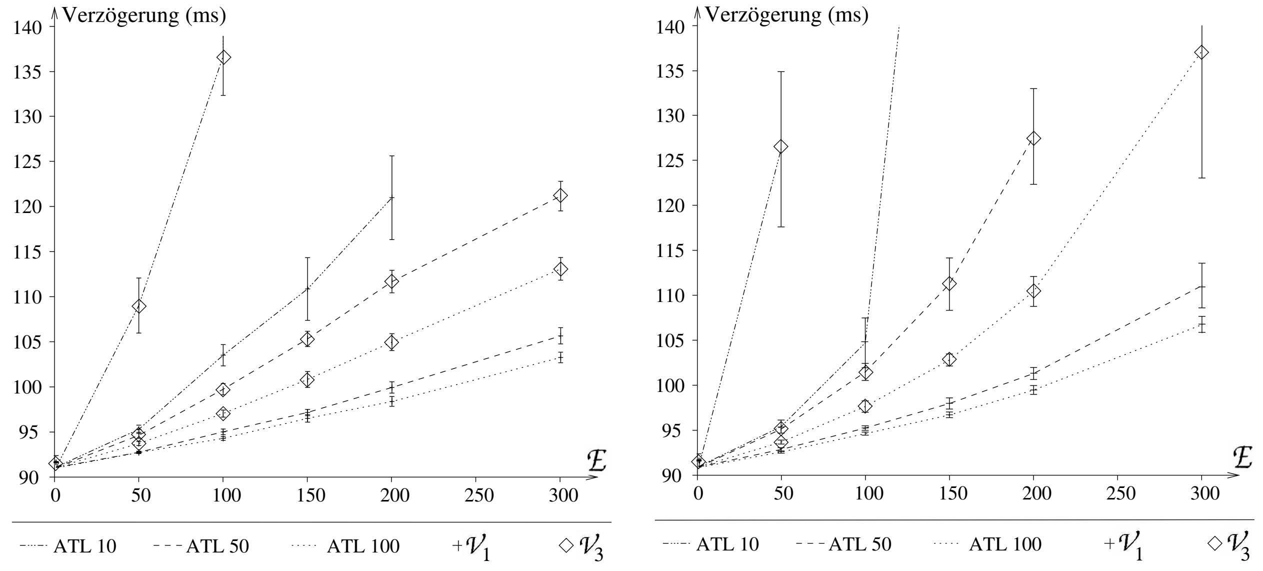
Tabelle 6.7: Anteile der Verkehrsarten für die Untersuchung

6.2.2 Effizienz des All-IP-Mobilfunknetzes

Um die Effizienz des entworfenen All-IP-Mobilfunknetzes insbesondere für die Übertragung von Sprache zu zeigen, wurden zunächst mittels des Simulationsmodells `SteuerSim` die auftretenden Verzögerungen bei der Übertragung von Sprach-, WWW- und FTP-PDUs untersucht. Die Ergebnisse der Simulation sind dabei die effektiven Datenraten, die bei der Übertragung erreicht werden. Weiter wird die für eine bestimmte Menge mobiler Endgeräte nötige Anzahl Funkkanäle mit der verglichen, die nötig wären, wenn die Sprache über fest zugewiesene Kanäle übertragen wird. Die Parameter der Simulation sind in Tabelle 6.6 angegeben.

6.2.2.1 Verzögerung der Sprachdaten

Abbildung 6.10 zeigt die Verzögerung der Sprach-PDUs in Abhängigkeit von $\mathcal{V}$, $\mathcal{E}$ und `ATL` (siehe Tabelle 6.6). Abbildung 6.10(a) zeigt die Kurven für $\mathcal{Z}_s = 4$, Abbildung 6.10(b) für $\mathcal{Z}_s = 2$. Deutlich sichtbar ist die Abhängigkeit der Verzögerung von `ATL`. Je kleiner `ATL` gewählt wird, desto häufiger wird ein neuer TBF angefordert. Dadurch kommt es häufiger zu Kollisionen auf dem PRACH, was zu deutlichen Verzögerungen der Übertragung führt. Weiter lässt sich aus den Abbildungen ablesen, dass je größer der Anteil des Sprachverkehrs ist, desto größer die Verzögerungen sind. Der Grund dafür ist, dass bei FTP- und WWW-Verkehren die zu übertragenden PDUs deutlich länger sind. Somit muss im Vergleich zum Sprachverkehr seltener ein TBF aufgebaut werden. Die Effekte der



(a) Parameter $\mathcal{Z}_s = 4$

(b) Parameter $\mathcal{Z}_s = 2$

Abbildung 6.10: Mittlere Verzögerung der Sprach-PDUs in Abhängigkeit von $\mathcal{V}$, $\mathcal{E}$ und `ATL`

Variation des Parameters $\mathcal{Z}_s$ treten stärker hervor, wenn häufiger ein TBF aufgebaut werden muss. Dies ist der Fall, wenn der Wert von `ATL` klein und der Anteil des Sprachverkehrs hoch ist.

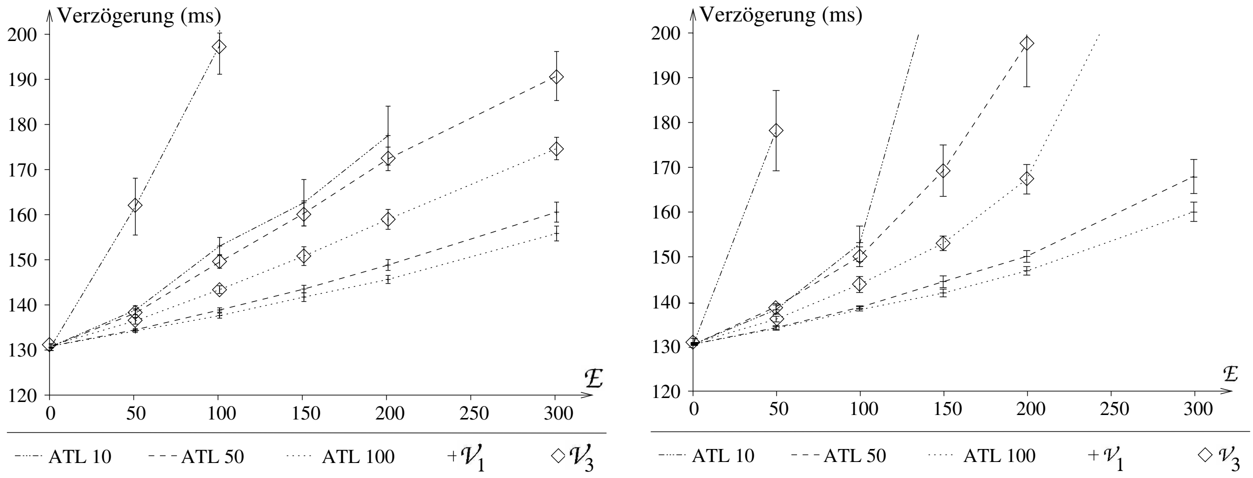
6.2.2.2 Verzögerung von WWW- bzw. FTP-PDUs

Die mittleren Verzögerungen der PDUs des WWW-Verkehrs für $\mathcal{Z}_s = 4$ und $\mathcal{Z}_s = 2$ zeigt Abbildung 6.11. Da die Kurven für die Verzögerung des FTP-Verkehrs nahezu identisch aussehen, wurde hier auf eine Darstellung verzichtet. Die Verzögerung ist durchweg höher als bei der Übertragung der Sprach-PDUs. Der Grund ist, dass hier für die Übertragung eine gesicherte Verbindung aufgebaut wird und dieser Aufbau einige Zeit benötigt (siehe Abschnitt 6.1.4.1).

6.2.2.3 Übertragungsrate von Datenpaketen

Abbildung 6.12 zeigt als Ergebnisse der Simulation mit dem Simulationsmodell `GesamtSim` die effektive Datenrate bei der Übertragung von Datenpaketen. Parameter der Simulation waren dabei die PDU-Größe $\mathcal{G}$ (560 Oktett und 1500 Oktett) und die Anzahl der für eine Übertragung zur Verfügung stehende Anzahl von Zeitschlitzen $\mathcal{Z}$ pro TDMA-Rahmen (1 bzw. 3 Zeitschlitze).

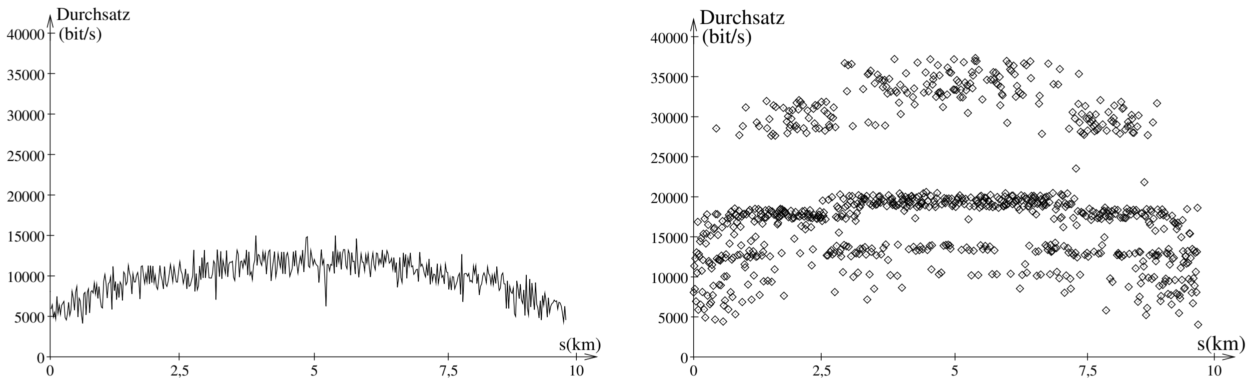
In Abbildung 6.12(b) wurde eine andere Darstellung gewählt, um zwei Effekte deutlicher zu zeigen. Zum einen zeigen sich Abstufungen im Durchsatz entlang der Strecke s, die durch den Wechsel der



(a) Parameter $\mathcal{Z}_s = 4$

(b) Parameter $\mathcal{Z}_s = 2$

Abbildung 6.11: Verzögerung von WWW-PDUs in Abhängigkeit von $\mathcal{V}$, $\mathcal{E}$ und `ATL`



