

Adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen

Torsten Langguth

**Lehrstuhl für Integrierte Systeme
der Technischen Universität München**

Adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen

Torsten Langguth

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rigoll

Prüfer der Dissertation:

1. Univ-Prof. Dr.-Ing. Ingolf Ruge, em.

2. Univ-Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer

Die Dissertation wurde am 8.12.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 2.11.2005 angenommen.

Danksagung

Diese Arbeit ist im Laufe meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik entstanden. In dieser Zeit konnte ich bei vielfältigen Aufgaben in Forschung und Entwicklung wertvolle Erfahrungen in der Planung, Leitung und Durchführung von Industrieprojekten sammeln.

Mein erster Dank geht an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingolf Ruge, der mir die Möglichkeit zur Arbeit auf dem hochinteressanten Gebiet der adaptiven Dienstgütesteuerung gab. Durch seine Förderung und wertvollen Anregungen hat er diese Arbeit maßgeblich unterstützt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und sein großes Interesse an der Arbeit.

Meine besondere Anerkennung für die Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit an der Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik gilt Herrn Dr.-Ing. Rudi Knorr. Ein Dankeschön geht auch an alle Kolleginnen und Kollegen für die offene und kreative Zusammenarbeit in den verschiedenen Projekten.

Die kritische Durchsicht meines Manuskriptes durch Birgit Langguth, Dr.-Ing. Stefan Leischner, Markus Zeller und Dr.-Ing. Rudi Knorr war von großer Bedeutung für die Fertigstellung dieser Arbeit.

Ausdrücklich möchte ich auch Keyvan Ebrahimpour, Thomas Geigl, Erik Oswald und Dr.-Ing. Robert Klinski erwähnen, die mir während der Entstehung dieser Arbeit als wertvolle Gesprächspartner zur Verfügung standen.

Meine besondere Wertschätzung gilt meiner Frau Birgit Langguth für die vielfältige Unterstützung, stetige Motivation und das mir entgegengebrachte Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit. Meinen beiden Söhnen Moritz und Felix danke ich für die unkonventionellen Lösungsansätze und die emotionale Unterstützung bei ihrer Fertigstellung. Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Heidi und Siegfried Langguth bedanken. Sie haben den Grundstein gelegt.

München, im Dezember 2004

Torsten Langguth

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die adaptive Dienstgütesteuerung bei der Übertragung im orthogonalen Frequenzmultiplex (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) mit dem Ziel der Steigerung der Leistungsfähigkeit bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen.

Die Nachfrage nach hohen Datenraten hat in den letzten Jahren unter anderem zur Verwendung von bisher ungenutzten Kapazitätsressourcen in Teilnehmeranschlussnetzen auf der Basis von bereits verlegten Kupferdoppeladern mittels Digital Subscriber Line Technologien (xDSL¹) geführt. Bei den weit verbreiteten xDSL-Übertragungssystemen spielt das OFDM-Verfahren eine besondere Rolle, da es durch die Aufteilung des Frequenzbandes in mehrere Unterträger eine außerordentlich effiziente Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite ermöglicht. Trotzdem stellen die leitungsgebundenen Mehrträgersysteme weiterhin einen Engpass in Bezug auf die verfügbare Datenrate dar. Mannigfaltige Forschungsaktivitäten sind deshalb bestrebt, die Datenrate weiter zu erhöhen. Durch die Verwendung adaptiver Modulationsverfahren erlaubt die OFDM-Übertragung die unterbrechungsfreie Anpassung der Übertragungsparameter im laufenden Betrieb als Reaktion auf veränderliche Eigenschaften, wie z. B. die Nebensprechstörungen. Bei der Ressourcenzuordnung der gegenwärtigen Übertragungsverfahren werden allerdings ausschließlich die veränderlichen Übertragungseigenschaften betrachtet. Die ebenfalls veränderlichen Verkehrscharakteristiken in Form der Dienstgüteanforderungen der Teilnehmer werden nicht in die Ressourcenzuweisung integriert. Statt dessen werden allgemeine Annahmen über die Art und Menge des erzeugten Verkehrs verwendet. Der dadurch erzeugte Leerverkehr führt zu einer Erhöhung der Störpegel, welche die ohnehin begrenzte Übertragungskapazität bei den leitungsgebundenen Mehrträgersystemen zusätzlich reduziert.

Diese Problemstellung wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. Es wird ein Verfahren entwickelt und untersucht, das durch die Anpassung der Dienstgüte an die veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften eine verbesserte Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ermöglicht. Als Zielkriterien dienen neben der Erhöhung der Datenrate und Reichweite auch die Gewährung von Fairness zwischen Teilnehmern, die an Leitungen unterschiedlicher Länge angeschlossen sind.

Zur Lösung der Problematik wird ein neuartiges Konzept zur adaptiven Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen vorgeschlagen. Dieses erlaubt die gemeinsame Anpassung der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften und die schnelle Reaktion auf deren Veränderungen. Die den Teilnehmern angebotene Datenrate stellt den im Anpassungsprozess bestimmten Parameter dar. Bei diesem Verfahren können einerseits die verwendeten Übertragungsparameter an die Art und Menge des erzeugten Verkehrs und dessen Dienstgüteanforderungen angepasst werden. Andererseits kann sich die dem Teilnehmer bereitgestellte Dienstgüte an die aktuellen Übertragungseigenschaften adjustieren. So wird beispielsweise zu Zeiten niedrigerer Netzlast eine höhere Dienstgüte garantiert als während der Hauptgeschäftszeit. Darüber hinaus unterstützt das Verfahren die Abstimmung der verwendeten Dienstgüte in den Teilnehmeranschluss- und Zugangsnetzen. Durch die Adaption und die übergreifende Dienstgüteabstimmung wird eine bessere Ausnutzung der begrenzten

1. Der Platzhalter x spezifiziert das betrachtete DSL-Verfahren.

Ressourcen erreicht. Dies führt letztlich zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Übertragung. Für die Ausgestaltung der adaptiven Dienstgütesteuerung sind zwei Zielstellungen zu untersuchen, die Berechnung optimierter Übertragungsparameter auf der Basis der veränderlichen Eigenschaften und die schnelle Benachrichtigung der beteiligten Komponenten über zu verändernde Parameter

Die neuartige adaptive Steuerung und gemeinsame Verwaltung der dynamischen Verkehrs- und Übertragungseigenschaften erfolgt in einer zentralen Verwaltungsinstanz, dem Dienstgüte- und Datenratenmanagement. Dieses berechnet auf Basis der veränderlichen Eigenschaften die pro Teilnehmer bereitgestellte Dienstgüte, Datenrate und Bitbelegung. Dieser Ansatz erweitert das dynamische Spektrummanagement um die gemeinsame Optimierung der veränderlichen Verkehrs- und Übertragungseigenschaften. Für die dienstgüteerweiterte Bitzuweisung wird ein Greedy-Verfahren verwendet, dessen schrittweise lokale Entscheidung zu einer globalen Optimierung führt. Die lokal optimale Lösung im Entscheidungsraum stellen die Leitung und der Unterträger dar, welche die geringsten Kosten in Form der benötigten Sendeleistung verursachen. In dieser Arbeit werden drei Kostenfunktionen entwickelt und untersucht, welche die Dienstgüte und Sendeleistung in unterschiedlicher Granularität beachten. Durch die in dieser Arbeit erstmals erfolgte Integration der Dienstgütebereitstellung in die Bitzuweisung wird am Beispiel eines Very-high-bit-rate DSL (VDSL) Systems gezeigt, dass die garantierte Datenrate für alle Teilnehmer um etwa 80% und die Reichweite um ca. 30% im Vergleich zu den bekannten Verfahren gesteigert werden. Die faire Ausgestaltung der Kostenfunktion vermeidet die Benachteiligung von Teilnehmer, die an langen Leitungen angeschlossen sind. Darüber hinaus führt die dynamische Anpassung der Datenrate an die Verkehrsanforderungen zu einer Reduktion der Sendeleistung.

Die bidirektionale Anpassung bei der adaptiven Dienstgütesteuerung erfordert den gemeinsamen Zugriff auf Parameter, die im Open System Interconnection Referenzmodell in unterschiedlichen Protokollschichten beheimatet sind. Zur Gewährleistung des gemeinsamen Informationszugriffs aus unterschiedlichen Protokollschichten wird ein Cross-Layer-Verfahren vorgeschlagen. Dieses ermöglicht die gemeinsame Kontrolle der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften durch die Übertragungs- und Sicherungsschicht. Die dynamische Anpassung der Übertragungsparameter erfordert sowohl einen horizontalen externen Informationsaustausch zwischen den beteiligten Netzknoten als auch eine vertikale interne Benachrichtigung der verschiedenen Protokollschichten. Diese Abstimmung sichert die synchrone Übertragung und korrekte Veränderung der Parameter im laufenden Betrieb. Durch die verwendete Inband-Signalisierung auf Basis von Paketen der Sicherungsschicht wird die gesamte Nutzdatenrate für den Austausch der Kontrollinformationen verwendet. Dadurch verkürzt sich die Signalisierungsdauer im Vergleich mit dem VDSL-Standard deutlich (< 100 Millisekunden) und die Reaktion auf Veränderungen erfolgt schneller als bei den bekannten xDSL-Verfahren.

Anhand von Netzprozessoren werden Realisierungsaspekte sowohl des Dienstgüte- und Datenratenmanagements als auch des Cross-Layer-Verfahrens für die Signalisierung diskutiert. Es zeigt sich, dass durch die Aufteilung der Funktionalität auf verschiedene Hardware-Blöcke und Ko-Prozessoren eine modulare und skalierbare Realisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung erreicht wird.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag für ein Verfahren zur adaptiven Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen, welches durch die gemeinsame Optimierung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften zu einer deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Übertragung führt.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungen und Symbole	XIII
 1. Einleitung	 1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Adaptive Dienstgütesteuering bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen	5
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit	7
 2. Systemgrundlagen für die Übertragung im orthogonalen Frequenzmultiplex	 9
2.1 Einführung	9
2.2 Grundlagen der OFDM-Übertragung	10
2.2.1 Systemstruktur der OFDM-Übertragung	10
2.3 Leitungsgebundene OFDM-Systeme	14
2.3.1 Übertragungseigenschaften von Teilnehmeranschlussleitungen	14
2.3.2 Systemaspekte der leitungsgebundenen Übertragung	15
2.3.3 Störumgebungen bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen	16
2.4 Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften	18
2.5 Bitzuweisungsalgorithmen	19
2.5.1 Bitzuweisung mit Einzelnutzerbetrachtung	20
2.5.2 Bitzuweisung mit Mehrnutzerbetrachtung	22
2.6 Adaptive Modulationsverfahren	26
2.7 Spektrummanagement	28
2.8 Zusammenfassung	29
 3. Grundlagen der Dienstgüterebereitstellung	 31
3.1 Einführung	31
3.2 Dienstgütemechanismen	32
3.2.1 Endgeräte	32
3.2.2 Netzgeräte	32
3.2.3 Veränderlichkeit der Verkehrscharakteristiken	37
3.3 Dienstgütearchitekturen	38
3.3.1 Asynchronous Transfer Mode	39
3.3.2 Integrated Services	39
3.3.3 Differentiated Services	40
3.3.4 Dienstgüte bei Ethernet	41
3.4 Bewertung der Architekturen	44
3.5 Cross-Layer-Entwurfsverfahren	46
3.6 Zusammenfassung	47

4. Konzeptvorschlag für die adaptive Dienstgütesteuerung	49
4.1 Einführung	49
4.2 Dienstgüterebereitstellung bei Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken	50
4.3 Adaptive Dienstgütesteuerung	51
4.3.1 Realisierungskonzept der adaptiven Dienstgütesteuerung	55
4.3.2 Systemmodell der adaptiven Dienstgütesteuerung	58
4.3.3 Cross-Layer-Entwurfsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung	61
4.3.4 Gemeinsame Steuerung von Übertragung und Dienstgüte	63
4.4 Zusammenfassung	64
5. Konzeptvorschlag eines Verfahrens zum Dienstgüte- und Datenratenmanagement	65
5.1 Einführung	65
5.2 Dienstgütereerweiterte Bitzuweisung	66
5.2.1 Optimierung durch Greedy-Verfahren	68
5.2.2 Greedy-Verfahren für das Dienstgüte- und Datenratenmanagement	70
5.2.3 Konkretisierung der Kostenfunktionen	72
5.2.3.1 Sendeleistungsminimierung bei Datenratenanforderungen pro Teilnehmer	73
5.2.3.2 Sendeleistungsminimierung bei Datenratenanforderungen pro Teilnehmer und Dienstklasse	75
5.2.3.3 Faire Bitzuweisung mit Datenratenanforderungen pro Teilnehmer und Dienstklasse	77
5.3 Ergebnisse der Leistungsbewertung	80
5.3.1 Simulationsmodell und Vergleichsverfahren	80
5.3.2 Untersuchung der Datenrate und Fairness	82
5.3.3 Untersuchung der Reichweite	84
5.3.4 Untersuchung der Sendeleistung	88
5.4 Zusammenfassung	90
6. Konzeptvorschlag eines Verfahrens zur Signalisierung	93
6.1 Einführung	93
6.2 Cross-Layer-Entwurf	93
6.2.1 Horizontale Signalisierung	94
6.2.2 Vertikale Signalisierung	94
6.3 Signalisierungsprotokoll	95
6.3.1 Formale Beschreibungstechniken	95
6.3.2 Protokollentwurf	96
6.3.2.1 Signalisierung	97
6.3.2.2 Austausch der Schätzwerte	99
6.3.2.3 Upstream-Signalisierung	101
6.3.2.4 Downstream-Signalisierung	103
6.3.3 Protokollvalidierung	104
6.4 Ergebnisse der Leistungsbewertung	105
6.4.1 Simulationsmodell und Vergleichsverfahren	106
6.4.2 Signalisierungsverzögerung	106
6.4.3 Dauer der gesamten Signalisierung	107
6.5 Zusammenfassung	109

7. Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung	111
7.1 Einführung	111
7.2 Grundlagen der Netzprozessoren	113
7.3 Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung im C-5 DCP	115
7.4 Aspekte der AQOS-Systemdimensionierung	119
7.5 Aufwandsabschätzung des Dienstgüte- und Datenratenmanagements	120
7.6 Zusammenfassung	121
8. Zusammenfassung und Ausblick	123
9. Literaturverzeichnis	131
Anhang A - Entwurf des Signalisierungsprotokoll	A-1
A1. Gesamtsystem	A-1
A2. DSLAM (LT)	A-2
A3. Modem (CPE)	A-18
A4. Beispiel einer Nachrichtensequenz	A-26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zunahme der im Internet erreichbaren Rechner [117]	1
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Netzebenen	2
Abbildung 3: Marktverteilung breitbandiger Teilnehmeranschlüsse in Deutschland [197]	5
Abbildung 4: Beispielhafte Netzstruktur für die Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen	6
Abbildung 5: Aufteilung des Frequenzbandes bei einem Mehrträgersystem	10
Abbildung 6: Modell eines Übertragungssystems	11
Abbildung 7: OFDM-System als Gruppe von parallelen Übertragungskanälen	12
Abbildung 8: Spektrale Darstellung eines OFDM-Systems	12
Abbildung 9: QPSK-Signalkpunkte mit Symbolenergie E_S und Bitenergie E_B [128]	14
Abbildung 10: Beschaltetes, homogenes, symmetrisches Leiterpaar der Länge l [149]	15
Abbildung 11: VDSL-Bandpläne	16
Abbildung 12: Nah- und Fernnebensprechen bei Teilnehmeranschlussleitungen	17
Abbildung 13: Bitbelegung eines Übertragungskanals	20
Abbildung 14: Water-Filling-Verfahren	22
Abbildung 15: Kopplungs- und FEXT-Koeffizienten bei zwei Leitungen	23
Abbildung 16: Übertragungs- und Nebensprechkopplungsfunktion eines VDSL-Kanals mit zwei Leitungen	25
Abbildung 17: Signalisierung mit geschlossener Schleife	28
Abbildung 18: Verwendete Frequenzspektren verschiedener xDSL-Verfahren	28
Abbildung 19: Spektrummanagement im Teilnehmeranschlussnetz	29
Abbildung 20: Qualitative Sprunghaftigkeit der erzeugten Datenmenge bei WWW-Verkehr	34
Abbildung 21: Anordnung der Dienstgütekomponten in einem Metro-Ethernet-Netz	44
Abbildung 22: Steuerung der veränderlichen Eigenschaften	53
Abbildung 23: Anpassungsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung	55
Abbildung 24: Konzept der adaptiven Dienstgüte	56
Abbildung 25: Struktureller Aufbau der Steuerungs- und Verwaltungsinstanz	57
Abbildung 26: Systemmodell der adaptiven Dienstgütesteuerung	58
Abbildung 27: Funktionales Modell der adaptiven Dienstgüte	60
Abbildung 28: AQOS-Cross-Layer-Architektur	61
Abbildung 29: Konvexe Charakteristik der Datenratenfunktion	70
Abbildung 30: Ablauf der dienstgüteeerweiterten Bitzuweisung	71
Abbildung 31: Absolute und relative Zuordnung der Datenratenanforderungen	79
Abbildung 32: Beispielszenario für je zwei Leitungen konstanter und variabler Länge	81
Abbildung 33: Garantierte Datenrate bei zwei Leitungen	82
Abbildung 34: Garantierte Datenrate bei vier Leitungen	83
Abbildung 35: Garantierte Datenrate bei acht Leitungen	83
Abbildung 36: Maximale Reichweite für unterschiedliche Szenarien	85
Abbildung 37: Reichweitenvergleich bei unterschiedlichen Dienstprofilen	87
Abbildung 38: Aufteilung der Sendeleistung bei zwei Leitungen	89
Abbildung 39: Beispiel für die Veränderlichkeit der Datenrate bei zwei Teilnehmern	89
Abbildung 40: Energieverbrauch aller Teilnehmer	90
Abbildung 41: Horizontale Signalisierung mit DDM	94
Abbildung 42: Vertikale Signalisierung am Beispiel DSLAM	95

Abbildung 43: AQOS-Signalisierung via DLL-Paketen	98
Abbildung 44: Austausch der Schätzwerte	100
Abbildung 45: Neuaushandlung und Aktivierung in Upstream-Richtung	102
Abbildung 46: Neuaushandlung und Aktivierung in Downstream-Richtung	103
Abbildung 47: Cross-Layer-Systemmodell des Protokolls	105
Abbildung 48: Signalisierungsverzögerung für 512 Byte große Nachrichten	107
Abbildung 49: Einordnung der Realisierungsmöglichkeiten	112
Abbildung 50: Kombinierte Realisierung von NP und Host-Prozessor	113
Abbildung 51: Vereinfachtes Blockdiagramm des Motorola C-5 DCP	114
Abbildung 52: Vereinfachter Aufbau eines Kanalprozessors [103]	115
Abbildung 53: Einordnung des DDM im NP	117
Abbildung 54: Funktionaler Ablauf der adaptiven Dienstgüte im C-5 DCP	118
Abbildung 55: Konzeptionelles Modell der adaptiven Dienstgütesteuerung	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die gebräuchlichsten xDSL-Verfahren [132]	4
Tabelle 2: Zuordnung von Prioritäten und Verkehrsarten nach [107]	42
Tabelle 3: Funktionales Modell der MEF-Dienstgüte [164]	43
Tabelle 4: Bewertung der Dienstgütearchitekturen	45
Tabelle 5: Reichweite der Verfahren in Meter	85
Tabelle 6: Ressourcenbelastung der verschiedenen Kostenfunktionen	86
Tabelle 7: Ergebnisse der Protokollvalidierung	105
Tabelle 8: Signalisierungsdauer in Sekunden je Richtung und Paketgröße	108

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

2B1Q	„Two Binary One Quarternary“-Leitungscode
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AF	Assured Forwarding
AOFDM	Adaptive OFDM
AQOS	Adaptive Dienstgütesteuerung (Adaptive Quality of Service)
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASIP	Application Specific Integrated Processor
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BGRP	Border Gateway Reservation Protocol
B-ISDN	Breitband-ISDN
BMU	Buffer Management Unit
CAM	Content Adressable Memory
CAP	Carrierless Amplitude/Phase Modulation
CLS	Controlled Load Service
CoS	Class of Service
CP	Channel Processor
CPE	Customer Premise Equipment
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
DAB	Digital Audio Broadcast
DCP	Digital Communications Processor
DDM	Dienstgüte- und Datenratenmanagement
DFT	Discrete Fourier Transformation

DiffServ	Differentiated Services
DLL	Sicherungsschicht (Data Link Layer)
DMT	Discrete Multi Tone
DRAM	Dynamic RAM
DS	Downstream
DSCP	DiffServ Codepoint
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	DSL-Access-Multiplexer
DSM	Dynamic Spectrum Management
DSP	Digitaler Signalprozessor
DVB-T	Terrestrial Digital Video Broadcast
EF	Expedited Forwarding
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FEXT	Far End Cross Talk
FFT	Fast Fourier Transformation
FP	Fabric Processor
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRED	Fair RED
FTP	File Transfer Protocol
FTTH	Fiber to the Home
GPP	General Purpose Processor
GS	Guaranteed Service
HDSL	High Bitrate Digital Subscriber Line
HFC	Hybrid Fiber Coax
Hiperlan	High Performance Local Area Network
ICI	Intercarrier Interference
ICI	Interface Control Information
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transformation
IDU	Interface Data Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force

IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Service Data Network
ISI	Intersymbol Interference
ISO	International Standard Organization
ITU	International Telecommunication Union
IW	Iterative Water-Filling
LAN	Local Area Network
LRD	Long Range Dependence
MAC	Media Access Control
MBAC	Measurement based Admission Control
MCM	Multi Carrier Modulation
MEF	Metro Ethernet Forum
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MUBL	Multi-User Bit-Loading
NEXT	Near End Cross Talk
NP	Netzprozessor
NSIS	Next Steps in Signaling
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PCI	Peripheral Component Interconnect
PDB	Per Domain Behavior
PHB	Per Hop Behavior
PHY	Übertragungsschicht (Physical Layer)
PLC	Power Line Communication
POTS	Plain Old Telephone Service
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QMU	Queue Management Unit

QoS	Quality of Service
QPSK	Quarternary Phase Shift Keying
RAM	Random Access Memory
RED	Random Early Drop
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTCP	Real Time Control Protocol
RTP	Real Time Protocol
RxSDP	Receive SDP
SDL	Specification and Description Language
SDP	Serial Data Processor
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SLS	Service Level Specification
SMC	Spectrum Management Center
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
SRAM	Static RAM
SRED	Stabilized RED
SS7	Signaling Sytem 7
STP	Set of Transmission Parameter
TAL	Teilnehmeranschlussleitung
TCP	Transmission Control Protocol
TLU	Table Lookup Unit
TOS	Type of Service
TxSDP	Transmit SDP
UDP	User Datagram Protocol
US	Upstream
VC	Virtual Channel
VDSL	Very High Bitrate Digital Subscriber Line
VST	Vermittlungsstelle

VOC	VDSL Overhead Channel
VP	Virtual Path
WA	Wireless Access
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web
xDSL	(Asymmetric, Very-high-Bitrate, ...) Digital Subscriber Line
XP	Executive Processor

Symbole

mathematische Schreibweisen:

$\bullet$	Faltungsoperator
$ \dots $	Absolutwert
$\max(u)$	Maximierung des Ausdruckes u
$\min(u)$	Minimierung des Ausdruckes u
$E[\dots]$	Erwartungswert
$\text{Im}\{X\}$	Imaginärteil einer komplexen Variable X
$\bar{P}$	Maximalwert der Variable P
$\Re$	Bereich der reellen Zahlen
$\text{Re}\{X\}$	Realteil einer komplexen Variable X
$\text{round}[\dots]$	Rundungsoperation
sodass ...	zu erfüllende Bedingung
$\mathbb{Z}_{\bar{0}}^{\bar{b}}$	Bereich der ganzen Zahlen zwischen 0 und $\bar{b}$
$\mathbb{Z}^+$	Bereich der positiven ganzen Zahlen

Variablen mit römischen Buchstaben

a	Ortsparameter
B	Trägerbandbreite
$b_i(k)$	Bitanzahl pro Leitung i und Unterträger k
$\bar{b}$	maximale Signalraumkonstellation
b^*	Menge der bereits zugewiesenen Bits
C	Dienstklassenindex
C'	Kapazitätsbelag
c_0	Lichtgeschwindigkeit
d	gesamte Verzögerung
$d_{\text{prop}}, d_{\text{proc}}, d_{\text{queue}}$	Verzögerungskomponenten
E	endliche Menge
E_B	Bitenergie eines OFDM-Symbols
E_S	Symbolenergie eines OFDM-Symbols
e_k	Einheitsvektor
f	Frequenzvariable
f_k	Trägerfrequenz des k -ten Unterträgers
f_{Sample}	Abtastfrequenz
f_{Symbol}	Symbolrate
g	Übertragungsmaß
G'	Leitwertsbelag
$g_E(t)$	empfangsseitiges Bandbegrenzungsfilter
$g_S(t)$	sendeseitiges Impulsformungsfilter
h	zeitdiskrete Basisbandimpulsantwort
H	Übertragungsfunktion eines Leiterpaares
H	Hurst-Parameter
$H_{i,j}$	Kopplungskoeffizienten zwischen den Leitungen i und j

$H_{i,j}(k)$	Kopplungskoeffizienten zwischen den Leitungen i und j im Unterträger k
$h_D(t)$	zeitdiskrete Kanalimpulsantwort
H_k	Übertragungsfunktion des k-ten Unterträgers
h_k	zeitdiskrete Kanalimpulsantwort
H_k	Filterkoeffizienten der Kanalimpulsantwort
h_k'	Fourier-Transformierte der Kanalimpulsantwort
H_l	Fourier-Transformierte des Vektors der zeitdiskreten Kanalimpulsantwort
$h_k(t)$	Kanalimpulsantwort des k-ten Teilkanals
k	Trägerindex
k	Wellenwiderstand eines Kables
k_{FEXT}	FEXT-Einkopplungskonstante
k_{NEXT}	NEXT-Einkopplungskonstante
i	Leitungsindex
$J(k, i)$	Kostenfunktion
l	Länge eines symmetrischen Leiterpaares
l	Index der OFDM-Symbole
L'	Induktivitätsbelag
M	Anzahl der Leitungen
M_m	Signalraumkonstellationen
m_k	Bitgruppe des k-ten Unterträgers
n	zeitdiskrete additive gaußverteilte Störung
N	Anzahl der Unterträger
N	Rauschsignal im Frequenzbereich
$N_i(k)$	additive gaußverteilte Störung der Leitung i im Unterträger k
$n_D(t)$	zeitdiskrete additive gaußverteilte Störung
$\tilde{n}(t)$	additives, gaußverteiltes Rauschen
$p(t)$	Rechteckfunktion
$\bar{P}$	maximale Sendeleistung
$P^*(k, b_k)$	minimale Sendeleistung für eine Bitbelegung im Unterträger k

$P_{\text{FEXT}}(f)$	spektralen Leistungsdichten der FEXT-Störung
P_i	spektrale Leistungsdichte der i-ten Leitung
$P_i(k)$	spektrale Leistungsdichte der Leitung i im Unterträger k
$P_{\text{NEXT}}(f)$	spektrale Leistungsdichte der NEXT-Störung
$P_S(f)$	Spektrum eines Sendesignals
$P[X > x]$	kumulative umlaufende Verteilungsfunktion
$Q_{c,i}$	Dienstgüteanforderung pro Dienstklasse c und Teilnehmer i
$r(k)$	Autokorrelationsfunktion
$r(t)$	Signal am Ausgang des Kanals
R	Summendatenrate
$R_{c,i}$	dienstklassenspezifische Datenrate
R_i	teilnehmerspezifische Datenrate der i-ten Leitung
$R_{\text{Signalisierung}}$	Datenraten der AQOS-Signalisierung
$R_{\text{Nutzdaten}}$	
R_{min}	
R_x	Empfänger
R'	Widerstandsbelag
r_l	zeitdiskreter l-ter OFDM-Empfangssignalvektor
$r_m(t)$	Empfangssignal der m-ten Leitung
$s(t)$	komplexwertiges Sendesignal
s_l	zeitdiskreter l-ter OFDM-Sendesignalvektor
$s_l(t)$	Zeitbereichsignal des l-ten OFDM-Symbols
$s_l[n]$	zeitdiskretes Sendesignal
$s_m(t)$	Sendesignal der m-ten Leitung
SNR_i	SNR der i-ten Leitung
$\text{SNR}_i(k)$	SNR der i-ten Leitung im Unterträger k
S_{xx}	Streuparameter
t	Zeitvariable
T	Symboldauer eines OFDM-Symbols

T	maximale Menge eines Teilmengensystems
T_{Symbol}	Symboldauer
T_x	Sender
U	Spannungsvariable
U	Teilmenge des Teilmengensystems (E, U)
U_0	Normierungswert für die Impulsspannungsverteilung
$U_{k,l}(t)$	Translationsfunktion mit Zeitdauer τ_0 und Frequenz ν_0
w, w_i	Gewichtungskoeffizienten
x	Sendesymbol
X_i, X, Y	Zufallsvariablen
$X^{(m)}, X_n^{(m)}$	summierte Zufallsvariablen
$X_{k,l}$	k-tes Element des l-ten OFDM-Sendesymbols
x_k	Kennzeichnung des Sendesymbols des k-ten Unterträgers
y	komplexwertiges Empfangssymbol
$Y_{k,l}$	k-tes Element des l-ten OFDM-Empfangssymbols
y_k	Kennzeichnung des Empfangssymbols des k-ten Unterträgers
$\hat{y}_k$	Kennzeichnung des Empfangssymbols des k-ten Unterträgers nach Entscheidungseinheit
Z_A	Impedanz der Ausgangslast
Z_l	Impedanz der Leitung und der Quelle
Z_L	Wellenwiderstand

Variablen mit griechischen Buchstaben:

α_N	Dämpfungskoeffizienten
α	Indexkoeffizient
β	Phasenkoeffizienten
β	Formparameter
Δf_k	Abstand der Trägerfrequenzen

$\Delta P_{j,i}(k)$	zusätzliche Leistungsaufnahme
γ	Ausbreitungskoeffizient
Γ	SNR-Lücke
γ_{code}	Codierungsgewinn
γ_{margin}	Systemreserve
μ	Mittelwert einer Verteilung
ρ_i^*	zugewiesene Datenrate
ρ_i	benötigte Datenrate
σ^2	Varianz einer Verteilung
ω	Frequenzvariable
ω_k	Frequenz des k-ten Unterträgers

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Der sich gegenwärtig vollziehende Wandel von der Industrie- zur Informations- und Wissensgesellschaft rückt drei zentrale Entwicklungen in den Vordergrund [134]. Erstens wird Wissen zum vierten Produktionsfaktor neben Kapital, Arbeit und Boden. Zweitens müssen die Organisations- und Arbeitsstrukturen angepasst werden, um dem ständig steigenden Informations- und Wissensbedarf Rechnung zu tragen. Der klassische Industriebetrieb wandelt sich zusehends zu einem modular strukturierten, vernetzten Unternehmen. Diese Entwicklung führt zur Entstehung neuer Produktions- und Arbeitskonzepte, wie z. B. der Telearbeit. Drittens bildet die globale Vernetzung auf der Basis moderner Informations- und Kommunikationstechnologien die Grundlagen für diesen Wandel.

Informationen und deren Austausch gewinnen in diesem Umfeld ständig an Bedeutung. Sie werden über immer leistungsfähigere soziale und elektronische Kommunikationsstrukturen in einer zunehmend vernetzten Gesellschaft vermittelt und ändern diese tief greifend.

Diese gesellschaftliche Entwicklung impliziert einen Strukturwandel in den Telekommunikationstechnologien. Um einen globalen Zugriff auf Information zu ermöglichen, ersetzen verbindungslose und paketvermittelte Netze die bisherige verbindungsorientierte Kommunikationsstruktur. Als umfassende Kommunikationsplattform im globalen Maßstab dient das Internet, dessen kommunikationstechnische Repräsentation das hardwareunabhängige und verbindungslose Internetprotokoll (IP) darstellt. Abbildung 1 illustriert die Bedeutung des Internets anhand des Wachstums der Anzahl der vernetzten Rechner.

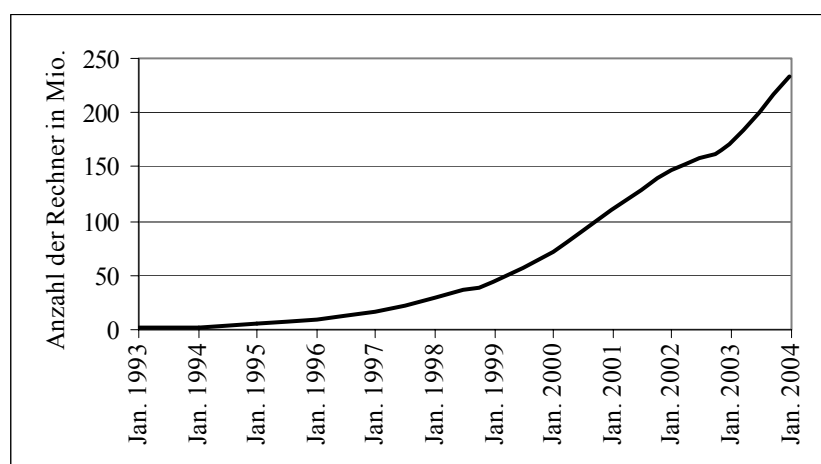


Abbildung 1: Zunahme der im Internet erreichbaren Rechner [117]

Die in ihrer Gesamtheit das Internet bildenden unterschiedlichen Netztypen und -strukturen können in hierarchische Ebenen eingeordnet werden. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der verschiedenen Netzebenen.

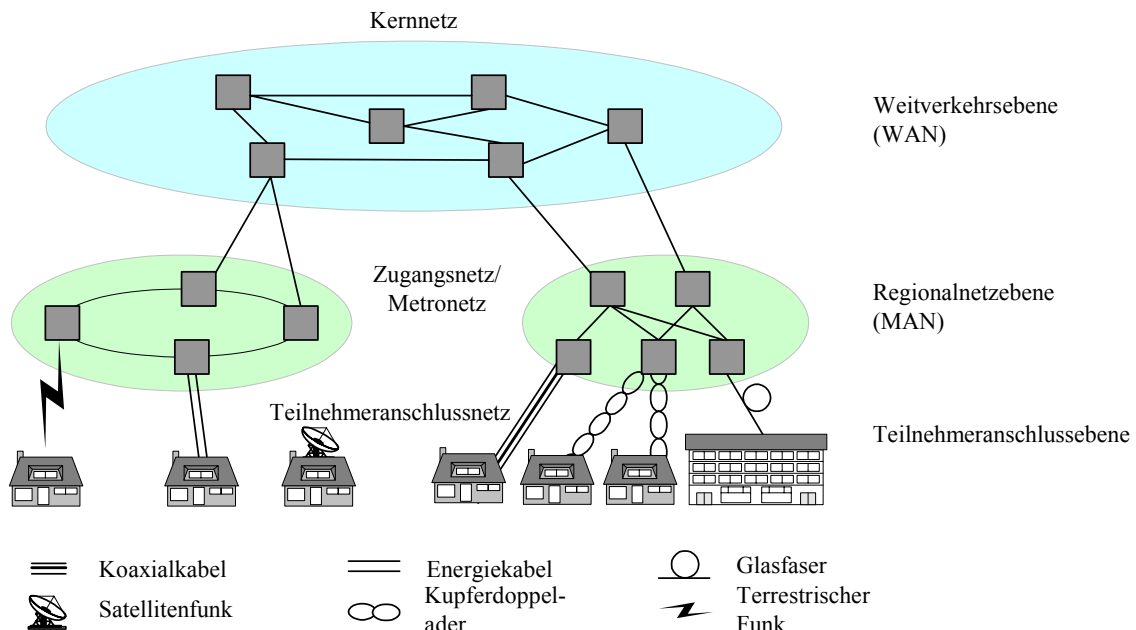


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Netzebenen

Kernnetze umspannen große geografische Gebiete und bilden das Rückgrat (Backbone) der Weitverkehrsdatenübertragung. Die darunter liegende Ebene bilden die Zugangsnetze als Schnittstelle zwischen den Kernnetzen und dem Teilnehmeranschlussnetzen. Zugangsnetze dienen der Verkehrsaggregation und der Anbindung der räumlich verteilten Teilnehmeranschlüsse an die wenigen Zugangspunkte der Kernnetze. Die Teilnehmeranschlussebene übernimmt die Aufgabe des Datentransports zwischen dem Zugangsnetz und dem Teilnehmer.

Zum Aufbau eines Netzwerks stehen derzeit die folgenden Übertragungsmedien zur Verfügung:

- Glasfaser
- Satellitenfunkkanal
- Energiekabel
- Koaxialkabel
- Kupferdoppelader
- Terrestrischer Funkkanal

In den Kernnetzen werden aufgrund der hohen Datenraten¹ und der zu überbrückenden großen Entfernungen hauptsächlich Glasfaserleitungen eingesetzt [149]. Hierbei lassen sich mithilfe von neueren Modulationsverfahren (Wavelength Division Multiplexing, WDM) Datenraten von derzeit 40 GBit/s realisieren. In Zukunft ist eine Steigerung bis zu einigen TBit/s zu erwarten [27]. In den Zugangsnetzen werden ebenfalls hauptsächlich Glasfaserleitungen verwendet.

1. Die Datenrate bezeichnet die Geschwindigkeit der Übertragung in Informationseinheiten pro Zeiteinheit.

Die oft auch als „letzte Meile“ bezeichneten Teilnehmeranschlussnetze stellen die Schnittstelle der Anwender zu den anderen Netzebenen dar. Dieser Umstand ist für die dem Teilnehmer gebotenen Dienste von entscheidender Bedeutung, da in diesem Bereich aufgrund der Netzwerkauslegung ein Engpass an Übertragungskapazität für die breitbandige Multimediaübertragung besteht. Für die Auslegung der Teilnehmeranschlussnetze bietet sich neben der Verwendung von Glasfasern auch der Einsatz von satellitengestützten bzw. terrestrischen Funkverbindungen sowie die Übertragung mithilfe von Koaxial-, Energie- oder Kupferdoppeladern an.

Auch in der Teilnehmeranschlussebene bietet die Glasfasertechnologie das größte Potenzial zur breitbandigen Übertragung. Allerdings müssen in diesem Bereich die hohen Infrastrukturkosten als zentraler Nachteil angeführt werden, weil meist kein Glasfaseranschluss beim Teilnehmer (Fiber to the Home, FTTH) bereitsteht. Ein Ausbau bestehender Anschlüsse mit Glasfasertechnologie ist wegen der erheblichen Kosten für die Verlegung derartiger Leitungen zurzeit lediglich für große Bürokomplexe mit einer Vielzahl von hochbitratigen Teilnehmeranschlüssen attraktiv [149].