(a) $\mathcal{Z} = 1$, $\mathcal{G} = 1500$ Oktett

(b) $\mathcal{Z} = 3$, $\mathcal{G} = 560$ Oktett

Abbildung 6.12: Effektive Datenrate pro PDU für die Übertragung größerer PDUs bei unterschiedlichen $\mathcal{Z}$ und $\mathcal{G}$

Kodierschemata bedingt werden. Zum anderen bilden sich gewisse Bänder heraus. Der Grund dafür ist der Quittierungsmechanismus der RLC/MAC-Schicht. Bei der quittierten Übertragung wird entweder am Ende eines TBFs oder nach spätestens 64 RLC/MAC-Blöcken eine Quittierungs-Meldung gesendet. Erst dann können fehlerhaft übertragene Blöcke erneut übertragen werden. Stehen mehrere PDUs zur Übertragung an, werden die ersten PDUs der Übertragungssequenz erst am Ende des TBF bzw. nach 64 RLC/MAC-Blöcken quittiert. Abbildung 6.13 zeigt ein Beispiel mit vier zu übertragenden PDUs, die zusammen weniger als 64 RLC/MAC-Blöcke für die Übertragung benötigen. Weiter wird von einer gleichbleibenden PDU-Größe ausgegangen und davon, dass immer vier PDUs eine Sequenz und somit einen TBF bilden. Damit ergeben sich zyklisch die vier in Abbildung 6.13 gezeigten Übertragungszeiten und somit entsprechend vier Durchsatzraten. Dieser Effekt zeigt sich in Abbildung 6.12(b) durch die deutlich getrennten Bänder des Durchsatzes.

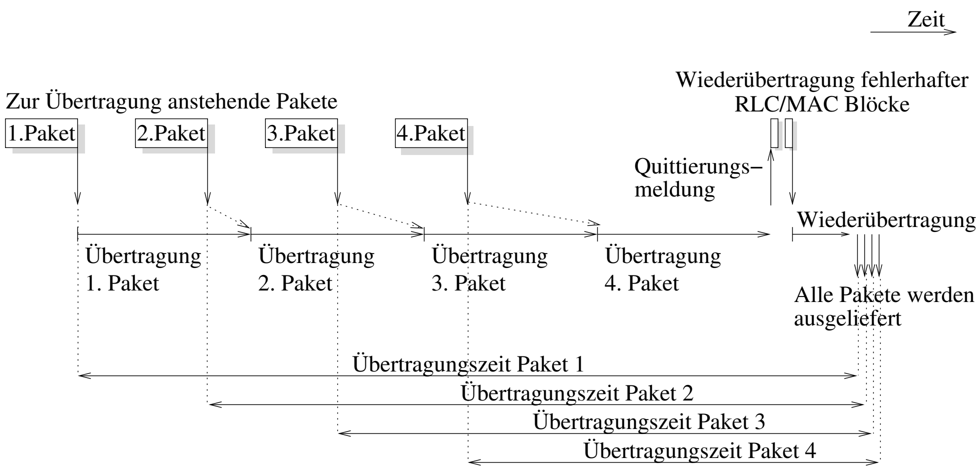


Abbildung 6.13: Übertragung und Quittierung von vier zur Übertragung anstehender PDUs

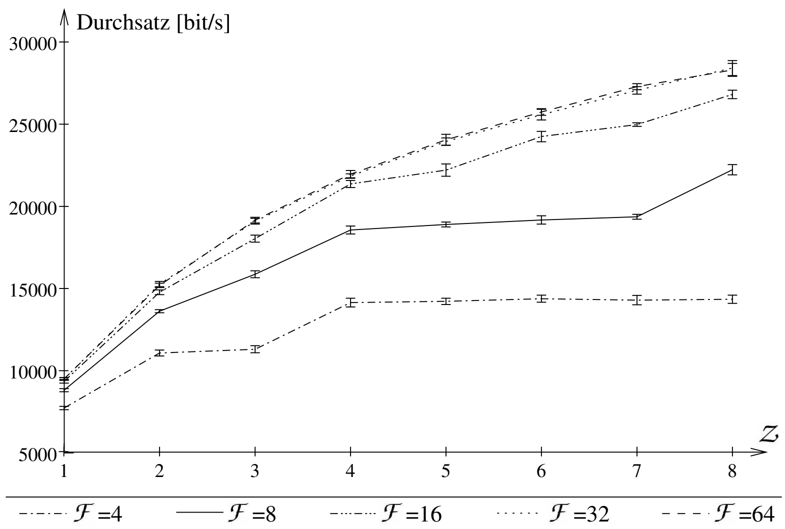


Abbildung 6.14: Mittlerer Durchsatz von WWW-PDUs in Abhängigkeit von $\mathcal{Z}$ und $\mathcal{F}$

Abbildung 6.14 zeigt den mittleren Durchsatz bei der Übertragung von WWW-PDUs. Variiert wurden dabei der Parameter $\mathcal{Z}$ und die im vorigen Abschnitt genannte Anzahl von RLC/MAC-Blöcken $\mathcal{F}$, nach der spätestens eine Quittierungs-Meldung gesendet wird. Dabei war die Luftschnittstelle so konfiguriert, dass immer genügend Funkkanäle zur Verfügung stehen, also keine PDU warten muss. Wählt man $\mathcal{F}$ kleiner als der im Standard vorgegebene Wert von 64, sinkt der Durchsatz deutlich. Lediglich zwischen einem Wert von 32 und einem Wert von 64 lassen sich kaum Unterschiede feststellen.

Die Kurven aus Abbildung 6.14 zeigen, dass sich der Durchsatz unterproportional zur Anzahl der Zeitschlitze pro TDMA-Rahmen $\mathcal{Z}$ verhält. Der Grund dafür ist, dass zwar die PDUs an sich schneller übertragen werden, die Verzögerungen durch z. B. die Anforderung eines TBF aber gleich bleiben und somit stärker ins Gewicht fallen.

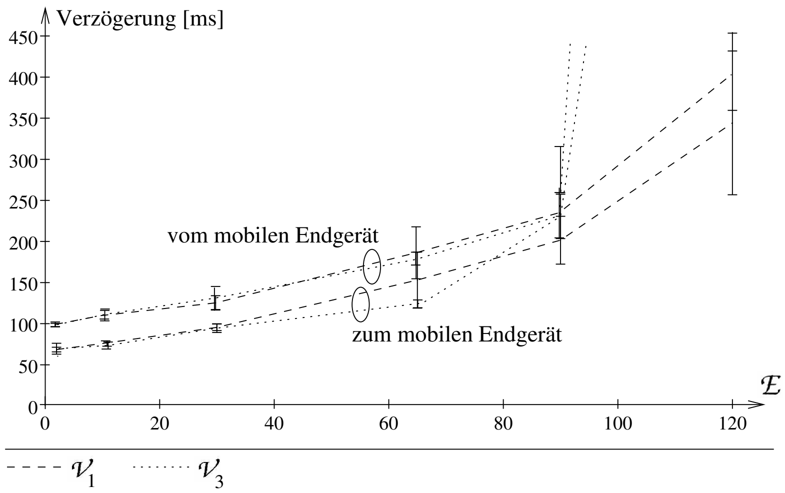


Abbildung 6.15: Mittlere Verzögerung von Sprach-PDUs in Abhängigkeit von $\mathcal{E}$ und $\mathcal{V}$ (Simulationsmodell `GesamtSim`)

Abbildung 6.15 zeigt die mittlere Verzögerung von Sprach-PDUs im Gegensatz zu Abbildung 6.10 als Ergebnis der Simulation mit dem Simulationsmodell `GesamtSim`. Die Kurven sind dabei abhängig von der Anzahl der mobilen Endgeräte $\mathcal{E}$, dem Verkehrsmix $\mathcal{V}$ und der Übertragungsrichtung vom bzw. zum mobilen Endgerät. Das schnellere Anwachsen der Verzögerung bei steigender Zahl mobiler Endgeräte im Vergleich zu Abbildung 6.10 hat zwei Gründe. Zum einen standen nicht immer genügend Signalisierkanäle zur Verfügung. Zum anderen wurden Übertragungsfehler und Wiederübertragungen berücksichtigt, was zu deutlich mehr Signalisiermeldungen führt.

6.2.2.4 Ersparnis an Funkkanälen

Neben der Frage der Verzögerung von PDUs bei der Übertragung wurde untersucht wie sich die Ausnutzung von Ruhephasen der Sprachübertragung für die Übertragung anderer PDUs auswirkt. Eine charakteristische Größe ist dabei die Anzahl der nötigen Funkkanäle, um alle für die Übertragung anstehenden PDUs ohne Zwischenspeicherung übertragen zu können. Abbildung 6.16 zeigt die prozentuale Einsparung an Funkkanälen beim All-IP-Mobilfunknetz (AIMF-Modell) im Vergleich zur

Anzahl der Funkkanäle bei einem System, bei dem die Sprachverbindungen über fest zugeordnete Funkkanäle übertragen werden (GSM-Modell). Die ‘Ersparnis’ Δ wurde abhängig von den Parametern $\mathcal{V}$, $\mathcal{E}$ und `ATL` und mit $\mathcal{Z}_s = 3$ ermittelt. Die Kurven in Abbildung 6.16 beziehen sich auf die Verbindung vom mobilen Endgerät.

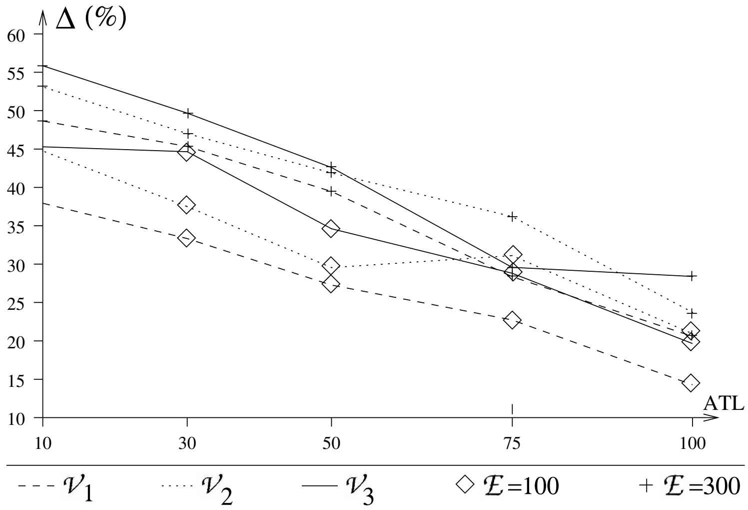


Abbildung 6.16: Δ in Abhängigkeit von $\mathcal{V}$, $\mathcal{E}$ und `ATL`

Wie Abbildung 6.16 zeigt, steigt Δ bei kleinen Werten des Parameters `ATL` und bei großen Werten des Parameter $\mathcal{E}$ an. Kurze TBF ragen weniger weit in Ruhephasen hinein, womit mehr Kapazität für andere Übertragungen zur Verfügung steht. Je mehr mobile Endgeräte sich in einer Zelle aufhalten, desto größer ist der Bündelungsgewinn, d. h. desto eher steht Verkehr zur Übertragung in z. B. Ruhephasen an. Weiter lässt sich ablesen, dass je größer der Anteil des Sprachverkehrs ist, desto größer wird die ‘Ersparnis’ Δ. Dies ist darin begründet, dass nur beim Sprachverkehr Unterschiede zwischen dem All-IP-Mobilfunknetz und der bei z. B. GSM üblichen exklusiven Zuweisung von Funkkanälen auftreten.

6.2.3 Untersuchung der Dienstgütemechanismen

Die Dienstgütemechanismen des Funkzugangsnetzes für Verkehr zum mobilen Endgerät wurde mittels des Simulationsmodells `DienstgüteSim` untersucht. Damit wurden die Auswirkungen auf die Dienstgüte bei Überlastung des Netzes erfasst. Stehen für die zu übertragenden PDUs genügend Ressourcen zur Verfügung, können meist alle Dienstgüteanforderungen erfüllt werden. Stehen mehr PDUs zur Übertragung an, als Ressourcen vorhanden sind, müssen niederpriore Verkehre beschränkt werden. Nur so können Dienstgüteanforderungen von höherprioren Verkehren weiterhin erfüllt werden. Die Beschränkung von niederpriorem Verkehr äußert sich meist in einem deutlichen

Anwachsen der Übertragungsverzögerungen, da die auf die Übertragung wartenden PDUs in Puffern zwischengespeichert werden.

In Abbildung 6.17 ist die Verzögerung von Sprachverkehren dreier Prioritätsklassen $\mathcal{P}_1$, $\mathcal{P}_2$ und $\mathcal{P}_3$ mit $\mathcal{P}_1 > \mathcal{P}_2 > \mathcal{P}_3$ in Abhängigkeit von der Auslastung $\mathcal{A}$ des Funkzugangsnetzes gezeigt. Ist $\mathcal{A} = 120$ bedeutet dies, dass am Funkzugangsnetz 20% mehr Verkehr zur Übertragung ansteht als von der Anzahl der Funkkanäle aus möglich ist. Belastet wird das System in der Untersuchung mit Sprach-, WWW- und FTP-Verkehren unterschiedlicher Prioritäten. Dabei besitzt Sprachverkehr eine höhere Priorität im Vergleich zu WWW-Verkehr. Diesem ist wiederum eine höhere Priorität im Vergleich zu FTP-Verkehr zugewiesen. Wie Abbildung 6.17 deutlich zeigt, erfährt höherpriorer Verkehr keine Beeinträchtigung. Bei niederpriorem Verkehr steigt bei größerem $\mathcal{A}$ die Verzögerung deutlich an. Fehlt für eine Prioritätsklasse die zur Übertragung nötige Datenrate, werden die Puffer dieser Klasse durch ankommende PDUs immer voller. Dadurch steigt die Verzögerung während der Systemlaufzeit stetig an. Dies ist in Abbildung 6.17 mit ‘Instabiler Systemzustand’ bezeichnet.

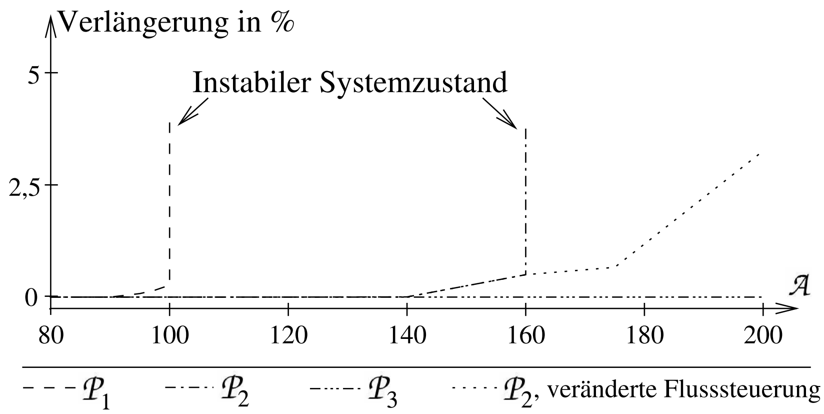


Abbildung 6.17: Verzögerung von PDUs des Sprachverkehrs unterschiedlicher Priorität in Abhängigkeit von $\mathcal{A}$ und der Art der Flusssteuerung. Die Fehlerintervalle wurden der Übersichtlichkeit wegen weggelassen, sie lagen in der Simulation unter 5% des Mittelwertes.

Daraus folgt insbesondere für die Übertragung von Sprachdaten, dass sobald für eine Prioritätsklasse zuwenig Ressourcen zur Verfügung stehen, die Qualität der Sprachübertragung stark eingeschränkt wird. Dadurch kann der Dienst nicht mehr sinnvoll angeboten werden. Eine Lösung dieses Problems ist, die Flusssteuerung so zu ändern, dass nicht für alle Verkehre einer Klasse die Ressourcen eingeschränkt werden. Statt dessen werden für einige Verkehre die notwendigen Ressourcen, für andere keine Ressourcen zur Verfügung gestellt. Damit kann zumindest für einige Verkehrsströme die Dienstgüte und somit der Dienst aufrecht erhalten werden. Führt man diese Flusssteuerung z. B.

für Verkehre der mittleren Priorität ein, ergibt sich die in Abbildung 6.17 gepünktelt eingezeichnete, mittlere Verzögerung.

Die Untersuchung zeigte zwei weitere Punkte. Zunächst ergeben sich dann Probleme, wenn zu einem mobilen Endgerät neben Sprachdaten auch andere, größere Daten-PDUs übertragen werden. Da die Flusssteuerung für jedes mobile Endgerät einen Puffer vorsieht, stehen in diesem sowohl die verzögerungsempfindlichen Sprach-PDUs als auch die größeren Daten-PDUs. Dementsprechend werden Sprach-PDUs, die hinter großen Daten-PDUs liegen, relativ lange verzögert. Um eine ausreichende Qualität für die Sprachübertragung sicherzustellen, darf somit keine Datenübertragung parallel stattfinden. Alternativ kann die Flusssteuerung so geändert werden, dass zumindest zwei Puffer pro mobilem Endgerät zur Verfügung stehen. Möglich wäre ebenfalls, größere Daten-PDUs vor der Zusammenführung der Daten- und Sprach-PDUs in kleine PDUs aufzuteilen (Segmentierung). Dies ist aber aufgrund der Informationen des PDU-Kopfes, die somit bei jeder kleinen PDU zusätzlich übertragen werden müssten, ineffizient.

Der zweite Punkt ist, dass teilweise Verkehre nicht entsprechend ihrer Priorität behandelt werden. Dies tritt dann auf, wenn zu einem mobilen Endgerät mehr als ein PDP-Kontext existiert. Da die Flusssteuerung nur endgerätbezogen arbeitet, berücksichtigt der Algorithmus als Priorität die höchste Priorität aller PDP-Kontexte zu einem mobilen Endgerät. Die Auswirkungen sollen an einem Beispiel gezeigt werden. Seien für das mobile Endgerät `A` die PDP-Kontexte κ_{A1} und κ_{A2} mit den Prioritäten $\mathcal{P}_{A1}$ und $\mathcal{P}_{A2}$ und für das mobile Endgerät `B` entsprechend κ_{B1}, κ_{B2}, $\mathcal{P}_{B1}$ und $\mathcal{P}_{B2}$ mit $\mathcal{P}_{A1} > \mathcal{P}_{B1}$ und $\mathcal{P}_{A2} = \mathcal{P}_{B2}$ definiert. Dann stuft der Algorithmus wegen $\mathcal{P}_{A1} > \mathcal{P}_{B1}$ das Endgerät `A` mit einer höheren Priorität als `B` ein. Damit wird trotz $\mathcal{P}_{A2} = \mathcal{P}_{B2}$ κ_{A2} bevorzugt gegenüber κ_{B2} behandelt. Abhilfe könnte auch hier eine geänderte Flusssteuerung mit mehreren Puffern pro mobilem Endgerät schaffen.

6.3 Parametrisierung des All-IP-Mobilfunknetzes

Nach den Effizienzuntersuchungen des All-IP-Mobilfunknetzes im vorigen Abschnitt werden in diesem optimale Werte für Parameter angegeben. Die Parameter wurden durch Simulation sowohl mittels des Simulationsmodells `Steuersim` als auch aus dem Modell des Funkkanals bestimmt.

6.3.1 Parameter aus dem Simulationsmodell `Steuersim`

Bestimmt wurden optimale Werte für die Anzahl der Kanäle für die Signalisierung, den Parameter `AIMF_TBF_LÄNGE` und die nötige Anzahl an Funkkanälen. Abbildung 6.18 zeigt die Anzahl der mobilen Endgeräte, die in Abhängigkeit von $\mathcal{Z}_S$, $\mathcal{V}$ und `ATL` bedient werden können. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Verzögerung der Sprach-PDUs unter 100 ms bleibt. Die Kurven in Abbildung 6.18 zeigen, dass drei Kanäle für die Signalisierung eine geeignete Anzahl darstellt. Bei nur zwei Kanälen ist eine deutlich geringere Zahl von mobilen Endgeräten möglich, vier Kanäle bringen keine Verbesserung gegenüber drei Kanälen. Abbildung 6.16 hat gezeigt, dass `ATL` möglichst klein gewählt werden sollte. Kleine Werte bedingen aber auch, dass oft neue TBF angefordert werden müssen, was zu mehr Signalisierverkehr und somit zu größeren Verzögerungen führt (vgl. Abschnitt 5.3.3.4). Abbildung 6.18 zeigt, dass `ATL` mindestens den Wert 50 haben sollte, da bei kleineren Werten die Anzahl der mobilen Endgeräte deutlich sinkt.