Die Übertragung über das Energiekabel (Power Line Communication, PLC) kann ebenfalls für die Überbrückung der „letzten Meile“ genutzt werden. Dieses Verfahren verwendet die bereits für die Energieübertragung verlegten Kabel. Höhere Datenraten (um die 2 MBit/s und mehr) können bei dieser Technologie erst durch die Verwendung höherer Frequenzbereiche (bis 30 MHz) erzielt werden. Wegen der Abstrahlungsproblematik ist jedoch die Nutzung des Energienetzes für die Übertragung in diesen Frequenzbereichen fraglich. Außerdem verteilt sich die Datenrate aufgrund des gemeinsamen Zugriffs auf mehrere Teilnehmer.

Die Verwendung des zur Fernsehübertragung eingesetzten Koaxialkabels (Hybrid Fiber Coax, HFC) weist als Shared-Medium ebenfalls die Notwendigkeit der gemeinsamen Nutzung der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität durch mehrere Teilnehmer auf. Wegen der besseren Abschirmung dieser Koaxialkabel lässt sich hier jedoch ein breiteres Frequenzspektrum und somit eine höhere Datenrate des Gesamtsystems von zukünftig bis zu 50 MBit/s erreichen [27]. Problematisch bei den HFC-Netzen ist die für die bidirektionale Übertragung notwendige kostspielige Umrüstung, da die Kabelnetze wegen der ursprünglichen Konzeption ausschließlich für die unidirektionale Fernsehübertragung ausgelegt sind.

Alternativ sind auch terrestrische funkbasierte Systeme (Wireless Access, WA) einsetzbar. Mit dieser Technologie können bidirektionale Datenraten von bis zu 280 MBit/s erzielt werden [149]. Als Nachteile erweisen sich die beschränkte Anzahl von verfügbaren Frequenzen innerhalb einer Region, die teilweise Notwendigkeit einer Sichtverbindung und die hohen Kosten bei der Einrichtung flächendeckender Funknetze in schwach besiedelten Gegenden.

Prinzipiell ist in der Teilnehmeranschlussebene auch der Einsatz breitbandiger Satellitenkommunikationssysteme denkbar. Allerdings ist diese Technik ausgesprochen teuer und findet nur in entlegenen Gegenden Anwendung.

Eine weitere Realisierungsmöglichkeit der breitbandigen Teilnehmeranschlüsse stellt die Verwendung der bereits bestehenden Kupferdoppeladerverkabelung dar, die ursprünglich für die Sprachsignalübertragung (Plain Old Telephone Service, POTS) in einem Frequenzband bis 3,4 kHz dimensioniert wurde. Mit analogem Modem lassen sich hier Datenraten von bis zu 56 kBit/s erreichen. Das dienstintegrierende digitale Netz (Integrated Services Digital Network, ISDN) kommt durch die Erweiterung des genutzten Frequenzspektrums auf eine Datenrate von 144 kBit/s. Diese Datenraten sind jedoch für Echtzeitanwendungen, wie z. B. die Fernsehübertragung, zu gering.

Die Einbeziehung noch höherer Frequenzbereiche bis zu 12 MHz auf diesen Teilnehmeranschlussleitungen (TAL) ermöglicht den Einsatz von neuartigen

Übertragungstechnologien, welche unter der Bezeichnung xDSL (Digital Subscriber Line, DSL) zusammengefasst sind. Die Unterscheidung der einzelnen DSL-Familien erfolgt durch den vorangestellten Platzhalter x. In Tabelle 1 sind wichtige Unterscheidungsmerkmale der gebräuchlichsten xDSL-Varianten gegenübergestellt.

Ein entscheidender Vorteil von xDSL-Systemen besteht darin, dass in Europa nahezu jeder Haushalt an das Kupferdoppeladernetz angeschlossen ist. Problematisch sind jedoch die Eigentumsverhältnisse bei dieser Infrastruktur, weil die Telefonleitungen fast ausnahmslos den ehemaligen Telekommunikationsmonopolisten gehören. Neue Netzbetreiber müssen die Leitungen daher mieten, was zu einer zusätzlichen Verteuerung der Infrastrukturkosten führt. Zur Vermeidung von Monopolstrukturen wurden in den letzten Jahren verschiedene Regelungen durch die entsprechenden Regulierungsbehörden getroffen, die den Markteinstieg alternativer Betreiber erleichtern.

DSL-Verfahren	Charakterisierung	Frequenzbereich	Datenraten		Reichweite [km]	Modulationsverfahren
			Upstream	Downstream		
HDSL	H=High Bit Rate	0 - 500 kHz	2 MBit/s	2 MBit/s	< 4	2B1Q (4-PAM)
SDSL	S=Symmetric	< 700 kHz	2,3 MBit/s	2,3 MBit/s	< 3	16-PAM
ADSL	A=Asymmetric	<1104 kHz	1 MBit/s	8 MBit/s	< 8	DMT
VDSL	V=Very High Bit Rate	< 12 MHz	13 MBit/s	52 MBit/s	< 1,4	DMT

Tabelle 1: Übersicht über die gebräuchlichsten xDSL-Verfahren [132]

In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass bei den hochbitratigen Übertragungsverfahren, wie z. B. ADSL oder VDSL, andere Modulationsformen als bei den Verfahren geringerer Datenrate eingesetzt werden. Während bei HDSL ein 2B1Q-Leitungscode und bei SDSL eine 16-fach Pulsamplitudenmodulation (PAM) verwendet werden, nutzen ADSL bzw. VDSL das Mehrträgermodulationsverfahren Discrete Multi Tone (DMT). Die entsprechenden Übertragungssysteme werden im weiteren Verlauf der Arbeit auch als leitungsgebundene Mehrträgersysteme bezeichnet.

DMT basiert im Wesentlichen auf dem Orthogonal Frequency Division Multiplexing Mehrträgerverfahren (OFDM). Den signifikanten Unterschied zum OFDM-Verfahren stellt die Realisierung eines reellen Zeitbereichsignals durch die konjugiert komplexe Erweiterung der Sendesymbole dar. Die Vorteile der Mehrträgerverfahren liegen einerseits in einer effizienten Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite und andererseits in einer im Vergleich zu den Einträgerverfahren deutlich einfacheren Realisierung des Empfängers. Des Weiteren erlauben die Mehrträgerverfahren die Verwendung adaptiver Modulationstechniken, bei denen die Datenrate unterbrechungsfrei variiert werden kann.

Abbildung 3 zeigt die Marktverteilung der gebräuchlichsten Technologien für breitbandige Teilnehmeranschlussnetze in Deutschland zum Ende des Jahres 2003. Dabei ist eindeutig zu erkennen, dass sich die xDSL-Technik einer ausgesprochen hohen Beliebtheit erfreut. Alle anderen Verfahren finden gegenwärtig nur in Marktnischen Anwendung.

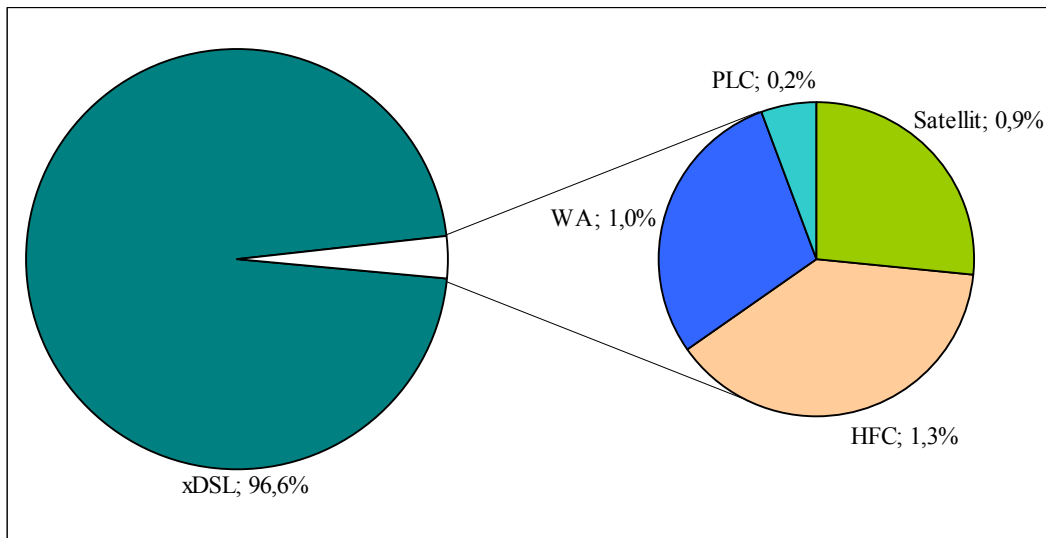


Abbildung 3: Marktverteilung breitbandiger Teilnehmeranschlüsse in Deutschland [197]

Die weltweite Verfügbarkeit der einheitlichen Transportplattform IP in allen Netzebenen führt zur Konvergenz der verschiedenen Netzstrukturen [58]. Konvergenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Diensten, wie z. B. herkömmliche Telefonie, Video, Daten, Spiele oder Fernsehen, unabhängig von der Art des Netzes auf der Basis von IP realisiert werden. Ein Dienst ist in diesem Zusammenhang eine abstrahierte Funktion, die von einem Netz den Teilnehmern bzw. deren Geräten bereitgestellt wird.

Im Umkehrschluss führt die Konvergenz zum Transport verschiedenster Dienste über eine einheitliche Netzplattform. Die sich unterscheidenden Anforderungen der Dienste an die Qualität der Übertragung müssen in diesem Netz natürlich gewährleistet werden. Dazu werden im Allgemeinen Dienstgütemechanismen (Quality of Service, QoS) verwendet. Ziel der Dienstgüterebereitstellung ist es, die Anforderungen der Anwendungen an die Netze dauerhaft und jederzeit zu sichern.

Die Dienstgüte kann in diesem Zusammenhang diverse Eigenschaften umfassen. Zur Bestimmung dienen häufig Transportparameter, wie z. B. Durchsatz, Verzögerung, Varianz der Verzögerung oder Fehlerrate. Ein dem Teilnehmer angebotener Dienst umfasst einen oder mehrere dieser Parameter, die bei der Übertragung garantiert werden [73]. Beispielsweise kann ein bestimmter Durchsatz zugesichert werden.

Aus Sicht des Teilnehmers ist vor allem die Ende-zu-Ende bereitgestellte Dienstgüte relevant. QoS muss also in allen Netzebenen und -knoten entlang des Übertragungspfades zwischen Sender und Empfänger angeboten werden. Aufgrund der speziellen Eigenschaften der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme, wie z. B. Schnittstelle zum Teilnehmer und begrenzte Übertragungskapazität, ist die Dienstgüterebereitstellung in diesem Bereich besonders wichtig.

1.2 Adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen

Für die Bereitstellung breitbandiger Internetzugänge bieten sich wegen der weiten Verbreitung und der zur Verfügung stehenden Datenrate vor allem die OFDM-basierten xDSL-Verfahren an. Nichtsdestotrotz stellen die Teilnehmeranschlussnetze infolge der begrenzten Datenrate den entscheidenden Engpass bei der Übertragung dar. Somit ist es in diesem Bereich essenziell, dass

die vorhandenen Ressourcen effizient ausgenutzt werden. Dieser Umstand wird durch die ausgesprochen hohen Kosten für Infrastrukturerweiterungen noch verstärkt. Generell können die in den Teilnehmeranschlussnetzen verfügbaren Ressourcen als begrenzt und teuer charakterisiert werden.

Für die beim Teilnehmer² spürbare Übertragungsqualität ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Dienstgüte in allen Netzebenen (Teilnehmeranschluss-, Zugangs- und Kernnetz) bereitsteht [175]. Gerade die Teilnehmeranschlussnetze sind bei den heutigen Übertragungskapazitäten jene Bereiche, die den Engpass darstellen, und damit die Qualität der Übertragung am stärksten beeinflussen [110]. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine Netzstruktur eines leitungsgebundenen Mehrträgersystems. Jeder Teilnehmer ist über eine im DSL-Access-Multiplexer (DSLAM) terminierte TAL an ein Zugangsnetz angeschlossen. Der DSLAM kann in der Vermittlungsstelle oder als abgesetzte Einheit realisiert werden. Bis auf die notwendige Fernspeisung der abgesetzten Einheit ergeben sich aus diesen verschiedenen Realisierungsbeispielen keine funktionalen Unterschiede. Ein Modem schließt die Leitung auf der Teilnehmerseite ab. Die TAL bildet eine Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecke zwischen Teilnehmermodem und DSLAM. An einem DSLAM können einige hundert Teilnehmer angeschlossen sein. Die Teilnehmeranschlüsse sind als Kabelbündel von 50 und mehr paarweise verdrehten Kupferdoppeladern verlegt. Zwischen den Leitungspaaren in einem Kabelbündel existieren Wechselwirkungen in Form von elektromagnetischen Kopplungen, die zu veränderlichen Übertragungskapazitäten führen. Wegen der spezifischen Eigenschaften der xDSL-basierten Teilnehmeranschlussnetze, wie z. B. die Veränderlichkeit der vorhandenen Übertragungskapazität, können in diesem Bereich die bekannten Dienstgüteverfahren nur eingeschränkt angewendet werden.

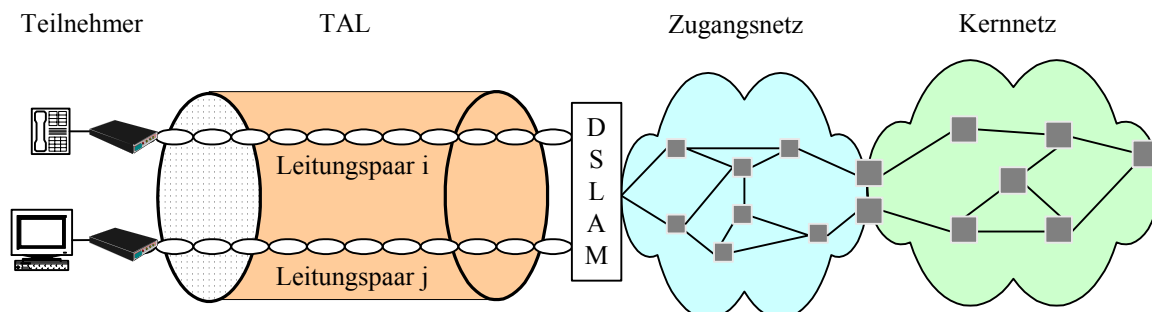


Abbildung 4: Beispielhafte Netzstruktur für die Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen

In dieser Arbeit werden deshalb Dienstgütemechanismen entwickelt und untersucht, die an die Charakteristiken der OFDM-basierten Mehrträgerübertragung bei kupferbasierten Teilnehmeranschlussleitungen angepasst sind. Insbesondere soll die durch die adaptiven Modulationsverfahren mögliche Veränderung der verfügbaren Datenrate für die adaptive Steuerung der Dienstgüte genutzt werden. Die den Teilnehmern bereitgestellte Dienstgüte ist

-
2. Durch die Ausgestaltung der Teilnehmeranschlussleitung als Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecke besteht eine eindeutige Beziehung zwischen den Eigenschaften einer Leitung und der Dienstgüte des daran angeschlossenen Teilnehmers. Die Begriffe Leitung und Teilnehmer werden in dieser Arbeit synonym für die Darstellung der Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen verwendet. Während die Leitung für die Charakterisierung der Übertragungseigenschaften verwendet wird, bezieht sich der Begriff Teilnehmer auf Informationen der höheren Protokollschichten, insbesondere die Verkehrseigenschaften und deren Ausprägung als Dienstgüte.

auf die jeweils aktuellen Verkehrsanforderungen und Übertragungseigenschaften abgestimmt. Die gemeinsame Steuerung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften führt zu einer Optimierung der Übertragung bei den leitungsgebundenen Mehrträgersystemen.

Zur Realisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung werden in dieser Arbeit die folgenden beiden Teilziele untersucht:

- **Gemeinsame Steuerung der Dienstgüte- und Übertragungsparameter**
Die bidirektionale Anpassung der Verkehrs- und Kanalcharakteristiken erlaubt die optimale Übertragung unter veränderlichen Betriebsbedingungen. Die eigenständige, gemeinsame Verwaltung der normalerweise getrennt verwalteten Parameter ermöglicht eine Adaption der Dienstgüte- und Übertragungsparameter im laufenden Betrieb.
- **Schnelle Signalisierung**
Durch einen schnellen Informationsaustausch wird die zeitnahe Benachrichtigung der beteiligten Komponenten und die sofortige Reaktion auf Veränderungen realisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die adaptive Dienstgütebereitstellung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen untersucht und eine mögliche Realisierung am Beispiel des VDSL-Verfahrens vorgeschlagen.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Für das Verständnis der spezifischen Eigenschaften der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme legt Kapitel 2 zunächst die Grundlagen der OFDM-Übertragung dar, die in dieser Arbeit betrachtet wird. Daran schließt sich eine Beschreibung der leitungsgebundenen Umgebung als untersuchtes Einsatzszenario an. Dabei wird die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften bei den leitungsgebundenen Mehrträgersystemen detailliert dargestellt. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die bei OFDM-basierten Übertragungsverfahren eingesetzten Bitzuweisungsalgorithmen beschrieben und deren Bedeutung für die adaptive Modulation erläutert. Ferner wird auf das Spektrummanagement als Verfahren zur effizienteren Ressourcenausnutzung bei xDSL-Systemen eingegangen.

Schwerpunkt von Kapitel 3 ist die Erläuterung der Grundlagen der Dienstgütebereitstellung. Dabei werden zuerst Dienstgütemechanismen für End- und Netzgeräte vorgestellt und untersucht. Außerdem wird auch auf die Veränderlichkeit der Verkehrseigenschaften eingegangen, die für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit von besonderem Interesse ist. Daran anschließend wird aufgezeigt, wie die Mechanismen zu Dienstgütearchitekturen verbunden werden können. Die Vor- und Nachteile der gegenwärtig vorherrschenden Verfahren werden in diesem Zusammenhang erläutert. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Dienstgütearchitekturen unter besonderer Beachtung der Eignung für den Einsatz in OFDM-basierten Teilnehmeranschlussnetzen. Das Kapitel geht außerdem auf Cross-Layer-Entwurfsverfahren ein, die bei der Optimierung der Dienstgütebereitstellung bei veränderlichen Übertragungseigenschaften Einsatz finden.

In Kapitel 4 wird ein Konzept für die adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen vorgeschlagen. Nach einer Beschreibung der Dienstgütebereitstellung bei den im xDSL-Bereich vorherrschenden Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wird auf die gemeinsame Steuerung der Dienstgüte- und Übertragungsparameter ausführlich eingegangen. Das prinzipielle Konzept der adaptiven Dienstgütesteuerung wird erklärt. Anschließend wird dargestellt, wie dieses Konzept als Systemmodell der adaptiven Dienstgütesteuerung konkretisiert werden kann. Abschließend wird das Entwurfsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung vorgestellt.

Die konkrete Ausgestaltung eines Verfahrens zum Dienstgüte- und Datenratenmanagement schlägt Kapitel 5 vor. Zu Beginn erfolgt die Darstellung der Integration der Dienstgüte in die Bitzuweisung. In diesem Zusammenhang wird auf die Optimierung durch ein Greedy-Verfahren und die spezifische Auslegung der Kostenfunktionen tiefer eingegangen. Verschiedene Kostenfunktionen werden diskutiert, welche die Dienstgüte und die Übertragungseigenschaften in unterschiedlicher Art und Granularität beinhalten. Eine simulative Leistungsbewertung vergleicht das vorgeschlagene Verfahren mit dem Stand der Forschung.

Kapitel 6 enthält die konkrete Ausgestaltung eines Vorschlages zur Realisierung des schnellen Informationsaustausches. Anhand des Cross-Layer-Entwurfsverfahrens wird ausgeführt, wie die gemeinsame Steuerung der in unterschiedlichen Protokollschichten beheimateten Parameter realisiert werden kann. Im weiteren Verlauf wird der Informationsaustausch der unterschiedlichen Parameter und Übertragungsrichtungen vorgestellt. Eine Validierung und eine Leistungsbewertung vergleichen das entworfene Protokoll mit dem Stand der Technik.

Die Realisierungsaspekte des vorgestellten Ansatzes betrachtet Kapitel 7 am Beispiel von Netzprozessoren. Die Vor- und Nachteile verschiedener Implementierungsmöglichkeiten werden abgewogen und am Beispiel des Netzprozessors Motorola C-5 DCP konkretisiert. Die genaue Zuordnung der Funktionalität der adaptiven Dienstgütesteuerung wird für den Motorola C-5 DCP vorgestellt. Des Weiteren werden Aspekte der Systemdimensionierung untersucht und eine Abschätzung der Komplexität des Verfahrens vorgenommen.

Kapitel 8 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten bzw. alternative Lösungsansätze.

2 Systemgrundlagen für die Übertragung im orthogonalen Frequenzmultiplex

In dem vorliegenden Kapitel werden grundlegende Aspekte der Übertragung im orthogonalen Frequenzmultiplex (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) als Basis für die weiterführenden Untersuchungen dieser Arbeit erläutert. Abschnitt 2.1 liefert einen einführenden Überblick über die historische Entwicklung der OFDM-Übertragung. Die Grundlagen von OFDM werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Abschnitt 2.3 widmet sich der konzeptionellen Darstellung von leitungsgebundenen Mehrträgersystemen. Die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften bei der leitungsgebundenen OFDM-Übertragung betrachtet Abschnitt 2.4. Abschnitt 2.5 geht detailliert auf die Verfahren zur Bitzuweisung in drahtgebundenen Übertragungssystemen ein. Die Fähigkeit der Reaktion auf veränderliche Übertragungseigenschaften wird in Abschnitt 2.6 am Beispiel der adaptiven Modulationsverfahren aufgezeigt. Abschnitt 2.7 beschreibt die Anstrengungen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit durch das dynamische Spektrummanagement. Abschnitt 2.8 fasst die wesentlichen Inhalte der Systemgrundlagen zusammen.

2.1 Einführung

Erste Untersuchungen zu Mehrträgerverfahren (Multi Carrier Modulation, MCM) sind bereits seit den 60er Jahren bekannt, als Chang [36] eine Arbeit zur bandbegrenzten Übertragung über Mehrträgersysteme veröffentlichte. Saltzberg [205] untersuchte die Leistungsbewertung derartiger Systeme. Weinstein und Ebert [237] führten diese Arbeiten weiter und zeigten, dass sich die Struktur der Sende- und Empfangsfilterbank durch eine diskrete Fouriertransformation (DFT) darstellen lässt. Dieses Ergebnis ermöglicht die Anwendung von Algorithmen, wie z. B. der Fast Fouriertransformation (FFT), bei der Realisierung der DFT. Ein Nachteil des Systems von Weinstein und Ebert war die fehlende perfekte Orthogonalität zwischen den Unterträgern. Peled und Ruiz [186] lösten dieses Problem, indem sie ein zyklisches Schutzintervall (Cyclic Prefix) zur Reduktion von Intersymbolinterferenzen (ISI) und Interkanalinterferenzen (ICI) einführten. Damit liegt am Empfänger ein zyklstationäres Signal vor und die Orthogonalität zwischen den Unterträgern ist gegeben, wenn das Schutzintervall länger als die zeitliche Dauer der Kanalimpulsantwort ist.

Aufgrund des hohen Aufwands bei der Berechnung großer FFT-Blöcke geriet das Übertragungsverfahren zwischenzeitlich in Vergessenheit. Erst in den 90er Jahren wurde durch Bingham [21] seine Wiedergeburt eingeleitet, da durch die Entwicklung moderner digitaler Signalprozessoren die notwendige Rechenleistung für die Implementierung der aufwändigen DFT-Operationen bereitstand. In der Folge erlangte OFDM wegen seiner Leistungsfähigkeit Berücksichtigung in verschiedenen Standards, wie z. B. für den digitalen Hörfunk (Digital Audio Broadcast, DAB [65]) und die digitale Fernsehübertragung (Terrestrial Digital Video Broadcast, DVB-T [66]). Außerdem wurde OFDM für lokale Datenfunknetze (Wireless Local Area Networks, WLAN), wie IEEE 802.11 [108] und High Performance Local Area Networks [67], und leitungslose Metronetze [109] spezifiziert.

Ein ausgesprochen bedeutendes und wirtschaftlich relevantes Einsatzgebiet für OFDM-basierte Verfahren sind leitungsgebundene Übertragungssysteme, wie z. B. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL [3]) und Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL [5]). Die drahtgebundenen Verfahren, insbesondere VDSL, dienen als Realisierungsbeispiel für die in dieser Arbeit dargelegten Untersuchungen.

2.2 Grundlagen der OFDM-Übertragung

Die Mehrträgerübertragung basiert auf der Aufteilung der verfügbaren Bandbreite in N einzelne Teilbandbreiten entsprechend Abbildung 5. Dadurch entstehen aus einem breitbandigen Kanal mehrere schmalbandige Teilkanäle. Diese Aufteilung ist bei der Implementierung einfach zu realisierender Entzerrer von Vorteil, weil bei solchen Kanälen wegen ihrer geringen Bandbreite lediglich von einem gleichmäßigen Kanalschwund (Flat Fading) auszugehen ist.

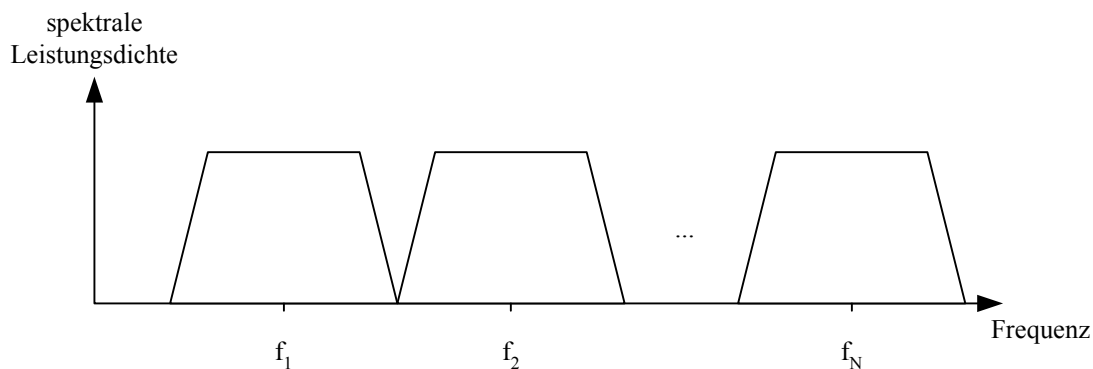


Abbildung 5: Aufteilung des Frequenzbandes bei einem Mehrträgersystem

Bei der Mehrträgerübertragung werden somit die Daten auf mehrere separate Unterträger verteilt. Das Mehrträgersignal stellt dann die Summe der N unabhängigen Untersignale dar. Die Anzahl der Bits, die jedem einzelnen Unterträger zugeordnet ist, wird von der Übertragungskapazität des jeweiligen Teilkanals bestimmt.

Für die ideale Ausnutzung der Bandbreite eines Mehrträgersystems ist es notwendig, dass der Abstand der Trägerfrequenzen Δf_k der einzelnen Unterträger Gleichung (2.1) erfüllt, wobei k die Nummerierung der Unterträger entsprechend Gleichung (2.2) darstellt.

$$\Delta f_k = \frac{1}{T} = B \quad (2.1)$$

$$k = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

2.2.1 Systemstruktur der OFDM-Übertragung

Mit den bisher angestellten Überlegungen zur Mehrträgerübertragung kann nun eine Systemstruktur des OFDM-Verfahrens aufgestellt werden. Dazu wird von folgenden vereinfachenden Annahmen ausgegangen:

- Sender und Empfänger sind perfekt synchronisiert.
- Die Rauschprozesse sind additiv, weiß und gaußverteilt (Additive White Gaussian Noise, AWGN).
- Während der Übertragung eines OFDM-Symbolintervalls ist die Kanalimpulsantwort zeit-invariant.

Im Folgenden werden nun die allgemeinen Übertragungseigenschaften eines OFDM-Systems anhand eines zeitdiskreten Modells abgeleitet. Die zeitdiskrete Betrachtung wird wegen der größeren Relevanz dem zeitkontinuierlichen Modell vorgezogen. Das gesamte zeitdiskrete Modell eines Übertragungssystems beschreibt Abbildung 6 [134].

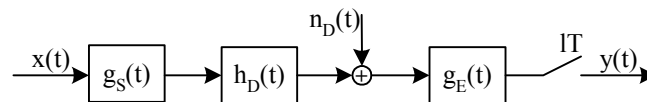


Abbildung 6: Modell eines Übertragungssystems

Die zu übertragenden Signale $x(t)$ werden zunächst durch das Sendefilter $g_S(t)$ spektral geformt und über den diskreten Übertragungskanal $h_D(t)$ übertragen. Störungen treten durch die im Übertragungskanal $h_D(t)$ verursachten Intersymbolinterferenzen (ISI) sowie in Form von additiven, weißen, gaußverteilten und mittelwertfreien Rauschprozessen $n_D(t)$ auf. Das empfangene Signal wird anschließend durch das Empfangsfilter mit der Impulsantwort $g_E(t)$ bandbegrenzt und zu den Zeitpunkten $t = lT$ abgetastet. Aus Implementierungsgründen werden für OFDM nicht überlappende Zeitsignale verwendet. Dadurch kann das folgende Impulsformungsfiler für die Symboldauer T genutzt werden (2.3).

$$g_S(t) = g_E(t) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } t \in [0, T] \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.3)$$

Das zeitdiskrete Modell des Übertragungskanals beschreiben die Gleichungen (2.4) und (2.5) unter Verwendung des Faltungsoperators $\bullet$.

$$h_l = g_S(t) \bullet h_D(t) \bullet g_E(t) \big|_{t=lT} \quad (2.4)$$

$$n_l = n_D(t) \bullet g_E(t) \big|_{t=lT} \quad (2.5)$$

Die gesamte Übertragung des OFDM-Systems kann durch (2.6) dargestellt werden [59].

$$\begin{aligned} Y_l &= \text{DFT}(\text{IDFT}(X_l) \bullet h_l + n_l) \\ &= \text{DFT}(\text{IDFT}(X_l) \bullet h_l) + N_l \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dabei werden mit Y_l und X_l die N empfangenen bzw. gesendeten Konstellationspunkte des l -ten OFDM-Symbols im Frequenzbereich, mit h_l die Kanalimpulsantwort und mit n_l das Rauschsignal des Kanals während des l -ten OFDM-Symbols charakterisiert.

Entsprechend der Annahme von weißen, additiven und gaußverteilten Störungen des OFDM-Systems bestimmt der Term (2.7) ein unkorreliertes gaußverteiltes Rauschen im Frequenzbereich.

$$N_l = \text{DFT}(n_l) \quad (2.7)$$

Die Umwandlung einer zyklischen Faltungsoperation zweier Signale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich führt zu einer Multiplikation der Einzelelemente. Die Übertragung des OFDM-Systems kann gemäß (2.8) umformuliert werden. H_l kennzeichnet die DFT der Kanalimpulsantwort h_l des l -ten OFDM-Symbols.

$$Y_l = X_l \cdot \text{DFT}(h_l) + N_l = X_l \cdot H_l^T + N_l \quad (2.8)$$

Aus den bisherigen Überlegungen ergibt sich, dass sich das OFDM-System als ein Übertragungssystem von parallelen, unabhängigen Kanälen mit additivem, weißem gaußverteilterm Rauschen darstellen lässt. Abbildung 7 zeigt die entsprechende Systemstruktur. Die Filterkoeffizienten der Fouriertransformierten der Kanalimpulsantwort werden durch H_l gekennzeichnet. Die Unterträger markiert der Trägerfrequenzindex k im Bereich $[1, \dots, N]$.

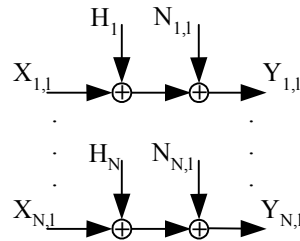


Abbildung 7: OFDM-System als Gruppe von parallelen Übertragungskanälen

Durch die Verwendung einer rechteckförmigen Zeitfensterung ergibt sich eine si-förmige Spektraldarstellung der Übertragung in jedem der N Teilkanäle mit Bandbreite B . Abbildung 8 zeigt den Spektralverlauf der gesendeten Symbole (Betrag normiert auf den Maximalwert) auf N Unterträgern mit dem Abstand B . Die Orthogonalität der Unterträger ist an den Stellen der Trägerfrequenz f_k deutlich zu erkennen, da nur auf jeweils einem einzigen Unterträger mit maximaler Leistung gesendet wird, während die benachbarten Unterträger bei der Frequenz f_k eine Nullstelle im Spektralbereich aufweisen und somit keine Störeinflüsse einstreuen [59].

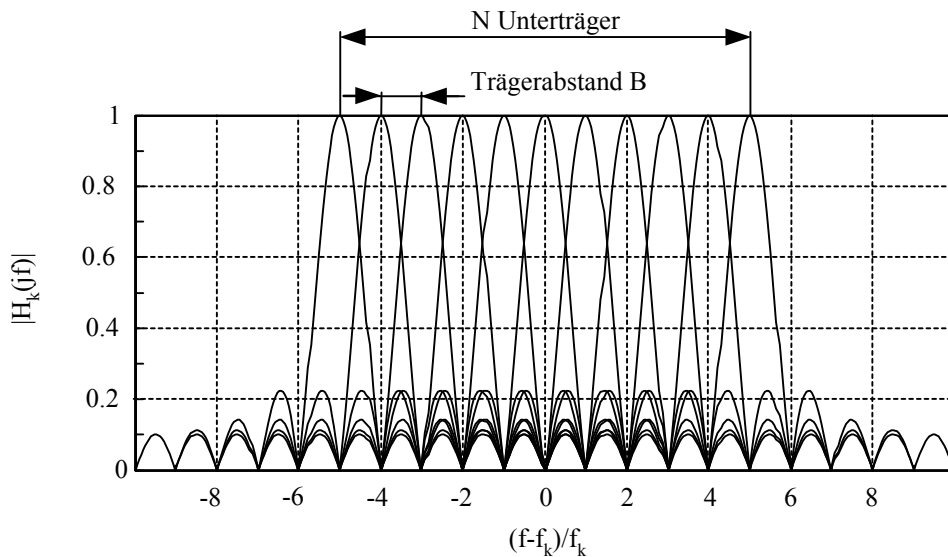


Abbildung 8: Spektrale Darstellung eines OFDM-Systems

Die Übertragung über reelle Basisbandkanäle erfordert eine Anpassung der OFDM-Sendestruktur, weil durch die IDFT- bzw. DFT-basierte OFDM-Modulation die komplexen Sendesymbole im Frequenzbereich in komplexe Sendesymbole im Zeitbereich transformiert werden. Für eine direkte Sendeoperation der transformierten Daten über den Basisbandkanal muss jedoch, durch die Anpassung der OFDM-Sendestruktur, die Ausgabe von reellen Zeitsignalen sichergestellt sein. Systemtheoretisch kann hier die konjugiert gerade Symmetrie der Spektren reeller Signale [128] genutzt werden. Infolge der Erweiterung von N komplexen Signalraumpunkten auf $\tilde{N} = 2N$ konjugiert komplexe Signalraumpunkte lässt sich durch die Transformationsvorschrift nach (2.9) aus dem komplexen Frequenzbereichssignal ein reelles Zeitbereichssignal generieren [192].

$$\begin{aligned} X'_k &= X_k, & k &= 1, \dots, N \\ X'_{\tilde{N}-k} &= X_k^*, & k &= 1, \dots, N \\ X'_0 &= \operatorname{Re}\{X_0\}, & X'_N &= \operatorname{Im}\{X_0\} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Im leitungsgebundenen OFDM-Empfangssystem wird eine inverse Struktur aufgebaut. Da hierbei jedoch die nach der DFT erhaltenen Werte $Y_{k,1}$, $k = N+1, \dots, 2N$ als die konjugiert komplexen Werte von $Y_{k,1}$, $k = 1, \dots, N-1$ des Empfangsvektors redundant sind, können sie verworfen werden. Lediglich $Y_{N,1}$ wird zur Bildung des ersten komplexen Symbols $Y_{0,1}$ benötigt. Diese Form der reellen OFDM-Basisbandübertragung wird als Discrete Multi Tone (DMT) bezeichnet [44]. Der wesentliche Unterschied zum OFDM-Verfahren ist deshalb in der Realisierung eines reellen Zeitbereichssignals durch die konjugiert komplexe Erweiterung der Sendesymbole zu sehen. Die prinzipielle Systemstruktur unter Verwendung von parallelen orthogonalen Unterträgern bleibt hierbei jedoch erhalten.

Bei Mehrträgersystemen unterscheidet sich im Gegensatz zum konventionellen Frequenzmultiplex die Anzahl der Bits, die den einzelnen Unterträgern zugeordnet werden [44]. Jedes der N unabhängigen Untersignale stellt jeweils eine zu übertragende Signalraumkonstellation dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird von Quadraturphasenumtastung (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) als verwendete Signalraumkonstellation ausgegangen [128]. Abbildung 9 zeigt eine derartige Signalraumkonstellation für eine Übertragung von 2 Bits. Die Symbolenergie des QPSK-Symbols bezeichnet hierbei E_S und die Bitenergie E_B [93].

Die QPSK-Darstellung ist aus der Modulation mit einer Phasenverschiebung von $\pi/2$ abgeleitet. Die in Abbildung 9 dargestellte Signalraumkonstellation für eine Bitgruppe der Länge 2 kann auch durch die Real- und Imaginärteile der Signalpunkte bestimmt werden. Dieser Fall wird als Quadraturamplitudenmodulation (QAM) bezeichnet und ist im betrachteten Fall mit der QPSK-Darstellung identisch.

Variiert die Länge der zu übertragenden Bitgruppen, werden verschiedene QAM-Symbolalphabete eingesetzt. Die Datenrate der Mehrträgerübertragung maximiert sich, wenn jedem Unterträger die an die Übertragungskapazität des Teilkanals angepasste Anzahl von Bits pro Symbol zugeordnet wird. Dabei muss gleichzeitig das Sendespektrum durch eine optimale Leistungsverteilung auf alle Unterträger im Sinne der Kanalkapazität nach Shannon geformt werden.

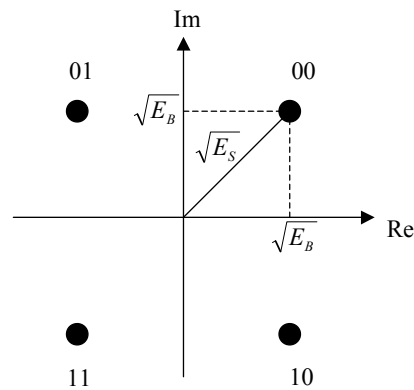


Abbildung 9: QPSK-Signalpunkte mit Symbolenergie E_S und Bitenergie E_B [128]

Die Aufteilung der Bits in die unterschiedlichen Signalraumkonstellationen im Frequenzbereich des OFDM-Modulators und damit die Anzahl der zu übertragenden Bits pro Unterträger legen Bitzuweisungsalgorithmen fest. Die betrachteten Systemumgebungen bestimmen maßgeblich die Aufteilung. Insbesondere die Eigenschaften des Übertragungskanal sind hier von entscheidender Bedeutung. Die Übertragungseigenschaften von leitungsgebundenen OFDM-Systemen werden in Abschnitt 2.3 näher betrachtet. Auf die Bitzuweisungsalgorithmen wird in Abschnitt 2.5 näher eingegangen.

2.3 Leitungsgebundene OFDM-Systeme

Nach der Vorstellung der Systemgrundlagen für die OFDM-Übertragung erfolgt in diesem Abschnitt die Betrachtung der leitungsgebundenen Mehrträgersystemumgebung. Diese ist von besonderem Interesse, da sie die konkrete Realisierung der OFDM-Systeme maßgeblich beeinflusst. Beispielsweise unterscheiden sich die Anzahl der zu verwendenden Träger und die Länge der OFDM-Symbole bei verschiedenen Einsatzszenarien deutlich [3, 6, 108, 118].

Für die leitungsgebundene Übertragung können prinzipiell verschiedene Leitungstypen, wie z. B. Koaxialkabel oder ungeschirmte, verdrehte Kupferdoppelader (Twisted Pair), verwendet werden. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und der vorhandenen aber ungenutzten Übertragungskapazität sind dabei die bereits verlegten, ungeschirmten, verdrehten Kupferdoppeladern von besonderer Bedeutung. Durch relativ einfache Veränderungen der Übertragungsverfahren kann die verfügbare Datenrate auf den Teilnehmeranschlussleitungen erheblich erhöht werden [39]. Dadurch lassen sich die Forderungen nach höheren Datenraten erfüllen, ohne auf zeit- und kostenintensive Neuverlegungen von Leitungen im Teilnehmeranschlussbereich zurückgreifen zu müssen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt daher eine Beschränkung auf diese ungeschirmten, verdrehten Kupferdoppeladern.

2.3.1 Übertragungseigenschaften von Teilnehmeranschlussleitungen

Für die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens einer verdrehten Kupferdoppelader wird auf das Modell eines homogen, symmetrischen Leiterpaars entsprechend Abbildung 10 zurückgegriffen [238]. Die Übertragungseigenschaften werden durch den komplexen, frequenzabhängigen Ausbreitungskoeffizienten γ und den komplexen, frequenzabhängigen Wellenwiderstand Z_L vollständig beschrieben. Mithilfe der Leitungsbeläge für Widerstand R' , Induktivität L' , Leitwert G' und Kapazität C' , lässt sich der Ausbreitungskoeffizient γ als Summe des Dämpfungskoeffizienten α_N und des Phasenkoeffizienten β nach (2.10)

ausdrücken. Die Gleichung (2.11) definiert den komplexen Wellenwiderstand Z_L . Die Größen Z_A und Z_L in Abbildung 10 bezeichnen die Impedanzen der Ausgangslast der Quelle und der Leitung.

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha_N + j\beta \quad (2.10)$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (2.11)$$

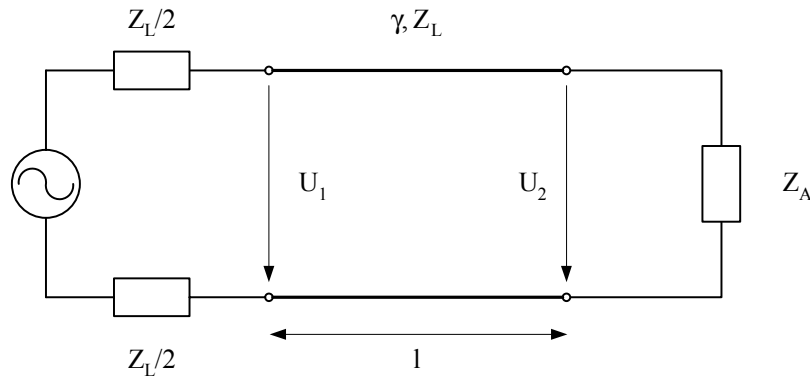


Abbildung 10: Beschaltetes, homogenes, symmetrisches Leiterpaar der Länge l [149]

Der S_{21} -Parameter der aus der Netzwerktheorie bekannten Streumatrixdarstellung charakterisiert die Übertragungsfunktion H des Leiterpaares. Damit ergeben sich die nachfolgenden Gleichungen für die Übertragung (2.13) unter Verwendung der Spannungen U_1 bzw. U_2 und des Übertragungsmaßes g (2.12).

$$g = \gamma \cdot l \quad (2.12)$$

$$H = \frac{U_2}{U_1} = e^{-g} = e^{-((\alpha_N + j\beta) \cdot l)} \quad (2.13)$$

Ein leitungsgebundener Übertragungskanal besteht meist aus mehreren zusammenhängenden homogenen Leitungssegmenten. Durch die Standardisierungsgremien werden deshalb zur Vereinheitlichung der Topologien verschiedene Testszenarien eingeführt [3, 5]. Die Übertragungsfunktion der gesamten Leitung kann aus den Übertragungsfunktionen der einzelnen Teilstücke berechnet werden. Die Verwendung von Streumatrizen für die einzelnen homogenen Leitungsstücke erleichtert die Berechnung der Eigenschaften des gesamten Übertragungskanals durch die Multiplikation der Streuparameter der Einzelabschnitte [188].

Aus (2.10) und (2.13) ergibt sich eine starke Dämpfung bei großen Leitungslängen l und hohen Frequenzen ω auf der Leitung. Wegen der Auswirkungen der Dämpfung auf die Güte der Übertragung entsprechend (2.13) hängt die Datenrate der Teilnehmeranschlussleitungen von der Länge der Leitungen ab. Die maximal erreichbare Datenrate ist umso höher, je kürzer die zu überbrückende Distanz ist.

2.3.2 Systemaspekte der leitungsgebundenen Übertragung

Verschiedene Varianten der Umsetzung der Systemkonzepte zur hochratigen Übertragung haben zu einer ganzen Familie von xDSL-Verfahren geführt. Das momentan am weitesten verbreitete Verfahren für die OFDM-basierte Übertragung im Teilnehmeranschlussbereich ist

ADSL [3]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird vor allem auf das neuere VDSL-Verfahren eingegangen [5], da es höhere Datenraten ermöglicht. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale zwischen ADSL und VDSL sind der Tabelle 1 im Kapitel 1 zu entnehmen. Eine detailliertere Übersicht zu weiteren xDSL-Verfahren ist in [160] zu finden.

Die beiden Übertragungsrichtungen in leitungsgebundenen Netzen werden als Upstream (Übertragung vom Endteilnehmer zur Vermittlungsstelle) und Downstream (Übertragung von der Vermittlungsstelle zum Endteilnehmer) gekennzeichnet. Das für die herkömmliche Telefonie verwendete Frequenzband wird aus Kompatibilitätsgründen nicht für die Mehrträgerübertragung genutzt. Für die Nutzung des nicht für die Telefonie gebrauchten Frequenzspektrums ergeben sich prinzipiell zwei unterschiedliche Möglichkeiten:

1. Übertragung von Up- und Downstream in Frequenzgetrenntlage
Die Übertragung findet in getrennten Frequenzbändern statt. Die Trennung lässt sich durch die Verwendung entsprechender Bandpassfilter realisieren.
2. Übertragung von Up- und Downstream unter Nutzung des gleichen Frequenzbandes
Die Übertragung findet in einem überlappenden Frequenzband statt. Die Trennung der Übertragungsrichtungen erfordert in diesem Fall ein aufwändiges Echokompensationsverfahren (z. B. [157]).

Für die konkreten Ausgestaltungen der VDSL-Übertragung ist die Übertragung mit getrennten Frequenzbändern standardisiert. Dadurch erübrigt sich die Kompensation der Störungen (Echos), die bei gemeinsamer Verwendung von Frequenzbändern für beide Übertragungsrichtungen bei Übertragung mit überlappenden Frequenzbändern auftreten können.

Die VDSL-Standards definieren verschiedene Bandpläne für die Aufteilung der Frequenzbänder für Upstream- (US) und Downstream- (DS) Richtung. Zur Minderung der Auswirkung der frequenzselektiven Übertragungseigenschaften werden jeweils zwei Bänder für die einzelnen Übertragungsrichtungen definiert. Abbildung 11 zeigt die Aufteilung der Frequenzbereiche der beiden gebräuchlichsten Bandpläne 997 und 998.

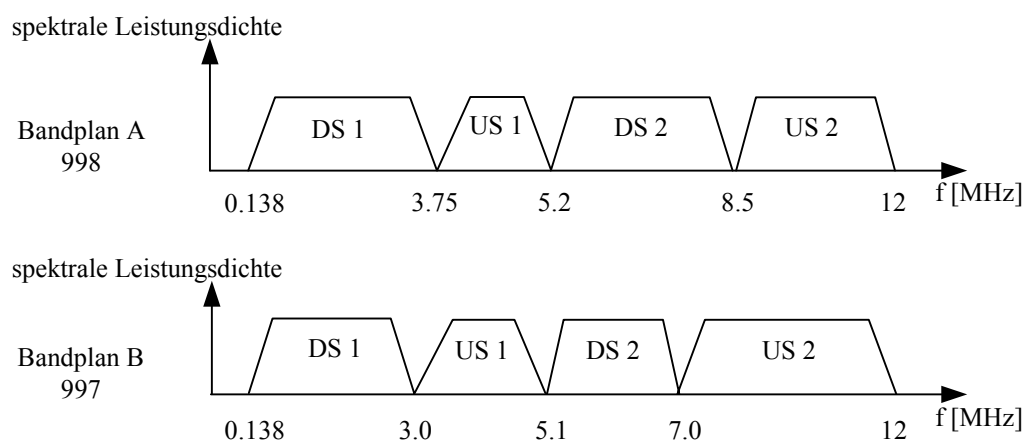


Abbildung 11: VDSL-Bandpläne

2.3.3 Störumgebungen bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen

Eine genaue Betrachtung der Störumgebung ist für die Untersuchung der leitungsgebundenen Übertragungssysteme von besonderer Bedeutung. Nur bei Beachtung der auftretenden Störungen kann die volle Leistungsfähigkeit der Verfahren erreicht werden.

In Bezug auf die Störumgebung ist bei Kupferdoppeladern von besonderem Interesse, dass die Leitungen häufig zu Kabelbündeln zusammengefasst sind, von denen lediglich einzelne Doppeladern direkt bei den Teilnehmern ausgekoppelt werden [160]. Die Leitungsbündel bestehen aus 50 und mehr Leitungen, in denen es zu elektromagnetischen Überkopplungen aus benachbarten Twisted-Pair-Leitungen kommt. Diese Überkopplung wirkt sich hinsichtlich der Übertragung auf der betrachteten Kupferdoppeladerleitung als Störung aus. Prinzipiell lässt sich eine Einteilung der Störerklassen in drei Kategorien vornehmen:

1. Nahnebensprechen (Near End Cross Talk, NEXT)
2. Fernnebensprechen (Far End Cross Talk, FEXT)
3. Impulsstörungen

Als Nahnebensprechen werden Störungen bezeichnet, die durch Sender verursacht werden, die sich auf der gleichen Seite befinden, wie der Empfänger der betrachteten Twisted-Pair-Leitung. Beim Nahnebensprechen ist der Einfluss der Kabeldämpfung relativ gering. Deshalb beeinflusst die Leitungslänge l die Störung nicht. Die Übertragung mit überlappenden Frequenzbändern kann als eine Form der NEXT-Störung angesehen werden, die sich jedoch durch die Verwendung eines Echokompensators reduzieren lässt. Bei der Übertragung mit getrennten Frequenzbändern kann der Einfluss des Nahnebensprechens vernachlässigt werden, weil sich die Störungen auf Frequenzbereiche auswirken, die für den Empfänger nicht relevant sind.

Als Fernnebensprechen werden Störungen bezeichnet, die von Sendern am entgegengesetzten Ende der betrachteten Twisted-Pair-Leitung verursacht werden. Im Gegensatz zur NEXT-Störung hängt die Dämpfung bei der FEXT-Störung von der Leitungslänge l ab. Da die VDSL-Standards eine Übertragung in Frequenzgetrenntlage beinhalten, wird die Leistungsfähigkeit dieser Systeme maßgeblich durch FEXT-Störungen beeinflusst. Beim Einsatz anderer xDSL-Systeme im gleichen Frequenzbereich tritt auch NEXT auf.

Abbildung 12 kennzeichnet die Klassifikation der NEXT- und FEXT-Störer.

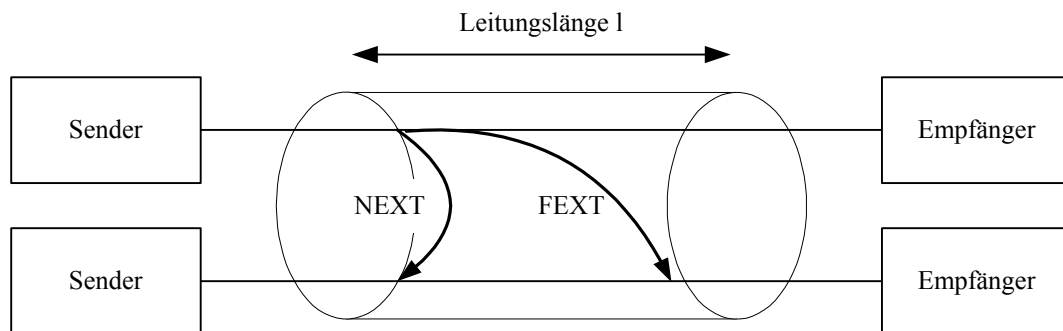


Abbildung 12: Nah- und Fernnebensprechen bei Teilnehmeranschlussleitungen

Die Gleichungen (2.14) und (2.15) beschreiben die spektralen Leistungsdichten der NEXT- und FEXT-Störungen [59]. Dabei bezeichnen k_{NEXT} und k_{FEXT} die Einkopplungskonstanten, $P_S(f)$ das Leistungsspektrum des Sendesignals, l die Länge und k den Wellenwiderstand der Leitung.

$$P_{\text{NEXT}}(f) = P_S(f) \cdot k_{\text{NEXT}} \cdot f^{3/2} \quad (2.14)$$

$$P_{\text{FEXT}}(f) = P_S(f) \cdot k_{\text{FEXT}} \cdot f^2 \cdot l \cdot e^{-lk\sqrt{f}} \quad (2.15)$$

Impulsstörungen werden beispielsweise durch transiente Überkopplungen aus parallel verlaufenden Leitungen oder Schaltimpulsen auf der gleichen Leitung verursacht. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind vor allem die Auswirkungen der Nebensprechstörungen und deren Reduktion zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Übertragung von Belang. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf die Impulsstörungen nicht mehr eingegangen.

2.4 Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften

Auf der Basis der vorgestellten Grundlagen der OFDM-Übertragung wird in diesem Abschnitt auf die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen eingegangen. Diese Veränderlichkeit resultiert aus den Kanalcharakteristiken einerseits und den Nebensprechstörungen andererseits.

Veränderungen der Kanalcharakteristik wirken sich entsprechend (2.12) und (2.13) direkt auf die Übertragungsfunktion des Kanals aus und beeinflussen die Übertragung maßgeblich. Ereignisse, die zur Veränderung der Kanalcharakteristik führen, werden meist durch externe Faktoren verursacht, wie z. B. die Umrangierung von Leitungen. Diese Ereignisse treten selten auf und variieren die Kanalcharakteristik nur in großen zeitlichen Abständen.

Durch das sich aus der elektromagnetischen Kopplung ergebende Nebensprechen stören Signalanteile der Übertragung auf einer Leitung die Übertragung auf benachbarten Leitungen. Nach (2.14) und (2.15) hängen die Nebensprechstörungen vom Sendeleistungsspektrum $P_S(f)$ der benachbarten Leitungen ab. Die Übertragung auf der Leitung eines Teilnehmers verursacht Störungen auf den benachbarten Leitungen. Aus der Literatur [220] ist bekannt, dass dieser Effekt nicht auf allen Leitungen gleich groß ist. Vielmehr sind die Auswirkungen bei benachbarten Leitungen sehr stark, während weiter entfernte Leitungen nicht mehr beeinflusst werden.

Das Sendeleistungsspektrum $P_S(f)$ auf einer Leitung wird von der Übertragung des angeschlossenen Teilnehmers bestimmt. Erfolgt keine Übertragung, dann wird auch keine Sendeleistung benötigt und die benachbarten Leitungen werden nicht gestört. Bei einer Übertragung mit hoher Datenrate wird eine hohe Sendeleistung in einem breiten Frequenzspektrum f benötigt. Die Nebensprechstörungen sind bei konstanter Systemreserve in diesem Fall dementsprechend höher. Da die vom Teilnehmer angeforderte Datenrate starken Schwankungen unterworfen ist, fluktuieren auch die Nebensprechstörungen. Dieser Effekt führt ebenfalls zur Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften. Wegen der höheren Variabilität bestimmen die Nebensprechstörungen die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften maßgeblich.

Durch das Nebensprechen ergibt sich eine direkte Beeinflussung der Leistungsfähigkeit der Übertragung auf benachbarten Leitungen. Eine hohe verwendete Datenrate auf einer Leitung führt durch die Nutzung vieler Unterträger zu einer starken Störung der benachbarten Leitungen. Daraus resultiert eine geringere Leistungsfähigkeit der benachbarten Leitungen in Form von Parametern, wie z. B. der Datenrate und der Reichweite.

Im Umkehrschluss können durch die Verringerung der genutzten Datenrate auf einer Leitung die störenden Nebensprecheinkopplungen auf andere Leitungen deutlich verringert werden. So wird eine höhere Leistungsfähigkeit auf den anderen Leitungen möglich.

OFDM-basierte Übertragungsverfahren gehen auf die vorhandenen Störumgebungen und deren Veränderlichkeit ein. Die im Abschnitt 2.5 vorgestellten Algorithmen zur Bitzuweisung versuchen, durch eine möglichst geschickte Bitbelegung die Nebensprecheffekte zu reduzieren.

Die in Abschnitt 2.6 untersuchten adaptiven Modulationsverfahren erlauben die Reaktion auf veränderliche Übertragungseigenschaften im laufenden Betrieb.

2.5 Bitzuweisungsalgorithmen

Einer der Vorteile von Mehrträger- gegenüber Einträgerverfahren ist die größere Flexibilität in Bezug auf die Granularität der Signalkonstellation und damit der verwendbaren Datenrate. Bei der Mehrträgerübertragung kann den verschiedenen Unterträger eine differenzierte Anzahl von Bits zugewiesen werden. Ursache dafür ist der unterschiedliche Signalrauschabstand (Signal to Noise Ratio, SNR) in den einzelnen Teilbandbreiten. Jedem Unterträger wird die Anzahl Bits zugeteilt, die bei dem jeweiligen SNR mit einer geforderten Bitfehlerwahrscheinlichkeit übertragen werden kann. Dadurch wird eine im Vergleich zur Einträgerübertragung verbesserte Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite möglich. Ein Mehrträgersystem überträgt eine höhere Anzahl von Bits über wenig gestörte Unterträger und weist dagegen stärker gestörten Trägern nur eine geringere Anzahl von Bits zu.

Die Zuteilung der Anzahl von Bits auf die jeweiligen Unterträger übernimmt ein Bitzuweisungsalgorithmus (Bit Loading). Dieser legt fest, wie die Gesamtdatenrate auf die einzelnen Unterträger aufgeteilt wird und bildet damit eine wesentliche Grundlage der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen. In [44] wird eine Berechnung der auf jedem Unterträger maximal zu übertragenden Bits vorgeschlagen. Hierzu wird in Anlehnung an die theoretische Kanalkapazität die Belegung des k -ten Unterträgers der i -ten Leitung mit $b_i(k)$ Bits nach (2.16)

$$b_i(k) = \text{round} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}_i(k)}{\Gamma} \right) \right] \quad (2.16)$$

errechnet und dabei auf eine ganzzahlige Anzahl von Bits pro Träger gerundet. $\text{SNR}_i(k)$ kennzeichnet den SNR des k -ten Unterträgers der i -ten Leitung. Die Größe Γ wird als SNR-Lücke (SNR Gap) bezeichnet und ist ein Maß für das Verhältnis zwischen der theoretisch optimalen und der realistisch möglichen Leistung. Für die bei VDSL-Systemen verwendete QAM-Kodierung lässt sich Γ durch (2.17)

$$\Gamma = 9,8 + \gamma_{\text{margin}} - \gamma_{\text{code}} \quad (2.17)$$

ausdrücken, wobei γ_{margin} als frei wählbarer Parameter eine Aussage über die Robustheit des Systems in einer Umgebung mit gaußschen Störungen ermöglicht, während γ_{code} den durch geeignete Codierungsverfahren gewonnenen Gewinn kennzeichnet. Für die bei VDSL-Verfahren spezifizierte Bitfehlerwahrscheinlichkeit von $P_{\text{error}} = 10^{-7}$ werden hierbei Werte von $\gamma_{\text{margin}} = 6\text{dB}$ und $\gamma_{\text{code}} = 3,8\text{dB}$ angenommen [146]. Die aus Gleichung (2.16) erhaltene Bitbelegung $b_i(k)$ der einzelnen Unterträger wird den Sendesymbolen der

Unterträger in einer $2^{b_i(k)}$ -QAM-Signalraumkonstellation zugewiesen. Bei der OFDM-Übertragung lassen sich die einzelnen Unterträger als voneinander entkoppelte parallele M-QAM-Einträgersysteme darstellen. M bezeichnet in diesem Fall die Anzahl der QAM-Signale, die aus der ganzzahligen Bitbelegung pro Unterträger von $2^{b_i(k)}$ Bits hervorgeht. Die Gesamtdatenrate R_i einer Leitung i setzt sich gemäß (2.18) aus der Summe der pro OFDM-Symbol übertragenen Bits $b_i(k)$ aller N Unterträger zusammen.

$$R_i = \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{k=1}^N b_i(k) \quad (2.18)$$

Auf Basis der für das VDSL-Verfahren nach [5] vorgeschriebenen Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-7} ist in Abbildung 13 die sich ergebende Bitbelegung in Upstream-Richtung für eine homogene Übertragungsstrecke mit 300 m Leitungslänge dargestellt. Dabei ist die unterschiedliche Anzahl von zugewiesenen Bits in den Unterträgern und die Ausblendung der für die Downstream-Übertragung verwendeten Unterträger deutlich zu erkennen.

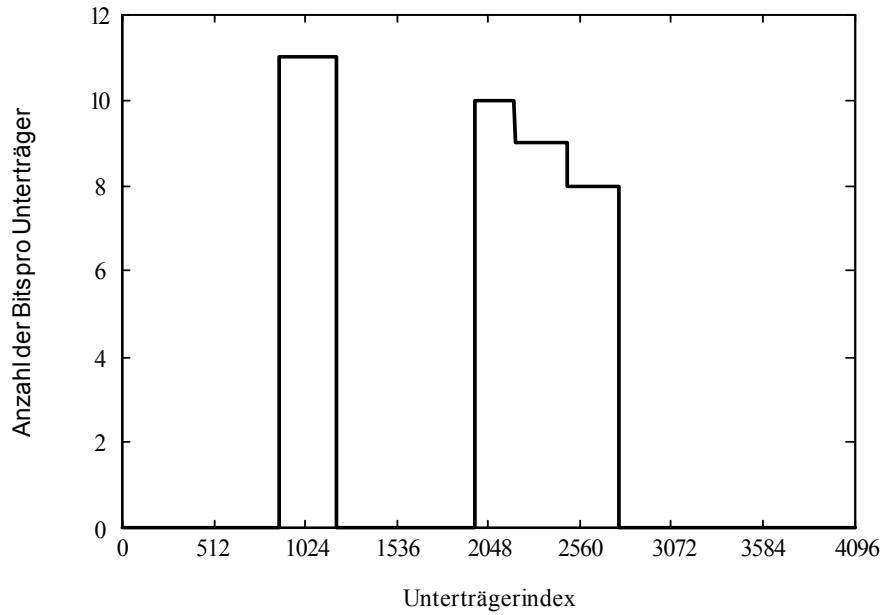


Abbildung 13: Bitbelegung eines Übertragungskanal

Die Verfahren zur Bitzuweisung können in zwei Gruppen eingeteilt werden, Algorithmen mit Einzelnutzer- und mit Mehrnutzerbetrachtung. Diese werden in den folgenden Teilabschnitten diskutiert.

2.5.1 Bitzuweisung mit Einzelnutzerbetrachtung

Bei der Einzelnutzerbetrachtung der Bitzuweisung wird der durch Nebensprechen erzeugte Einfluss benachbarter Leitungen nicht beachtet. Der Signalrauschabstand $\text{SNR}_i(k)$ lässt sich unter Verwendung der Signalsendeleistung $P_i(k)$, der Übertragungsfunktion $H_i(k)$ und der Varianz einer gaußschen Störung $N_i(k)$ des Unterträgers k der Leitung i durch (2.19) ausdrücken [44].

$$\text{SNR}_i(k) = \frac{P_i(k) |H_i(k)|^2}{N_i(k)} \quad (2.19)$$

Von besonderem Interesse bei der Bitzuweisung ist die Optimierung der resultierenden Datenrate unter Beachtung der eingesetzten Sendeleistung. In der Literatur [209] werden für diese Problemstellung zwei unterschiedliche Optimierungsprinzipien angeführt. Ziel des

Ansatzes der Minimierung der Sendeleistung (Power Minimization oder Margin Maximization) ist die Zuweisung der Bits und Sendeleistung zu den Unterträgern und Leitungen, sodass für eine definierte Summe der Datenraten aller Leitungen die geringst mögliche Sendeleistung benötigt wird (2.20) [29].

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N P_i(k) \\ \text{sodass} \quad & \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N b_i(k) \geq R \end{aligned} \quad (2.20)$$

Bei dieser Darstellung symbolisieren $P_i(k)$ die Sendeleistung der Leitung i in Unterträger k , T_{Symbol} die Symboldauer, R die Summendatenrate aller Leitungen und $b_i(k)$ die Bitbelegung der Leitung i in Unterträger k .

Demgegenüber optimiert der Ansatz der Ratenmaximierung (Rate Maximization) die Summendatenrate R in Bezug auf eine festgelegte maximale Sendeleistung $\bar{P}$ entsprechend Gleichung (2.21) [29].

$$\begin{aligned} \max \quad & R = \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N b_i(k) \\ \text{sodass} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N P_i(k) \leq \bar{P} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Problematisch beim Ansatz der Ratenmaximierung ist der Umstand, dass a priori nicht feststeht, ob die angestrebte Summendatenrate erreicht werden kann. Daher bleibt bis zum Ende der Optimierung unklar, ob die Anforderungen der Teilnehmer befriedigt werden können.

Für die Realisierung der Ratenmaximierung werden in der Literatur verschiedene Verfahren vorgeschlagen [137, 218]. Ziel des in [137] vorgeschlagenen Algorithmus' ist eine effiziente und wenig komplexe Bitzuweisung unter Nutzung der Lagrange-Optimierung. Das in [218] vorgeschlagene Verfahren strebt ebenfalls eine effiziente Realisierung an, folgt jedoch nicht dem Weg der sukzessiven Bitzuweisung. Vielmehr werden in [218] von einer initialen Maximalzuweisung solange Bits entfernt, bis Randbedingungen, wie z. B. die maximale Sendeleistung pro Leitung und Unterträger, erfüllt sind.

Aus der Literatur [146] ist bekannt, dass beide Optimierungsansätze äquivalent zueinander sind. Der Ansatz der Sendeleistungsminimierung stellt aber für die praktische xDSL-Realisierung die interessantere Problemstellung dar, da durch die Netzbetreiber das Erreichen vorgegebener Datenraten mit möglichst niedriger Sendeleistung angestrebt wird [220]. Deswegen wird der Ansatz der Sendeleistungsminimierung im weiteren Verlauf dieser Arbeit präferiert.

Für die Sendeleistungsminimierung existiert eine Vielzahl verschiedener Ansätze. Diese können in optimale [21, 101] und suboptimale Lösungen [30, 41, 74] unterschieden werden.

Der in [21] und [101] vorgeschlagene Hughes-Hartogs-Algorithmus basiert auf der sukzessiven Zuweisung der Bits auf die Unterträger, bis die angestrebte Summendatenrate erreicht ist. Diese Zuteilung folgt der bereits seit den 60er Jahren [76] bekannten Erkenntnis, dass die Verteilung der Sendeleistung auf einen spektral geformten Kanal der Water-Pouring-Verteilung entspricht. Die Belegung ist entsprechend Abbildung 14 dem sukzessiven „Nachgießen“ der Bits in einen „See“ vergleichbar, dessen „Wasserlinie“ durch die Sendeleistung definiert wird. Daher spricht man auch von einem Water-Filling-Verfahren. Der Algorithmus findet die optimale Bitbelegung unter Verwendung eines iterativen Ansatzes, bei dem in jedem Iterationsschritt ein

Bit dem Unterträger zugewiesen wird, der die geringste Erhöhung der Sendeleistung verursacht [146]. Ein solcher Ansatz wird als Greedy-Verfahren bezeichnet. Die Komplexität und die damit verbundene langsame Konvergenz des Verfahrens hat zur Entwicklung von suboptimalen Algorithmen mit geringerer Komplexität geführt.

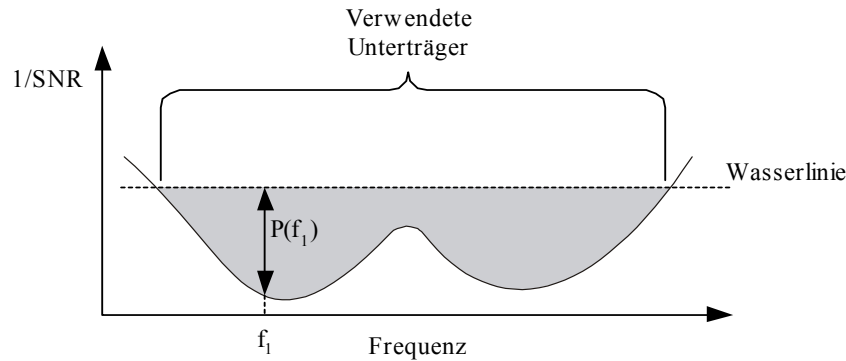


Abbildung 14: Water-Filling-Verfahren

In [74] wird ein Bitzuweisungsalgorithmus beschrieben, der eine konstante Bitfehlerwahrscheinlichkeit über alle Unterträger bei Berücksichtigung der vorgegebenen Sendeleistung und Datenrate sicherstellt. Weitere Algorithmen [30, 41] optimieren die Sendeleistung in Bezug auf eine vorgegebene Summendatenrate unter Verwendung des Greedy-Verfahrens.

Allen Bitzuweisungsalgorithmen mit Einzelnutzerbetrachtung ist gemein, dass immer nur die Eigenschaften einer Leitung betrachtet werden. Entsprechend Gleichung (2.15) verursacht die Übertragung auf einer Leitung aber auch Signaleinkopplungen auf anderen Leitungen. Diese Einkopplungen stören die ursprüngliche Übertragung auf den anderen Leitungen, verringern ihren Signalausabstand und führen damit zu einer niedrigeren Datenrate.

Bei der Einzelnutzerbetrachtung werden die durch FEXT eingestrahlten Störsignale durch Schätzungen approximiert. Diese Schätzungen basieren auf Worst-Case-Nebensprechmodellen, die eine Sicherheitsreserve beinhalten. Die konservativen Definitionen der Sendeleistungsspektren münden in xDSL-basierten Teilnehmeranschlussnetzen, die in den meisten Einsatzszenarien zu restriktiv in Bezug auf die erreichbare Datenrate und Reichweite sind [220].

2.5.2 Bitzuweisung mit Mehrnutzerbetrachtung

Die Verwendung von Algorithmen, welche die sich ändernden FEXT-Störungen beinhalten, verspricht eine Steigerung von Leistungsparametern, wie die erreichbare Datenrate und die Reichweite, bei der xDSL-Übertragung. Die Integration der Nebensprecheffekte führt zu Bitzuweisungsverfahren mit Mehrnutzerbetrachtung.

Die Betrachtung der realen Störeinflüsse aller Leitungen eines Übertragungssystems führt zu einem Szenario mit mehreren Teilnehmern (Multi-User Case). Abbildung 15 modelliert die FEXT-Koeffizienten eines Übertragungssystems mit zwei Sendern (Tx) und Empfängern (Rx). Es ist ersichtlich, dass neben den direkten Kopplungsparametern (H_{11} , H_{22}) auch Nebensprechparameter (H_{12} , H_{21}) existieren, welche die Einkopplung in die jeweils andere Leitung bezeichnen.

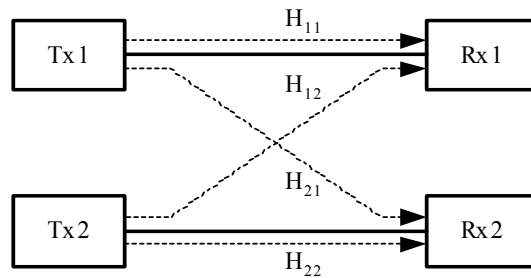


Abbildung 15: Kopplungs- und FEXT-Koeffizienten bei zwei Leitungen

Unter Betrachtung der realen Einflüsse der Einkopplungen kann der Signalrauschabstand auf der Leitung i mit Gleichung (2.22) beschrieben werden.

$$\text{SNR}_i(k) = \frac{|H_{i,i}(k)|^2 P_i(k)}{N_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^M |H_{i,j}(k)|^2 P_j(k)} \quad (2.22)$$

Dabei kennzeichnen $H_{i,i}(k)$ die Übertragungsfunktion, $P_i(k)$ die Sendeleistung und $N_i(k)$ die Stärke des gaußschen Rauschens auf der Leitung i im Unterträger k . Der Term $\sum_{j=1, j \neq i}^M |H_{i,j}(k)|^2 P_j(k)$ beschreibt die realen FEXT-Störungen der $M-1$ anderen Leitungen auf die Leitung i . Durch die Einbeziehung der wirklichen Nebensprecheffekte ergibt sich ein Zusammenhang zwischen den Störungen und der Übertragung auf benachbarten Leitungen. Deren Sendeleistung $P_j(k)$ verändert den Signalrauschabstand und beeinflusst damit die Übertragungseigenschaften auf der betrachteten Leitung i .

Gegenwärtig sind verschiedene Ansätze zur Mehrnutzerbitzuweisung bekannt. In [248] und [249] wird ein verteilter Ansatz zum iterativen Water-Filling (IW) vorgestellt. Dabei wird auf jeder Leitung der Water-Fill-Algorithmus iterativ angewendet. Die Zuweisung der Sendeleistung wird als konkurrierendes Spiel aufgefasst, bei dem jede Leitung versucht, ihre eigene Datenrate unter Beachtung der von den anderen Leitungen verursachten Störungen zu maximieren. Das Verfahren vollzieht eine schrittweise Aufteilung der genutzten Frequenzbereiche zwischen den beteiligten Leitungen. Durch die Reduktion der gemeinsam genutzten Unterträger werden die Störungen verringert, d.h., der Signalrauschabstand wird erhöht (2.19). Aus der Vergrößerung des Signalrauschabstandes resultiert die Erhöhung der verfügbaren Datenrate jeder einzelnen Leitung entsprechend Gleichung (2.16).

Durch die schrittweise Durchführung des Algorithmus beim iterativen Water-Filling erfolgt die Anpassung relativ langsam. Folglich ist das Verfahren nur bedingt für Umgebungen mit sich schnell ändernden Störungen geeignet. Da jede Leitung ihre Datenrate ohne Betrachtung der anderen Leitungen maximiert, ist die Leistungsfähigkeit des Algorithmus deutlich schlechter, als die in [42] vorgestellte Lösung für die zentral koordinierte Bitzuweisung [148].

In [42] wird das Problem der Maximierung der Summe der erreichbaren Datenraten zweier Leitungen durch eine Lagrange-Optimierung gelöst (2.23). Die Maximierung erfolgt entsprechend (2.23) unter der Randbedingung konstanter maximaler Signalsendeleistungen $(\bar{P}_1, \bar{P}_2)$ beider Leitungen. Die Terme $b_1(k)$, $b_2(k)$ und $P_1(k)$, $P_2(k)$ kennzeichnen die

zugewiesenen Bits bzw. die jeweilige Sendeleistung der Leitungen 1 und 2 in den Unterträgern k . Der Faktor w dient der Gewichtung der Datenrate auf der zweiten Leitung.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^N b_1(k) + w \sum_{k=1}^N b_2(k) \\ \text{sodass} \quad & \sum_{k=1}^N P_1(k) = \bar{P}_1 \quad \text{und} \quad \sum_{k=1}^N P_2(k) = \bar{P}_2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Dieser Lösungsansatz erweist sich in der Realisierung als ausgesprochen komplex und rechenaufwändig.

Der in [34] vorgestellte Ansatz zum optimalen Spektrummanagement für Mehrnutzer-DSL strebt die Ratenmaximierung einer Leitung unter Beachtung einer angestrebten Datenrate für eine R_1 oder mehrere weitere Leitungen R_2 an (2.24).

$$\max \quad wR_1 + (1-w)R_2 \quad (2.24)$$

Damit können unterschiedliche Datenraten für alle beteiligten Leitungen nicht erreicht werden. In [146] wird ein „Multi-User Bit-Loading“ (MUBL) genannter zentral koordinierter Ansatz vorgestellt. Die zentrale Koordination ist bei Teilnehmeranschlussleitungen von großer praktischer Bedeutung, da durch die Struktur der Netze eine zentrale Einheit in Form des DSL-Access-Multiplexers (DSLAM) gegeben ist. Ziel dieses Ansatzes ist die Minimierung der Sendeleistung $P_i(k)$ unter der Randbedingung einer zu erreichenden Summendatenrate R aller Leitungen (2.25).

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N P_i(k) \\ \text{sodass} \quad & \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N b_i(k) \geq R \end{aligned} \quad (2.25)$$

Ähnlich wie bei der Einzelnutzerbetrachtung kann diese Problemformulierung auch im Mehrnutzerfall durch das Greedy-Verfahren gelöst werden. Im Gegensatz zur Einzelnutzerbetrachtung wird bei der Mehrnutzerbetrachtung nicht nur die Sendeleistung einer Leitung beachtet, sondern auch die Auswirkungen auf die anderen Leitungen, die sich durch das Nebensprechen ergeben. Hierzu wird eine Kostenfunktion aufgestellt. Der Bitzuweisungsalgorithmus wählt dann den Unterträger und die Leitung aus, welche die geringsten Kosten verursachen.