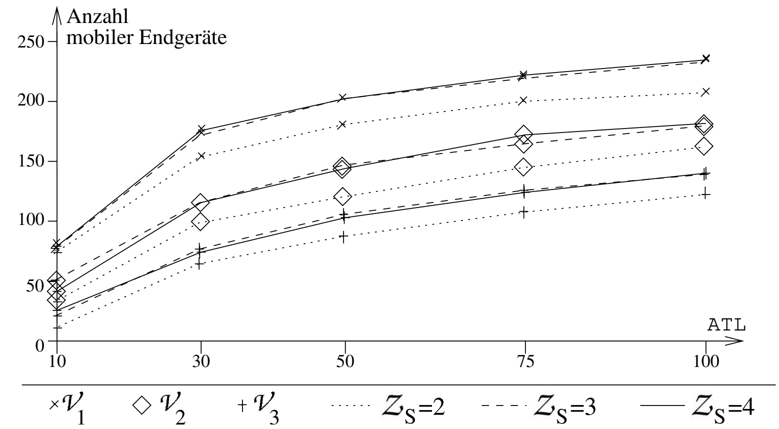


Abbildung 6.18: Anzahl der mobilen Endgeräte, die unter der Bedingung, dass die Verzögerung der Sprach-PDUs unter 100 ms bleibt, unterstützt werden können

Somit wird für das All-IP-Mobilfunknetz vorgeschlagen, drei Kanäle für die Signalisierung vorzusehen und `ATL` auf 50 zu setzen. Abbildung 6.19 zeigt die nötige Anzahl von Funkkanälen, damit in 98% bzw. 99,5% der Fälle[6] die Anforderungen erfüllt werden können.

Wie in Abbildung 6.19 ersichtlich, wächst mit dem Anteil des Sprachverkehrs auch die Zahl der nötigen Funkkanäle. Weiter zeigen die Diagramme, dass, wie schon in Abbildungen 6.16 gezeigt, beim AIMF-Modell deutlich weniger Funkkanäle benötigt werden als beim GSM-Modell. Der Unterschied in der Anzahl der Funkkanäle, ob 98% oder 99,5% der Fälle abgedeckt werden sollen, ist dagegen gering. Daraus lässt sich ableiten, dass nur selten eine hohe Anzahl von Funkkanälen benötigt werden.

[6] Ein 'Fall' bezieht sich hier auf die Dauer der Übertragung eines RLC/MAC-Blockes, also auf 20 ms.

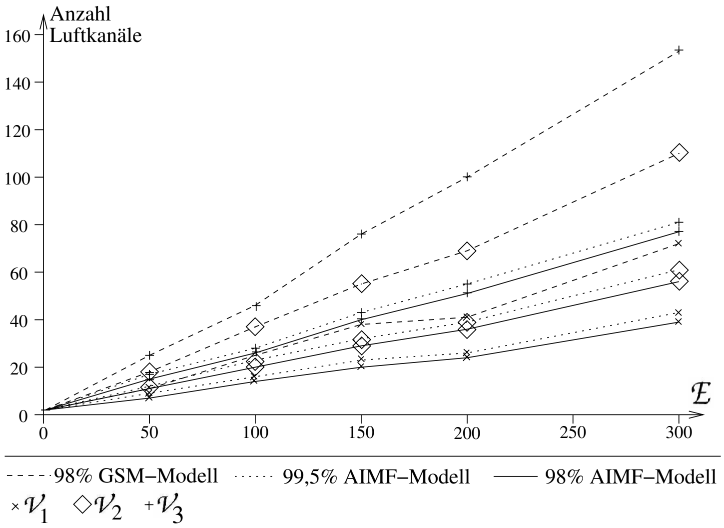


Abbildung 6.19: Anzahl der nötigen Funkkanäle, um 98% bzw. 99,5% der Fälle abzudecken

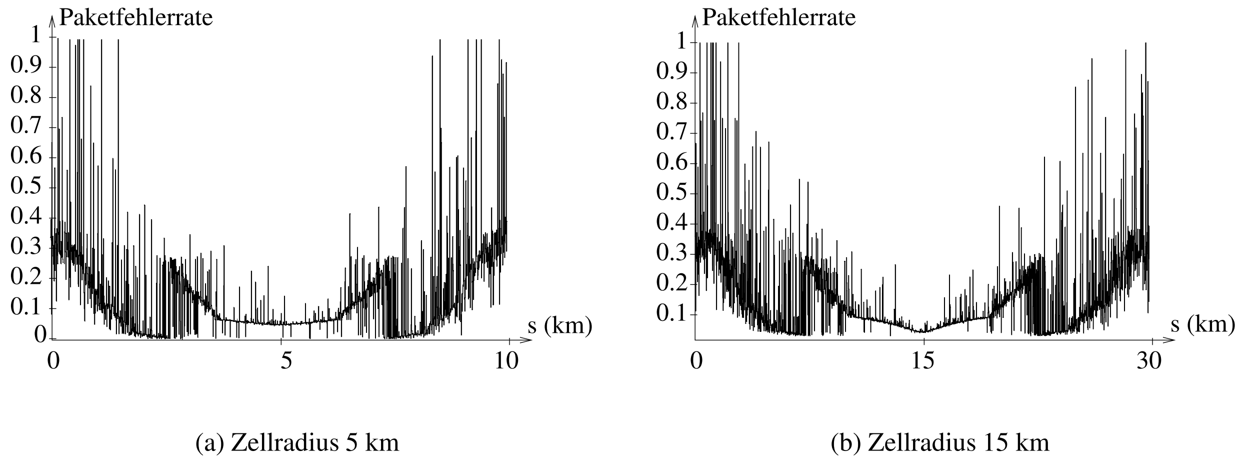
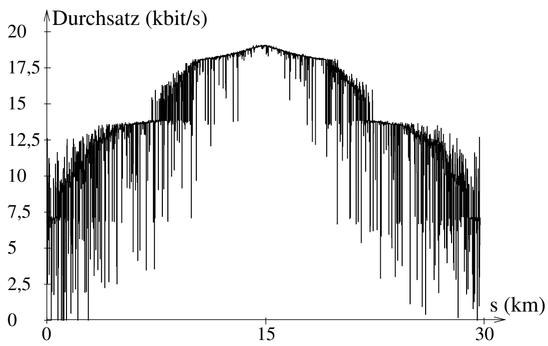


Abbildung 6.20: PDU-Fehlerrate in Abhängigkeit von der durchfahrenen Strecke s mit für Datenübertragung optimierten Grenzen der Kodierschemata

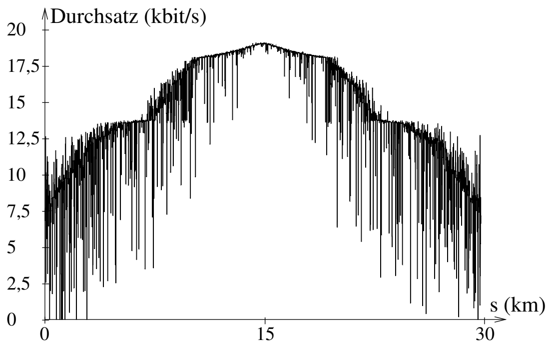
6.3.2 Einfluss der Kodierschematagrenzen

Für die Untersuchungen im vorigen Kapitel wurden die für die Sprachübertragung optimalen Grenzen der Kodierschemata verwendet. Abbildung 6.20 zeigt im Vergleich dazu die PDU-Fehlerraten mit für die Übertragung von Daten optimierter Kodierschematagrenzen.

Abbildung 6.21 zeigt die daraus resultierende, zur Verfügung stehende Datenrate (Durchsatz) für die Übertragung von Daten bei einem Zellradius von 15 km. Gemittelt über die gesamte Strecke ergibt sich eine mittlere Datenrate pro Funkkanal von 13996 bit/s für sprachoptimierte Grenzen und



(a) Sprachgrenzen



(b) Datengrenzen

Abbildung 6.21: Durchsatz bei verschiedenen Schematagrenzen und einem Zellradius von 15 km

14097 bit/s für datenoptimierte Grenzen. Es ist somit fast kein Unterschied in der zur Verfügung stehenden Datenrate festzustellen. Die für Sprachübertragung optimierten Grenzen halten aber die maximale PDU-Fehlerrate weitgehend unter 0,23.

Abbildung 6.22 zeigt für den 15 km Radius die erreichbare Datenrate in Abhängigkeit von der gewählten maximalen PDU-Fehlerrate, auf Grund derer die Kodierschematagrenzen gewählt wurden. Die beiden gestrichelt gezeichneten Linien geben zum einen die für die Sprachübertragung gewählte maximale PDU-Fehlerrate von 0,23 an. Zum anderen ist der ermittelte maximale Durchsatz mit optimierten Grenzen für die Datenübertragung eingetragen. Auch hier zeigt sich, dass durch die Optimierung der Kodierschematagrenzen für Sprachübertragung der Durchsatz nur geringfügig kleiner wird. Selbst eine Festlegung der Grenzen derart, dass die PDU-Fehlerrate maximal 0,2 beträgt, wäre noch ohne größere Verringerung des Durchsatzes möglich.