Im Falle der Mehrnutzerbetrachtung wird die Kostenfunktion als die minimale Sendeleistungssteigerung aller Leitungen formuliert. Diese beinhaltet neben einer Steigerung der Sendeleistung auf der Leitung, in deren Unterträger ein Bit mehr übertragen wird, auch die erhöhte Sendeleistung auf den benachbarten Leitungen, um die Zunahme der FEXT-Störungen auszugleichen. Basierend auf der minimalen Sendeleistung $P^*(k, b_i(k))$ aller Leitungen M für eine Bitbelegung $b_i(k)$ im Unterträger k nach Gleichung (2.26) kann die Kostenfunktion $J(k, i)$ mit der Formulierung (2.27) bestimmt werden [146].

$$P^*(k, b_i(k)) = \min \sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k)) \quad (2.26)$$

$$J(k, i) = P^*(k, b_i(k) + e_k) - P^*(k, b_i(k)) \quad (2.27)$$

Dabei ist e_k der Einheitsvektor, dessen k -tes Element 1 ist und alle anderen Elemente 0 sind. Die bei allen Algorithmen verwendete Optimierung hinsichtlich einer Summendatenrate führt zu dem Problem, dass die Datenrate nicht gleichmäßig auf die beteiligten Leitungen verteilt wird. Vielmehr werden Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften bevorzugt, da diese weniger Sendeleistung für die Zuweisung der Bits benötigen. Sowohl die Koeffizienten der Übertragungsfunktion als auch die Nebensprechkoeffizienten hängen von den Charakteristiken der Leitungen ab. Abbildung 16 zeigt ein Szenario mit zwei Leitungen, bei dem die kürzere erste Leitung 600 m lang ist und die längere zweite Leitung 900 m lang ist. In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass im Frequenzbereich oberhalb 10 MHz die Nebensprechkopplungsfunktion H_{21} größer ist als die Übertragungsfunktion H_{22} der zweiten Leitung. Bei gleichem Leistungsdichtespektrum auf beiden Leitungen sind in diesem Beispiel die durch Nebensprechen von der ersten Leitung erzeugten Störungen größer, als die Nutzsignale auf der zweiten Leitung. Demzufolge wird die Übertragung auf der zweiten Leitung durch die FEXT-Störungen der ersten Leitung beeinträchtigt.

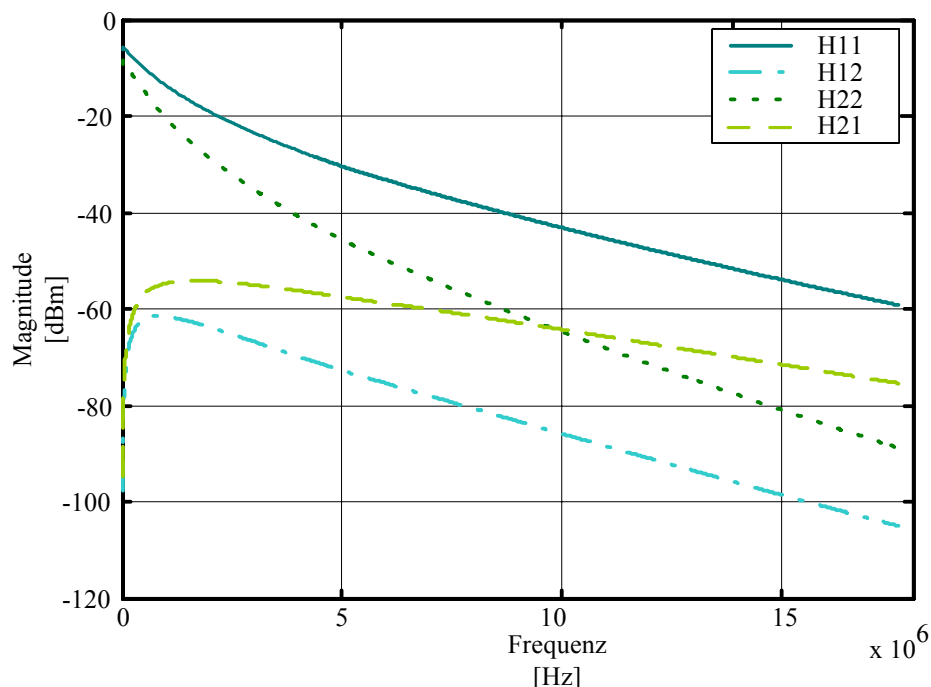


Abbildung 16: Übertragungs- und Nebensprechkopplungsfunktion eines VDSL-Kanals mit zwei Leitungen

Da die kürzere Leitung die besseren Übertragungseigenschaften hat und für die Bitzuweisung weniger Sendeleistung benötigt, wird sie bei der Bitzuweisung bevorzugt. Dies führt zu dem als Nah-Fern-Problem bezeichneten Sachverhalt, dass kurze Leitungen einen größeren Anteil der verfügbaren Ressourcen zugewiesen bekommen. Die alleinige Einbeziehung der Eigenschaften des Übertragungskanals in die Bitzuweisung führt prinzipiell zu einer ungleichen Verteilung der Datenrate in Umgebungen mit unterschiedlich langen Leitungen.

Dem Nah-Fern-Problem trägt oft die Betrachtung von Ratenregionen Rechnung. Eine Ratenregion beschreibt den Zusammenhang der möglichen Datenrate für eine bestimmte Reichweite der Leitung. In den bekannten Ratenregionen ist zu erkennen, dass auf kürzeren Leitungen eine deutlich höhere Datenrate zu erreichen ist, als auf längeren Übertragungsstrecken.

Für die praktische Realisierung ist der Nah-Fern-Effekt sehr nachteilig, weil die von einem Betreiber offerierten Dienste unabhängig von der betrachteten Leitung sein sollten. Die Bitzuweisung unter Berücksichtigung einer Summendatenrate führt zur Ungleichbehandlung von Leitungen mit unterschiedlicher Länge. Kurze Leitungen mit tendenziell besseren Übertragungseigenschaften werden bevorzugt und erhalten eine höhere Datenrate zugewiesen, als längere Leitungen.

In [147] wird versucht, dieses Problem zu lösen, indem eine gewichtete Kostenfunktion eingeführt wird (2.28). Dabei stellen w_j die Gewichtungskoeffizienten der Leitungen und $\Delta P_{i,j}(k)$ die zusätzliche Leistungsaufnahme einer Leitung j bei einer Erhöhung der Bitbelegung für die Leitung i nach Gleichung (2.26) dar.

$$J(k, i) = \sum_{j=1}^M w_j \Delta P_{i,j}(k) \quad (2.28)$$

Dadurch kann der Einfluss der Leitungseigenschaften auf die Bitbelegung verringert werden. Bei diesem Ansatz ist a priori nicht klar, ob eine bestimmte angestrebte Datenrate erreicht werden kann. Zusätzlich bestehen Schwierigkeiten, die passenden Gewichtungskoeffizienten für unterschiedliche Leitungslängen und Zieldatenraten der Teilnehmer zu finden. Die Berechnung wird somit für unterschiedliche Leitungslängen und Zieldatenraten aufwändig und ist für eine dynamische Anpassung ungeeignet.

In [81] wird Vektored-DSL vorgeschlagen, welches die Teilnehmeranschlussleitungen eines Kabelbündels als Matrixkanal (Multi Input Multi Output, MIMO) betrachtet. Dabei werden die Signale mehrerer Leitungen in jedem Unterträger separat bearbeitet [220]. Das Verfahren entfernt aus dem empfangenen Signal die Anteile, die durch Nebensprechen aus anderen Leitungen erzeugt werden. Dazu wird die Kenntnis der Nebensprechfunktionen zwischen den Leitungen verwendet. Vektored-DSL verspricht eine deutliche Steigerung der Datenrate, erfordert allerdings großen Implementierungsaufwand und ist ausgesprochen komplex [34].

Für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen ist der bereits beschriebene zentral koordinierte Ansatz der Multi-User-Bitbelegung von besonderem Interesse; denn er ist für die in der vorliegenden Arbeit untersuchte gemeinsame Behandlung von Übertragungs- und Verkehrseigenschaften geeignet. In der weiteren Betrachtung der Bitbelegung für xDSL-Mehrträgersysteme wird daher von diesem Verfahren ausgegangen.

2.6 Adaptive Modulationsverfahren

Mehrträgermodulationsverfahren erlauben die granulare Einstellung der verwendeten Datenrate. Adaptive Modulationsverfahren ermöglichen die Veränderung der Übertragungsparameter, wie z. B. der Signalraumkonstellation der Unterträger, im laufenden Betrieb. Damit lassen adaptive Modulationsverfahren die Reaktion auf variable Eigenschaften zu und sind eine wichtige Voraussetzung für die in dieser Arbeit untersuchte adaptive Dienstgütesteuerung.

Die Nutzung der Veränderlichkeit des Modulationsverfahrens wurde erstmals in [222] für die adaptive QAM-Modulation als Reaktion auf variable Kanaleigenschaften vorgeschlagen. Die Variation des Modulationsverfahrens wird durch eine geänderte Signalraumkonstellation realisiert. Das ursprünglich für die Einzelträgermodulation entworfene Prinzip kann prinzipiell auch bei Mehrträgerverfahren eingesetzt werden. OFDM ist durch die Aufteilung des Übertragungsfrequenzbandes in unabhängige, parallele Unterträger prädestiniert für die Adaption des Modulationsverfahrens, da die verwendete Signalraumkonstellation für jeden

Unterträger separat gewählt werden kann. Bei OFDM-Systemen wird das Verfahren dann als adaptives OFDM (AOFDM) bezeichnet [130].

In [41] und [45] werden die Vorzüge der adaptiven Modulation bei Teilnehmeranschlussleitungen dargestellt. Diese beinhalten insbesondere die Reaktion auf Leitungsveränderungen durch die Anpassung der Bitzuweisung auf den Unterträgern. Dieser Prozess ist nahtlos, nahezu fehlerfrei und ohne Dienstunterbrechung realisierbar. Bei Teilnehmeranschlussleitungen wird das Verfahren daher bei Veränderungen der Nebensprechcharakteristiken eingesetzt. In [98] wird die Verwendung von AOFDM für die dynamische Anpassung der Datenrate bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen vorgeschlagen.

Die Anpassung der Übertragungsparameter bei der adaptiven Modulation kann in drei Phasen eingeteilt werden [130].

- Schätzung der Kanalqualität
Für die korrekte Anpassung der Übertragungsparameter ist eine zuverlässige Kenntnis über die Kanaleigenschaften notwendig. Die Kanalschätzung erfolgt meist auf Basis von Referenzdaten.
- Wahl der passenden Übertragungsparameter
Basierend auf der Kanalschätzung ist das geeignete Modulationsverfahren für die Unterträger durch den Bitzuweisungsalgorithmus zu wählen. Verfahren wie z. B. QPSK und QAM mit verschiedenen Signalraumkonstellationen oder „Keine Übertragung in diesem Unterträger“ stehen als Übertragungsparameter zur Wahl. Diese Verfahren sind mit $M_{\bar{b}}$ gekennzeichnet, wobei $\bar{b} \in (0, 2, 3, \dots, 15)$ die durch die VDSL-Standards zugelassene Anzahl der Bits pro Unterträger beschreibt.
- Signalisierung oder blinde Erkennung der neuen Signalkonstellation
Der Empfänger muss Kenntnis über das gewählte Modulationsverfahren erlangen. Dies kann durch Signalisierungsnachrichten oder durch blinde Erkennung erfolgen. Die Signalisierung kann z. B. durch explizite Nachrichten oder Verwendung von Unterträgern für die Signalisierung erfolgen. Die blinde Erkennung auf Basis der SNR-Schätzung oder Trellis-Codierung sind aus der Literatur ebenfalls bekannt. Die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren ist allerdings begrenzt [130]. Im Rahmen der xDSL-Standardisierung werden Verfahren mit expliziter Signalisierung vorgeschlagen [98, 99]. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ebenfalls dieser Ansatz verwendet.

Durch die Übertragung in Frequenzgetrenntlage entsprechend der VDSL-Standardisierung sind die betrachteten Übertragungskanäle nicht reziprok. Dies bedeutet, dass Sende- und Empfangskanal eines Gerätes unterschiedliche Eigenschaften haben. Da die Kanalschätzung prinzipiell im Empfänger durchgeführt wird, kann ein Gerät aus den selbst gewonnenen Kanalschätzungen keine Aussage über die Güte des bei der Übertragung verwendeten Kanals machen. Die Charakteristiken werden also im Empfänger ermittelt und müssen dem Sender durch Signalisierung mitgeteilt werden. In Downstream-Richtung ermittelt das Modem und in Upstream-Richtung der DSLAM die Übertragungsparameter.

Daher kommt bei der Signalisierung grundsätzlich nur ein Verfahren mit geschlossener Schleife in Frage. Dabei werden entsprechend Abbildung 17 die Kanalschätzungen vom Empfänger an den Sender übertragen. Der Sender informiert den Empfänger über die genutzten Übertragungsparameter.

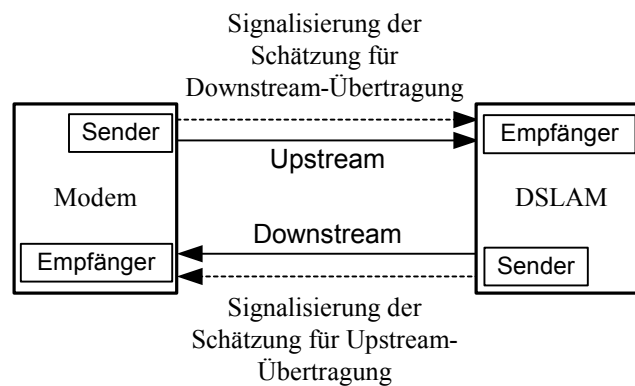


Abbildung 17: Signalisierung mit geschlossener Schleife

Der Einsatz adaptiver Modulationsverfahren bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ermöglicht die dynamische Anpassung der Datenrate, wenn sich die Übertragungseigenschaften der Kanäle ändern. Andere veränderliche Prozesse, insbesondere die Verkehrscharakteristiken und Dienstgüte, werden bei den gegenwärtig bekannten Verfahren zur adaptiven Modulation nicht beachtet.

2.7 Spektrummanagement

Die Leistungsfähigkeit von kupferbasierten Teilnehmeranschlussleitungen wird maßgeblich durch Nebensprechen infolge von elektromagnetischer Kopplung zwischen benachbarten Leitungen bestimmt. Auf der Basis dieser Erkenntnis werden seit einigen Jahren Anstrengungen unternommen, die spektrale Kompatibilität zwischen den verschiedenen Übertragungsverfahren und Systemen zu verbessern [4]. Spektrale Kompatibilität ermöglicht den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Systeme in einem Kabelbündel mit einer niedrigen Wahrscheinlichkeit von Beeinträchtigungen durch Nebensprechstörungen [132]. Die spektrale Kompatibilität wird durch das Spektrummanagement erreicht.

Beim Spektrummanagement werden die genutzten Frequenzbereiche der Übertragungssysteme so auf die Teilnehmeranschlussleitungen verteilt, dass das Nebensprechen minimiert wird. Dieser Prozess gewinnt durch die Vielzahl an unterschiedlichen Übertragungssystemen, wie z. B. POTS, ISDN, ADSL, SDSL, VDSL, an Bedeutung. Diese Systeme verwenden entsprechend Abbildung 18 unterschiedliche Frequenzspektren, die sich auch teilweise überlappen.

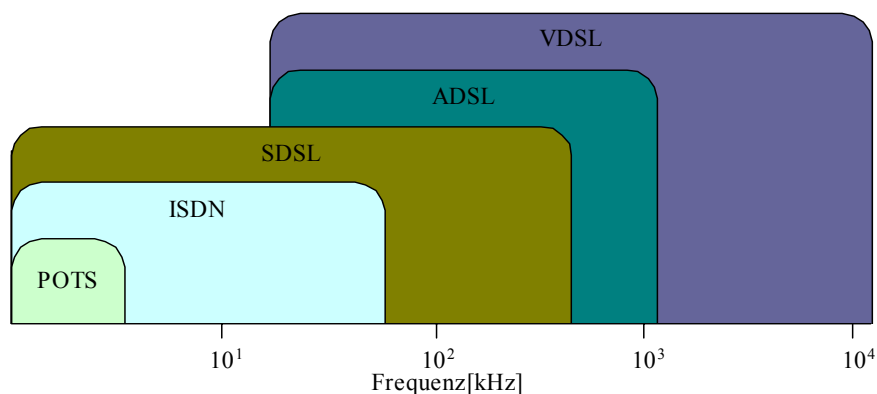


Abbildung 18: Verwendete Frequenzspektren verschiedener xDSL-Verfahren

Die Spektrummanagement-Standardisierung [4] legt Grenzen der Sendeleistungen in den einzelnen Frequenzbereichen fest, welche die Kompatibilität der Systeme sichern.

Neuere Entwicklungen [46] erlauben die dynamische Zuordnung der Frequenzspektren (Dynamic Spectrum Management, DSM) zu den Übertragungssystemen. Damit ist die spektrale Kompatibilität auch zwischen Übertragungssystemen des gleichen Standards gewährleistet. Die im Abschnitt 2.5 vorgestellten Bitzuweisungsalgorithmen mit Mehrnutzerbetrachtung werden dabei für die Belegung der Unterträger verwendet.

DSM kann sowohl unkoordiniert als auch koordiniert betrieben werden. Im unkoordinierten Modus versuchen die beteiligten Übertragungssysteme autonom, die verfügbare Datenrate durch Verringerung der Nebensprecheinflüsse zu erhöhen. Iterative Water-Filling wird in diesem Fall für die Bitzuweisung eingesetzt.

Im koordinierten Modus wird eine zentrale Instanz (Spectrum Management Center, SMC) verwendet, die die Bitzuweisung steuert (Abbildung 19).

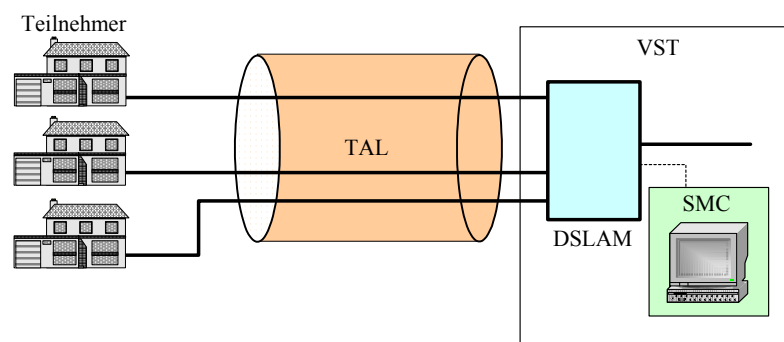


Abbildung 19: Spektrummanagement im Teilnehmeranschlussnetz

Das oft in der Vermittlungsstelle (VST) realisierte SMC sammelt die im DSLAM und im Modem beim Teilnehmer (Customer Premise Equipment, CPE) ermittelten Informationen über die Leitungscharakteristiken der Teilnehmeranschlussleitung (TAL) und legt die verwendeten Frequenzbereiche für die Übertragungssysteme der einzelnen Leitungen fest. Die in Abschnitt 2.5 beschriebenen Verfahren Multi-User-Bit-Loading [249] und Vectored-DSL [81] können dazu genutzt werden. DSM reduziert die Nebensprecheffekte durch die genaue Abstimmung der Sendeleistung und der genutzten Frequenzbereiche der Übertragungssysteme.

Gegenwärtig werden beim dynamischen Spektrummanagement allein die veränderlichen Übertragungseigenschaften betrachtet. Andere variable Merkmale, wie z. B. die zu übertragenden Datentypen und -mengen, werden nicht beachtet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches durch die gemeinsame Koordinierung aller veränderlicher Eigenschaften eine deutlich effizientere Ressourcenausnutzung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ermöglicht.

2.8 Zusammenfassung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der Entwicklung der Mehrträgermodulationsverfahren. Es enthält außerdem eine Erläuterung der Grundlagen der OFDM-Übertragung. Hierbei wird insbesondere die zeitdiskrete Realisierung der Mehrträgerübertragung beschrieben. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die Charakteristiken der leitungsgebundenen Umgebung dargelegt.

Der Schwerpunkt des Kapitels liegt auf der Vorstellung verschiedener Ansätze zur Zuweisung

der Bitbelegung bei Mehrträgersystemen. Die Vorteile der Einbeziehung der veränderlichen Nebensprechstörungen werden herausgearbeitet. Diese liegen darin, dass durch eine wesentlich genauere Bestimmung der Störumgebung die Ressourcenauslastung effizienter gestaltet werden kann. Durch die Bitzuweisung auf Basis von Summendatenraten wird die Übertragungskapazität ungleich auf die Leitungen verteilt. Kürzere Leitungen werden bevorzugt bedient. Teilnehmerspezifische Datenratenanforderungen werden nicht beachtet. Die Verwendung adaptiver Algorithmen, welche die sich ändernden FEXT-Störungen in ihre Berechnung aufnehmen, führt zu einer Steigerung von Leistungsparametern, wie die erreichbare Datenrate und die Reichweite. Die adaptiven Modulationsverfahren verdeutlichen, wie der Anpassungsprozess an die Veränderungen der Eigenschaften realisiert werden kann. Die aktuellen Ansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch die Steuerung der spektralen Aufteilung der genutzten Frequenzbereiche werden vorgestellt.

Die bekannten adaptiven Verfahren basieren ausschließlich auf der Betrachtung der veränderlichen Übertragungseigenschaften. Andere variable Prozesse werden nicht beachtet. Damit ist die erreichte Leistungsfähigkeit von der gewählten heterogenen Topologie abhängig. Fairness zwischen Teilnehmern an unterschiedlichen Leitungen ist nicht gegeben.

Für die optimale Ausnutzung der Ressourcen im Teilnehmeranschlussbereich ist eine umfassende Betrachtung aller veränderlicher Eigenschaften erforderlich. Dies ist mit den vorhandenen Verfahren nicht möglich. Neue Ansätze, die sowohl die Übertragungs- als auch die Verkehrseigenschaften integrieren und auf die realen Datenratenanforderungen der einzelnen Teilnehmer eingehen, sind notwendig, um eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der Teilnehmeranschlussleitungen zu erreichen. Ein solches Verfahren wird in Kapitel 4 vorgestellt und im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht.

3 Grundlagen der Dienstgüterebereitstellung

In den letzten Jahren war der Bereich der Multimediaübertragung Schwerpunkt mannigfaltiger Forschungsaktivitäten. Dabei kristallisierte sich die Dienstgüterebereitstellung als ein Schlüssel für die hoch qualitative Übertragung unterschiedlichster Dienste heraus. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Dienstgüterebereitstellung dargelegt.

Nach einer Einführung in Abschnitt 3.1 stellt Abschnitt 3.2 verschiedene Dienstgütemechanismen vor. Dabei werden Methoden für Endgeräte und Netzknoten betrachtet. Besondere Beachtung findet die Darstellung der Verkehrsmodellierung und der Veränderlichkeit der Verkehrseigenschaften. Abschnitt 3.3 erläutert, wie die Mechanismen zu Systemlösungen in der Form von Dienstgütearchitekturen zusammengefügt werden können. Die vorgestellten Konzepte bewertet Abschnitt 3.4 in Bezug auf die weiterführenden Untersuchungen dieser Arbeit. Abschnitt 3.5 stellt Ansätze zu Cross-Layer-Entwurfsverfahren dar, deren Ziel die Optimierung der Übertragung durch einen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Protokollschichten ist. Abschnitt 3.6 enthält eine Zusammenfassung über die grundlegenden Aspekte der Dienstgüterebereitstellung.

3.1 Einführung

Kaum ein Begriff der Telekommunikation wird so mehrdeutig und verwirrend verwendet, wie die Dienstgüte (Quality of Service, QoS) und deren Bereitstellung durch die Netze zur Multimediaübertragung [73]. Ursache dafür ist das unterschiedliche Verständnis für diesen Begriff.

Dienstgüte geht einher mit dem Trend zur Konvergenz der Netze, d.h. dem Verschmelzen unterschiedlicher Netztypen und Dienste auf der Basis von IP. Dieser Prozess wird durch das Zusammenwachsen der verschiedenen Bereiche der klassischen Telekommunikation, wie z. B. Computer, Telefonie und Medien, verursacht [58]. Konvergenz bedeutet dabei, dass eine Vielzahl von Diensten, wie z. B. herkömmliche Telefonie, Video, Datendienste, Spiele oder Fernsehen, unabhängig von der Art des Netzes realisiert werden. Im Umkehrschluss heißt dies, dass verschiedene Dienste über ein Netz transportiert werden. Die sich unterscheidenden Anforderungen der Anwendungen an die Qualität der Übertragung müssen im Netz gewährleistet werden. Ziel der Dienstgüte ist es, die Bedürfnisse der Applikationen in den Netzen dauerhaft und jederzeit zu sichern. Ein QoS-Netz bietet garantierte spezifische Übertragungsdienste für bestimmte Verkehrstypen auch dann, wenn die Gesamtauslastung des Netzes sehr hoch ist [173].

Die Dienstgüte kann verschiedene Parameter umfassen, wie z. B. Durchsatz, Verzögerung, Varianz der Verzögerung oder Fehlerrate. Ein von der Netzarchitektur dem Teilnehmer angebotener Dienst umfasst einen oder mehrere dieser Parameter, die bei der Übertragung garantiert werden [73].

Zum besseren Verständnis der Dienstgütearchitekturen werden in Kapitel 3.2 Dienstgütemechanismen und in Kapitel 3.3 übergreifende Systemlösungen vorgestellt.

3.2 Dienstgütemechanismen

Dienstgütemechanismen können je nach Einsatzgebiet, Endgeräte bzw. Netzgerät, unterschieden werden. Diese beiden Gruppen werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.

3.2.1 Endgeräte

Endgeräte enthalten jene Anwendungsprogramme, welche für die Übertragung verwendet werden [224]. Sie sind somit Sender und Empfänger der Ende-zu-Ende-Übertragung. Die Dienstgütemechanismen der Endgeräte umfassen die Nutzdatenverarbeitungs- und Steuerungsebene des Open Systems Interconnection (OSI) Referenzmodells der International Standard Organization (ISO) [52]. Folgende Themenschwerpunkte sind Gegenstand der Forschung auf dem Gebiet der Endgeräte [82]:

- Kodierung
- Task Scheduling
- Synchronisierung
- Transportmechanismen
- Teilnehmersignalisierung

Ziel der Kodierverfahren ist die Reduktion der Datenmenge durch Entfernung redundanter Anteile, die Steuerung der Qualität der Informationen, die Anpassung an die Auslastung des Netzes und die Erhöhung der Robustheit gegen Übertragungsfehler [2, 82, 198, 223].

Scheduling-Verfahren teilen die Ressourcen des Gerätes, wie z. B. Prozessor und Bus, zwischen den verschiedenen Anwendungsprozessen auf [11, 82, 129].

Der zeitliche Bezug der Informationen innerhalb der Datenströme wird durch die Synchronisation erhalten und gegebenenfalls wieder hergestellt [82].

Als Transportmechanismus für Datenströme mit Echtzeitanforderungen findet meist das Real Time Protocol (RTP) [206] Anwendung. RTP kann neben den Nutzdaten auch Informationen über den Inhalt (z. B. Typ der Daten und Kodierung), die Transportkontrolle (z. B. Sequenznummer, Zeitstempel) und Rückkanalinformationen (Real Time Control Protocol, RTCP) austauschen [82].

Die Teilnehmersignalisierung setzt sich in IP-basierten Netzen aus den beiden unabhängigen Komponenten Dienstsensibilisierung (z. B. Session Initiation Protocol, SIP [91], H.323 [121]) und Ressourcenreservierung (z. B. Resource Reservation Protocol, RSVP [25]) zusammen. Während die Dienstsensibilisierung die Verfügbarkeit der Dienste und der Dienstgütereigenschaften der Datenströme koordiniert, belegt die Ressourcenreservierung die benötigten Ressourcen in den Netzelementen des Pfades der Nutzdatenübertragung.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf den Teilnehmeranschlussleitungen, die keine Endgeräte beinhalten. Daher wird im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Dienstgütemechanismen für Endgeräte nicht tiefer eingegangen.

3.2.2 Netzgeräte

Ein Teilnehmer nimmt die Dienstgüte eines Dienstes „Ende-zu-Ende“ wahr. Eine einmal erfolgte Verschlechterung der Qualität der Übertragung in einem Netzbereich kann nicht wieder rückgängig gemacht werden. Daher muss die QoS in allen Elementen (Netze und Netzknoten), die ein Datenstrom passiert, gewährleistet werden. In diesem Zusammenhang stellt ein

Datenstrom die Abfolge der übertragenen Daten einer unidirektionalen Kommunikationsverbindung dar.

In diesem Abschnitt werden die in den Netzknoten realisierten Verfahren für die Dienstgüteunterstützung vorgestellt. Diese Mechanismen umfassen die Ebenen der Nutzdatenbehandlung, Steuerung und Verwaltung des OSI-Referenzmodells [52]. Folgende Themen sind vor allem Schwerpunkt der Forschung für Dienstgüte in Netzgeräten:

- Verkehrsmodellierung
- Verkehrslenkung
- Verkehrskontrolle
 - Verkehrsbehandlung
 - Scheduling
 - Warteschlangenmanagement
- Zugangskontrolle
- Reservierungsprotokolle

Die Verkehrsmodellierung untersucht das Verhalten von Verkehrsquellen, wie Sprache [26, 127], Video [78, 81, 96], Daten [49, 50] und Signalisierungsverkehr [56] und die Auswirkungen von Strukturen für lokale (Local Area Network, LAN) und Weitverkehrsnetze (Wide Area Network, WAN) auf die Verkehrscharakteristiken. Die statistische Auswertung der Verkehrsmessungen von paketvermittelnden Netzwerktypen [1, 17, 50, 56, 241] hat das Vorhandensein selbstähnlicher Eigenschaften des Verkehrs sowohl im WAN [38, 185] als auch im LAN [150, 151] gezeigt. Selbstähnlichkeit bedeutet, dass statistische Muster in verschiedenen Zeitskalen auftreten, die im Bereich von Millisekunden und Stunden variieren. Ein selbstähnlicher Prozess zeigt strukturelle Ähnlichkeiten über einen weiten Bereich von Skalen einer spezifischen Dimension. Mit anderen Worten wiederholt sich die Referenzstruktur über ein breites Spektrum von geometrischen, statistischen oder zeitlichen Einheiten [190]. Die Statistik des Prozesses ändert sich nicht durch die Veränderung der Skalierung. Es ist erwiesen, dass die Verkehrscharakteristiken von Video, Daten (Telnet, World Wide Web, WWW), Transfer von Dateien (FTP) und Signalisierungsnachrichten des Protokolls SS7 selbstähnlich sind.

Zur Illustration des Verhaltens zeigt Abbildung 20 beispielhaft die Sprunghaftigkeit der erzeugten Datenmenge von WWW-Verkehr bei unterschiedlichen Auflösungen. Aus allen fünf Grafen ist zu entnehmen, dass die erzeugte Datenmenge stark schwankend ist. Die Sprunghaftigkeit der erzeugten Netzlast besteht auch dann, wenn die Auflösung geändert wird.

Prozesse mit sich wiederholender Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sind in vielen Anwendungsbereichen wie den Wirtschaftswissenschaften (Paretos Gesetz), den Sprachwissenschaften (Zipfs Gesetz) und den Sozialwissenschaften (Lotkas Gesetz) nachgewiesen [239]. Nach [225] und [242] kann die Selbstähnlichkeit des Verkehrs aus der Zusammenführung vieler einzelner, hoch variabler An-Aus-Quellen abgeleitet werden. Die An-Aus-Quellen zeichnen sich durch An- bzw. Aus-Zeiten mit Heavy-Tail-Verteilung und unendlicher Varianz aus. Die Superposition vieler dieser Quellen führt zu selbstähnlichem Netzverkehr, der sich an die fraktionale brownische Bewegung annähert. Dieser Prozess wird in der Literatur als Joseph-Effekt bezeichnet [190].

Für die mathematische Beschreibung der Verkehrseigenschaften wird eine Zeitreihe X_n entsprechend Gleichung (3.1) für die Intervalldauer T_i angenommen.

$$X_n = Y[nT_i] - Y[(n-1)T_i] \quad (3.1)$$

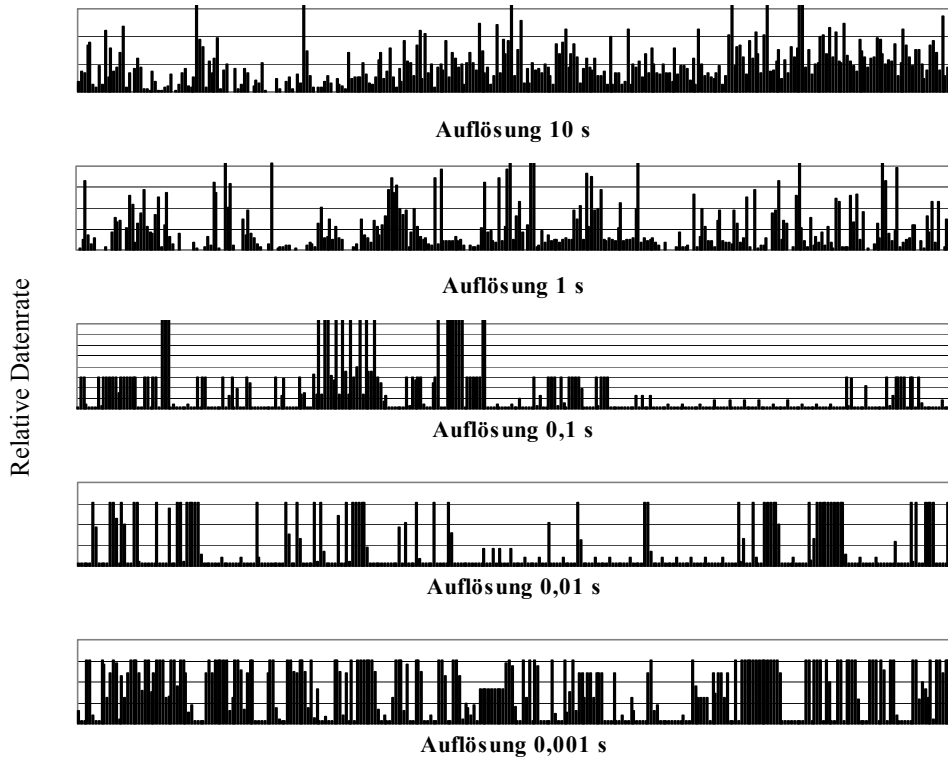


Abbildung 20: Qualitative Sprunghaftigkeit der erzeugten Datenmenge bei WWW-Verkehr

Die Anzahl der angekommenen Pakete bis zum Zeitpunkt t stellt einen Zählprozess Y dar und wird mit Gleichung (3.2) beschrieben. Dabei ist $dY(t)$ ein Punktprozess, der die Paketankünfte repräsentiert.

$$Y(T) = \int_0^t dY(x) \quad (3.2)$$

X_n ist zu jedem Zeitpunkt eine Zufallsvariable und ein Zufallsprozess, wenn t variiert.

Zusätzlich zur Zeitreihe X_n werden nun weitere Zeitreihen $X^{(m)} = X_n^{(m)}$, $n \in \mathbb{Z}^+$ betrachtet. Diese ergeben sich aus der Summation der in nicht überlappende, aufeinander folgende Blöcke der Größe m aufgeteilten Zeitreihe X_n (3.3).

$$X_n^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=nm-(m-1)}^{nm} X_i \quad (3.3)$$

Beispielsweise stellt $X^{(1)}$ in diesem Zusammenhang die höchst mögliche Auflösung der Zeitreihe dar. Damit stellt der Prozess $X^{(m)}$ eine weniger detaillierte Kopie des Prozesses $X^{(1)}$ dar. Bleiben die statistischen Eigenschaften unbeeinflusst von der Zusammenlegung der Zeitreihen, spricht man von einem selbstähnlichen Prozess. Der Prozess $X_n^{(m)}$ stellt außerdem eine zeitliche Mittelung von X_n dar.

Für einen stationären ergodischen Prozess X_n gilt, dass der Mittelwert μ gleich der Summe aller Mittelwerte der aggregierten Zeitreihen (3.4) und dass die Varianz der Zeitreihe gleich der Varianz der Zufallsvariable σ^2 (3.5) ist.

$$E[X_n] = \mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.4)$$

$$\sigma^2 = \text{Var}[X_n] = E[(X_n - \mu)^2] \quad (3.5)$$

Eine Eigenschaft selbstähnlicher Prozesse ist ihre Langzeitabhängigkeit (Long Range Dependence, LRD). Der Begriff geht auf Harold Hurst zurück, der herausfand, dass es in Zeitreihen langfristige Korrelationen gibt [102]. Ein Prozess wird als LRD bezeichnet, wenn seine Autokorrelationsfunktion $r(k)$ entsprechend (3.6) nicht summierbar ist.

$$\sum_{k=0}^{\infty} r(k) = \infty \quad (3.6)$$

Die Autokorrelationsfunktion $r(k)$ wird durch (3.7) beschrieben.

$$r(X_n, X_{n+k}) = E[(X_n - \mu)(X_{n+k} - \mu)] \quad (3.7)$$

Außerdem gilt, dass die Autokorrelationsfunktion einen hyperbolischen Abfall β hat (3.8) [79].

$$r(X_n, X_{n+k}) \sim |k|^{-\beta}, |k| \rightarrow \infty \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.8)$$

Der Hurst-Parameter H stellt ein Maß für die Langzeitabhängigkeit dar (3.9).

$$H = 1 - \frac{\beta}{2} \quad \frac{1}{2} < H < 1 \quad (3.9)$$

Der Wert $\frac{1}{2}$ steht dabei für reine Kurzzeitabhängigkeit, der Wert von 1 dagegen für maximale Langzeitabhängigkeit.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Eigenschaften, welche die Skalierungseigenschaften von zeitabhängigen Statistiken betreffen, fokussiert die Heavy-Tail-Eigenschaft auf die Spanne der Amplitudenverteilungen von X_n .

Eine Zufallsvariable hat eine Heavy-Tail-Verteilung, wenn ihre kumulative umlaufende Verteilungsfunktion entsprechend dem Power-Law mit Index α abfällt, d.h. die Form (3.10) hat.

$$P[X \geq x] \sim x^{-\alpha}, x \rightarrow \infty \quad \alpha > 0 \quad (3.10)$$

Für $0 < \alpha < 1$ sind alle Momente unendlich und für $n > \alpha$ ist das n -te Moment unendlich. Heavy-Tail-Verteilungen haben daher unendliche Mittelwerte und Varianzen. Die bekannteste Heavy-Tail-Verteilung stellt die Pareto-Verteilung nach Gleichung (3.11) dar [185]. Dabei kennzeichnet a den Ortsparameter und β den Formparameter.

$$P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{a}{x}\right)^{\beta}, a, \beta \geq 0, x \geq a \quad (3.11)$$

Aus der Literatur [26, 49, 56, 78, 81, 96, 102, 127, 150, 185, 225, 239, 242] können folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Ethernet-LAN-Verkehr ist selbstähnlich.
- Aggregierter WAN-Verkehr ist selbstähnlich.
- Video-Übertragungen mit variabler Datenrate sind selbstähnlich.
- Unabhängig vom verwendeten Codec und der kodierten Szene zeigt der Videoverkehr eine Langzeitabhängigkeit.
- Die von WWW-Browsern erzeugten Verkehrsmuster sind selbstähnlich.
- SS7-Signalisierungsverkehr ist selbstähnlich.
- Die Anzahl der Bytes pro Burst von Datentransfers sind Heavy-Tail-Verteilungen.
- Die Größe der im Internet zugänglichen Dateien zeigt eine Heavy-Tail-Verteilung.

Die Erkenntnis, dass der Netzwerkverkehr selbstähnlich oder langzeitabhängig ist, kann für mehrere Thematiken der Telekommunikation, wie z. B. Zugangskontrolle [32], Verkehrsmessung [235], Überlastkontrolle [231] und Warteschlangenverhalten [55, 70, 177], genutzt werden [190]. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass auch die Dienstgüterebereitstellung von diesen Eigenschaften profitieren kann. Dazu wird in Kapitel 4 ein Konzept für die adaptive Dienstgütesteuerung vorgestellt.

Verfahren zur Verkehrslenkung optimieren die Netzauslastung im laufenden Betrieb. Dadurch können einerseits Überlastungen des Netzes oder von Teilnetzen besser kontrolliert und andererseits eine höhere Auslastung der Ressourcen erreicht werden. Dies gelingt durch die lastabhängige Anpassung der Weiterleitungsentscheidung in den Netzknoten. Beispielsweise können für die Wegewahl neben der Zieladresse auch andere Kriterien, wie z. B. die Quelladresse, berücksichtigt werden. Diese Verfahren werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr betrachtet, weil die Teilnehmeranschlussleitungen der Schwerpunkt der Untersuchungen sind und hier die dynamische Verkehrslenkung nicht effektiv eingesetzt werden kann.

Der Themenschwerpunkt Verkehrskontrolle beinhaltet alle Dienstgütefunktionen, die ein Paket in einem Netzknoten durchläuft. Sie werden üblicherweise an den Ein- und Ausgängen eines Netzknoten realisiert.

Die Verkehrsbehandlung wurde im Rahmen der IntServ- [244] und DiffServ-Standardisierung [22] durch die Internet Engineering Task Force (IETF) eingeführt. Sie beinhaltet die Klassifizierung und Markierung eines Paketes, sowie die Überwachung und die Formung eines Datenstroms in Bezug auf die Konformität zu einem Verkehrsprofil. Ein Klassifizierer untersucht die Inhalte des Paketkopfes und ordnet das Paket einer bestimmten Verkehrsklasse zu. Bei der Markierung wird dem Paket eine Marke im Paketkopf, z. B. ein DiffServ Codepoint (DSCP), zugewiesen. Anhand der Marke kann ein Paket als zu einem bestimmten Datenstrom zugehörig erkannt werden. Die Überwachung sichert die langfristige Konformität eines Datenstroms zu seinem Verkehrsprofil. Die Formung gewährleistet die kurzfristige Erfüllung des Verkehrsprofils.

Verfahren zur Ablaufkoordination (Scheduling) verteilen die Übertragungskapazität eines Knotenausgangs an die für diesen Ausgang bestimmten Pakete. Sie legen die Reihenfolge der Übertragung der Pakete fest. Scheduling-Verfahren verwalten meist mehrere Puffer und erlauben eine anteilige Zuordnung der Speicherkapazität und Bedienrate der Puffer. In Bezug auf den Umgang mit ungenutzten Ressourcen werden Scheduler danach eingeteilt, ob sie die ungenutzten Ressourcen den anderen Datenströmen zur Verfügung stellen (Work Conserving) oder die Ressourcen ungenutzt lassen (Non-Work Conserving). Weiterhin werden die

Scheduling-Verfahren danach unterschieden, ob sie die Bedienrate einer Verkehrsklasse an die gegenwärtige Lastsituation oder an zeitabhängige Prioritäten anpassen [82]. Sehr verbreitet sind Scheduling-Verfahren, welche die Ressourcen fair zwischen den Datenströmen aufteilen, wie z. B. Weighted Fair Queueing (WFQ) [183, 184] und Worst Case Fair Queueing (WF²Q) [16]. Fairness bedeutet in diesem Kontext, dass keiner der Datenströme benachteiligt wird.

Verfahren zum Warteschlangenmanagement werden für Verkehrsarten verwendet, die das Transmission Control Protocol (TCP) [191] benutzen. Sie vermeiden durch die Flusskontrolle von TCP die Überlastungen im Netz. TCP reagiert auf erkannte Paketverluste, indem die Größe des Sendefensters und damit die erzeugte Last verringert wird. Verfahren, wie z. B. Random Early Detection (RED) [23, 75], Stabilized RED [179] und Fair RED (FRED) [153], werfen Pakete, wenn die Pufferfüllstände eine gewisse Größe erreichen. Für die zuverlässige Übertragung der verworfenen Pakete sorgt TCP.

Verfahren für die Zugangskontrolle legen fest, welche Verkehrsarten und -mengen in das Netz gelangen dürfen. Sie entscheiden, ob einem Datenstrom die benötigten Ressourcen im Netz zur Verfügung gestellt werden können, ohne dass andere Datenströme negativ beeinflusst werden. Die Zugangskontrolle ist ein kritischer Teil jeder Dienstgütearchitektur. Wenn der Verkehr, der in ein Netz gelangt, nicht kontrolliert werden kann, dann existiert keine Überlastkontrolle im Netz und die Dienstgüte kann nicht garantiert werden. Neben parameterbasierten Verfahren [187] existieren auch messbasierte Verfahren [126, 135], die Informationen über die aktuelle Auslastung in die Entscheidung einbeziehen.

Reservierungsprotokolle übermitteln die Informationen, welche die Netzknoten benötigen, um Ressourcen für bestimmte Datenströme zu belegen. Das Resource Reservation Protocol [25] wurde von der IETF im Zusammenhang mit IntServ entwickelt. RSVP reserviert Ressourcen in allen Netzknoten auf dem kompletten Weg einzelner Datenströme. Um die Skalierbarkeit zu verbessern, werden auch aggregierende Verfahren verwendet [15, 182]. Zum Austausch von Reservierungsinformationen zwischen verschiedenen Domänen wird das Border Gateway Reservation Protocol (BGRP) [181] vorgeschlagen. Die IETF-Arbeitsgruppe Next Steps in Signaling (NSIS) arbeitet gegenwärtig an einem einheitlichen Rahmenwerk für unterschiedliche Reservierungsverfahren.

3.2.3 Veränderlichkeit der Verkehrscharakteristiken

In Kapitel 3.2.2 werden hinsichtlich der Verkehrsmodellierung verschiedene Effekte der Verkehrscharakteristiken von Anwendungen, wie Selbstähnlichkeit, Langzeitabhängigkeit und Heavy-Tail-Verteilung vorgestellt.

Aus diesen Eigenschaften folgt, dass sich die zu übertragende Datenmenge sprunghaft und über große Skalenbereiche ändert. Die erzeugte Verkehrsmenge heutiger Anwendungen ist damit großen Veränderungen unterworfen. Dieser Effekt gewinnt bei den Teilnehmeranschlussleitungen noch an Bedeutung, da eine Glättung der Sprunghaftigkeit der Verkehre durch statistisches Multiplexen sehr vieler verschiedener Datenströme nur eingeschränkt möglich ist. Normalerweise werden auf einer Teilnehmeranschlussleitung ausschließlich die Daten des jeweils angeschlossenen Teilnehmers übertragen. Naturgemäß erzeugt ein einzelner Teilnehmer nur eine begrenzte Zahl von Datenströmen. Der Glättungseffekt der Sprunghaftigkeit des zu übertragenden Datenaufkommens kann daher im Bereich der Teilnehmeranschlussnetze vernachlässigt werden [35].

Ein weiterer Aspekt, der zu einer großen Veränderlichkeit der Verkehrscharakteristiken führt, ist die durch An-Aus-Quellen beschriebene temporäre Inaktivität der Verkehre diverser Anwendungen [26]. Diese Eigenschaft lässt sich auf Einflüsse zurückführen, die auf der

menschlichen Interaktion basieren. So werden beispielsweise die Zwischenabstände und Nutzungsdauer von Telefongesprächen durch An-Aus-Quellen mit Pareto-Verteilung beschrieben [56]. Bei bestimmten Anwendungen mit menschlicher Interaktivität, wie z. B. WWW, zeigt sich die Sprunghaftigkeit des Verkehrs auch innerhalb einer Sitzung. WWW-Sitzungen sind durch zwei Phasen gekennzeichnet, Informationsabruf und Informationsverarbeitung. Zuerst erfolgt der Abruf der Informationen und danach deren Verarbeitung. Das Verkehrsaufkommen dieser beiden Phasen unterscheidet sich drastisch. Durch das Verarbeiten von Informationen, z. B. dem Lesen von Internetseiten, wird nahezu kein Verkehr erzeugt. Demgegenüber werden in der Abrufphase große Datenmengen ausgetauscht. Da die Menge der auszutauschenden Daten heavy-tail-verteilt sind, differiert das Datenaufkommen bei unterschiedlichen Sitzungen auch in der Phase des Informationsabrufs deutlich.

Die beschriebenen Verkehrscharakteristiken moderner Anwendungen erschweren die langfristige Vorhersage der zu erwartenden Verkehrsmenge in Teilnehmeranschlussnetzen. Es existiert keine konstante Marke, welche die zu erwartenden Werte ausreichend genau repräsentiert. Die Zuteilung einer statischen Datenrate für bestimmte Anwendungen oder Klassen von Anwendungen führt damit immer zu Ungenauigkeiten und stellt einen Kompromiss zwischen der bereitgestellten Dienstgüte und der Netzlast dar.

Wie in Kapitel 2 bereits erläutert wird, führt der durch Überabschätzung, Nichtbeachtung von Inaktivität und feste Vorgabe erzeugte Leerverkehr zu Einbußen in der Leistungsfähigkeit der Übertragung auf Teilnehmeranschlussleitungen.

Durch die gemeinsame Anpassung der Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften und der Verkehrscharakteristiken ist eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit von OFDM-basierten Teilnehmeranschlussnetzen zu erwarten. In Kapitel 4 wird ein Konzept vorgestellt, welches die gemeinsame Steuerung der variablen Eigenschaften ermöglicht.

3.3 Dienstgütearchitekturen

Dieser Abschnitt diskutiert die Zusammenfügung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Mechanismen zu Dienstgütearchitekturen, die generell in zwei Gruppen gegliedert werden können [72]:

- Architekturen für feinkörnige Dienstgüte
Die Netzressourcen werden für einzelne Datenströme reserviert. Die Reservierung wird durch ein Signalisierungsprotokoll durchgeführt. Für die Signalisierung werden oft definierte quantitative Dienstgütespezifikationen verwendet [122]. Beispiele für diese Architektur sind Integrated Services (IntServ) der IETF und Asynchronous Transfer Mode (ATM).
- Architekturen für grobkörnige Dienstgüte
Einzelströme mit ähnlichen Eigenschaften werden in Klassen zusammengefasst und gemeinsam behandelt (Class of Service, CoS). Die Architekturen basieren auf einer Dienstgütevereinbarung zwischen Teilnehmer und Netz, einer qualitativen Dienstgütespezifikation und einer Zugangskontrolle [82]. Beispiele für diese Architektur sind Differentiated Services (DiffServ) der IETF und der Architekturentwurf des Metro Ethernet Forums auf Basis von IEEE 802.1p/Q.

Diese Ansätze werden in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet.

3.3.1 Asynchronous Transfer Mode

Asynchronous Transfer Mode [8] ist das von der International Telecommunication Union (ITU) vorgeschlagene und standardisierte [7, 119] Übertragungsverfahren für die Realisierung des breitbandigen dienstintegrierenden digitalen Netzes (B-ISDN).

ATM ist ein verbindungsorientiertes Verfahren, bei dem die zu übertragenden Daten in Zellen konstanter Größe segmentiert werden. Einzelne Verbindungen werden durch virtuelle Kanäle (Virtual Channel, VC) und virtuelle Pfade (Virtual Path, VP) identifiziert. Dabei charakterisieren VCs dynamisch und VPs statisch allozierbare Verbindungen [193]. Mehrere Kanäle mit lokaler Signifikanz des Indexes werden auf Pfade mit netzweiter Bedeutung geschaltet. Zur Weiterleitung in den Netzknoten bietet ATM eine schnelle und effiziente Umschaltung (Switching) von Verbindungen.

ATM unterstützt verschiedene Dienstklassen für konstant- und variabelratigen Echtzeitverkehr, Best-Effort-Daten und reaktiv gesteuerte Verkehrsarten. Damit können verschiedene Dienstgüteparameter, wie z. B. die Verzögerungsschwankung und die Zellverlusthäufigkeit, garantiert werden [77]. Die Dienstklassen werden durch unterschiedliche Verbindungen (VC/VP) differenziert.

ATM verwendet eine konstante Datenrate. Ist die zu übertragende Verkehrsmenge so niedrig, dass die Datenrate nicht ausgelastet wird, dann werden Leerzellen übertragen, die Lücken im Datenstrom vermeiden, sonst aber keinen Nutzwert haben.

Die ursprüngliche Intention einer einheitlichen, weltumspannenden Dienstplattform mit reinen Ende-zu-Ende-ATM-Verbindungen hat sich bis heute nicht verwirklichen lassen. Ursache dafür sind z. B. die teuren Schnittstellenkarten für Teilnehmer, die hohe Komplexität von ATM und die weite Verbreitung von Ethernet im Heim- und LAN-Bereich. Trotzdem ist ATM gerade im Teilnehmeranschluss- und Zugangsbereich sehr weit verbreitet. Problemstellungen, wie der große Anteil von Verwaltungsverkehr (mindestens 5 Byte jeder 53 Byte großen ATM-Zelle), der hohe Aufwand und die Komplexität bei der Bereitstellung und Verwaltung der Verbindungen sowie die relativ hohen Betriebskosten haben in den letzten Jahren zur Entwicklung anderer, auf die verbindungslosen, paketbasierten Verfahren IP und Ethernet aufbauender Dienstgütearchitekturen, geführt. Auf diese wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

3.3.2 Integrated Services

Integrated Services wurde Mitte der 90er Jahre durch die IETF entwickelt. Ziel der Architektur [24] ist die Erfüllung der Anforderungen von echtzeitkritischen Anwendungen in IP-basierten Netzen. Das IntServ-Rahmenwerk definiert zwei Dienstklassen, den Guaranteed Service (GS) [210] und den Controlled Load Service (CLS) [245]. IntServ bietet sowohl harte (garantierte) als auch weiche (deterministische) Dienstgüte.

Das zustandsbasierte und verbindungsorientierte IntServ erlaubt die Ende-zu-Ende-Reservierung von Netzressourcen für einzelne Datenströme. Die Architektur sichert die Dienstqualität durch explizite Reservierung von Ressourcen in den Schnittstellen aller Netzelemente entlang des Nutzdatenpfades vom Sender bis zum Empfänger einer Verbindung. Als Reservierungsprotokoll wird von der IETF RSVP [244] vorgeschlagen. Zur Bearbeitung der Reservierungen erfordert die Architektur die Implementierung von Zustandsautomaten in den Netzknoten. Darüber hinaus müssen dort neben den Nutzdatenpaketen auch die Signalisierungs- und Reservierungsnachrichten verarbeitet werden. Für die interne Ressourcenverwaltung sind datenstromspezifische Zustände in den Netzknoten notwendig. Diese werden während der gesamten Dauer der Verbindung auf aktuellem Stand gehalten. Da

der Reservierungszustand in den Netzknoten in regelmäßigen Abständen erneuert werden muss, überträgt das Reservierungsprotokoll periodische Refresh-Nachrichten.

Im Vergleich zum herkömmlichen Best-Effort-Dienst des Internets sind in den Netzknoten zusätzliche Mechanismen bei der Paketbehandlung, wie z. B. Klassifizierung, Überwachung und Formung, zu durchlaufen. Da für jeden reservierten Datenstrom ein eigener Puffer verwaltet wird, sind bei IntServ auch Warteschlangenmanagement und Scheduling wesentlich komplexer als bei herkömmlichen Netzknotenarchitekturen. Aufgrund der Konzeption der Architektur für Übertragungsverfahren mit konstanter Datenrate sind Interaktionen mit der Übertragungsschicht zur Steuerung der benötigten Datenrate nicht vorgesehen.

Durch die Behandlung jeder einzelnen Verbindung und die Sicherung der Dienstgüte für die große Anzahl der Verbindungen müssen in allen Netzknoten sehr viele Statusinformationen vorgehalten werden. Für jeden einzelnen Datenstrom müssen Berechnungen über die Konformität des Verkehrsprofils durchgeführt werden. Dies hat sich vor allen im Kernbereich der Netze als große Herausforderung an die Leistungsfähigkeit der Netzknoten erwiesen, weil dort mehrere hunderttausend Datenströme betrachtet werden müssen. Durch die Einzelstromreservierung und die periodischen Zustandserneuerungen erzeugt RSVP außerdem eine Flut an Nachrichten.

Diese Probleme haben sich als ernstes Skalierungsproblem von IntServ erwiesen. Die Architektur ist zu mächtig und kompliziert, als das sie in großen Netzen Anwendung finden könnte. Diese Erkenntnisse bewog die IETF zur Entwicklung eines zweiten, weniger komplexen Ansatzes, der DiffServ-Architektur.

3.3.3 Differentiated Services

Differentiated Services wurde von der IETF als Reaktion auf die Skalierungsprobleme von IntServ Ende der 90er Jahre entwickelt. Ziel von DiffServ ist eine einfache, robuste und skalierbare Dienstgütearchitektur, die auch in großen Netzen einsetzbar ist.

DiffServ verwendet Dienstklassen und bietet somit eine relative Dienstgüte. Die Architektur [22] ist für Domänen spezifiziert, an deren Grenzen komplexe Mechanismen, wie z. B. Zugangskontrolle und Markierung, durchgeführt werden. Innerhalb der Domäne arbeiten die Netzknoten ohne verbindungspezifische Zustände.

DiffServ beschreibt das Verhalten einzelner Netzknoten (Per Hop Behavior, PHB) [51, 94], das Verhalten an den Grenzen der Domäne und das Zusammenspiel der einzelnen Mechanismen um bestimmte Charakteristiken des Verkehrs innerhalb der Domäne (Per Domain Behavior, PDB) [175] zu erreichen.

Entsprechend der DiffServ-Architektur sind folgende Mechanismen auf allen Netzknoten einer Domäne implementiert:

- Klassifizierung
Einordnung der Datenströme in Dienstklassen
- Scheduling
Zuteilung von Ressourcen an Dienstklassen

In den Grenzknoten werden weitere Mechanismen vorgesehen:

- Markierung
Dienstklassenspezifische Kennzeichnung von Paketen mit DiffServ-Marken (DiffServ Codepoints, DSCP)
- Bandbreitenkontrolle
Überwachung eintreffender und Formung abgehender Datenströme

Eine Dienstklasse wird im DiffServ-Kontext durch Regeln zur Klassifizierung, einer eindeutigen Marke, einen definierten PHB und die verwendeten Mechanismen an den Netzgrenzen spezifiziert.

Zur Klassifizierung der Datenströme können verschiedene Felder der MAC-, IP- und TCP/UDP-Paketköpfe (Header) verwendet werden. Die Markierung erfolgt durch Setzen des DiffServ-Feldes im IP-Header der Pakete mit dem entsprechenden DSCP.

Die Netzknoten in der Domäne nutzen den DSCP zur Einordnung der Pakete, ordnen die Pakete dem entsprechenden PHB ein und weisen die Pakete den Ressourcen der Dienstklasse zu.

DiffServ definiert zwei verschiedene PHBs:

- Expedited Forwarding (EF) [51]
- Assured Forwarding (AF) [94]

EF ist für Datenströme echtzeitkritischer Anwendungen gedacht und beschreibt das qualitative Verhalten der Netzknoten hinsichtlich der zu erwarteten Verzögerung und Verluste. AF beschreibt, welche Mechanismen im Netz implementiert werden müssen, um eine Dienstklasse zu realisieren. Dazu definiert AF mehrere Dienstklassen mit relativen Unterscheidungskriterien untereinander. Das Verfahren liefert ebenfalls nur qualitative Aussagen zur Dienstgüte.

Die Netzbetreiber haben innerhalb ihres Netzes die freie Wahl der verwendeten Mechanismen und realisierten Dienstklassen. Zwischen unterschiedlichen DiffServ-Domänen werden Vereinbarungen (Service Level Agreement, SLA) zur Gewährleistung von Dienstgarantien getroffen, die Informationen über Verkehrstyp, -volumen und Dienstqualität beinhalten. Eine SLA stellt einen Kontrakt zwischen einem Kunden und einem Netzbetreiber dar und enthält neben technischen auch finanzielle und rechtliche Aspekte. Die Dienstqualität wird durch eine Service Level Specification (SLS) vorgegeben. Eine SLS ist eine rein technische Beschreibung, die von einer SLA abgeleitet ist.

DiffServ bietet ein skalierbares und wenig komplexes Rahmenwerk für Dienstgüte in IP-basierten Netzen. Weitere Stärken sind der geringe Managementaufwand und die leichte Migration von herkömmlichen IP-Netzen. Aufgrund der Konzeption der Architektur für IP-basierte Netze mit konstantratigen Übertragungsverfahren sind Interaktionen mit der Übertragungsschicht zur Steuerung der benötigten Datenrate bei DiffServ nicht vorgesehen.

DiffServ bietet nur qualitative Dienstgüte. Quantitative QoS-Garantien sind wegen fehlender Signalisierung und Zugangskontrolle nicht möglich. Die Architektur lebt davon, dass durch statistisches Multiplexen und Aggregation sehr vieler Datenströme in wenige Dienstklassen eine Glättung der Verkehrscharakteristik erzielt werden kann. Um Dienstgütegarantien für Echtzeitverkehre geben zu können, ist trotzdem eine Überdimensionierung der Netze notwendig. Dies erschwert vor allem in Netzen mit niedriger Übertragungskapazität den wirtschaftlichen Betrieb.

3.3.4 Dienstgüte bei Ethernet

Ethernet ist die am weitesten verbreitete lokale Netzstruktur. Etwa 98% des Datenverkehrs in der Geschäftswelt beginnt oder endet in einem Ethernet-Netz [163]. Im Unterschied zu IP basiert die Weiterleitung bei Ethernet auf Informationen der Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells. Diese Weiterleitungsmethode wird als Switching bezeichnet. Die weite Verbreitung von Ethernet ergibt sich aus Eigenschaften, wie z. B. Einfachheit, Robustheit, Kosteneffektivität und Interoperabilität zwischen verschiedenen Herstellern. Diese Pluspunkte der Technologie haben zu Versuchen geführt, Ethernet auch in Teilnehmeranschluss- und Zugangsnetzen zu etablieren.

Für die Standardisierung von Ethernet für Teilnehmeranschlussnetze sind die Ethernet in the First Mile Allianz [64] und die Arbeitsgruppe 802.3ah Ethernet in the First Mile [106] des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) federführend. Die Standardisierung von Ethernet für Metronetze erfolgt vor allem durch das Metro Ethernet Forum (MEF) [161].

Die Vorzüge von Ethernet in Teilnehmeranschluss- und Zugangsnetzen liegen neben den beschriebenen Vorteilen vor allem in der Verringerung der Komplexität, die nicht zuletzt durch den Ersatz herkömmlicher Technologien, wie z. B. ATM, erreicht wird.

Im Standard IEEE 802.1p wird eine Methode zur Unterscheidung und Priorisierung von Ethernet-Paketen spezifiziert. Dieser Standard ist in IEEE 802.1D [107] eingegliedert und erlaubt eine Differenzierung der Priorität der Pakete durch drei Bits. Damit sind bis zu acht unterschiedliche Dienstklassen realisierbar. Die Zuordnung bestimmter Verkehrsarten zu Prioritätswerten stellt Tabelle 2 dar.

Priorität	Verkehrsart
1	Hintergrund
2	frei
0	Best-Effort
3	Excellent-Effort
4	Kontrollierte Last
5	Video
6	Sprache
7	Kontrollverkehr des Netzes

Tabelle 2: Zuordnung von Prioritäten und Verkehrsarten nach [107]

Basierend auf dieser Zuordnung wird durch das MEF ein Dienstgütekonzzept definiert [164]. Ziel der MEF-Architektur ist die Gewährung sowohl relativer als auch absoluter Dienstgüte. Dazu werden Bandbreitenprofile mit entsprechenden Parametern, wie z. B. Mittelwert und Dauer der Datenrate, definiert. Die Architektur definiert verschiedene Dienste für Punkt-zu-Punkt- (Ethernet Line) und Mehrpunkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen (Ethernet LAN). Die Konformität eines Dienstes zu seinem Profil wird durch Dienstfarben markiert. Als Leistungsparameter der Dienstgüte werden Merkmale, wie die Verfügbarkeit, Verzögerung oder Verluste, definiert.

Tabelle 3 beschreibt das funktionale Dienstgütemodell der MEF-Architektur. Dieses Modell spezifiziert Funktionen und Merkmale, die benötigt werden, um eine SLA gewährleisten zu können. Die aus der SLA abgeleitete SLS bildet die Grundlage für die benötigte Funktionalität. Die SLS ist die technische Beschreibung des Kontraktes zwischen Provider und Kunde. Je nach SLS werden verschiedene Funktionen gebraucht.

Für die Verwaltung und Überwachung der Dienstgüteanforderungen stehen Policy- und Verzeichnisdienste zur Verfügung. Ein Signalisierungsschema mit entsprechender Reservierungsinstanz wird für die Verteilung der Dienstgüteinformationen und die Ressourcenbelegung verwendet. Ähnlich wie bei DiffServ können für die Klassifizierung verschiedene Felder der Paketköpfe verwendet werden. Die Markierung kann in Feldern der Sicherungsschicht- (IEEE 802.1p) und Vermittlungsschicht-Header (IP TOS, DSCP)

übermittelt werden. Die Bandbreitenkontrolle besteht aus Formung und Überwachung und entspricht der Verkehrsbehandlung in Kapitel 3.2. Verfahren zur Überlastvermeidung sind für die Sicherungsschicht (z. B. Fiber Distributed Data Interface, FDDI) und Transportschicht (z. B. TCP) bekannt. Dabei werden durch eine Rückkoppelschleife dem Sender Informationen über die Auslastung des Netzes gegeben. Der Sender kann daraufhin seine Sendelast anpassen und eine Überlastung des Netzes vermeiden. Die Überlastkontrollfunktion entspricht der im Kapitel 3.2 beschriebenen Verkehrskontrolle. Die Standardisierung der Dienstgütearchitektur entsprechend MEF ist gegenwärtig noch im Gange. Daher sind die konkret verwendeten Verfahren noch nicht endgültig definiert.

Service Level Specification	Policy Management	Policy- und Verzeichnisdienste
		Zugangskontrolle
	QoS Signalisierung	Reservierung
	Klassifizierung	Transportschicht Klassifizierung
		Vermittlungsschicht Klassifizierung
		Sicherungsschicht Klassifizierung
	Markierung	Vermittlungsschicht Markierung
		Sicherungsschicht Markierung
	Bandbreitenkontrolle	Formung
		Überwachung
	Überlastvermeidung	Flusskontrolle
	Überlastkontrolle	Scheduling
		Warteschlangenverwaltung

Tabelle 3: Funktionales Modell der MEF-Dienstgüte [164]

In [133] wird gezeigt, wie die Funktionen an unterschiedlichen Punkten eines Netzes angeordnet werden können. Abbildung 21 stellt die entsprechende Dienstgütearchitektur dar. Wichtige Funktionen, wie z. B. Klassifizierung, Markierung und Bandbreitenkontrolle, werden dabei an den Eingangsgrenzen der Netze durchgeführt. Innerhalb der Netze wird die Dienstgüte durch das Weiterleitungsverhalten der Netzknoten bestimmt. Die Überlastkontrolle und die Policy- und Verzeichnisverwaltung sind in allen Netzknoten implementiert.

Die vom Metro Ethernet Forum spezifizierte Dienstgütearchitektur orientiert sich stark an DiffServ. Für die Dienstgüterrealisierung sind vor allem DiffServ-Mechanismen vorgesehen. Daher gelten die in Abschnitt 3.3.3 getroffenen Aussagen auch für die MEF-Architektur. Der Hauptunterschied zu DiffServ besteht darin, dass für die Weiterleitung der Pakete Switching verwendet wird. Für die Dienstgüterebereitstellung spielt das Weiterleitungsverfahren nur eine untergeordnete Rolle. Interaktionen mit der Übertragungsschicht zur Steuerung der benötigten Datenrate sind bei der Ethernet basierten Dienstgütearchitektur ebenfalls nicht vorgesehen.

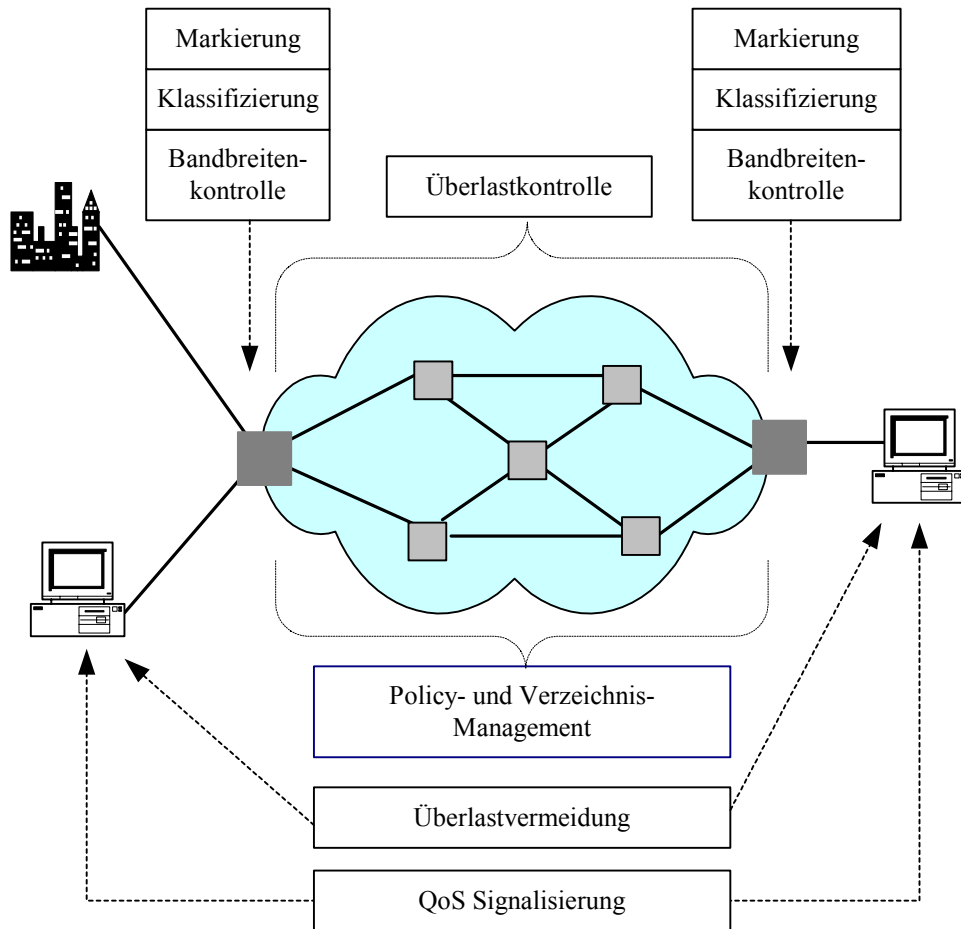


Abbildung 21: Anordnung der Dienstgütekomponten in einem Metro-Ethernet-Netz

3.4 Bewertung der Architekturen

Nach der Vorstellung verschiedener Dienstgütearchitekturen erfolgt nun eine Bewertung der vorgestellten Verfahren. Hinsichtlich der Art der Dienstgütegarantie können die Architekturen in die zwei Eigenschaften, hart und weich, eingeteilt werden [82].

Architekturen mit harter Dienstgütegarantie sind durch quantitative Definitionen mit paketbezogenen Grenzwerten gekennzeichnet. Diese dürfen nicht oder nur kurzzeitig überschritten werden. Architekturen mit weicher Dienstgüte unterstützen nur qualitative Definitionen der Dienstgüte [82]. Die Architekturen mit harter Dienstgütegarantie verwenden Reservierungsmethoden auf Basis von Datenströmen und eine Verkehrskontrolle pro Paket und Datenstrom. Die Architekturen mit weicher Dienstgütegarantie bilden Verkehrsaggregate im Netz und nutzen keine Zugangskontrolle oder diese findet am Netzeingang auf Basis lokaler Informationen statt.

Für die weitere Bewertung der Dienstgütearchitekturen werden die folgenden Kriterien verwendet:

- **Granularität**
Differenzierungsgrad der Dienstgüteanforderungen an das Netz und Spektrum möglicher Dienstgütespezifikationen
- **Komplexität**
Aufwand und Anzahl der Verarbeitungsschritte und benötigter Verwaltungsaufwand
- **Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften**
Nutzung der Dynamik der Übertragungseigenschaften zur Beeinflussung der verwendeten Datenrate

Die Bewertung erfolgt in fünf Stufen [82]: sehr gut (++), gut (+), befriedigend (o), bedingt ausreichend (-) und ungenügend (--).

Für eine hohe Granularität ist die Verkehrsbehandlung pro Datenstrom notwendig. Mit der Komplexität kann auch eine Aussage über die Skalierbarkeit gemacht werden. Generell gilt, dass eine hohe Komplexität leicht zu Skalierungsproblemen führen kann.

Die Möglichkeit der Anpassung an die veränderlichen Übertragungseigenschaften ist von besonderer Bedeutung für die weiterführenden Untersuchungen (insbesondere Kapitel 4 und 5) dieser Arbeit. Wie in Abschnitt 2.5 erläutert wird, kann die nutzbare Datenrate bei den OFDM-basierten Übertragungsverfahren mit feiner Granularität variiert werden. Diese Eigenschaft erlaubt die Anpassung der verwendeten Netzressourcen in Form der Datenrate durch die Dienstgütearchitektur. Im Gegensatz zur Zugangskontrolle werden dabei die verfügbaren Netzressourcen an das erwartete Verkehrsaufkommen angepasst. Die OFDM-Übertragung ermöglicht eine feinkörnige und kurzfristige Veränderung der Datenrate. Das Bewertungskriterium der Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften kennzeichnet die Möglichkeit der Dienstgütearchitekturen, auf Veränderungen des Übertragungskanal oder der Verkehrsanforderungen zeitnah zu reagieren und die verwendete Datenrate dementsprechend anzupassen.

	ATM	IntServ	DiffServ	Ethernet MEF
Art der Garantie	hart	hart	weich	weich
Granularität	+	++	-	-
Komplexität	--	--	++	+
Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften	--	o	--	--

Tabelle 4: Bewertung der Dienstgütearchitekturen

In Tabelle 4 ist zu erkennen, dass ATM und IntServ die beste Granularität und höchste Komplexität aufweisen. Zwischen den beiden Kriterien gibt es einen direkt proportionalen Zusammenhang. Verfahren mit hoher Granularität stellen die Dienstgüte auf Basis einzelner Datenströme bereit. Dazu ist ein höherer Steuerungs- und Verwaltungsaufwand als bei den Verfahren mit niedrigerer Granularität notwendig. Im Gegensatz zu ATM und IntServ bieten DiffServ bzw. Ethernet MEF eine geringere Komplexität, worunter allerdings auch die Granularität leidet. Aufgrund der gemeinsamen Behandlung von Datenströmen mit ähnlichen Eigenschaften als Dienstklasse bieten DiffServ und Ethernet MEF nur qualitative Definitionen der Dienstgüte. Dadurch skaliert die Verwaltung und Steuerung der Dienstgüte auch in großen Netzen.

Allen Architekturen ist gemein, dass sie nur eingeschränkt auf die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften eingehen können. Dies kann mit der Konzeption für Netzarchitekturen mit konstanter Datenrate, wie sie in den großen Netzen mit optischer Übertragungstechnik üblich ist, begründet werden. Die Dienstgütearchitekturen sind vor allem für die horizontale Gewährleistung der Dienstgüte in den Netzgeräten ausgelegt und bieten nur sehr eingeschränkt die Möglichkeit des vertikalen Informationsaustausches zwischen den Protokollschichten innerhalb eines Gerätes. Durch die Reservierung für einzelne Datenströme kann IntServ zumindest in Bezug auf die Zugangskontrolle die Informationen über die belegten Ressourcen nutzen. Keine der Architekturen kann die Menge der verwendeten Übertragungsressourcen in Abhängigkeit von den angeforderten Datenraten beeinflussen. Daher schneidet die Bewertung der Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften entsprechend schlecht ab.

Die Adaption der Datenrate bei den leitungsgebundenen Mehrträgersystemen kann bei den bekannten Dienstgütearchitekturen nicht genutzt werden. Dies führt zu einer ineffizienten Ressourcennutzung im Teilnehmeranschussbereich, die sich durch eine verringerte Datenrate und Reichweite auswirkt. Diese Nachteile wirken sich verstärkt aus, da die verfügbaren Ressourcen bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen begrenzt sind und ein Ausbau ausgesprochen teuer ist. Die vorgestellten Dienstgütearchitekturen sind daher nur bedingt für den Einsatz bei OFDM-basierten Teilnehmeranschlussleitungen geeignet. Für die Dienstgüteunterstützung auf Teilnehmeranschlussleitungen werden Verfahren benötigt, die an deren spezifische Eigenschaften angepasst sind und eine Interaktion zwischen den verschiedenen beteiligten Protokollschichten zur Optimierung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften erlauben.

3.5 Cross-Layer-Entwurfsverfahren

Ursache für die fehlende Interaktion zwischen den Protokollschichten der vorgestellten Dienstgütearchitekturen ist die konventionelle modulare Struktur des OSI-Referenzmodells, die durch eine gewisse Unflexibilität gekennzeichnet ist. Verschiedene Untersuchungen [89] haben in den letzten Jahren gezeigt, dass das OSI-Entwurfsschema zu Schwierigkeiten führt, wenn ein dynamisches Verhalten bestimmter Eigenschaften zu beachten ist. Die Unzulänglichkeit des Referenzmodells bei zeitvarianten Verhalten zeigt sich insbesondere im Fehlen von Möglichkeiten des gemeinsamen Zugriffs auf Informationen durch verschiedene Protokollschichten und im geringen Informationsaustausch zwischen den Protokollschichten. Damit kann auf das dynamische Verhalten der Übertragungs- und Verkehrscharakteristiken nicht flexibel eingegangen werden. Eine Anpassung an die sich ändernden Bedingungen erfolgt nicht. Dies hat eine ineffiziente Nutzung der Ressourcen zur Folge, weil stets eine Sicherheitsreserve zu beachten ist. Aus diesem Mangel resultiert die Entwicklung von Verfahren, welche die gemeinsame Benutzung von Informationen in unterschiedlichen Schichten erlauben.