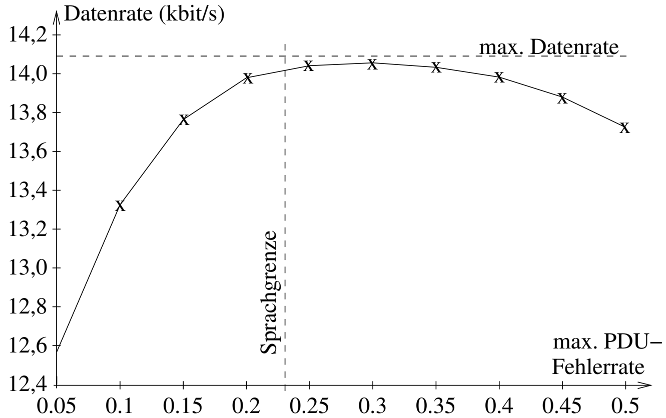


Abbildung 6.22: Durchsatz in Abhängigkeit der maximal eingestellten PDU-Fehlerrate

Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Dem steigenden Bedarf an mobiler Kommunikation stehen begrenzte Ressourcen der Funkübertragung wie die Anzahl der zur Verfügung stehenden Funkfrequenzen gegenüber. Um die Anforderungen der Kunden eines Mobilfunknetzes wirtschaftlich erfüllen zu können, müssen diese Ressourcen effizient genutzt werden. Dazu können z. B. Funkkanäle, die zeitweise von Verbindungen nicht benötigt werden, in diesen Perioden von anderen Verbindungen genutzt werden. Neben der effizienten Nutzung der Ressourcen ist es für bestimmte Anwendungen notwendig, Übertragungsdienste mit Dienstgütemerkmalen zur Verfügung zu stellen.

In dieser Arbeit wird ein auf dem Mobilfunkstandard GSM basierendes Konzept für das 'All-IP-Mobilfunknetz' entworfen und untersucht. Dabei wird die im GSM-Standard spezifizierte Möglichkeit der paketorientierten Datenübertragung – GPRS – eingesetzt. Beim Systementwurf wurde darauf geachtet, im Rahmen des GPRS-Standards die Ressourcen insbesondere der Funkübertragung effizient zu nutzen. Weiter wird Anwendungen die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Dienstgüteanforderungen zu spezifizieren. Ein wichtiger Punkt im All-IP-Mobilfunknetz ist, dass Sprache im Gegensatz zu GSM paketorientiert übertragen wird und Ruhephasen der Sprachkommunikation für andere Datenübertragungen genutzt werden können. An den Grenzen des Mobilfunknetzes werden die Sprachverbindungen durch Netzübergangseinrichtungen sowohl bezüglich der Signalisierung als auch der Sprachkodierung an bestehende Standards angepasst. Verschiedene Sprachkodierer wurden bezüglich der benötigten Datenrate und der Sprachqualität miteinander verglichen, insbesondere unter Berücksichtigung des fehleranfälligen Funkkanals. Dabei zeigt sich, dass heutige Sprachkodierer auch bei Datenraten von unter 5 kbit/s trotz der Randbedingungen der mobilen Kommunikation eine gute Sprachqualität liefern. Damit können Sprachverbindungen effizient mittels GPRS paketorientiert übertragen werden, was bei gleicher Anzahl von Funkkanälen zu einer deutlich höheren Zahl gleichzeitig möglicher Kommunikationsverbindungen führt.

Die Dienstgüte der Verbindungen wird durch ein das ganze GPRS-Netz umfassendes Dienstgütekonzept ermöglicht. Dieses stellt sowohl im Festnetz als auch bei der Funkübertragung für verschiedene

Verkehre unterschiedliche Prioritäten und Datenraten zur Verfügung. An der Grenze zwischen dem Festnetz und der Funkübertragung werden die Dienstgüteparameter entsprechend umgesetzt, so dass eine für die Anwendungen durchgehende Dienstgüte ermöglicht wird. Die Dienstgütemechanismen im Festnetz basieren dabei auf dem `DiffServ`-Architekturmodell. Signalisiermeldungen und Datenpakete der Sprachverbindungen werden bevorzugt behandelt. Für die weiteren Datendienste sind zwei Klassen für verschiedene Anforderungen bezüglich der Datenrate vorgesehen. Dabei können jeweils unterschiedliche Prioritäten spezifiziert werden. Für Datenübertragungen ohne Dienstgüteanforderungen steht eine Übertragung nach dem Best-Effort Prinzip zur Verfügung. Als Dienstgüteparameter für die Funkübertragung kann neben der Datenrate der Verbindung die Priorität angegeben werden. Damit können für die meisten Anwendungen die Dienstgüteparameter ausreichend detailliert angegeben werden. Die verwendeten Mechanismen wurden so gewählt, dass die Dienstgüte trotz der Randbedingungen eines Mobilfunknetzes unterstützt werden kann.

Für die Untersuchungen des All-IP-Mobilfunknetzes wurden drei Simulationsmodelle entworfen, mit denen verschiedene Aspekte wie Verzögerungen oder Systemauslastungen untersucht wurden. Weiter wurden ein Modell der Luftschnittstelle erstellt und verschiedene Arten von Verkehr, Sprach-, WWW- und FTP-Verkehr, nachgebildet. Bei den simulativen Untersuchungen des All-IP-Mobilfunknetzes zeigte sich, dass im Vergleich zur Sprachkommunikation, bei der Funkkanäle exklusiv belegt werden, über 55% weniger Funkkanäle benötigt werden. Die Ersparnis an Funkkanälen ist dabei abhängig von der Verkehrscharakteristik und der Anzahl der mobilen Endgeräte in einer Zelle. Die Verzögerung der Sprachdaten ist mit entscheidend für die Qualität einer Sprachverbindung. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Rahmen der Genauigkeit der Modelle die Sprachübertragung eine Verzögerung von weniger als 150 ms erfährt. Weiter wurde gezeigt, dass die Mechanismen zur Realisierung der Dienstgüte die von den verschiedenen Anwendungen gestellten Anforderungen umsetzen können.

Im Rahmen der Untersuchung konnten für Systemparameter optimale Werte gefunden werden. Mit diesen können bei effektiver Ausnutzung der Luftschnittstelle die Anforderungen der Anwendungen, insbesondere auch der Sprachübertragung, erfüllt werden.

Das entworfene Mobilfunksystem und die simulativen Untersuchungen dazu zeigen, dass bei Verwendung des Dienstes GPRS sowohl für Sprach-, als auch für Datenübertragungen mit oder ohne Dienstgüteanforderungen die Luftschnittstelle deutlich effizienter genutzt werden kann. Dies führt zu einem kostengünstigen und somit wirtschaftlicheren Betrieb eines Mobilfunknetzes.

7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden ein All-IP-Mobilfunknetz entworfen, Kenngrößen simulativ untersucht und für Systemparameter optimale Werte bestimmt. Eine weitere Verfeinerung und Erweiterung der Untersuchung dieser Kenngrößen und Systemparameter ist vor einer Realisierung nötig. Weiter muss untersucht werden wie sich Zellwechsel und die damit verbundenen Unterbrechungen der Übertragung auf die Sprachkommunikation auswirken. Durch genauere Modelle des Funkkanals können detaillierte Erkenntnisse über die zu erwartende Qualität eines realisierten Systems gewonnen werden. Die genaueren Modelle können z. B. durch Einbeziehung geografischer Merkmale, Störungen durch benachbarte Frequenzbänder oder weiterer Einflüsse realisiert werden.

Auch bei der Bestimmung optimaler Grenzen zwischen den Kodierschemata CS-1 - CS-4 können durch aufwändigere Modelle mehr Effekte der Funkübertragung wie der wiederholten Übertragung von PDUs im Fehlerfall berücksichtigt werden. Durch eine geeignete Wahl der Grenzen zwischen den Kodierschemata kann die Effizienz der Funkübertragung in gewissen Grenzen erhöht werden.

Ein weiterer Punkt ist die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen der Datenübertragung von GPRS und den Mechanismen von TCP. Durch die hohen Verzögerungen bei der Funkübertragung können bestimmte Regelmechanismen des TCP ansprechen. Werden diese Wechselwirkungen nicht berücksichtigt, kann durch diese Regelmechanismen z. B. der Verkehr unnötig gedrosselt oder deutlich erhöht werden [Mey99], [PM01], [LF00].

Weiter kann als Anwender der SNDCP-Schicht nicht das IP, sondern das PPP-Protokoll für die Sprachübertragung eingesetzt werden. Durch eine geeignete Definition des PDU-Formats kann u. U. die Menge der mit jedem Sprachpaket übertragenen Steuerinformation reduziert werden. Allerdings wird diese Steuerinformation durch die PDU-Kopfkomprimierung beim All-IP-Mobilfunknetz bereits auf ein Minimum reduziert.

Literaturverzeichnis

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

[ABD+98] ANDREWS, Matthew ; BORST, Simon C. ; DOMINIQUE, Francis ; JELENKOVIC, Predrag R. ; KUMARAN, Krishnan ; RAMAKRISHNAN, K. G. ; WHITING, Philip A.: Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms for High-Speed Data Wireless Networks. In: *Bell Labs Technical Journal* 3 (1998), Juli/September, Nr. 3

[AD01] AL-DAM, Khalid: *Garantierte Dienstgüte in einem GPRS Backbone-Netz*, Universität Stuttgart, IND, Studienarbeit, Januar 2001

[Bag98] BAGWELL, Chris. *Audio File Formats FAQ*. http://home.sprynet.com/~cbagwell/AudioFormats.html. November 1998

[BDR+00] BALACHANDRAN, K. ; DEMETRESCU, C. ; R.EJZAK ; NANDA, S. ; HONG, Xie: MAC Layer Design for Statistical Multiplexing of Voice and Data over EGPRS. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '00)* IEEE, 2000, S. 913–923

[BM96] BARCELÓ, Francisco ; MARTÍN, Javier: PRMA Performance Evaluation Based on Speech Clipping. In: *Proceedings of the International Conference on Communications Systems* IEEE, 1996, S. 1206–1210

[Bod99] BODAMER, Stefan. *Einführung in die Konzepte der C++-Simulationsbibliothek Version 2.1*. IND, Universität Stuttgart. August 1999

[Cal88] CALHOUN, George: *Digital Cellular Radio*. 685 Canton Street, Norwood, MA 02062 : Artech House, INC., 1988

[CAS98] CORBUN, Olivier ; ALMGREN, Magnus ; SVANBRO, Krister: Capacity and Speech Quality Aspects using Adaptive Multi-Rate (AMR). In: *Proceedings of the 9th IEEE*

International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'98) IEEE, 1998, S. 1535–1539

[Che99] CHEN, Xiaohua: The Effects of Source Characteristics on the Performance of GPRS Coding Schemes. In: *Proceedings of the GPRS Day at WINLAB, Rutgers University*, 1999

[CIM00] CASONI, Maurizio ; IMMOVILLI, Gianni ; MERANI, Maria L.: Channel Allocation Schemes Providing QoS in Wireless Networks. In: *Proceedings of the ITC Specialist Seminar on Mobile Systems and Mobility*, 2000, S. 61–72

[CK96] COX, Richard V. ; KROON, Peter: Low Bit-Rate Speech Coders for Multimedia Communication. In: *IEEE Communications Magazine* 34 (1996), Dezember, Nr. 12, S. 34–41

[CK01] CHASKAR, Hemant ; KOODLI, Rajeev: MPLS and DiffServ for UMTS QoS in GPRS Core Network Architecture. In: *Proceedings of the 11th Internet Society Conference (INET 2001)* ISOC, 2001

[Com91] COMER, Douglas E.: *Internetworking with TCP/IP*. Bd. 1. Prentice-Hall, INC., 1991

[COS] COST 231 FINAL REPORT. *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*. http://www.lx.it.pt/cost231

[Dit93] Kap. Vorwort In: DITTAMI, John: *Signale und Kommunikation, Mechanismen des Informationsaustauschs in lebenden Systemen*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlang, 1980-1993

[DSB+99] DEMETRESCU, C. ; SAMUEL, L. ; BROOKS, C. ; ILAS, C. ; SAMARAS, K. ; YAN, Ran: Evaluating Voice over GPRS. In: *Telecommunication Journal of Australia* 49 (1999), Nr. 4, S. 47–54

[EW99] EBERT, Jean-Pierre ; WILLIG, Andreas: A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation / Technical University Berlin, Telecommunication Networks Group. 1999. – TKN Technical Reports Series

[FKTD99] FABRI, S. N. ; KONDOZ, A. ; TATESH, S. ; DEMETRESCU, C.: Proposed Evolution of GPRS for the Support of Voice Services. In: *IEE Proceedings - Communications* 146 (1999), Oktober, Nr. 5, S. 325–330

[FL96] FLEURY, Bernard H. ; LEUTHOLD, Peter E.: Radiowave Propagation in Mobile Communications: An Overview of European Research. In: *IEEE Communications Magazine* 34 (1996), Februar, Nr. 2, S. 70–81

[GfK00] GFK MEDIENFORSCHUNG. *GfK Online Monitor, 6. Untersuchungswelle*. http://www.gfk.de. August 2000

[GL00a] GHRIBI, Brahim ; LOGRIPPO, Luigi: Understanding GPRS: the GSM Packet Radio Service. In: *Computer Networks* 34 (2000), November, Nr. 5, S. 763–779

[Glo99] GLOSS, Bernd: *Paketorientierte Zugriffsverfahren im Mobilfunk*, IND, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1 1999. – Diplomarbeit Nr. 1631

[GOST00] GÖRAN, A. ; OLIN, Birgitta ; SVANBRO, Krister ; TURINA, Dalibor: The Challenges of Voice-over-IP-over-Wireless. In: *Ericsson Review* (2000), Nr. 1, S. 20–31

[GP00] GARCÍA, Luis A. ; POGUNTKE, Kai: Dimensioning of the Gb Interface for GPRS. In: *Proceedings of the ITC Specialist Seminar on Mobile Systems and Mobility*, 2000, S. 249–260

[GP01] GUÉRIN, Roch A. ; PLA, Vicent: Aggregation and Conformance in Differentiated Service Networks: A Case Study. In: *ACM Computer Communication Review* 31 (2001), Januar, Nr. 1, S. 21–32

[GS85] GRUBER, John G. ; STRAWCZYNSKI, Leo: Subjective Effects of Variable Delay and Speech Clipping in Dynamically Managed Voice Systems. In: *IEEE Transactions on Communications* COM-33 (1985), August, Nr. 8, S. 801–808

[GSM01] GSM ASSOCIATION. *GSM Teilnehmerzahlen*. http://www.gsmworld.com. Mai 2001

[Hat80] HATA, Masaharu: Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* VT-29 (1980), August, Nr. 3, S. 317–325

[Her99] HERZOG, Roman. *Eröffnungsansprache des damaligen Bundespräsidenten anläßlich der CeBIT-Messe*. März 1999

[HJA] HASEGAWA-JOHNSON, Mark ; ALWAN, Abeer: Speech Coding: Fundamentals and Applications / University of Illinois, University of California. – Forschungsbericht

[HMS98] HOFF, Simon ; MEYER, Michael ; SCHIEDER, Andreas: A Performance Evaluation of Internet Access via the General Packet Radio Service of GSM. In: *Proceedings of the 48th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 98)* IEEE, 1998, S. 1760–1764

[IKTO00] IIDA, Katsuyoshi ; KAWAHARA, Kenji ; TAKINE, Tetsuya ; OIE, Yuji: Performance Evaluation of the Architecture for End-to-End Quality-of-Service Provisioning. In: *IEEE Communications Magazine* 38 (2000), April, Nr. 4, S. 76–81

[Int99] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *ITU Telecommunication Indicators, Mobile cellular subscribers per 100 people*. http://www.itu.int/ti/industryoverview. 1999

[IYU84] IKEGAMI, F. ; YOSHIDA, S. ; UMEHIRA, M.: Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 32 (1984), August, Nr. 8, S. 822–829

[JIL97] JOYCE, Robert M. ; IBBETSON, Luke J. ; LOPES, Luis B.: GSM Data Service Performance Improvement through the Use of Slow Frequency Hopping. In: *Proceedings of the 47th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 97)* IEEE, 1997, S. 1872–1876

[Kec00] KECK, Dirk: *Erkennung von Wechselwirkungen zwischen Mehrwertdiensten durch Analyse ihrer Konfigurationen und Protokollabläufe*, IND, Universität Stuttgart, Dissertation, 2000

[KGW+99] KIM, Seong-Cheol ; GUARINO, Bernard J. J. ; WILLIS, Thomas M. I. ; ERCEG, Vinko ; FORTUNE, Steven J. ; VALENZUELA, Reinaldo A. ; THOMAS, Louis W. ; LING, Jonathan ; MOORE, J. D.: Radio Propagation Measurements and Prediction using Three-dimensional Ray Tracing in Urban Environments at 908 MHz and 1.9 GHz. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* VT-48 (1999), Nr. 3, S. 931–945

[Küh98] KÜHN, P. J. *Vorlesungsskript Technische Informatik III.* IND, Universität Stuttgart. 1998

[Küh00] KÜHN, P. J. *Vorlesungsskript Communication Networks I.* IND, Universität Stuttgart. 2000

[Küh01] KÜHN, P. J. *Vorlesungsskript Technische Informatik II.* IND, Universität Stuttgart. 2001

[KL94] KOCHER, H. ; LANG, M.: An Object-Oriented Library for Simulation of Complex Hierarchical Systems. In: *Proceedings of the Object-Oriented Simulation Conference (OOS '94)*, 1994, S. 145–152

[KMM00] KALDEN, Roger ; MEIRICK, Ingo ; MEYER, Michael: Wireless Internet Access Based on GPRS. In: *IEEE Personal Communications* 7 (2000), April, Nr. 2, S. 8–18

[Koc94] KOCHER, Hartmut: *Entwurf und Implementierung einer Simulationsbibliothek unter Anwendung objektorientierter Methoden*, IND, Universität Stuttgart, Dissertation, 1994. – 59. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

[Kus98] KUSHIDA, Takayuki: The Traffic Measurement and the Empirical Studies for the Internet. In: *IEEE Global Telecommunications Conference 98, GLOBECOM*, 1998

[Lap94] LAPIDOTH, Amos: The Performance of Convolutional Codes on the Block Erasure Channel Using Various Finite Interleaving Techniques. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 40 (1994), September, Nr. 5, S. 1459–1573

[LB99] LABIOD, Houda ; BOUTABA, Raouf: Performance Evaluation of Block Error-Correcting Codes for High Speed Wireless Communication Links. In: *Proceedings of Interoperable Communication Networks, ICON* 2 (1999), Nr. 2-4, S. 171–187

[LCLZ00] LE, Khiem ; CLANTON, Chris ; LIU, Zhigang ; ZHENG, Haihong: Efficient and Robust Header Compression for Real-Time Services. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '00)* IEEE, 2000

[LF00] LANG, Tanja ; FLOREANI, Daniel: Performance Evaluation of Different TCP Error Detection and Congestion Control Strategies over a Wireless Link. In: *ACM Performance Evaluation Review* 28 (2000), Dezember, Nr. 3, S. 30–38

[Lip94] LIPINSKI, Klaus (Hrsg.): *Lexikon der Datenkommunikation*. Bergheim : DATACOM-Verlag, 1994

[Liu97] LIU, Chunlei. *Multimedia Over IP: RSVP, RTP, RTCP, RTSP*. http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-97/ip_multimedia/index.htm. 1997

[LK91] LAW, A. L. ; KELTON, W. D.: *Simulation Modeling and Analysis*. Second Edition. New York : McGraw-Hill, 1991

[LP00] LAKANIEMI, Ari ; PARANTAINEN, J.: On Voice Quality of IP Voice over GPRS. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, IMCE 2000*, 2000, S. 751–754

[LT01a] LINDEMANN, Christoph ; THÜMMLER, Axel: Evaluating the GPRS Radio Interface for Different Quality of Service Profiles. In: *Proceedings of the 12th GI/ITG Fachtagung 'Kommunikation in verteilten Systemen*, 2001

[LT01b] LINDEMANN, Christoph ; THÜMMLER, Axel: Performance Analysis of the General Packet Radio Service. In: *Proceedings of the 21th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2001

[LU86] LEE, H. H. ; UN, C. K.: A Study of On-Off Characteristics of Conversational Speech. In: *IEEE Transactions on Communications* COM-34 (1986), Juni, Nr. 6, S. 630–637

[LYWW99] LI, Bo ; YIN, Li ; WONG, K. Y. M. ; WU, Si: An Efficient and Adaptive Bandwidth Allocation Scheme for Mobile Wireless Networks Based on On-line Local Parameter Estimations. In: *Proceedings of the PIMRC 99*, 1999, S. 1258–1262