Der gemeinsame Zugriff auf Informationen durch verschiedene Protokollschichten und der vertikale Informationsaustausch zwischen den Protokollschichten in einem Netzgerät wird durch ein erweitertes Entwurfsschema, dem Cross-Layer-Design, ermöglicht. Cross-Layer-Verfahren werden bereits seit einigen Jahren für leitungslose Umgebungen vorgeschlagen [19, 20, 47, 143, 208]. Sie ermöglichen den Entwurf adaptiver Verfahren für Anwendungsgebiete wie die Zugriffssteuerung [97, 219, 230], die Videocodierung [95], die Dienstgütesteuerung [171] und die Konfiguration von Funknetzen [154]. Ziel von Cross-Layer-Verfahren ist die optimierte Übertragung durch den Informationsaustausch zwischen mehreren Protokollschichten. Beispielsweise kann die Anwendungsschicht Informationen von

niedrigeren Schichten (z. B. Fehlerwahrscheinlichkeit oder Netzauslastung) erhalten [131]. Auf der anderen Seite können Informationen höherer Schichten über die gegenwärtigen Verkehrsanforderungen für eine verbesserte Übertragung ausgenutzt werden.

Durch die dynamische Adaption der Übertragungs- und Verkehrscharakteristiken sind Cross-Layer-Verfahren auch bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen geeignet. Damit sind sie prinzipiell auch bei der gemeinsamen Steuerung von Kanal- und Dienstgüteinformationen in OFDM-basierten Teilnehmeranschlussnetzen anwendbar. Gegenwärtig sind Cross-Layer-Verfahren für dieses Einsatzgebiet nicht bekannt. Aufgrund der grundlegenden Unterschiede der leitungslosen und leitungsgebundenen Übertragung können die vorhandenen leitungslosen Verfahren nicht einfach auf die leitungsgebundene Umgebung überführt werden. Für die leitungsgebundenen Mehrträgersysteme sind daher neue, an die spezifischen Eigenschaften angepasste Verfahren notwendig.

3.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich der Dienstgüterebereitstellung. Es werden QoS-Mechanismen in Endgeräten und Netzknoten erläutert. Besonderer Wert wird auf die Erläuterung der Veränderlichkeit der Verkehrseigenschaften gelegt. Phänomene wie Selbstähnlichkeit, Langzeitabhängigkeit und Heavy-Tail-Verteilung führen zu einer Sprunghaftigkeit der zu übertragenden Datenmenge. Des Weiteren wird ausgeführt, dass wegen der Eigenschaften der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme die Glättung der Sprunghaftigkeit nur bedingt möglich ist.

Im Rahmen des Kapitels wird zudem die Zusammenführung verschiedener Mechanismen zu Dienstgütearchitekturen beschrieben. Die grundsätzlichen Aspekte wichtiger Dienstgütearchitekturen werden dargestellt. Im Anschluss daran werden die Systemkonzepte in Hinblick auf Eigenschaften wie Granularität, Komplexität und Nutzung der Ressourcenvariabilität bewertet. Dabei wird deutlich, dass zwischen der Güte der Dienstgarantie und der benötigten Komplexität ein Kompromiss geschlossen werden muss. Fokus der bekannten Dienstgütearchitekturen für die leitungsgebundene Übertragung ist der horizontale Informationsaustausch zwischen verschiedenen Netzgeräten. Aufgrund des fehlenden vertikalen Austausches von Informationen zwischen verschiedenen Protokollschichten können sie die veränderlichen Ressourcen nur sehr eingeschränkt nutzen und sind damit für den Einsatz in Teilnehmeranschlussnetzen nur unzureichend geeignet.

Cross-Layer-Verfahren ermöglichen den vertikalen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Protokollschichten. Diese Verfahren sind im Bereich der leitungslosen Übertragung für Problemstellungen, wie z. B. Zugriffs- und Dienstgütesteuerung, etabliert, können aber für die in dieser Arbeit betrachteten leitungsgebundenen Mehrträgersysteme nicht übernommen werden.

Zur effizienten Nutzung der begrenzten und teuren Ressourcen bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen sind Dienstgüteverfahren notwendig, die auf die veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften abgestimmt sind. Ein solches Verfahren wird im weiteren Verlauf der Arbeit vorgeschlagen und untersucht.

4 Konzeptvorschlag für die adaptive Dienstgütesteuerung

Die Multimediaübertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ist durch die Veränderlichkeit sowohl der Verkehrs- als auch der Kanalcharakteristiken gekennzeichnet. Dieses Kapitel stellt ein Verfahren vor, welches durch die gemeinsame Steuerung der Dienstgüte- und Übertragungsparameter eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der Übertragung bei OFDM-basierten Teilnehmeranschlussleitungen ermöglicht.

Abschnitt 4.1 enthält eine Einführung in die Problemstellung und die Definition der Leistungsfähigkeit für Teilnehmeranschlussleitungen. Abschnitt 4.2 beschreibt die Dienstgütebereitstellung bei den im xDSL-Bereich vorherrschenden Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Das Konzept der adaptiven Dienstgüte wird in Abschnitt 4.3 detailliert ausgeführt. Abschnitt 4.4 fasst das Konzept der adaptiven Dienstgütesteuerung zusammen.

4.1 Einführung

Teilnehmeranschlussnetze bilden die Schnittstelle zwischen den Teilnehmern und den verschiedenen Netzebenen. Möchte ein Teilnehmer eine Anwendung nutzen, ist es grundsätzlich notwendig, dass die erforderliche Datenrate auf seiner Anschlussleitung bereit steht. Daher ermöglicht die Steigerung der nutzbaren Datenrate der Teilnehmeranschlussleitungen die Verbreitung neuer breitbandiger Anwendungen und verbessert die Qualität bei bereits nutzbaren Anwendungen.

Die Leistungsfähigkeit der in dieser Arbeit betrachteten leitungsgebundenen Mehrträgersysteme kann vor allem an drei Parametern festgemacht werden:

- nutzbare Datenrate
- mögliche Leitungslänge der Übertragung (Reichweite)
- Fairness

Die Datenrate einer Übertragungsstrecke ist für viele Dienstgüteparameter der limitierende Faktor. Ist die Datenrate zu niedrig, können bestimmte Anwendungen nicht oder nur mit geringer Qualität genutzt werden. Beispielsweise wird der für Anwendungen wichtige Durchsatz durch die verfügbare Datenrate begrenzt.

Die Länge der Leitungen, an welche die einzelnen Teilnehmer angeschlossen sind, ist sehr unterschiedlich. Bei Kupferdoppeladern besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Datenrate und der Reichweite der Übertragung. Die Datenrate der Teilnehmeranschlussleitungen ist von der Länge der Leitungen abhängig und die maximal erreichbare Datenrate ist umso höher, je kürzer die zu überbrückende Distanz ist (siehe Tabelle 1 in Kapitel 1). Die Steigerung der Reichweite ermöglicht die breitbandige Anbindung weiter entfernter Teilnehmer, verbessert die Abdeckung in ländlichen Gebieten und stärkt die Verbreitung hochbitratiger Anwendungen. Die Reichweite ist bei Teilnehmeranschlussleitungen ein Maß für die mögliche Verbreitung der angebotenen Dienste. Nur bei ausreichend großer Reichweite können neue Anwendungen flächendeckend angeboten werden.

Die Teilnehmer können die Länge der Leitung, an der sie angeschlossen sind, nicht beeinflussen. Die Fairness der bereitgestellten Datenrate auf Leitungen unterschiedlicher Länge stellt somit ebenfalls einen Parameter dar, der die Leistungsfähigkeit der Teilnehmeranschlussnetze bestimmt. Fairness bedeutet dabei, dass Teilnehmer nicht benachteiligt werden, die an längeren Leitungen angeschlossen sind. Aus der Literatur [18] ist bekannt, dass Fairness erreicht werden kann, wenn keiner Leitung mehr Datenrate zugeordnet wird, als der angeschlossene Teilnehmer angefordert hat und kein Teilnehmer mit unerfüllten Datenratenanforderungen eine schlechtere Dienstgüte bekommt, als die anderen Teilnehmer.

Aus Sicht der Betreiber ist es erstens erstrebenswert die Datenrate der Teilnehmeranschlussleitungen zu erhöhen und zweitens die Reichweite der Übertragung zu steigern. Nur so können Multimediaanwendungen einer Vielzahl von Teilnehmern fair bereitgestellt werden.

Die Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ist durch die Variabilität bestimmter Eigenschaften gekennzeichnet, die in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

- Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften
- Veränderlichkeit der Verkehrscharakteristik der Anwendungen

Die Abschnitte 2.5 und 3.2.3 erläutern die Ursachen für die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen und der Verkehrscharakteristiken der Anwendungen. Während der erst genannte Aspekt insbesondere mit der Übertragungsschicht verbunden ist, beziehen sich die Verkehrscharakteristiken vor allem auf die höheren Schichten des OSI-Referenzmodells.

OFDM-basierte Verfahren bieten prinzipiell eine große Flexibilität hinsichtlich der Granularität der Signalraumkonstellation und der erreichbaren Datenrate. Damit bieten die leitungsgebundenen Mehrträgersysteme die Möglichkeit, die aktuell genutzte Datenrate an Veränderungen anzupassen. Die Datenrate muss nicht während der gesamten Dauer der aktiven Übertragung konstant sein, sondern kann flexibel und mit hoher Granularität auf sich ändernde Erfordernisse eingestellt werden. Diese Anpassung erfolgt unterbrechungsfrei im laufenden Betrieb.

Bei den bekannten adaptiven Verfahren wird die Bitzuweisung nur auf Basis der Eigenschaften des Übertragungskanal vorgenommen. Die Veränderlichkeit des Verkehrsverhaltens wird bei den herkömmlichen Bitzuweisungsalgorithmen nicht betrachtet. Dementsprechend steht einem Teilnehmer die Datenrate unabhängig von den Verkehrsanforderungen zur Verfügung. Auch wenn der Teilnehmer gerade keine oder nur wenig Nutzdaten überträgt, werden auf der Leitung Leerdaten übertragen. Die nutzlosen Leerdaten führen zu Störungen, welche die Leistungsfähigkeit der Übertragung benachbarter Leitungen beeinträchtigen.

In den folgenden Abschnitten des Kapitels wird ein Konzept vorgeschlagen, das durch die adaptive Dienstgütesteuerung auf Basis der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften zu einer verbesserten Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen führt. Der nächste Abschnitt behandelt deshalb die Bereitstellung der Dienstgüte bei den im xDSL-Bereich vorherrschenden Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken.

4.2 Dienstgütebereitstellung bei Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken

Die Verfahren zur Dienstgütesteuerung erstreben die Gewährleistung der von den Anwendungen benötigten Übertragungsqualität und die Vermeidung deren Verschlechterung bei einer hohen Auslastung der Netze. Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Dienstgütearchitekturen vermeiden die Überbelastung der Netze durch die Kontrolle des

Verkehrs, der in das Netz gelangt. Eine dynamische Anpassung der verfügbaren Verbindungs- oder Netzkapazität ist bei diesen Verfahren nicht möglich, da die verwendeten Übertragungsverfahren mit einer konstanten Datenrate betrieben werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten Teilnehmeranschlussleitungen bestehen aus Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken. Unter Beachtung der für die xDSL-Verfahren spezifizierten Bitfehlerwahrscheinlichkeit von maximal 10^{-7} kann der Einfluss von Übertragungsfehlern auf die Dienstgüte vernachlässigt werden [139]. In diesem Fall werden die Dienstgüteparameter, wie z. B. Verzögerung und Verlustrate, vom Füllstand der Warteschlangen bestimmt, welche die Datenströme durchlaufen [124]. Paketverluste resultieren beispielsweise aus dem Überlauf der Warteschlangen oder durch explizites Verwerfen von Paketen ab einem bestimmten Füllstand infolge von Warteschlangenmanagement.

Am Beispiel des Dienstgüteparameters Verzögerung soll der Einfluss der Warteschlangen erläutert werden. Entsprechend Gleichung (4.1) setzt sich die Gesamtverzögerung d zwischen zwei benachbarten Netzknoten aus der Dauer der Ausbreitung d_{prop} , der Bearbeitung d_{proc} und der Pufferung in der Warteschlange d_{queue} zusammen [196].

$$d = d_{\text{prop}} + d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} \quad (4.1)$$

Weil die Dauer der Ausbreitung und der Bearbeitung statische Eigenschaften von Topologien bzw. Systemen sind, können diese Terme als konstant angenommen werden [124]. Die Optimierung der Gesamtverzögerung wird maßgeblich von der Verringerung der Warteschlangenverzögerung bestimmt. Durch die Minimierung der Warteschlangenverzögerung wird die Gesamtverzögerung des Systems minimiert [124].

Die Füllstände der Warteschlangen wachsen an, wenn mehr Verkehr in einem Netzknoten eintrifft, als dieser über seine Ausgänge abtransportieren kann. Die bekannten Dienstgütearchitekturen sichern kleine Füllstände der Warteschlangen durch die Begrenzung des hereinkommenden Verkehrs eines Netzknoten [142]. Durch die große Sprunghaftigkeit des Verkehrs einzelner Teilnehmer und die fehlende Glättung durch statistisches Multiplexen ist dieses Verfahren bei Teilnehmeranschlussleitungen wenig effizient. Des Weiteren führen begrenzte verfügbare Ressourcen zu einer Beschneidung der Dienstgüte in diesem Bereich.

Die OFDM-basierten Teilnehmeranschlussnetze bieten die Möglichkeit, kleine Füllstände der Warteschlangen durch die Anpassung der Datenrate an die Menge des zu übertragenden Verkehrs zu sichern. Durch die Veränderung der verfügbaren Datenrate werden die Füllstände der Warteschlangen reguliert. Die Kontrolle und Anpassung der Datenrate führt wegen der minimierten Füllstände der Warteschlangen zu einer kleineren Verzögerung und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten durch Warteschlangenüberfüllung. Infolge der Anpassung der Datenrate an die Verkehrsanforderungen verbessert sich die Dienstgüte. Ein Konzept zur adaptiven Steuerung der Dienstgüte in Abhängigkeit der veränderlichen Eigenschaften wird in Abschnitt 4.3 vorgeschlagen und in den Kapiteln 5 und 6 detailliert untersucht.

4.3 Adaptive Dienstgütesteuerung

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen sowohl die Eigenschaften des Übertragungskanal als auch die Verkehrscharakteristiken veränderlich sind. In diesem Abschnitt wird ein adaptives Verfahren vorgestellt, welches diese Merkmale für eine Steigerung der Leistungsfähigkeit bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen nutzt.

Adaptive Verfahren gewinnen seit einer Reihe von Jahren in der Forschung an Übertragungs- und Dienstgüteverfahren an Bedeutung. Adaptive Modulationsverfahren gelten als vielversprechende Ansätze für die Steigerung der Datenrate bei veränderlichen Übertragungskanälen [43]. Verschiedene Möglichkeiten der Anpassung von Parametern wie Sendeleistung und Bitrate [33, 84, 85, 86, 233, 236], Codierung [83, 156] oder Bitfehlerwahrscheinlichkeit [136] werden in der Literatur beschrieben. Adaptive Verfahren zur Dienstgütebereitstellung [110, 180, 211, 229] untersuchen verschiedene Aspekte, wie Zugangskontrolle, Ressourcenbelegung und Ende-zu-Ende-Management für variable Datenströme wie z. B. komprimiertes Video.

Verfahren, welche die Adaption von Übertragungseigenschaften und Dienstgütebereitstellung vereinen, sind allerdings für die OFDM-basierten Teilnehmeranschlussleitungen nicht bekannt. Daher werden bei den gegenwärtigen Verfahren die veränderlichen Verkehrscharakteristiken auf eine konstante Datenrate abgebildet. Dazu werden allgemeine Abschätzungen der Verkehrsmenge verwendet. Da sich die Verkehrscharakteristiken der Teilnehmer ändern, gibt es keine konstante Datenrate, die den Anforderungen der Anwendungen entsprechen. Wird mehr Datenrate angefordert als vorhanden ist, werden die zu übertragenden Daten verzögert übertragen. Liegen die Anforderungen unter der bereitgestellten Datenrate werden inhaltslose Daten über die Übertragungsstrecke gesendet, um die Datenrate auf Bitebene konstant zu halten. Solche Verkehre sind z. B. Leerzellen bei ATM oder Füllmuster bei Ethernet und dem im Teilnehmeranschlussbereich oft verwendeten Point to Point Protocol (PPP) [214].

Die für diesen Leerverkehr benötigte Signalsendeleistung stört durch elektromagnetische Kopplung die Übertragung auf benachbarten Leitungen des Kabelbündels. Diese Störungen beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit der Übertragung auf den Leitungen. Die Reduktion dieser Störungen steigert die Leistungsfähigkeit der Teilnehmeranschlussleitungen. Dazu werden Dienstgütemechanismen benötigt, welche auf die Eigenschaften der Übertragungssysteme abgestimmt sind [140] und die Veränderlichkeit der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften beachten.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die adaptive Dienstgütesteuerung (AQOS) vorgeschlagen und analysiert, die die Spezifik der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme, die Veränderlichkeit der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften, für eine Optimierung der Übertragung nutzt. Die adaptive Dienstgütesteuerung beinhaltet die gemeinsame Steuerung beider variabler Eigenschaften und bildet das Bindeglied zwischen den veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften (Abbildung 22). Die bereitgestellte Dienstgüte repräsentiert die aktuellen Verkehrsanforderungen, die bei den gegenwärtigen Übertragungseigenschaften realisiert werden können und passt sich dynamisch an die beiden veränderlichen Eigenschaften an. Auf Veränderungen einer der Eigenschaften wird durch die Adaption der Dienstgüte reagiert. Beispielsweise wird bei einer höheren zu übertragenden Verkehrsmenge entsprechend viel Datenrate zur Verfügung gestellt, während bei einer niedrigeren Auslastung weniger Ressourcen verwendet werden.

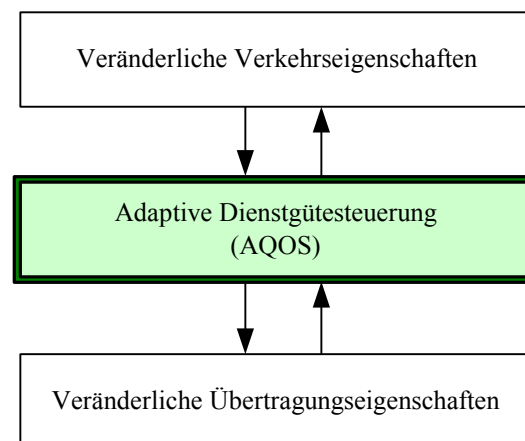


Abbildung 22: Steuerung der veränderlichen Eigenschaften

Das AQOS-Konzept basiert auf der Idee der gemeinsamen Steuerung der Verkehrs- und Übertragungseigenschaften und der schnellen Reaktion auf deren Veränderung. Da sowohl Verkehrs- als auch Übertragungseigenschaften veränderlich sind, können bei der Änderung einer der Eigenschaften die Parameter der jeweils anderen dynamisch mitgeführt werden. Dadurch wird für beide variable Charakteristiken eine Optimierung der bereitgestellten Dienstgüte erreicht. Bei AQOS werden die Übertragungsparameter und die Dienstgüteparameter der Teilnehmer aufeinander abgestimmt [141]. Die Adaption kann in beide Richtungen (bidirektional), von höheren zu niedrigeren Schichten des OSI-Referenzmodells und umgekehrt erfolgen.

In der Anpassungsrichtung von Verkehrs- zu Übertragungseigenschaften werden die bereitgestellten Netzressourcen in Form der Datenrate dynamisch an die von den Teilnehmer angeforderten Verkehrstypen und -mengen angepasst. Die Datenrate eines Teilnehmers wird auf seine aktuellen Dienstgüteanforderungen abgestimmt, die sich aus den Verkehrscharakteristiken der genutzten Anwendungen ergeben. Beispielsweise wird zu Beginn neuer hochratiger Verbindungen entsprechend mehr Datenrate zur Verfügung gestellt, die nach Beendigung der Übertragung wieder reduziert wird. Damit erfolgt die Bitzuweisung der Übertragungsschicht in Abhängigkeit von den Anforderungen der höheren Schichten. Diese Anforderungen werden durch die Dienstgüteparameter repräsentiert. Für die Bitzuweisung können neben den Übertragungsparametern somit weitere Informationen, wie z. B. die Priorität eines Teilnehmers oder eines Datenstroms, verwendet werden. Die jeweils benötigte Dienstgüte resultiert aus dem Verkehrsmix, welcher von den Anwendungen der Teilnehmer erzeugt wird.

Die für die Übertragung erforderliche Datenrate wird auf die erzeugte Verkehrsmenge abgestimmt. Auf diese Art wird die Erzeugung von unnötigem Leerverkehr vermieden. Die Adaption der real verwendeten Datenrate an die zu übertragende Datenmenge führt bei konstanter Systemreserve direkt zu einer geringeren Sendeleistung der Leitungen. Hierdurch werden die störenden Auswirkungen auf benachbarte Teilnehmer reduziert, die aus der elektromagnetischen Kopplung der Leitungen eines Kabelbündels resultieren. Nach Gleichung (2.22) ergibt sich aus der verringerten Sendeleistung ein vergrößerter Signalrauschabstand, der sich entsprechend Gleichung (2.16) direkt in der Steigerung der Leistungsfähigkeit der Teilnehmeranschlussleitungen in Form von einer größeren Anzahl an zugewiesenen Bits auswirkt. Die akkurate Adaption der real genutzten Datenrate an den von den Teilnehmern erzeugten Verkehrsmix vermeidet Leerverkehr und verringert die Störungen benachbarter Leitungen. Die Anpassung der Datenrate eines Teilnehmers steigert die Leistungsfähigkeit der

Übertragung auf den benachbarten Leitungen eines Kabelbündels. Die allgemeine Anwendung des Verfahrens verbessert die Leistungsfähigkeit der Übertragung aller beteiligter Leitungen.

Indem die Auswirkung der Übertragung auf benachbarte Leitungen gesteuert wird, kann auch der Effekt des statistischen Multiplexens zwischen verschiedenen Leitungen genutzt werden. Ist das Verkehrsverhalten von Teilnehmern an unterschiedlichen Leitungen unabhängig voneinander, dann sind die erzeugten Datenmengen der Teilnehmer nicht korreliert. Dies bedeutet, dass im statistischen Mittel die angeforderte Datenmenge eines Teilnehmers dann hoch ist, wenn die Datenmengen auf den benachbarten Leitungen niedrig sind. Durch die Anpassung der Datenrate auf diese Schwankungen kann kurzfristig auf stark ausgelasteten Leitungen eine höhere Datenrate gewährt werden. Die Dienstgüte auf den anderen Leitungen wird nicht beeinträchtigt.

Gerade interaktive Anwendungen, wie z. B. WWW, zeichnen sich durch starke Schwankungen der benötigten Datenrate aus. Die Verkehrscharakteristik von WWW ist durch kurze Zeiten aktiver Übertragung (Laden der Dateien aus dem Internet) und relativ lange Phasen der Inaktivität der Übertragung (Verarbeiten oder Lesen der erhaltenen Informationen) bestimmt. Aus der statistischen zeitlichen Verteilung der Aktivitätsphasen der einzelnen Teilnehmer ergibt sich ein Multiplexgewinn bei der adaptiven Dienstgütesteuerung.

Die Adaption kann allerdings auch in umgekehrter Richtung von der Übertragungsschicht zur Dienstgütesteuerung erfolgen. In diesem Fall werden die Dienstgüteparameter an die aktuellen Kanaleigenschaften und Netzcharakteristiken, wie z. B. Kanalimpulsantwort, Nebensprechkoeffizienten und Auslastung, adaptiert. Die Dienstgüteparameter verändern sich, wenn die Eigenschaften der Teilnehmeranschlussleitung oder der benachbarten Netze variieren. Dadurch kann auf die aktuellen Zustände der Übertragungsstrecke eingegangen und die Dienstgütewerterstellung variabel gestaltet werden. Die erzielbare Dienstgüte gleicht sich an die verändernden Eigenschaften des Übertragungskanal an. Infolge dieser Anpassungsfähigkeit sind die aktuellen Zustände des Netzes in die Dienstgütesteuerung integriert. Beispielsweise kann dem Teilnehmer zu Zeiten niedriger Auslastung des Netzes eine höhere Dienstgüte geboten werden, was durch die Bereitstellung der entsprechenden Schnittstellen auch auf das benachbarte Zugangsnetz ausgedehnt werden kann. Die angebotene Dienstgüte auf den Teilnehmeranschlussleitungen und im Zugangsnetz wird aufeinander abgestimmt. Da für den Teilnehmer nur die Ende-zu-Ende-Dienstgüte relevant ist, wäre im Falle der Bereitstellung unterschiedlicher Dienstgüten in diesen beiden Netzabschnitten nur die geringere der beiden Dienstgüten bemerkbar. Die Abstimmung der bereitgestellten Dienstgüte auf der Teilnehmeranschlussleitung und im angegliederten Zugangsnetz vermeidet unnötigen Aufwand und die Vergeudung von Ressourcen.

Ein weiterer Aspekt der adaptiven Dienstgüte ist, dass die sich ändernden Verkehrscharakteristiken nicht mehr auf eine Übertragungsstrecke mit konstanter Datenrate abgebildet werden. Weil die Datenrate der Teilnehmeranschlussnetze variiert, müssen die Anforderungen der Anwendungen auf veränderliche Netzstrukturen angeglichen werden und die QoS-Parameter der Verbindungen gegebenenfalls mitgeführt werden. Die Ressourcen, die von einem Datenstrom belegt werden, adaptieren damit an die dynamischen Veränderungen der Übertragungsschicht während der Dauer der Verbindung.

Die adaptive Steuerung der Dienstgüte unter Beachtung der veränderlichen Übertragungskapazität erweitert das Entscheidungskonzept über die Zulassung der Datenströme. Bei den heutigen Dienstgütearchitekturen wird dazu die Zugangskontrolle verwendet. Sie bestimmt, ob die Ressourcenanforderungen des neuen Datenstroms ohne Beeinträchtigung vorhandener Datenströme gewährleistet werden können. Wenn das der Fall ist, wird der Datenstrom zugelassen. Ist dies nicht der Fall, wird der Verbindungswunsch

abgelehnt. Wegen der adaptiven Dienstgütesteuerung kann in letzterem Fall zusätzliche Übertragungskapazität durch eine Erhöhung der Datenrate bereitgestellt werden. Dies bedeutet eine dynamische Neudimensionierung der Übertragungsstrecke und erlaubt die Zuschaltung von Übertragungskapazitäten auf Anforderung. Die Neudimensionierung ermöglicht eine flexible Gestaltung der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme und schafft einen zusätzlichen Freiheitsgrad bei der Dienstgüterebereitstellung.

AQOS ermöglicht die bidirektionale Adaption der bereitgestellten Dienstgüte bei veränderlichen Verkehrs- und Übertragungseigenschaften. Die Dienstgüte wird durch die den Teilnehmern zugewiesene Datenrate repräsentiert. Abbildung 23 beschreibt das Anpassungsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung. Veränderungen der Verkehrseigenschaften führen zu einer Adaption der Dienstgüteparameter. Aufgrund der dynamischen Anpassung der Datenrate an die neuen Dienstgüteparameter verringern sich die Störungen anderer Leitungen infolge von Nebensprechen. Die Reduktion der Störungen und die Veränderungen der Übertragungseigenschaften, wie z. B. die Umrangierung der Leitungen, erfordern die Anpassung der Übertragungsparameter in Form der Bitbelegung und Sendeleistung. Die auf die aktuell vorherrschenden Verkehrs- und Übertragungseigenschaften angepassten Übertragungsparameter steigern die Leistungsfähigkeit der Übertragung in Form von höheren Datenraten und Reichweiten. Diese Verbesserung wirkt sich auf die bereitgestellte Dienstgüte aus, deren Parameter auf die höhere Leistungsfähigkeit abgestimmt werden.

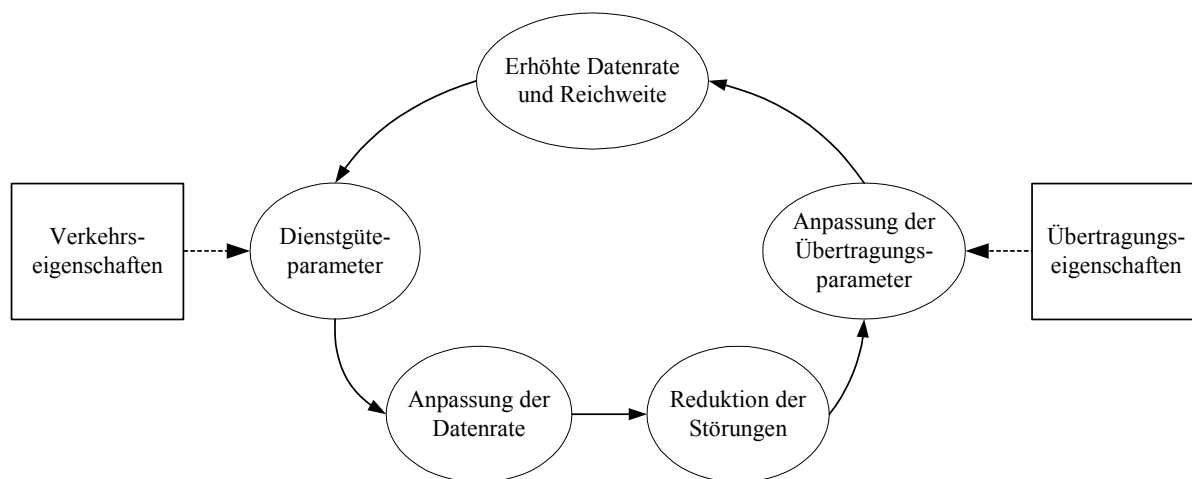


Abbildung 23: Anpassungsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung

Als Fazit der angestellten Überlegungen kann zusammengefasst werden, dass die adaptive Dienstgüte durch die gemeinsame Optimierung von Übertragungs- und Verkehrseigenschaften und die Adaption der verwendeten Datenrate an die real existierenden Verkehrsanforderungen die Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Teilnehmeranschlussnetzen ermöglicht.

4.3.1 Realisierungskonzept der adaptiven Dienstgütesteuerung

Nach der Erläuterung der prinzipiellen Funktion der adaptiven Dienstgüte soll in diesem Abschnitt das AQOS-Realisierungskonzept vorgestellt werden.

Bei der modellhaften Betrachtung entsprechend Abbildung 24 kann eine Unterteilung in die Netzebenen Teilnehmeranschlussleitungen, Zugangsnetz und Kernnetz vorgenommen werden. Die in dieser Arbeit untersuchte adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen betrifft vor allem die Teilnehmeranschlussleitungen und das Zugangsnetz.

Die Teilnehmeranschlussleitungen bilden die Schnittstelle zwischen den Teilnehmern und dem Verbund der verschiedenen Netze. Auf der Netzseite werden die TAL in Linecards in den DSLAMs terminiert. Die Linecard stellt die physikalischen Ports für den Anschluss der Leitungen zur Verfügung. Der DSLAM verfügt über eine Verwaltungseinheit für die Leitungen (Line Management), welches zur Steuerung, Überwachung und Konfiguration der Teilnehmeranschlussleitungen verwendet wird. Das in Abschnitt 2.7 vorgestellte dynamische Spektrummanagement erweitert das Line Management zu einer Spectrum Management Center (SMC) genannten Managementinstanz für die Leitungen des DSLAMs entsprechend Abbildung 19 in Kapitel 2. Das SMC vereint die Funktionalität der Koordination der verschiedenen Frequenzspektren und der Verwaltung der Leitungsparameter.

Darüber hinaus bildet der DSLAM die Nahtstelle zum Zugangsnetz. Zugangsnetze führen die Verkehre der vielen geografisch verteilten DSLAMs zu den wenigen Übergangspunkten zu den Kernnetzen zusammen. So besteht beispielsweise das Netz der Deutschen Telekom AG aus etwa 7900 Hauptverteilerstandorten, in denen die DSLAMs aufgebaut sind, und nur aus 75 Zugangspunkten zum deutschlandweiten Kernnetz.

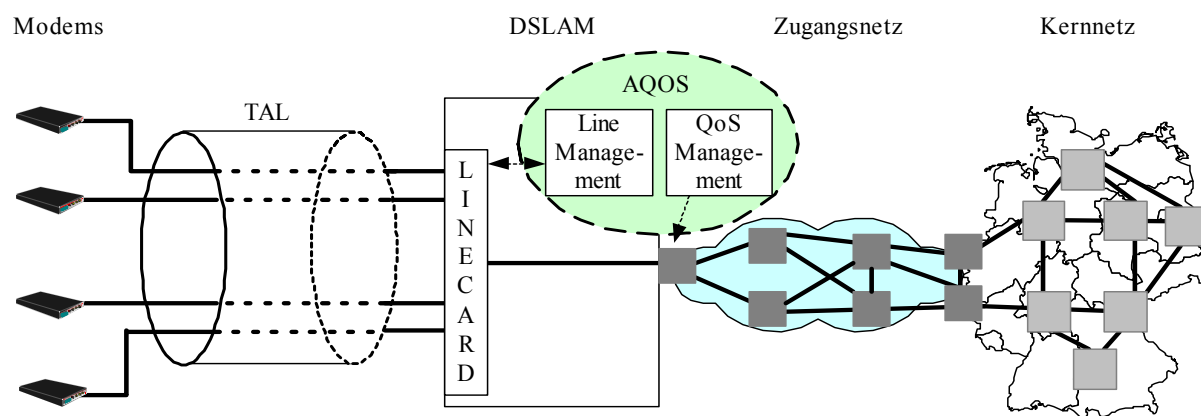


Abbildung 24: Konzept der adaptiven Dienstgüte

Neue Ansätze für paketbasierte Zugangsnetze, wie z. B. die in [54] und [64] vorgeschlagenen Verfahren, integrieren den DSLAM in das Zugangsnetz. Das Zugangsnetz bietet seinen Nutzern Dienstgüte an. Wie in Kapitel 3.3 erläutert wird, sind wichtige Funktionen der Dienstgütearchitektur am Rand des Netzes realisiert. Die Knoten innerhalb des Netzes sind auf schnelle Weiterleitung optimiert und verfügen über relativ wenig Intelligenz. Der DSLAM bildet in diesem Konzept den Grenzknoten des QoS-fähigen Zugangsnetzes. Konsequenterweise ist dann auch ein Teil der Dienstgütesteuerung in den DSLAM integriert.

An der Schnittstelle zwischen TAL und Zugangsnetz sind zwei Verwaltungs- und Steuerungsfunktionen etabliert, QoS- und Spektrummanagement. Diese Funktionen sind konzeptionell im DSLAM oder zumindest in dessen Nähe realisiert. Bei den gegenwärtigen Verfahren arbeiten diese Managementfunktionen unabhängig voneinander.

Die adaptive Dienstgütesteuerung führt die bisher getrennten Verwaltungs- und Steuerungsfunktionen in einer gemeinsamen Managementinstanz (Management Center, MC) für das QoS- und Spektrummanagement zusammen. Abbildung 25 zeigt den Aufbau der entsprechenden Steuerungs- und Verwaltungsinstanz.

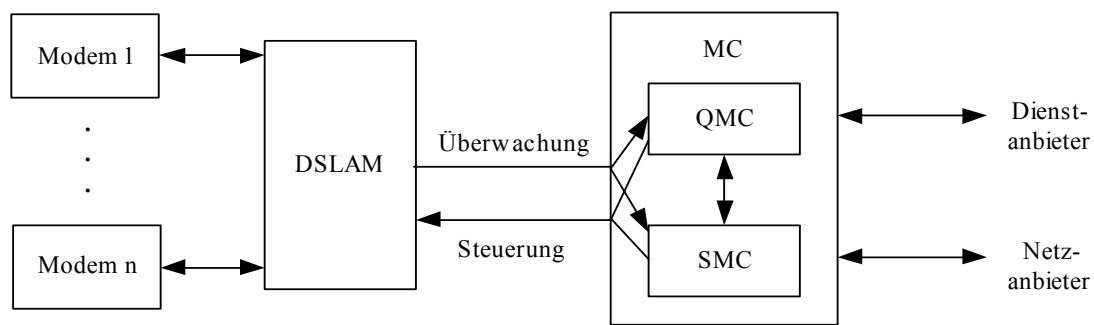


Abbildung 25: Struktureller Aufbau der Steuerungs- und Verwaltungsinstanz

Das MC enthält zwei Managementkomponenten, das QoS- (QMC) und das Spektrummanagement (SMC). Diesen beiden Einheiten werden Informationen über die veränderlichen Eigenschaften zugeleitet, dem QMC die Verkehrsparameter und dem SMC die Übertragungsparameter. Bei Veränderung der Eigenschaften werden neue Parameter für Dienstgüte und Übertragung im MC berechnet und zwischen den beiden Managementkomponenten abgestimmt. Nach der Berechnung überträgt das MC die neuen Parameter an die beiden Netzknoten (DSLAM und Modem) einer Teilnehmeranschlussleitung. Die neuen Parameter können dann aktiviert werden. Auf Veränderung kann also reagiert und eine Anpassung der Übertragungs- und Dienstgüteparameter herbeigeführt werden.

Da zwischen den QMC und SMC eine Interaktion besteht, können Übertragungs- und Dienstgüteparameter gemeinsam gesteuert werden. AQOS erweitert somit das aus der Literatur bekannte Spektrummanagement [4] um die dynamische Steuerung der Dienstgüte. Durch die in dieser Arbeit erstmals vorgeschlagene gemeinsame Steuerung der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften werden beide veränderlichen Charakteristiken in einer einheitlichen Managementeinheit zusammen verwaltet. Das dynamische Spektrummanagement wird um die Dienstgütesteuerung erweitert.

Zusätzlich erlaubt das Realisierungskonzept auch eine Interaktion mit dem jeweiligen Netz- bzw. Dienstanbieter. Somit kann die bereitgestellte Datenrate und Dienstgüte zwischen Teilnehmeranschlussleitung und Zugangsnetz koordiniert werden. Für die Teilnehmer ist vor allem die Ende-zu-Ende-Dienstgüte relevant. Daher ist es vorteilhaft, in den benachbarten Netzebenen, Teilnehmeranschlussleitungen und Zugangsnetz, die gleiche Dienstgüte bereitzustellen. Andernfalls wäre für den Teilnehmer nur die geringere Dienstgüte bemerkbar. Deshalb wird die Dienstgüte zwischen den beiden Netzebenen abgestimmt. Des Weiteren könnte bei unabgestimmter Dienstgüte durch die dynamische Bereitstellung der Datenrate auf den Teilnehmeranschlussleitungen ein Engpass im Zugangsnetz erzeugt werden, wenn die Summe der Datenraten der Teilnehmeranschlussleitung die vorhandene Kapazität einer oder mehrerer Übertragungsstrecken des Zugangsnetzes übersteigt. Dies würde nur zu einer Verschiebung der Dienstgüteproblematik aber nicht zu einer Lösung führen. Daher besteht bei der adaptiven Dienstgütesteuerung die Möglichkeit der Abstimmung der bereitgestellten Dienstgüte auf den Teilnehmeranschlussleitungen und im Zugangsnetz.

Die Realisierung der adaptiven Dienstgüte im DSLAM ist aus mehreren Gründen vorteilhaft. Erstens stellt der DSLAM bei xDSL-Übertragungssystemen eine zentrale Instanz dar, die für die Steuerung und Koordination der Leitungsparameter verwendet wird. Die Integration der Dienstgütesteuerung stellt eine Erweiterung dieser Funktionalität dar und erfordert nur eine geringfügige Veränderung des Systemkonzepts. Zweitens ist der DSLAM als Verbindungsglied zwischen Teilnehmeranschlussleitungen und Zugangsnetz für die adaptive Dienstgütesteuerung

prädestiniert, was durch die Integration von Dienstgütemechanismen in den DSLAM verstärkt wird. Drittens strebt die adaptive Dienstgütesteuerung eine schnelle Reaktion auf Veränderungen der betrachteten Parameter an. Dabei ist die zeitaufwändige Weiterleitung der extrahierten Parameter an externe Komponenten zu vermeiden. Durch die Integration der adaptiven Dienstgüte in den DSLAM werden die Parameter intern bearbeitet und Verzögerungen durch die Übertragung der Parameter zu einer außerhalb des DSLAM realisierten Managementinstanz treten nicht auf.

Durch das Verschmelzen der bereits vorhandenen Managementkomponenten im DSLAM entsteht eine Verwaltungsinstanz für Verkehrs- und Übertragungseigenschaften auf der Basis der Dienstgüte. Die Zusammenführung der Steuerungsfunktionen in einer Instanz erlaubt die gemeinsame Optimierung der variablen Parameter.

4.3.2 Systemmodell der adaptiven Dienstgütesteuerung

Das für die adaptive Dienstgütesteuerung benötigte Systemmodell erweitert die Funktionalität der Steuerungs- und Managementebene des OSI-Referenzmodells. Abbildung 26 beschreibt das System und die Interaktion mit der Nutzdatenebene des Schichtenmodells für die Übertragungsschicht (PHY), die Sicherungsschicht (DLL) und die durch IP repräsentierte Vermittlungsschicht.

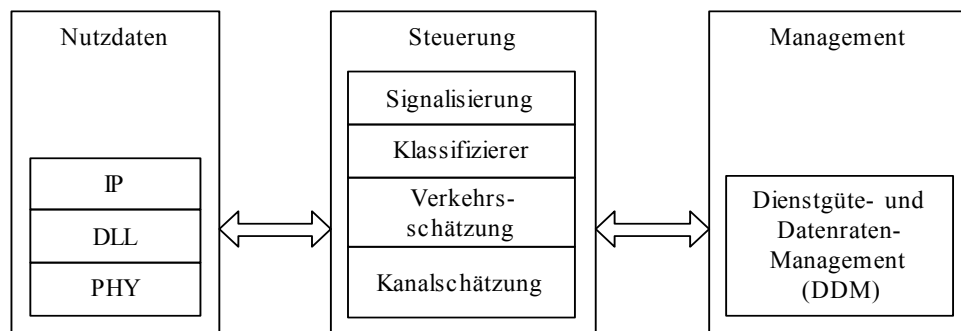


Abbildung 26: Systemmodell der adaptiven Dienstgütesteuerung

Die für die adaptive Dienstgütesteuerung zusätzlich benötigte Funktionalität der Steuerungsebene setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Verkehrsklassifizierung
- Verkehrsschätzung
- Kanalschätzung
- Signalisierung

Die Managementebene enthält das Dienstgüte- und Datenratenmanagement (DDM).

Wie die gegenwärtig vorherrschenden Dienstgütearchitekturen erlaubt AQOS qualitative Aussagen über die angebotene Dienstgüte der Übertragung. Die Unterscheidung der verschiedenen Qualitätsstufen erfolgt durch die Klassifizierung des Verkehrs in Dienstklassen. Verkehrsklassifizierer sind aus vielen Dienstgütearchitekturen bekannt. Sie untersuchen die Inhalte der Paketköpfe und ordnen die Pakete nach bestimmten Regeln den Verkehrsklassen zu. Ein breites Spektrum an Klassifizierern ist aus der Literatur [87] bekannt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Verwendung vorhandener Klassifizierer vorausgesetzt.

Eine essenzielle Notwendigkeit zur Anpassung veränderlicher Parameter ist die Schätzung der gegenwärtigen und Vorhersage der zukünftigen Übertragungseigenschaften und Verkehrsanforderungen. In der Übertragungsschicht findet eine Schätzung der Eigenschaften des Übertragungskanals statt. Die Kanalschätzung liefert Informationen über den Übertragungskanal wie z. B. die Kanalimpulsantwort und die Nebensprechkoeffizienten. Diese Informationen werden durch die Kanalparameter dargestellt. Verfahren zur Kanalschätzung sind aus der Literatur bekannt, z. B. [134].

Auf Basis der Verkehrsklassifizierung findet eine Schätzung der zu erwartenden Datenrate in den Verkehrsklassen statt. Für die Realisierung der Schätzung bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die folgende Auflistung stellt einige Beispiele dar.

- Extraktion der Informationen aus Signalisierungsnachrichten (z. B. [216])
Viele Dienstgütearchitekturen verwenden Signalisierungs- (z. B. SIP, H.323) und Reservierungsnachrichten (z. B. RSVP) beim Aufbau von Verbindungen. Diese Nachrichten enthalten Informationen über die Art und Menge des Verkehrs und können für eine Bestimmung der benötigten Datenraten genutzt werden.
- Empirische Modelle für die Verkehrscharakteristiken der Anwendungen (z. B. [199])
Die Fortschritte auf dem Feld der Verkehrsmodellierung erlauben die Schätzung der Datenrate für verschiedene Anwendungen, wie z. B. Video.
- Feste Verkehrsprofile (z. B. [22])
Von den Netzbetreibern können Verkehrsprofile in Form von SLS erstellt werden, welche die zu erwarteten Datenraten festlegen.

Das Resultat der Verkehrsschätzung sind Dienstgüteanforderungen einzelner Teilnehmer für spezifische Dienstklassen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird von einer schnellen und exakten Schätzung der Verkehrs- und Kanalcharakteristiken ausgegangen. Die Ergebnisse beider Schätzprozesse, Kanalparameter und Dienstgüteanforderungen einzelner Teilnehmer, werden einer Managementinstanz zugeleitet. Dieses Dienstgüte- und Datenratenmanagement steuert die Aufteilung der Ressourcen, die Zugangskontrolle für neue Verbindungen und die Neuaushandlung bei Veränderung der verfügbaren Ressourcen. Eine Signalisierungsinstanz teilt die veränderte Ressourcenaufteilung den verschiedenen Protokollschichten der Nutzdatenebene und den beteiligten Netzknoten mit. Danach wird die neue Ressourcenaufteilung aktiviert und die genutzte Datenrate verändert. Abbildung 27 illustriert das funktionale Modell der adaptiven Dienstgütesteuerung.

Zur Gewährleistung der Stabilität des Verfahrens darf pro Übertragungsrichtung jeweils nur eine Veränderung der Parameter durchgeführt werden. Eine neue Aushandlung kann erst beginnen, wenn die vorherige beendet ist. Dadurch wird die korrekte Sequenz und Synchronität der Aushandlung sichergestellt. Das zentral realisierte DDM koordiniert die Stabilität des Verfahrens. Weil die Dauer der Aushandlung sehr kurz ist, stellt diese Annahme keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit dar. Während einer Aushandlung wird auf erneute Veränderungen der Eigenschaften nicht sofort eingegangen. Diese Veränderungen gehen nicht verloren, sondern werden nach dem Abschluss der aktuellen Aushandlung abgearbeitet. Wegen der Schnelligkeit der Aushandlung hat diese minimale temporäre Verzögerung nur geringe Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Verfahrens.

Die Ausführung der in Abbildung 27 dargestellten Funktionalität wird durch Veränderungen der Übertragungs- bzw. Verkehrseigenschaften verursacht. Ändern sich die Dienstgüteanforderungen der Teilnehmer oder die Kanalcharakteristiken, dann werden durch das DDM neue Übertragungsparameter ermittelt. Diese werden durch die Signalisierung an die

beteiligten Komponenten verteilt. Aufgrund der bereits diskutierten Ursachen treten Veränderungen der Verkehrseigenschaften und damit der benötigten Dienstgüte sehr viel häufiger auf, als Variationen der Kanalcharakteristiken. Darüber hinaus wirken sich die Änderungen der Datenraten auch direkt auf die Nebensprechstörungen als Übertragungseigenschaft aus. Die Veränderlichkeit der Verkehrseigenschaften stellt somit den dominierenden Faktor für die Häufigkeit der Ausführung der adaptiven Dienstgüte dar.

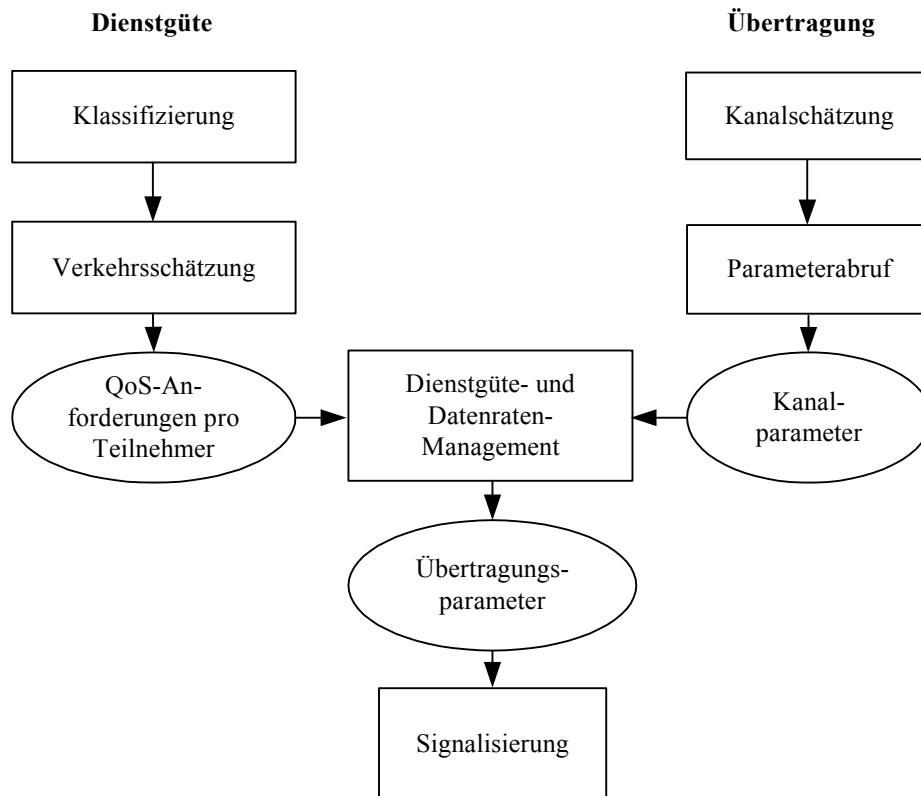


Abbildung 27: Funktionales Modell der adaptiven Dienstgüte

Die Veränderlichkeit der Verkehrseigenschaften tritt vor allem beim Auf- bzw. Abbau von Verbindungen auf und hängt von der Granularität der Verkehrsschätzung und der betrachteten Verkehrsart ab. Grobe Schätzungen des Verkehrs, wie z. B. bei Verkehrsprofilen, führen zu einer selteneren Änderung der Parameter und damit der Ausführung der adaptiven Dienstgüte. Beispielsweise wird bei der Verkehrsschätzung auf Basis von Internet-Sitzungen nur zu Beginn und Ende der Sitzung die adaptive Dienstgüte ausgeführt. Die Dauer solcher Sitzungen wird durch logarithmische Normalverteilungen mit Medianen von ca. 10 Minuten bei zeitbasierter Abrechnung und etwa 100 Minuten bei pauschaler Abrechnung modelliert [116]. Privatanwender initiieren solche Sitzungen häufig nur einmal am Tag, beispielsweise um E-Mail zu lesen. In diesen beispielhaften Fällen wird die adaptive Dienstgütesteuerung zweimal pro Tag ausgeführt.

Bei einer feineren Verkehrsschätzung hängt die Häufigkeit vor allem von der Art des zu übertragenden Verkehrs ab. Basiert die Verkehrsschätzung auf der Extrahierung der Parameter aus den Signalisierungsnachrichten, so wird AQOS im Falle der Telefonie jeweils beim Verbindungsauf- und abbau ausgeführt. Telefongespräche werden in der Literatur ebenfalls durch lognormale Verteilungen mit Medianen von 170 - 300 Sekunden [56] für die Dauer und durch exponentielle Verteilungen mit Mittelwerten zwischen 90 und 300 Sekunden für die

Zwischenzeit zwischen den Telefongesprächen modelliert [31]. Diese Werte stellen Indikatoren für die Häufigkeit der AQOS-Ausführung dar. Die adaptive Dienstgütesteuerung wird demnach in relativ großen Zeitabständen initiiert, während ihre Ausführungsdauer im Subsekundenbereich liegt. In Verbindung mit der zentralen Koordination durch das DDM ist die Stabilität der adaptiven Dienstgütesteuerung somit gewährleistet.

4.3.3 Cross-Layer-Entwurfsschema der adaptiven Dienstgütesteuerung

Das Konzept der adaptiven Dienstgütesteuerung beinhaltet die gemeinsame Anpassung von Übertragungs- und Dienstgüteparametern bei Veränderungen der Kanal- oder Verkehrseigenschaften. Diese Anpassung erfordert einen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten und Protokollschichten.

Das OSI-Referenzmodell ist für die gemeinsame Adaption von Parametern verschiedener Protokollschichten nur unzureichend geeignet. Cross-Layer-Verfahren erlauben den vertikalen Informationsaustausch zwischen den Protokollschichten, wie er bei der adaptiven Dienstgütesteuerung notwendig ist. Der hier vorgeschlagene Ansatz erlaubt die Verwendung des Cross-Layer-Entwurfs zur optimierten Steuerung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen.

Abbildung 28 zeigt die Cross-Layer-Architektur der adaptiven Dienstgütesteuerung. Durch Verkehrsklassifizierung und Verkehrs- bzw. Kanalschätzung erfolgt eine Abstrahierung der Parameter der einzelnen Protokollschichten. Hierbei muss erwähnt werden, dass je nach Auslegung des Netzgerätes als Switch oder Router die Verkehrsklassifizierung Informationen der Sicherungs- oder Vermittlungsschicht verwendet. Daraus ergeben sich keine prinzipiellen Unterschiede, allein die Art der für die Klassifizierung verwendeten Informationen differiert. Die Darstellung in Abbildung 28 bezieht sich auf den bei Teilnehmeranschlussleitungen weit verbreiteten Fall der Auslegung der Netzgeräte als Switch mit Funktionalität der Sicherungsschicht. Die Abstrahierung führt zu einer Transformation der Parameter in eine Form, die sich für die Cross-Layer-Optimierung im Dienstgüte- und Datenratenmanagement eignet. Das DDM entscheidet auf Basis der abstrahierten Eingangsparameter über die in den jeweiligen Protokollschichten zu verwendenden Cross-Layer-Parameter. Die ermittelten Parameter werden durch die Signalisierungsinstanz an die beteiligten Protokollschichten verteilt. Die Cross-Layer-Architektur der adaptiven Dienstgütesteuerung stellt somit einen geschlossenen Regelkreis zur Optimierung der Übertragung bei veränderlichen Verkehrs- und Übertragungseigenschaften dar.

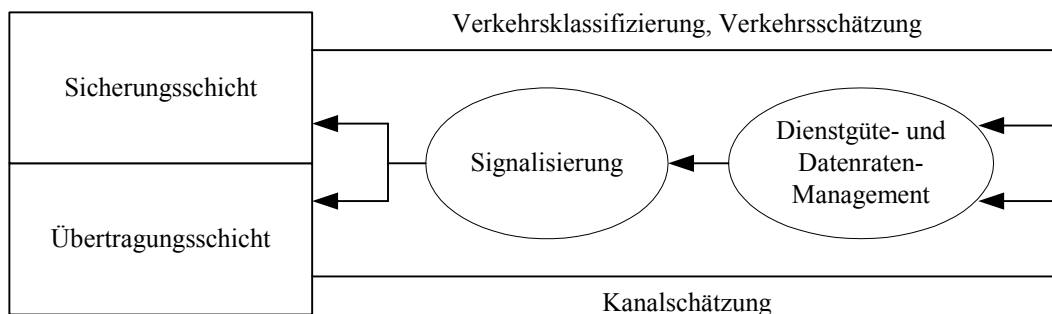


Abbildung 28: AQOS-Cross-Layer-Architektur

Ein kritischer Punkt der Cross-Layer-Verfahren ist das Finden von einfachen und robusten Abstrahierungsparametern für die gemeinsame Nutzung in verschiedenen Protokollschichten

[230]. Bei der adaptiven Dienstgütesteuerung stellt die in Dienstklassen aufgeteilte Datenrate den Abstrahierungsparameter dar. Unterschiedliche Parameter repräsentieren die Datenrate in den einzelnen Protokollschichten. In der Übertragungsschicht wird sie durch die Bitbelegung abgebildet, welche die Aufteilung der Bits auf die einzelnen Unterträger festlegt. In der Sicherungsschicht wird die Datenrate durch Bedienraten für die Warteschlangen dargestellt. Das AQOS-Cross-Layer-Verfahren verwendet die Datenrate zur Repräsentation der veränderlichen Eigenschaften der Übertragungs- und Sicherungsschicht.

Bei AQOS wird schnell auf auftretenden Veränderungen reagiert. Nur so ist eine unterbrechungsfreie Adaption an die variablen Eigenschaften möglich. Die Anpassung der Datenrate an veränderte Verkehrscharakteristiken wird bei Datenströmen mit Dienstgüteanforderungen beim Verbindungsauf- bzw. abbau ausgeführt. Vor allem bei Anwendungen mit direkter Teilnehmerinteraktion tolerieren die Nutzer beim Aufbau der Verbindung nur geringe Verzögerungen. Die schnelle Reaktion auf Veränderungen erfordert, dass der Informationsaustausch ohne großen zeitlichen Verzug realisiert werden kann. Der Informationsaustausch wird durch ein Protokoll zur Signalisierung realisiert.

Die verschiedenen Arten des Informationsaustausches bei der adaptiven Dienstgüte können in folgende zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Horizontaler Informationsaustausch
Signalisierung zwischen unterschiedlichen Netzknoten, wie z. B. DSLAM und Modem bei Teilnehmeranschlussleitungen
- Vertikaler Informationsaustausch
Signalisierung zwischen unterschiedlichen Schichten des OSI-Referenzmodells innerhalb eines Netzknoten

Die horizontale Signalisierung tauscht Informationen zwischen den Partnerinstanzen der gleichen Protokollschicht unterschiedlicher Netzknoten aus, wie z. B. DSLAM und Modem. Die adaptive Dienstgütesteuerung unterscheidet zwei unterschiedliche horizontale Signalisierungsphasen:

1. Austausch der geschätzten Parameter der Kanal- oder Verkehrscharakteristiken
2. Austausch und Aktivierung der veränderten Übertragungs- und Dienstgüteparameter

Die Schätzung der Verkehrscharakteristiken kann zentral oder dezentral erfolgen. Erfolgt sie zentral, werden die Verkehrscharakteristiken immer im DSLAM geschätzt. Dies hat den Vorteil, dass die Verkehrsschätzungen nicht über die Übertragungsstrecke transferiert werden müssen und vermeidet zusätzliche Ressourcenbelastungen. Für den Verbindungsaufbau bei einem inaktiven Kanal wird in diesem Fall eine ständig verfügbare Signalisierungsdatenrate benötigt. Die dezentrale Schätzung erfolgt im jeweiligen Sender der Übertragungsstrecke. Bei beiden Schätzansätzen werden die sich verändernden Verkehrscharakteristiken in der ersten Phase an das DDM übermittelt. Wegen der geringeren Komplexität verfolgt das AQOS-Verfahren den Ansatz der zentralen Verkehrsschätzung im DSLAM.

In der zweiten Phase werden sich ändernde Dienstgüte- und Übertragungsparameter ausgetauscht. Diese Parameter werden durch das DDM ermittelt und von dort an die Sender der jeweiligen Übertragungsrichtung signalisiert. Die Kenntnis der Übertragungsparameter in den Empfängern ist nicht unbedingt notwendig. Allerdings sind die gegenwärtig bekannten Verfahren zur Schätzung der Signalkonstellation wenig effizient [130]. Daher wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Übertragungsparameter auch im Empfänger einer Übertragungsstrecke bekannt sind. Die Übertragungsparameter werden auch an den Empfänger signalisiert.

Die Korrektheit der Informationen ist für die Stabilität der Übertragung von besonderer Wichtigkeit. Die Aktivierung von Übertragungsparametern, die nicht korrekt sind oder sich zwischen Sender und Empfänger unterscheiden, führt zum Verlust der Synchronisierung und zur Unterbrechung der Übertragung. Daher wird beim Austausch der Übertragungsparameter die Korrektheit der Daten bestätigt.

Nach der positiven Bestätigung der Übertragungsparameter werden die neuen Übertragungsparameter aktiviert. Die Aktivierung signalisiert der Sender an den Empfänger.

Die vertikale Signalisierung tauscht Informationen zwischen unterschiedlichen Protokollschichten aus. Bei der adaptiven Dienstgütesteuerung sind dabei die Übertragungs- und die Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells betroffen. Dieser Ansatz erfordert den gemeinsamen Zugriff aus verschiedenen Protokollschichten auf die jeweiligen Parameter. Deren Verwaltung kann also nicht mehr autonom innerhalb der entsprechenden Schichten erfolgen. Vielmehr wird ein koordiniertes Management der Parameter verschiedener Schichten benötigt. Die gemeinsame Steuerung der Parameter erfolgt im DDM, welches als zentrale Managementinstanz zur Verwaltung und Adaption der Dienstgüte- und Übertragungsparameter dient.

Ein konkreter Vorschlag für die Ausgestaltung der Signalisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung wird in Kapitel 6 vorgestellt.

4.3.4 Gemeinsame Steuerung von Übertragung und Dienstgüte

Die adaptive Dienstgütesteuerung erfordert die gemeinsame Nutzung von Informationen in unterschiedlichen Protokollschichten. Zur Steuerung dieser Parameter ist eine eindeutige Abbildungsvorschrift zwischen Übertragungs- und Sicherungsschicht erforderlich.

Die Eigenschaften der Übertragungsstrecke werden z. B. durch die Kanalimpulsantwort und die Nebensprechkoeffizienten der Leitungen bestimmt. Diese werden durch ein Kanalschätzverfahren gewonnen. Die Verkehrscharakteristiken der Anwendungen liefern die Dienstgüteanforderungen der Teilnehmer in Form von Datenratenanforderungen für die einzelnen Dienstklassen. Die Datenrate stellt damit den Parameter dar, der für die gemeinsame Informationsnutzung zwischen den Schichten geeignet ist.

Die Datenrate in der Übertragungsschicht wird durch die Bitbelegung (Bit-Load-Vektor) in den einzelnen Unterträgern repräsentiert und durch Übertragungsparameter (Set of Transmission Parameter, STP) definiert [69]. In einem Netzknoten können verschiedene STPs definiert sein, von denen allerdings nur ein einziger aktiv ist. Die folgenden Parameter sind entsprechend der VDSL-Standardisierung [6, 68, 69, 118] für die dynamische Datenratenanpassung von Bedeutung.

- Anzahl der Bits pro Unterträger
- Signalsendeleistung pro Unterträgers

Die Standards erlauben die Aufteilung der Übertragungsbandbreite auf maximal 4096 Unterträger, die in die beiden Übertragungsrichtungen Up- und Downstream aufgeteilt sind. Die maximale Anzahl von Bits, mit denen ein Träger belegt werden darf, schwankt bei den einzelnen Standards und liegt zwischen 11 und 15.

Die Datenrate eines Übertragungskanal i ergibt sich nach (2.18) aus der pro Symboldauer T_{symbol} übertragenen Summe aller auf die N Unterträger verteilten Bits einer Übertragungsrichtung.

In der Sicherungsschicht bestimmt die Bedienrate der einzelnen Warteschlangen die Datenrate der jeweiligen Dienstklasse. Für jede Dienstklasse existiert in den Netzknoten eine Warteschlange, in die der entsprechende Verkehr eingeordnet wird. Ein Scheduling-Verfahren koordiniert die Bedienung der Warteschlangen.

Die gemeinsame Nutzung der geforderten Datenrate in unterschiedlichen Schichten erfolgt durch die Abbildung der Bedienrate von Warteschlangen in der Sicherungsschicht auf die Bitbelegung in der Übertragungsschicht.

Für die Abstimmung der Parameter der unterschiedlichen Protokollschichten ist das Dienstgüte- und Datenratenmanagement verantwortlich (siehe Abbildung 27). Dieses berechnet auf Basis der Dienstgüteanforderungen der Teilnehmer und der abgeschätzten Kanalparameter neue Übertragungsparameter. Falls die Dienstgüteanforderungen nicht gewährleistet werden können, muss der Verbindungswunsch abgelehnt werden. Im Falle der Gewährleistung der geforderten Dienstgüte wird der Verbindungswunsch akzeptiert und die neue Bitbelegung aktiviert.

Ein konkreter Vorschlag für das Dienstgüte- und Datenratenmanagement wird in Kapitel 5 vorgestellt.

4.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel zeigt, wie die Veränderlichkeit der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Übertragung in Form von Datenrate, Reichweite und Fairness genutzt werden kann. Es wird erläutert, wie die Dienstgüte bei Punkt-zu-Punkt-Übertragungstrecken durch eine Anpassung der verwendeten Datenrate gesteuert wird.

Mit der adaptiven Dienstgütesteuerung wird ein neuartiges Konzept zur Anpassung der verschiedenen variablen Parameter vorgestellt. AQOS ist ein auf die Veränderlichkeit der Übertragungs- und Verkehrseigenschaften abgestimmtes Dienstgüteverfahren und beinhaltet neben der gemeinsamen Optimierung der Dienstgüte und Übertragung ein schnelles Signalisierungsverfahren zum Austausch der veränderten Parameter bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen. Cross-Layer-Entwurfsmethoden kommen dabei zum Einsatz. Dabei werden die in verschiedenen Protokollschichten beheimateten veränderlichen Eigenschaften für eine Optimierung der verwendeten Datenrate genutzt. Die Datenrate stellt den gemeinsamen Abstrahierungsparameter des Cross-Layer-Verfahrens dar, die in der Übertragungsschicht durch die Bitbelegung und in der Sicherungsschicht durch die Bedienrate der Warteschlangen dargestellt wird.

Das DDM optimiert sowohl Dienstgüte als auch Übertragungsparameter in Abhängigkeit von den Verkehrs- und Kanalcharakteristiken. Dadurch erweitert AQOS das aus der Literatur [4] bekannte dynamische Spektrummanagement um die dynamische Dienstgütesteuerung. Ein Ansatz zur Integration der adaptiven Dienstgütesteuerung in bestehende Zugangsnetze wird ebenfalls vorgeschlagen. Die schnelle Signalisierung erlaubt die zeitnahe Reaktion auf Veränderungen und die gemeinsame Nutzung von Informationen durch verschiedene Protokollschichten.

AQOS liefert ein Rahmenwerk für die adaptive Bereitstellung der Dienstgüte, welches durch die dynamische Anpassung der veränderlichen Eigenschaften eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von leitungsgebundenen Mehrträgersystemen ermöglicht.

5 Konzeptvorschlag eines Verfahrens zum Dienstgüte- und Datenratenmanagement

Die Aufgaben des Dienstgüte- und Datenratenmanagements bestehen in der Steuerung und Verwaltung der Dienstgüte der einzelnen Teilnehmer, in der Berechnung der in Abhängigkeit von Übertragungs- und Verkehrseigenschaften verwendeten Datenrate und deren Verteilung auf die jeweiligen Unterträger. In diesem Kapitel wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches durch die gemeinsame Steuerung der Dienstgüte- und Übertragungsparameter die Leistungsfähigkeit der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme optimiert.

Abschnitt 5.1 liefert eine Einführung in die Problematik. Abschnitt 5.2 schlägt ein Verfahren zur dienstgüteeerweiterten Bitzuweisung vor. Dieses Verfahren wird einer Leistungsbewertung unterworfen, deren Ergebnisse Abschnitt 5.3 vorstellt. Die in diesem Kapitel getroffenen Kernaussagen fasst der Abschnitt 5.4 zusammen.

5.1 Einführung

In Abbildung 27 in Kapitel 4 wird das Dienstgüte- und Datenratenmanagement als die Komponente gekennzeichnet, welche die Dienstgüte der Datenströme festlegt und die dazu benötigten Übertragungsparameter berechnet. Damit ist das DDM für die adaptive Dienstgütesteuerung von entscheidender Bedeutung. Es legt auf Basis der Übertragungs- und Verkehrscharakteristiken fest, ob und welche Dienstgüte gewährleistet werden kann. Zusätzlich bestimmt es, wie die daraus resultierende Datenrate auf die einzelnen Unterträger aufgeteilt wird. Dies wird durch einen Bitzuweisungsalgorithmus realisiert. In Kapitel 2.5 werden die existierenden Bitzuweisungsalgorithmen detailliert analysiert. Die Verfahren können prinzipiell in zwei Gruppen eingeteilt werden, Einzelnutzerbetrachtungen und Mehrnutzerbetrachtungen.

Bei der Einzelnutzerbetrachtung werden die veränderlichen Nebensprechstörungen benachbarter Leitungen nicht betrachtet, sondern nur von AWGN-Störungen ausgegangen. Die Nebensprechstörungen werden durch eine Systemreserve approximiert. Da diese Schätzung suboptimal ist, führen diese Verfahren zu einer ineffizienten Ressourcenausnutzung in den Teilnehmeranschlussnetzen.

Bei der Mehrnutzerbetrachtung werden die real existierenden Nebensprechstörungen in die Bitzuweisung einbezogen. Sie ist deshalb von größerem Interesse und ermöglicht eine deutlich bessere Ausnutzung der Ressourcen als die Einzelnutzerbetrachtung. Der Term (5.1) aus Gleichung (2.22) zeigt, dass die Störungen durch die Nebensprechfunktion $H_{i,j}(k)$ zwischen Leitung i und j und die Sendeleistung $P_j(k)$ auf der benachbarten Leitung j im Unterträger k bestimmt wird. Die Übertragung auf Leitung i wird durch die Sendeleistung auf Leitung j beeinflusst.

$$\sum_{j=1, j \neq i}^M |H_{i,j}(k)|^2 P_j(k) \quad (5.1)$$

Die meisten der bekannten Mehrnutzerbitzuweisungsalgorithmen führen eine Optimierung der Summe der Datenraten aller betrachteter Leitungen durch. Mit diesen Verfahren sind spezifische Datenraten für bestimmte Leitungen nicht garantierbar. Außerdem wird auf die erwartete Dienstgüte unterschiedlicher Teilnehmer nicht eingegangen. Eine dienstgütespezifische Bitzuweisung ist also auch nicht möglich. Die Bitzuweisung erfolgt ausschließlich auf Basis der Übertragungseigenschaften. Damit bekommen Leitungen mit guten Charakteristiken mehr Übertragungskapazität zugewiesen als Leitungen mit schlechteren Eigenschaften. Dieses Verfahren ist unfair gegenüber Teilnehmern, die an Leitungen mit ungünstigeren Übertragungseigenschaften angeschlossen sind. Datenratengarantien können bei den gegenwärtig bekannten Verfahren nicht gewährt werden, da immer nur die Gesamtdatenrate eines Kabelbündels betrachtet wird. Die Datenrate einzelner Teilnehmer spielt bei der Bitzuweisung keine Rolle.

Für den realen Einsatz der Mehrnutzerbitzuweisung sind Verfahren notwendig, welche die Datenratenanforderungen einzelner Teilnehmer einbeziehen. Die Aufteilung der Datenrate in einzelne Dienstklassen ist für die Dienstgüteunterstützung essenziell. Nur so können Netzbetreiber hochwertige Dienste anbieten, die garantierte Datenraten in spezifischen Dienstklassen enthalten.

5.2 Dienstgüteerweiterte Bitzuweisung

Aus den im vorigen Abschnitt erläuterten Aspekten geht hervor, dass für die adaptive Dienstgütesteuerung ein Bitzuweisungsalgorithmus benötigt wird, der Datenraten für einzelne Dienstklassen und Teilnehmer garantieren kann. Die bereitzustellende Datenrate in den entsprechenden Dienstklassen repräsentiert die Dienstgüte des Verkehrs.

Diese Problemstellung führt zu dem Lösungsansatz der Minimierung der Sendeleistung $P_i(k)$ der Leitungen unter der Randbedingung zu erreichender Dienstgüteanforderungen $Q_{c,i}$ für einzelne Teilnehmer i und Dienstklassen c (5.2).

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N P_i(k) \\ \text{sodass} \quad & \sum_{k=0}^N b_i k \geq Q_{c,i} \\ & Q_{1,i} < Q_{2,i} < \dots < Q_{\bar{c},i} \end{aligned} \tag{5.2}$$

Die Neuartigkeit dieses Ansatzes liegt in der Gewährleistung der Dienstgüte $Q_{c,i}$ für einzelne Dienstklassen und Teilnehmer. Bei der Darstellung (5.2) ist zu beachten, dass die Bitbelegung $b_i(k)$ nur diskrete, positive Werte $\{0, 1, \dots, \bar{b}\}$ annehmen kann und durch eine maximale Bitbelegung $\bar{b}$ begrenzt ist. Die VDSL-Standards erlauben die Wahl von $\bar{b}$ im Bereich von 11 bis 15. Mit $\overline{P(k)}$ ist die Maske gekennzeichnet, welche die Sendeleistung $P_i(k)$ im Unterträger k der Leitung i limitiert (5.3). Die Sendemaske wird durch den verwendeten Bandplan definiert (siehe Abbildung 11 in Kapitel 2).

$$P_i(k) \leq \overline{P(k)} \tag{5.3}$$

Unter Verwendung von Gleichung (2.22) kann der notwendige Signalrauschabstand für die Übertragung einer bestimmten Anzahl von Bits berechnet werden (5.4).

$$\text{SNR}_i(k) = \frac{|H_{i,i}(k)|^2 P_i(k)}{N_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^M |H_{i,j}(k)|^2 P_j(k)} \geq f_i(b_i(k), \overline{P_{\text{error}}}) \quad (5.4)$$

$i = 1, \dots, M$

In dieser Formulierung kennzeichnet $\overline{P_{\text{error}}}$ die mittlere Symbolfehlerwahrscheinlichkeit. Der Term f_i wird durch die jeweiligen Modulations- und Kodierungsverfahren bestimmt. Für die bei ADSL und VDSL oft verwendete QAM-Kodierung gilt unter Verwendung der bereits in Kapitel 2 vorgestellten SNR-Lücke Γ nach Gleichung (5.5):

$$f_i(b_i(k), \overline{P_{\text{error}}}) = \Gamma(2^{b_i(k)} - 1) \quad (5.5)$$

Die Gleichung (5.4) kann in die Matrixform (5.6) umformuliert werden.

$$(I - A_k)x_k(b_i(k)) \geq y_k \quad (5.6)$$

Dabei werden unter Verwendung der M-dimensionalen Einheitsmatrix I die einzelnen Terme durch die Gleichungen (5.7), (5.8) und (5.9) bestimmt.

$$\{A_k\}_{i,j} = \begin{cases} \frac{\Gamma(2^{b_i(k)} - 1)|H_{ij}(k)|^2}{|H_{ii}(k)|^2} & \forall, i \neq j \\ 0 & \forall, i = j \end{cases} \quad (5.7)$$

$$x_k(b_i(k)) = [P_1(k) \dots P_M(k)]^T \quad (5.8)$$

$$y_k = \left[\frac{\Gamma(2^{b_1(k)} - 1)N_1(k)}{|H_{11}(k)|^2} \dots \frac{\Gamma(2^{b_M(k)} - 1)N_M(k)}{|H_{MM}(k)|^2} \right]^T \quad (5.9)$$

Wenn A_k nichtreduzierbar ist, sind die Perron Eigenwerte von A_k real und positiv und es existiert nach dem Perron-Frobenius-Theorem für nichtreduzierbare Matrizen¹ ein positiver Eigenvektor [155]. In [165] wird gezeigt, dass für (5.6) eine Lösung existiert. Nach [146] ist (5.10) die Pareto-optimale Lösung für (5.6), wenn ein nichtnegatives x_k existiert.

$$x_k(b_i(k)) = (I - A_k)^{-1} y_k \quad (5.10)$$

Das bedeutet, dass alle anderen Lösungen elementweise größer oder gleich dieser Lösung sind. Die minimale Signalleistung für eine bestimmte Bitbelegung $[b_1(k), b_2(k), \dots, b_M(k)]$ kann aus (5.10) umformuliert werden und ist durch Gleichung (5.11) festgelegt [146].

1. Eine Matrix A ist genau dann nichtreduzierbar, wenn für jedes Element (i, j) ein nichtnegatives ganzzahliges k existiert, sodass das Element (i, j) von A^k ungleich Null ist.

$$\begin{bmatrix} P_1(k) \\ P_2(k) \\ \dots \\ P_M(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{|H_{11}(k)|^2}{\Gamma(2^{b_1(k)} - 1)} & -|H_{12}(k)|^2 & \dots & -|H_{1M}(k)|^2 \\ -|H_{21}(k)|^2 & \frac{|H_{22}(k)|^2}{\Gamma(2^{b_2(k)} - 1)} & \dots & -|H_{2M}(k)|^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -|H_{M1}(k)|^2 & -|H_{M2}(k)|^2 & \dots & \frac{|H_{MM}(k)|^2}{\Gamma(2^{b_M(k)} - 1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_1(k) \\ N_2(k) \\ \dots \\ N_M(k) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Die Lösung des Gleichungssystems nach (5.11) erfordert eine Optimierungsstrategie. In Kapitel 5.2.1 wird ein Optimierungsverfahren für die in (5.11) beschriebene Problemformulierung vorgeschlagen.

5.2.1 Optimierung durch Greedy-Verfahren

Die in (5.2) und (5.11) definierte Problemstellung strebt die Minimierung der Sendeleistung aller Leitungen unter Beachtung von garantierten, dienstklassenspezifischen Datenraten für einzelne Teilnehmer an. Die Datenrate wird durch die Bitbelegung auf die einzelnen Unterträger repräsentiert. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Anzahl übertragener Bits und der Sendeleistung nach (2.16) und (2.19) gilt die folgende Formulierung [217]:

Das sequenzielle Hinzufügen eines Bits zu dem Unterträger und Teilnehmer, der die niedrigste zusätzliche Sendeleistung benötigt, führt zu einer Maximierung der Gesamtzahl zugewiesener Bits und einer Minimierung der Sendeleistung.