[MAO92] MEIER-HELLSTERN, Kathleen S. ; ALONSO, Eduardo ; O'NEIL, Douglas R.: The Use of SS7 and GSM to Support High Density Personal Communications. In: *Proceedings of the 3rd WINLAB Workshop on 3rd Generation Wireless Information Networks*, 1992

[Mar] MARKTFORSCHUNGSUNTERNEHMEN IDC. *Studie*. http://www.idc.com

[May97] MAYER, William-J.: Congestion Control Interactions with Multiple User Parts in SS7. In: *Proceedings of the 15th International Teletraffic Congress (ITC'97)*, 1997, S. 1189–1198

[May00] MAYER, Silvan: Impact of GPRS on the Signalling of a GSM-based Network. In: *Proceedings of the 1st Polish-German Teletraffic Symposium (PGTS 2000)*, 2000, S. 131–138

[MB95] MCCREE, Alan V. ; BARNWELL III, Thomas P.: A Mixed Excitation LPC Vocoder Model for Low Bit Rate Speech Coding. In: *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 3 (1995), Juli, Nr. 4, S. 242–250

[Mey99] MEYER, Michael: TCP Performance over GPRS. In: *Proceedings of the IEEE 1st Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99)*, 1999, S. 1248–1252

[MK98] MAYER, Silvan ; KABATNIK, M. *Erweiterung des SS7-Protokolls zur Übertragung von Meldungen über TCP/IP*. 26. Interner Bericht, IND, Universität Stuttgart. 1998

[ML97a] MCKNIGHT, Lee W. ; LEIDA, Brett A.: Internet Telephony: Costs, Pricing, and Policy. In: *Proceedings of the Telecommunications Policy Research Conference*, 1997

[MMZ94] MANFIELD, David-R. ; MILLSTEED, Gregory K. ; ZUKERMAN, Moshe: Performance Analysis of SS7 Congestion Control under Sustained Overload. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 12 (1994), April, Nr. 3, S. 405–414

[Moi00] MOIGNARD, Celine: *Performance Evaluation of Header Compression Schemes for IP based Wireless Access System*, IND, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Juni 2000

[NNP00] NESKOVIC, Aleksandar ; NESKOVIC, Natasa ; PAUNOVIC, George: Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment. In: *IEEE Communications Surveys* 31 (2000), Drittes Quartal, Nr. 1, S. 2–12

[Nol99] NOLL, Peter: Speech and Audio Coding for Multimedia Communications. In: *Proceedings of the International COST 254 Workshop on Intelligent Communication Technologies and Applications*, 1999

[ONS95] HÅKAN OLOFSSON ; NÄSLUND, Jonas ; SKÖLD, Johan: Interference Diversity Gain in Frequency Hopping GSM. In: *Proceedings of the 45th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 95)* IEEE, 1995, S. 102–106

[OOKF68] OKUMURA, Y. ; OHMORI, E. ; KAWANO, T. ; FUKUDA, K.: Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Service. In: *Review of the Electrical Communication Laboratory* 16 (1968), Nr. 9/10, S. 825–873

[Pau98] PAULER, Wolfgang: Telefonieren über IP. In: *Funkschau* (1998), Dezember, Nr. 26, S. 20–25

[PDLZ99] PERKINS, Mark E. ; DVORAK, Charles A. ; LERICH, Barry H. ; ZEBARTH, Joseph A.: Speech Transmission Performance Planning in Hybrid IP/SCN Networks. In: *IEEE Communications Magazine* 6 (1999), Juni, Nr. 37, S. 126–131

[PH99] PARANTAINEN, Janne ; HAMITI, Shkumbin: Delay Analysis for IP Speech over GPRS. In: *Proceedings of the 49th Fall IEEE Vehicular Technology Conference (VTC99 Fall)* (1999), September, S. 829–833

[Pha] PHAMDO, Nam. *Data Compression Download Source Codes and Papers*. http://www.data-compression.com/download.html. Department of Electrical and Computer Engineering, State University of New York

[PL95] PAHLAVAN, Kaveh ; LEVESQUE, Allen H.: *Wireless Information Networks*. John Wiley & Sons, Inc., 1995 (Wiley series in telecommunications and signal processing)

[PM00a] PLESSL, Christian ; MAURER, Simon: *Hardware/Software Codesign in Speech Compression Applications* , ETH Zürich, Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze, Semesterarbeit SA-2000.14, Februar 2000

[PM00b] PRIGGOURIS, G. ; MERAKOS, S. Hadjiefthymiades L.: Supporting IP QoS in the General Packet Radio Service. In: *IEEE Networks* 14 (2000), Spetember/Oktober, Nr. 5, S. 8–17

[PM01] PEISA, Janne ; MEYER, Michael: Analytical Model for TCP File Transfers over UMTS. In: *Proceedings of the International Conference on Third Generation Wireless*, 2001

[PMHG95] POLLINI, G. P. ; MEIER-HELLSTERN, K. S. ; GOODMAN, D. J.: Signalling Traffic Volume Generated by Mobile and Personal Communications. In: *IEEE Communications Magazine* 33 (1995), Juni, Nr. 6, S. 60–65

[Puu99] PUUSKARI, Mikko: Quality of Service Framework in GPRS and Evolution Towards UMTS. In: *Proceedings of the 3rd European Personal Mobile Communications Conference*, 1999

[QCC+00a] QIU, Xiaoxin ; CHAWLA, Kapil ; CHANG, Fi F. ; CHUANG, Justin ; SOLLENBERGER, Nelson ; WHITEHEAD, Jim: An Enhanced RLC/MAC Design for Supporting Integrated Services over EGPRS. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '00)* IEEE, 2000

[QCC+00b] QIU, Xiaoxin ; CHAWLA, Kapil ; CHANG, Li F. ; CHUANG, Justin ; SOLLENBERGER, Nelson ; WHITEHEAD, Jim: RLC/MAC Design Alternatives for Supporting Integrated Services over EGPRS. In: *IEEE Personal Communications* 7 (2000), April, Nr. 2, S. 20–33

[QGF99] QUESETH, Olav ; GESSLER, Fredrik ; FRODIGH, Magnus: Algorithms for Link Adaptation in GPRS. In: *Proceedings of the 49th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC99)* IEEE, 1999

[Que97] QUERBACH, Thorsten: *Internet Telefonie*, Universität Koblenz-Landau, Institut für Wirtschaftsinformatik, Fachbereich Informatik, Diplomarbeit, 1997

[Rab00] RABE, Udo: *Implementierung eines sicheren IP-Tunnels für SS7-Signalisiernachrichten*, IND, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, August 2000

[Rei99] REID, Mark: Multimedia Conferencing over ISDN and IP Networks using ITU-T H-series Recommendations: Architecture, Control and Coordination. In: *Computer Networks* 31 (1999), S. 225–235

[RLGPC+99] REYES-LECUONA, A. ; GONZÁLEZ-PARADA, E. ; CASILARI, E. ; CASASOLA, J. C. ; DÍAZ-ESTRELLA, A.: A Page-Oriented WWW Traffic Model for Wireless System

Simulations. In: *Proceedings of the 16th International Teletraffic Congress (ITC'99)*, 1999, S. 1271–1280

[RLS99] REICHL, Peter ; LEINEN, Simon ; STILLER, Burkhard: A Practical Review of Pricing and Cost Recovery for Internet Services. In: *Proceedings of the 2nd Internet Economics Workshop, IEW 99*, 1999

[Sau90] SAUER, Klaus: *Integration von Sprach- und Datenkommunikation in lokalen Netzen*, IND, Universität Stuttgart, Dissertation, 1990. – 50. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

[SBGP99] STILLER, Burkhard ; BRAUN, Torsten ; GÜNTER, Manuel ; PLATTNER, Bernhard: The CATI Project: Charging and Accounting Technology for the Internet. In: *Proceedings of the 5th European Conference on Multimedia Applications, Services, and Techniques, ECMAST 99*, 1999

[Sea96] SEARS, Andrew. *The Effect of Internet Telephony on the Long Distance Voice Market*. Internet Telephony Consortium, MIT, http://itel.mit.edu. April 1996

[SL00] SCHIEDER, A. ; LEY, T.: Enhanced Voice over IP Support in GPRS and EGPRS. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '00)* IEEE, 2000, S. 803 –808

[SM01] STUCKMANN, Peter ; MÜLLER, Frank: Quality of Service Management in GPRS Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Networking (ICN '01)* IEEE, 2001

[Sor98] SORGER, U. *Mobile Kommunikation*. http://www.nesi.e-technik.tu-darmstadt.de/uli/L/laufhtml.html. 1998

[Spe] *Speech Example of the DoD Digital Voice Processing Consortium*. http://www.plh.af.mil/ddvpc/celp.htm

[SR99] SCHULZRINNE, Henning ; ROSENBERG, Jonathan: Internet Telephony: Architecture and Protocols – an IETF Perspective. In: *Computer Networks* 31 (1999), April, Nr. 4, S. 237–255

[SR00] SUBBIAH, Barani ; RAIVIO, Yrjo: Transport Architecture Evolution in UMTS/IMT-2000 Cellular Networks. In: *International Journal of Communication Systems* 13 (2000), August, Nr. 5, S. 371–385

[Stü99b] STÜBER, Gordon L.: *Principles of Mobile Communication*. Kluwer Academic Publishers, 1996 (3rd Print 1999)

[Ste53] STEINITZ, W. *Grafik: Schematischer Durchschnitt durch die Sprachorgane*. http://www.uni-potsdam.de/u/slavistik/vc/dalchow/phonetik/skripte/sprechorgane.htm. 1953

[Teca] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, FAKULTÄT IV, ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIK. *GSM 06.10 lossy speech compression*. http://kbs.cs.tu-berlin.de/~jutta/toast.html

[TO99] TOGA, James ; OTT, Jörg: ITU-T Standardization Activities for Interactive Multimedia Communications on Packet-based Networks: H.323 and Related Recommendations. In: *Computer Networks* 31 (1999), April, Nr. 4, S. 205–223

[TSM97] TUNNICLIFFE, G. W. ; SATHYENDRAN, A. ; MURCH, A. R.: Performance Improvement in GSM Networks due to Slow Frequency Hopping. In: *Proceedings of the 47th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 97)*, 1997, S. 1857–1861

[Tur00] TURINA, Dalibor: Challenges of Real-Time IP Support in GSM/EDGE Radio Access Network. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '00)* IEEE, 2000, S. 8–12

[TWN01] TANGEMANN, M. ; WEBER, A. ; NIKOLAI, D.: Introducing 3rd Generation Mobile Communication Services on Evolved GSM Platforms. In: *AEUe International Magazine* (2001), Februar

[Unt] UNTERNEHMENSBERATUNG FROST & SULLIVAN. *Studie*. http://www.frost.com

[Var98] VARY, Peter: Sprachcodec in GSM - Mobilfunknetzen. In: *Funkschau* (1998), Nr. 7, S. 50–53

[Vol98] VOLMER, Marc: *Leistungsuntersuchung paketierter Sprachkommunikation im Internet*, Universität Stuttgart, IND, Nr 1575, Studienarbeit, 1998

[Wal98b] WALKE, Bernhard: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. Bd. 1, Grundlagen, GSM, UMTS und andere zellulare Mobilfunknetze. B. G. Teubner, Stuttgart, 1998

[WB88] WALFISCH, J. ; BERTONI, H. L.: A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 36 (1988), Dezember, Nr. 12, S. 1788–1796

[WMGL98] WANG, Jin ; MCCANN, Peter J. ; GORREPATI, Patvardhana B. ; LIU, Chung-Zin: Wireless Voice-over-IP and Implications for Third-Generation Network Design. In: *Bell Labs Technical Journal* 3 (1998), Juli/September, Nr. 3, S. 79–97

[Wüt98] WÜTSCHNER, Georg: *Grundlegende Funktionsweise von LPC (Linear Predictive Coding)*, Universität der Bundeswehr, München, Institut für Nachrichtentechnik, Studienarbeit, 1998

[YY00] YEUNG, Kwan-Lawrence ; YUM, Tak-Shing P.: Performance Analysis of Borrowing with Directional Carrier Locking Strategy in Cellular Radio Systems. In: *IEICE Transactions on Communications* E83-B (2000), Oktober, Nr. 10, S. 2394–2401

[Zie99] ZIEMANN, Peter: Signalisierungsinformationen in IP-Netzen. In: *Funkschau* (1999), August, Nr. 17, S. 78–80

[ZK99] ZHANG, Qinqing ; KASSAM, Saleem A.: Finite-State Markov Model for Rayleigh Fading Channels. In: *IEEE Transactions on Communications* 47 (1999), November, Nr. 11, S. 1686–1692

[ZK00] ZNATI, Taieb F. ; KIM, Sung J.: Adaptive Channel Management Schemes for Wireless Communication Systems. In: *International Journal of Communication Systems* 13 (2000), September, Nr. 6, S. 435–460

Normen, Empfehlungen und vergleichbare Dokumente

[FS1017] Department of Defence, USA: *Specifications for the Analog to Digital Conversion of Voice by 2.400 Bit/Second Mixed Excitation Linear Prediction*. Draft for Federal Standard. Mai 1998

[G113] ITU: *Transmission Systems and Media, General Characteristics of International Telephone Connections and International Telephone Circuits, Transmission Impairments*. ITU-T Recommendation G.113. Februar 1996

[G114] ITU: *One-way Transmission Time*. ITU-T Recommendation G.114. Mai 2000. – Prepublished Recommendation

[G728] ITU: *General Aspects of Digital Transmission Systems; Terminal Equipments: Coding of Speech at 16 kbit/s Using Low-Delay Code Excited Linear Prediction*. ITU-T Recommendation G.728. September 1992

[GSM0330] ETSI: *Technical Report Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Network Planning Aspects (GSM 03.30, Version 8.3.0)*. TR 101 362. April 2000

[GSM0360c] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); (GSM 03.60, Version 7.4.1)*. EN 301 344. September 2000

[GSM0408] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Mobile Radio Interface Layer 3 Specification (GSM 04.08, Version 7.10.0)*. TS 100 940. Dezember 2000

[GSM0460] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Mobile Station (MS) - Base Station System (BSS) Interface; Radio Link Control/Medium Access Control (RLC/MAC) Protocol (GSM 04.60, Version 8.4.0)*. EN 301 349. Mai 2000

[GSM0464] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Mobile Station - Serving GPRS Support Node (MS-SGSN); Logical Link Control (LLC) (GSM 04.64, Version 8.3.0)*. TS 101 351. März 2000

[GSM0465] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+)(GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); General Packet Radio Service (GPRS); Mobile Station (MS) - Serving GPRS Support Node (SGSN); Subnetwork Dependent Convergence Protocol (SNDCP) (GSM 04.65, Version 3.1.0)*. TS 124 065. Januar 2000

[GSM0501] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase2+); Physical Layer on the Radio Path; General Description (GSM 05.01 Version 8.3.0)*. TS 100 573 V8.3.0. April 2000

[GSM0502c] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Multiplexing and Multiple Access on the Radio Path (GSM 05.02, Version 8.7.0)*. TS 100 908. November 2000

[GSM0610] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase2+); Full Rate Speech; Transcoding (TS 06.10, Version 8.2.0)*. TS 100 961. Juni 2001

[GSM0816] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Base Station System (BSS) - Serving GPRS Support Node (SGSN) Interface; Network Service (GSM 08.16, Version 8.0.0)*. TS 101 299. Juni 2000

[GSM0818] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Base Station System (BSS) - Serving GPRS Support Node (SGSN); BSS GPRS Protocol (BSSGP) (GSM 08.18, Version 8.6.0).* TS 101 343. Januar 2001

[GSM0902] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Mobile Application Part (MAP) Specification (GSM 09.02, Version 7.7.0).* TS 100 974. Dezember 2000

[GSM0960] ETSI: *Digital Cellular Telecommunications System (Phase2+); General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) Across the Gn and Gp Interface (GSM 09.60 Version 7.5.1).* EN 301 347. Dezember 2000

[GSM1215] ETSI: *Digital Cellulary Telecommunications System (Phase2+); General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Charging; (GSM 12.15, Version 7.6.0).* TS 101 393. November 2000

[H323] ITU: *Packet-based Multimedia Communications Systems*. ITU-T Recommendation H.323. Febuar 1998

[I120] ITU: *Integrated Services Digital Networks (ISDNs), General Structure*. ITU-T Recommendation I.120. März 1993

[ITG97] ITG: *Entwurf für die ITG-Empfehlung 5.2-03: Begriffe der Nachrichtenverkehrstheorie, Begriffswerk des ITG-Fachausschusses 5.2.* Oktober 1997

[MPEG4] ISO: *Overview of the MPEG-4 Standard*. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11. http://www.cselt.it/mpeg/standards/mpeg-4/mpeg-4.htm. März 2001

[Q2111] ITU: *B-ISDN ATM Adaptation Layer Service Specific Connection Oriented Protocol in a Multi-link and Connectionless Environment (SSCOPMCE).* ITU-T Recommendation Q.2111. Dezember 1999. – Prepublished Recommendation

[Q701] ITU: *Functional Description of the Message Transfer Part (MTP) of Signalling System No. 7.* ITU-T Recommendation Q.701. März 1993

[Q711] ITU: *Signalling System No. 7 - Functional Description of the Signalling Connection Control Part*. ITU-T Recommendation Q.711. Juli 1997

[Q756] ITU: *Signalling System No. 7 - Guidebook to Operations, Maintenance and Administration Part (OMAP).* ITU-T Recommendation Q.756. Juni 1997

[Q764] ITU: *Integrated Services Digital Network User Part (ISUP).* ITU-T Recommendation Q.764. November 1988

[Q771] ITU: *Signalling System No. 7 - Functional Description of Transaction Capabilities*. ITU-T Recommendation Q.771. Juni 1997

[RFC1144] IETF: *Compressing TCP/IP Headers for Low-Speed Serial Links*. RFC1144. Februar 1990. – http://www.ietf.org/rfc/rfc1144

[RFC1633] IETF: *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*. RFC1633. Juni 1994. – http://www.ietf.org/rfc/rfc1633

[RFC1889] IETF: *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*. RFC1889. Januar 1996. – http://www.ietf.org/rfc/rfc1889

[RFC1945] IETF: *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.0*. RFC1945. Mai 1996. – http://www.ietf.org/rfc/rfc1945.txt

[RFC2003] IETF: *IP Encapsulation within IP*. RFC2003. Oktober 1996. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2003.txt

[RFC2475] IETF: *An Architecture for Differentiated Services*. RFC2475. Dezember 1998. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2475

[RFC2508] IETF: *Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links*. RFC2508. Februar 1999. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2508

[RFC2543] IETF: *SIP: Session Initiation Protocol*. RFC2543. März 1999. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2543

[RFC2597] IETF: *Assured Forwarding PHB Group*. RFC2597. Juni 1999. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2597

[RFC2598] IETF: *An Expedited Forwarding PHB*. RFC2598. Juni 1999. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2598

[RFC2719] IETF: *Framework Architecture for Signaling Transport*. RFC2719. Oktober 1999. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2719

[RFC2960] IETF: *Stream Control Transmission Protocol*. RFC2960. Oktober 2000. – http://www.ietf.org/rfc/rfc2960

[RFC768] IETF: *User Datagram Protocol*. RFC768, STD 6. August 1980. – http://www.ietf.org/rfc/rfc768

[RFC791] IETF: *Internet Protocol*. RFC791, STD 5. September 1981. – http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt

[RFC793] IETF: *Transmission Control Protocol*. RFC793, STD 7. September 1981. – http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt

[RFC959] IETF: *File Transfer Protocol (FTP)*. RFC959, STD 9. Oktober 1985. – http://www.ietf.org/rfc/rfc959.txt

[ROCCO] IETF: *ROCCO - A Header Compression Framework and Realized Schemes*. März 2000. – http://www.dmn.tzi.org/ietf/rohc/ROCCO_IETF47.pdf

[ROHC] IETF: *Internet Draft: Robust Header Compression (ROHC)*. November 2000. – http://www.ietf.org/ids.by.wg/rohc.html

[T1606] ANSI: *Frame Relay Bearer Service - Architecture Framework and Service description*. ANSI T1.606. 1990

[X25] ITU: *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*. ITU-T Recommendation X.25. Oktober 1996