Ein solcher Ansatz wird Greedy-Verfahren genannt. Das Greedy-Verfahren ist ein Prinzip zur lokalen Optimierung, bei dem man den nächsten Schritt im Suchraum so wählt, dass ein maximaler Vorteil entsteht. Algorithmen zur lokalen Optimierung werden als „greedy“ (gierig) bezeichnet, da sie jeweils den Schritt zuerst ausführen, der sie der gesuchten Lösung am nächsten bringt. Man versucht, das Optimierungsproblem durch lokale Auswahl des jeweils besten Elements unter Beachtung von Nebenbedingungen zu lösen. Auf dem Weg durch den Suchraum wird bei jedem Schritt nach einem bestimmten Kriterium entschieden, in welche Richtung weitergesucht wird. Dieses Kriterium garantiert, dass die Suche möglichst zu einer global optimalen Lösung führt, ohne dass Entscheidungen widerrufen werden müssen.

Wenn ein Problem nicht greedy-lösbar ist, liefert die Anwendung eines Greedy-Algorithmus im Allgemeinen nicht die global optimale Lösung. Also muss für jedes Problem zunächst untersucht werden, ob es greedy-lösbar ist.

Eine Problemstellung ist genau dann greedy-lösbar, wenn

- sich die optimale Lösung des Gesamtproblems aus optimalen Lösungen von Teilproblemen zusammensetzen lässt und
- die global optimale Lösung durch eine lokal optimale Entscheidung im Suchraum erreichbar ist.

Die Problemstellungen, bei denen das Greedy-Verfahren zu einer optimalen Lösung führt, besitzen eine gemeinsame Struktur.

Die Teilprobleme lassen sich durch ein Teilmengensystem (E, U) beschreiben. Das Teilmengensystem besteht aus einer endlichen Menge E und einer nichtleeren Menge U von Teilmengen von E . Unter der Annahme der Gültigkeit von (5.12) und (5.13) besteht das

Optimierungsproblem darin, für jede beliebige Kostenfunktion $J: E \rightarrow \mathbb{R}$ eine in U maximale Menge T zu finden, deren Gesamtgewicht nach (5.14) maximal ist.

$$\emptyset \in U \quad (5.12)$$

$$A \subset B \text{ und } B \in U \Rightarrow A \in U \quad (5.13)$$

$$J(T) = \sum_{e \in T} J(e) \quad (5.14)$$

Für ein Teilmengensystem (E, U) und eine Gewichtungsfunktion w wird das Greedy-Verfahren durch folgende Vorgehensweise beschrieben:

- Ordne die Elemente in $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ absteigend² nach ihrem Gewicht, sodass $J(e_1) \geq J(e_2) \geq \dots \geq J(e_k)$.
- Setze $T = \emptyset$ und $k=1$.
- Falls $T \cup \{e_k\} \in U$, dann setze $T = T \cup \{e_k\}$.

Aus der Literatur [71] ist bekannt, dass das Greedy-Verfahren das zu (E, U) gehörende Optimierungsproblem löst, wenn das Teilmengensystem (E, U) ein Matroid ist. Ein Teilmengensystem ist genau dann ein Matroid, wenn für alle $A, B \in U$ die Austauschenschaft nach (5.15) gilt [144].

$$|A| < |B| \Rightarrow \exists e \in B - A, A \cup \{e\} \in U \quad (5.15)$$

Aus den angestellten Überlegungen kann für die in dieser Arbeit untersuchte adaptive Dienstgütesteuerung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen das Folgende abgeleitet werden:

Unter der Annahme einer streng monoton steigenden und konvexen³ Funktion der den Teilnehmern i in Abhängigkeit von der Sendeleistung zugewiesenen Datenraten R_i mit $R_i(0) = 0$ konvergiert das Greedy-Verfahren zur global optimalen Lösung. Eine Funktion ist konvex, wenn (5.16) gilt.

$$f\left(\frac{x+y}{2}\right) \leq \frac{f(x) + f(y)}{2} \quad (5.16)$$

Aufgrund der nach (2.16) und (2.19) konvexen Charakteristik der Datenratenfunktion R_i ist es ausgeschlossen, dass eine einmal ausgewählte minimale Sendeleistung in einem späteren Zuweisungsschritt unterboten wird. Abbildung 29 stellt die konvexe Charakteristik der Datenratenfunktion am Beispiel eines VDSL-Systems dar. In der Abbildung ist zu erkennen, dass umso mehr Sendeleistung für die Zuweisung eines weiteren Bits benötigt wird, je mehr Bits bereits zugewiesen sind. Durch die Wahl des Unterträgers, welche die minimale zusätzliche Sendeleistung beansprucht, ergibt sich, dass bei einer weiteren Entscheidung, bei der schon weitere Bits auf die Unterträger verteilt sind nicht weniger Sendeleistung verlangt werden kann. Damit kann das Greedy-Verfahren angewendet werden.

Aus der Literatur [221] ist bekannt, dass die Konvexität für alle praktisch interessanten Datenratenfunktionen gilt [12]. Viele der bekannten Verfahren zur Bitzuweisung für Einzel-

2. Wenn eine Lösung mit minimalem Gewicht gesucht ist, so werden die Elemente aufsteigend sortiert.
 3. Der Graph einer konvexen Funktion ist so gewölbt, dass die Menge der Punkte oberhalb des Graphen konvex (nach außen gewölbt) ist, d.h., dass für je zwei in der Menge enthaltene Punkte auch alle Punkte der Verbindungsstrecke zu dieser Menge gehören.

[21, 30, 41, 101] und Mehrnutzerbetrachtung [146, 147] wenden das Greedy-Verfahren an. Die Gültigkeit des Greedy-Algorithmus kann für eine Vielzahl von Bitzuweisungsverfahren angenommen werden und wird im weiteren Verlauf für die in dieser Arbeit betrachteten Kostenfunktionen gezeigt. Als Entscheidungskriterium wird für das in diesem Kapitel untersuchte DDM bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen die Kostenfunktion J verwendet. Bei der Zuweisung wird dann der Unterträger und Teilnehmer ausgewählt, welcher die geringsten Kosten verursacht.

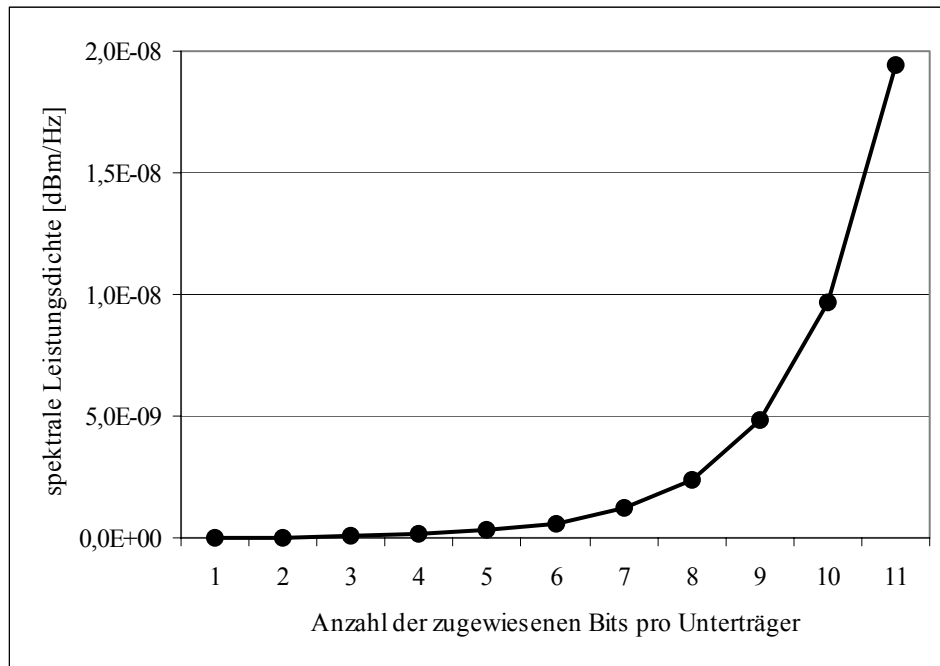


Abbildung 29: Konvexe Charakteristik der Datenratenfunktion

5.2.2 Greedy-Verfahren für das Dienstgüte- und Datenratenmanagement

Für die konkrete Ausgestaltung des Greedy-Verfahrens bei der Bitzuweisung für das DDM kann der Algorithmus in zwei Phasen, die Initialisierung und die Iteration, unterschieden werden. Während der Initialisierungsphase werden für alle Leitungen und Unterträger die Bitbelegungen und Sendeleistungen in den definierten, unbelegten Anfangsstatus versetzt. Die für die Bitzuweisung verwendeten Leitungen und Unterträger werden festgelegt. Danach werden für alle in der höchsten Dienstklasse beteiligten Leitungen und Unterträger die Kosten berechnet, um ein Bit zu übertragen. Abbildung 30 beschreibt die Realisierung des Bitzuweisungsalgorithmus.

Der Iterationsprozess durchläuft sukzessiv alle Dienstklassen, von der höchsten zur niedrigsten. Innerhalb des Iterationsprozesses werden zuerst die Leitung und der Unterträger bestimmt, welche die geringsten Kosten verursachen. Der Bitbelegung des ausgewählten Unterträgers wird ein Bit hinzuaddiert. Die Sendeleistungen der ausgewählten und der benachbarten Leitungen werden entsprechend (5.11) angepasst. Wenn die angestrebte Datenrate der Leitung innerhalb der aktuellen Dienstklasse erreicht ist, wird die Leitung mit allen Unterträgern von der weiteren Bitzuweisung in dieser Dienstklasse ausgeschlossen. Im Anschluss werden die Kosten des Unterträgers für die Übertragung eines weiteren Bits neu berechnet.

Sind alle Datenratenanforderungen der aktuellen Dienstklasse erfüllt, wird zur nächst niedrigeren Dienstklasse gewechselt und die Prozedur für alle Leitungen, die in dieser Dienstklasse Datenrate anfordern, wiederholt. Die gesamte Iteration wird solange durchgeführt,

bis die Datenratenanforderungen in allen Dienstklassen und damit die maximale Sendeleistung oder die maximale Bitbelegung erreicht sind.

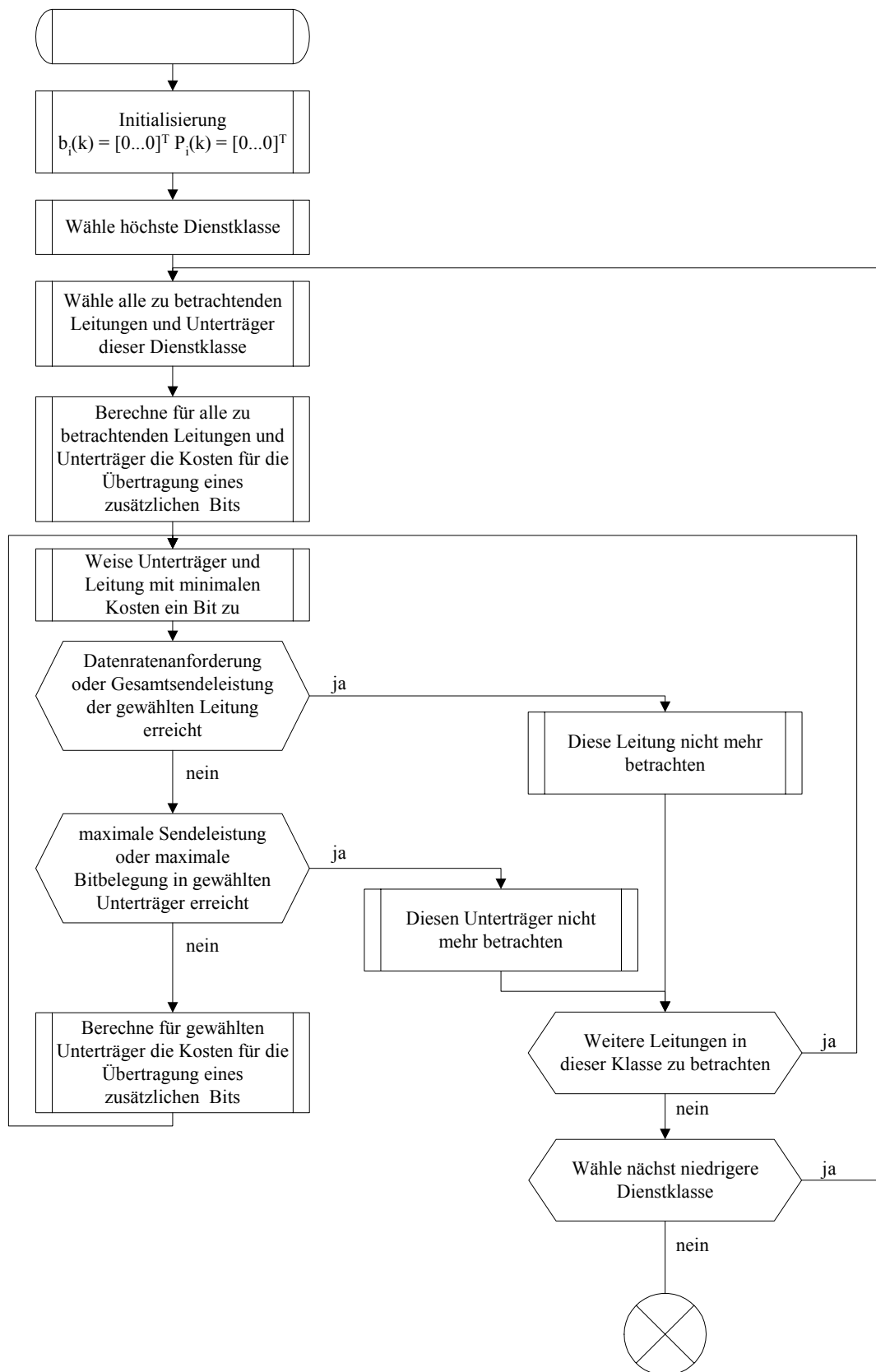


Abbildung 30: Ablauf der dienstgütererweiterten Bitzuweisung

Besondere Bedeutung für die Bitzuweisung hat die Wahl des Entscheidungskriteriums in Form der Kostenfunktion. Auf die Kostenfunktionen wird detailliert in Abschnitt 5.2.3 eingegangen.

5.2.3 Konkretisierung der Kostenfunktionen

Das Greedy-Verfahren basiert auf einer lokalen Optimierung, bei dem der nächste Schritt so gewählt wird, dass der größtmögliche Vorteil entsteht. Bei greedy-lösbaren Problemstellungen, wie der dienstgütererweiterten Bitzuweisung, führt die sukzessive lokale Optimierung zum globalen Optimum. Zentrale Bedeutung bei diesem Ansatz hat das Entscheidungskriterium im Suchraum, das durch eine Kostenfunktion repräsentiert wird. Die Kostenfunktion wird bei der Bitzuweisung so ausgestaltet, dass in jedem Schritt die Leitung und der Unterträger ausgewählt werden, welche die minimalen Kosten verursachen.

Bei den bekannten Verfahren zur Mehrnutzerbitzuweisung wird die Kostenfunktion als die minimale gesamte Sendeleistungssteigerung aller Teilnehmer für ein zusätzliches Bit unter der Bedingung einer zu erreichenden Summendatenrate R aller Leitungen formuliert. Die Sendeleistungssteigerung beinhaltet neben der zusätzlichen Leistung für die Leitung und den Unterträger, deren Bitzuweisung inkrementiert wird, auch die benötigte zusätzliche Leistung der anderen Leitungen, um ihr SNR beizubehalten. Die Erhöhung der Sendeleistung durch das zusätzliche Bit führt auch zu größeren FEXT-Störungen auf benachbarten Leitungen. Diese müssen durch die Erhöhung der Sendeleistung auf den benachbarten Leitungen ausgeglichen werden. Die gesamte Sendeleistungserhöhung enthält beide Anteile, die Erhöhung der ausgewählten Leitung und der benachbarten Leitungen. Basierend auf der minimalen Sendeleistung aller Leitungen M für eine Bitbelegung $b_i(k)$ kann die Kostenfunktion $J(k, i)$ mit (5.17) bestimmt werden.

$$J(k, i) = \min \left(\sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k) + e_k) - \sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k)) \right) \quad (5.17)$$

$$\text{sodass } \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N b_i(k) \geq R$$

Dabei ist e_k der Einheitsvektor, dessen k -tes Element 1 ist und alle anderen Elemente 0 sind. Dieser Ansatz ist für die Bereitstellung von Dienstgüte nicht ausreichend und wird für die adaptive Dienstgütesteuern um die Gewährleistung der Datenratenanforderungen der einzelnen Teilnehmer und Dienstklassen erweitert.

Für die Bitzuweisung bei AQOS ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der benötigten Sendeleistung und den spezifischen Datenratenanforderungen der Teilnehmer.

Einerseits ist bei der realen Ausgestaltung der Bitzuweisung die Minimierung der Signalsendeleistung wichtig. Die in den Teilnehmeranschlussnetzen vorhandenen Topologien erfordern oft eine dezentrale Implementierung der Geräte. Damit ist ein Anschluss an eine zentrale Stromversorgung vielfach nicht gegeben und eine Fremdspeisung erforderlich. In solchen Szenarien wird natürlich auf einen sehr niedrigen Energieverbrauch durch die Geräte Wert gelegt. Die Minimierung der Signalsendeleistung hat dabei große Bedeutung und kann einen wichtigen Anteil zu der Reduzierung des Energieverbrauchs beisteuern.

Andererseits sind die von den Teilnehmern geforderten Datenraten bereitzustellen. Nur die Erfüllung der Anforderungen gewährleistet eine hohe Dienstgüte und zufriedene Teilnehmer. Die teilweise Nichtgewährung der Datenrate führt zu Dienstgüteeinschränkungen, die bis zum Verlust der Verbindung gehen können. Die für solche Datenströme bereitgestellten Ressourcen sind vergeudet und bieten keinen Nutzwert.

Aus diesen Erläuterungen ergibt sich eindeutig das Primat der Dienstgütesicherung gegenüber der Sendeleistungsminimierung bei den Teilnehmeranschlussnetzen. Dies beeinflusst die Ausgestaltung der Kostenfunktion, die beide Aspekte, die Gewährleistung der Dienstgüte und die Sendeleistungsminimierung, in Betracht ziehen muss.

Für die adaptive Dienstgütesteuerung werden verschiedene Kostenfunktionen entwickelt und untersucht. Diese unterscheiden sich in der Granularität der bereitgestellten Dienstgüte und im Grad der Einbeziehung der Signalsendeleistung in die Entscheidung durch das Greedy-Verfahren. Diese Vorgehensweise wird gewählt, weil die Dienstgüte unter verschiedenen Umständen, wie z. B. Topologie, Szenario oder Betreibersichtweise, unterschiedliche Ausprägungen hat. Die Kostenfunktionen sollen im Folgenden vorgestellt werden.

5.2.3.1 Sendeleistungsminimierung bei Datenratenanforderungen pro Teilnehmer

Bei der ersten vorgeschlagenen Kostenfunktion wird die Dienstgüte nur in relativ grober Form umgesetzt. Die dem Teilnehmer bereitgestellte Dienstgüte wird durch eine Gesamtdatenrate der Anforderungen aller Anwendungen realisiert. Diese Gesamtdatenrate stellt die Summe aller Anforderungen eines Teilnehmers dar. Spezifische Dienstklassen werden nicht unterstützt.

Ziel der in diesem Abschnitt untersuchten Kostenfunktion ist die Sendeleistungsminimierung unter Beachtung der spezifischen Datenratenanforderungen jedes Teilnehmers. Die Kostenfunktion wird im Folgenden auch „AQOS-Rate“ genannt. Das Verfahren minimiert die Gesamtsendeleistung P_i (5.18) auf allen Leitungen i unter Beachtung von Datenratenanforderungen R_i einzelner Teilnehmer.

$$J(k, i) = \min \left(\sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k) + e_k) - \sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k)) \right) \quad (5.18)$$

$$\text{sodass } \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{k=1}^N b_i(k) \geq R_i \quad \forall i = 1, \dots, M$$

Die Bitbelegungen $b_i(k)$ stellen dabei nichtnegative ganzzahlige Werte dar, die durch die maximale Bitbelegung $\bar{b}$ begrenzt sind (5.19).

$$b_i(k) \in Z_{\bar{b}}^0 \quad (5.19)$$

Die maximale Signalsendeleistung $P_i(k)$ je Unterträger und die Sendeleistung einer Leitung werden durch die spektrale Sendemaske (5.20) im Unterträger k $\overline{P(k)}$ bzw. die Gesamtsendeleistung (5.21) $\bar{P}$ begrenzt.

$$0 \leq P_i(k) \leq \overline{P(k)} \quad (5.20)$$

$$0 \leq P_i = \sum_{k=1}^N P_i(k) \leq \bar{P} \quad (5.21)$$

Zum Verständnis der Matroidstruktur der Optimierung nach (5.18) wird ein konstantes Quantum q an von den Teilnehmern i angeforderten Datenraten R_i angenommen (5.22).

$$q = \sum_{i=1}^M R_i \quad (5.22)$$

Diese Annahme korrespondiert mit dem Systemkonzept der adaptiven Dienstgütesteuerung, bei dem durch Verkehrsklassifizierung und -schätzung die Dienstgüteanforderungen der einzelnen Teilnehmer als Eingangsparameter des DDM gewonnen werden. Unter Berücksichtigung der Bitbelegung $b_i(k)$ des Unterträgers k kann die Menge E entsprechend (5.23) für all N Unterträger beschrieben werden.

$$E = \{(b_i(k), k), 0 \leq b_i(k) \leq \bar{b}, k \in N\} \quad (5.23)$$

Mit (5.22) ist die Untermenge U durch (5.24) als Teilmenge von E gegeben

$$U = \{B \subseteq E, |B| \leq q\} \quad (5.24)$$

Bei dieser Formulierung stellt jedes B in (5.24) eine bestimmte Bitbelegung für ein Mehrträgersystem mit q Bits dar. Gleichung (5.24) enthält somit alle möglichen Bitbelegungen mit maximal q Bits. Die Gleichungen (5.23) und (5.24) formulieren ein Matroid des Ranges q , welches die durch (5.18) gegebene Problemstellung unter Beachtung von (5.19), (5.20) und (5.21) löst. Unter Verwendung der Kostenfunktion J nach (5.18) konvergiert das Verfahren zur minimalen Sendeleistung unter der Beachtung der Datenratenanforderungen jedes einzelnen Teilnehmers.

Bei AQOS-Rate werden die Datenratenanforderungen aller Teilnehmer so auf die Unterträger verteilt, dass die benötigte Sendeleistung minimal ist. Die Dienstgüte der Teilnehmer wird dabei durch die Menge an erforderlicher Datenrate bestimmt. Die Datenratenanforderungen werden bei der adaptiven Dienstgütesteuerung durch die Verkehrsschätzung ermittelt und liefern ein genaues Abbild der notwendigen Dienstgüte. Daher ist bei der Bitzuweisung eine Systemreserve für die zugewiesene Datenrate überflüssig. Durch die Verkehrsschätzung werden auch inaktive Teilnehmer erkannt. Diesen Teilnehmern wird keine Datenrate zugeteilt. Die Bitzuweisung bei AQOS-Rate erfüllt die durch die Verkehrsschätzung ermittelten wirklichen Dienstgüteanforderungen in Form der gerade benötigten Datenrate.

Bei der sukzessiven Zuordnung des Greedy-Verfahrens werden in einem Iterationsprozess die Bits solange zugewiesen, bis alle Datenratenanforderungen erfüllt sind (5.18) oder die durch (5.19), (5.20) und (5.21) gegebenen Abbruchbedingungen erreicht sind. Während der Iteration werden die Teilnehmer in zwei Gruppen eingeteilt, Teilnehmer mit erfüllten bzw. nicht erfüllten Datenratenanforderungen. Teilnehmern mit erfüllten Datenratenanforderungen ist bereits das benötigte Quantum an Datenrate zugeordnet worden. Diese Teilnehmer werden im weiteren Verlauf der Zuweisung nicht mehr bedient. Die Zuweisung erfolgt stets nur für Teilnehmer, deren Dienstgüteanforderungen noch nicht erfüllt sind.

Die konkrete Ausgestaltung dieser Kostenfunktion wählt in jedem Iterationsschritt aus der Menge von Leitungen mit unerfüllten Dienstgüteanforderungen jeweils der Unterträger aus, welcher zur geringsten Steigerung der gesamten Signalsendeleistung führt. Diese besteht aus den folgenden beiden Anteilen, Erhöhung auf der ausgewählten Leitung bzw. den benachbarten Leitungen. Auf der ausgewählten Leitung wird die Sendeleistung erhöht, da die Anzahl der zu übertragenden Bits durch die Zuweisung zunimmt. Die Steigerung der Sendeleistung auf den benachbarten Leitungen ist notwendig, um den Signalausgabestand auf diesen Leitungen konstant zu halten. Durch die erhöhte Sendeleistung auf der ausgewählten Leitung wird ein stärkeres Nebensprechen erzeugt, welches die Störungen auf den benachbarten Leitungen erhöht. Durch die Steigerung der Sendeleistung auf den benachbarten Leitungen werden die erhöhten Störungen ausgeglichen und der Signalausgabestand konstant gehalten.

Sind die Datenratenanforderungen einer Leitung erreicht, wird diese Leitung aus dem Bitzuweisungsverfahren herausgenommen und erhält keine weiteren Bits zugewiesen. Die Zuweisung ist beendet, wenn die Datenratenanforderungen aller Leitungen erfüllt sind oder aufgrund der Abbruchbedingungen keine Bits mehr zugeteilt werden dürfen. Dies ist dann der Fall, wenn die Maximalwerte von Parametern, wie die Anzahl von Bits pro Unterträger (5.19) oder die Sendeleistung pro Unterträger (5.20) und Leitung (5.21) erreicht sind.

Bei AQOS-Rate werden die Datenratenanforderungen in den Dienstklassen nicht einzeln betrachtet, sondern für die jeweiligen Teilnehmer zusammengefasst. Daher werden die Dienstklassen und ihre Priorität auch nicht bei der Bitzuweisung betrachtet. Höher priorisierte Datenratenanforderungen können bei AQOS-Rate nicht von niedriger priorisierten unterschieden werden. Das Entscheidungskriterium für die Bitzuweisung ist die benötigte Signalsendeleistung, die aus den Übertragungseigenschaften der Leitungen hervorgeht.

Die Dienstgüteanforderungen aller Teilnehmer können nur dann erfüllt werden, wenn die gesamten Datenratenanforderungen niedriger ist, als die maximal mögliche Datenrate aller Leitungen. Tritt dieser Umstand nicht ein, können die Dienstgüteanforderungen von einzelnen Teilnehmern nicht garantiert werden. Von der Beeinträchtigung der Dienstgüte sind die Teilnehmer betroffen, die an Leitungen mit schlechten Übertragungseigenschaften angeschlossen sind. Da die Bitzuweisung auf Basis der Übertragungseigenschaften erfolgt, kann die Beeinträchtigung der Dienstgüte hoch priorisierte Datenströme auf schlechten Leitungen betreffen, während niedriger eingestufte Verkehre auf Leitungen mit besseren Eigenschaften übertragen werden. Verschiedene Dienstklassen mit unterschiedlicher Priorität können bei AQOS-Rate nicht realisiert werden. Aufgrund der möglichen Beeinträchtigung der Dienstgüte ist eine Einbeziehung der Dienstklassen in die Bitzuweisung wünschenswert und wird bei den im weiteren Verlauf vorgestellten Kostenfunktionen realisiert.

5.2.3.2 Sendeleistungsminimierung bei Datenratenanforderungen pro Teilnehmer und Dienstklasse

Die Beachtung von Dienstklassen bei der Bitzuweisung führt zu der in diesem Abschnitt untersuchten Kostenfunktion zur Sendeleistungsminimierung bei Datenratenanforderungen pro Teilnehmer und Dienstklasse. Bei der im Folgenden auch mit „AQOS-Prio“ bezeichneten Kostenfunktion sind die Dienstgüteanforderungen in die vom Netz angebotenen Dienstklassen aufgeteilt. Innerhalb einer Dienstklasse repräsentieren die Datenratenanforderungen die Dienstgüte der Datenströme. Die Dienstklassen unterscheiden sich untereinander durch ihre jeweilige Priorität. Zwischen den Datenströmen der einzelnen Anwendungen und den angebotenen Dienstklassen existiert eine eindeutige Zuordnungsvorschrift, die durch die Klassifizierung umgesetzt ist.

Ziel des Ansatzes ist die Minimierung der Gesamtsendeleistung (5.25) auf allen Leitungen unter Beachtung von Datenratenanforderungen $R_{c,i}$ der einzelnen Teilnehmer für spezifische Dienstklassen c .

$$J(k, i) = \min \left(\sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k) + e_k) - \sum_{i=1}^M P_i(k, b_i(k)) \right) \quad (5.25)$$

$$\text{sodass } \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{k=1}^N b_i(k) \geq \sum_{c=1}^C R_{c,i} \quad \forall i = 1, \dots, M; c = 1, \dots, C$$

Die Bedingungen (5.19), (5.20) und (5.21) gelten auch bei dieser Kostenfunktion.

Bei AQOS-Prio werden die Verkehrsanforderungen der Teilnehmer in die angebotenen Dienstklassen eingeteilt. Dies erfolgt durch eine Klassifizierung der Datenströme der jeweiligen

Anwendungen. Auf Basis der Klassifizierung erfolgt eine Schätzung der zu übertragenden Datenmengen. Wie bei AQOS-Rate liefert die Verkehrsschätzung ein genaues Abbild der aktuellen Ressourcenanforderungen und benötigt keine Systemreserve bei der Bitzuweisung. Ebenso wird inaktiven Teilnehmern bei der Bitzuweisung in der jeweiligen Dienstklasse keine Datenrate zugeteilt. Bei AQOS-Prio werden die realen Dienstgüteanforderungen in Form der in jeder Dienstklasse gerade benötigten Datenrate erfüllt.

Die Integration der Dienstklassen in die Bitzuweisung führt zu einer Aufteilung des Iterationsprozesses zur schrittweisen lokalen Entscheidung. Diese Aufteilung basiert auf der Einordnung der Verkehrsanforderungen in die spezifischen Dienstklassen. Das Greedy-Verfahren betrachtet jede einzelne Dienstklasse in absteigender Reihenfolge je nach Priorität der Dienstklasse. Es werden also zuerst alle Dienstgüteanforderungen der höchsten Dienstklasse gewährleistet, bevor die Bitzuweisung der Verkehrsanforderungen der nächst niedrigeren Dienstklasse erfolgt. Die weitere Reihenfolge der Bearbeitung entspricht dann der jeweiligen Priorität der Dienstklassen.

Innerhalb einer Dienstklasse wird wieder der Unterträger aus der Menge von Leitungen mit nicht erfüllten Datenratenanforderungen ausgewählt, welcher zur geringsten Steigerung der gesamten Signalsendeleistung führt. Die Zuweisung wird beendet, wenn die Datenratenanforderungen aller Leitungen in allen Dienstklassen erfüllt sind oder die bereits in Abschnitt 5.2.3.1 beschriebenen Abbruchbedingungen (5.20), (5.21) und (5.22) erreicht sind.

Auch bei AQOS-Prio wird die Menge aller Leitungen in die Gruppen mit vollständig zugewiesenen und nicht zugewiesenen Datenratenanforderungen eingeteilt. Diese Einteilung erfolgt jeweils pro Dienstklasse. Die Leitungen mit bereits vollständig zugewiesenen Datenratenanforderungen, inaktiver Übertragung oder fehlenden Datenratenanforderungen in der aktuellen Dienstklasse werden bei der Bitzuweisung nicht mehr betrachtet. Sind die Datenratenanforderungen eines Teilnehmers in der aktuell gewählten Dienstklasse erfüllt, wird die entsprechende Leitung aus dem Zuweisungsprozess für diese Dienstklasse herausgenommen. Wenn die Bitzuweisung für die aktuelle Dienstklasse beendet ist und die nächst niedrigere Dienstklasse gewählt wird, werden wieder alle Teilnehmer mit Datenratenanforderungen in dieser Dienstklasse betrachtet.

Analog zu AQOS-Rate wird bei der Bitzuweisung aus der Gruppe mit nicht zugewiesenen Datenratenanforderungen die Leitung und der Unterträger ausgewählt, welche die geringste Steigerung der Sendeleistung zur Folge hat.

AQOS-Prio erreicht durch die Betrachtung einzelner Dienstklassen eine feinere Granularität als AQOS-Rate. Die Zuweisung bei AQOS-Rate kann als Spezialfall von AQOS-Prio betrachtet werden, bei dem nur eine einzige Dienstklasse existiert. Innerhalb der einzelnen Dienstklassen wird die Dienstgüte durch die jeweiligen Datenratenanforderungen repräsentiert.

AQOS-Prio ermöglicht die priorisierte Datenratenzuweisung je Dienstklasse. In Anlehnung an die Dienstgütearchitektur des weit verbreiteten Ethernet-Verfahrens (siehe Kapitel 3.3.4) wird eine strikte Priorisierung zwischen den Dienstklassen gewählt. Im Falle der Verwendung von Ethernet im angeschlossenen Zugangsnetz kann das priorisierende Einteilungsschema der Dienstklassen auf den Teilnehmeranschlussleitungen und im Zugangsnetz eingesetzt werden. Die Regional- und Teilnehmeranschlussebene können damit eine einheitliche Dienstgütearchitektur verwenden. Die Interaktion zwischen diesen beiden Ebenen erfolgt über den in Abbildung 25 in Kapitel 4 dargestellten Aufbau der adaptiven Dienstgütesteuerung.

Innerhalb jeder Dienstklasse wird wieder die Signalsendeleistung als Entscheidungskriterium verwendet. Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften werden innerhalb der Dienstklasse zuerst bedient. Damit besteht die Möglichkeit, dass die Anforderungen von Teilnehmern auf Leitungen mit schlechten Übertragungseigenschaften nicht erfüllt werden

können, da die Ressourcen schon besseren Kanälen zugewiesen wurden. Dies gilt allerdings nur innerhalb einer Dienstklasse. Wichtigere Dienstklassen werden immer vor unwichtigeren bearbeitet. Innerhalb einer Dienstklasse werden Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften vor Leitungen mit schlechteren Eigenschaften ausgewählt.

5.2.3.3 Faire Bitzuweisung mit Datenratenanforderungen pro Teilnehmer und Dienstklasse

Die Wahl der Kostenfunktion bei AQOS-Rate (5.18) und AQOS-Prio (5.25) führt zu einer tendenziell unfairen Zuweisung der Datenrate. Die Unfairness zeigt sich in der Bevorzugung von kürzeren Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften gegenüber längeren Leitungen. Durch die feinere Granularität der bereitgestellten Dienstgüte in Form von Dienstklassen bei AQOS-Prio wird die Unfairness insofern abgemildert, als die Priorisierung der Dienstklassen beachtet wird. Damit werden Anforderungen einer höher eingestuften Dienstklasse von Leitungen mit schlechteren Übertragungseigenschaften vor niedriger eingestuften Anforderungen auf besseren Leitungen bedient.

Fairness wird erreicht, wenn die beiden folgenden Bedingungen eingehalten werden [18].

1. Keiner Leitung wird mehr Datenrate zugeordnet, als der angeschlossene Teilnehmer angefordert hat.
2. Kein Teilnehmer mit unerfüllten Datenratenanforderungen erhält eine schlechtere Dienstgüte als die anderen Teilnehmer.

Diese beiden Fairnessbedingungen müssen bei der Bitzuweisung eingehalten werden.

Die in diesem Abschnitt vorgeschlagene Kostenfunktion erreicht die faire Erfüllung der Datenratenanforderungen in den einzelnen Dienstklassen, indem sie die Übertragungseigenschaften in Form der benötigten Sendeleistung nicht mehr in die Auswahl der zu bedienenden Leitung integriert. Die Kostenfunktion betrachtet vielmehr die Menge an Datenrate, die den Leitungen noch nicht zugewiesen ist. Die Datenrate wird für einzelne Teilnehmer und Dienstklassen separat zugeordnet. Für die Benennung der Kostenfunktion wird im Folgenden der Begriff „AQOS-Fair“ verwendet.

Im Unterschied zu den vorher erläuterten Kostenfunktionen geht nun die Signalsendeleistung nicht mehr in die Auswahl der Leitung ein. Die tendenziell unfaire Bevorzugung von Teilnehmern, die an Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften angeschlossen sind, wird aus der Optimierung eliminiert. Der Ansatz intendiert die Reduktion der Menge von nicht zugewiesener Datenrate einzelner Teilnehmer unter Beachtung der Datenratenanforderungen $R_{c,i}$ in den einzelnen Dienstklassen c (5.26).

$$J(i) = \max \left(R_{c,i} - \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{k=1}^N b_{c,i}(k) \right)$$

$$\text{sodass } \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \sum_{k=1}^N b_{c,i}(k) \geq \sum_{c=1}^C R_{c,i}$$

$$k = 1, \dots, N; i = 1, \dots, M; c = 1, \dots, C$$
(5.26)

Die nicht zugewiesene Datenrate ergibt sich aus der Differenz der Datenratenanforderungen

$R_{c,i}$ der Teilnehmer i in der Dienstklasse c und der zugewiesenen Datenrate $\sum_{k=1}^N b_{c,i}(k)$. In

jedem Iterationsschritt wird der Teilnehmer ausgewählt, der die größte Menge an nicht zugewiesener Datenrate aufweist.

Zur Beurteilung der Fairness wird nun die Erfüllung der beschriebenen Fairnessbedingungen untersucht. Die erste Fairnessbedingung löst die Kostenfunktion ein, indem die Leitungen, bei denen die Datenratenanforderungen des angeschlossenen Teilnehmers erfüllt sind, aus der Zuweisung herausgenommen werden. Dieser Bedingung kommen alle vorgeschlagenen Kostenfunktionen implizit nach. Innerhalb jeder Dienstklasse erfolgt die Bitzuweisung stets nur für die Leitungen mit unerfüllten Datenratenanforderungen.

Zur detaillierten Betrachtung der zweiten Fairnessbedingung wird nun angenommen, dass die Bitzuweisung in infinitesimal kleinen Schritten und mit infinitesimal kleinem Ratenzuwachs erfolgt. In diesem Fall ist die Zuweisung fair, wenn zu jedem Zeitpunkt jedem Teilnehmer i mindestens die Datenrate zugeordnet ist, die seinem Anteil an der benötigten Gesamtdatenrate entspricht. Gleichung (5.27) beschreibt diesen Sachverhalt.

$$\frac{R_{c,i}}{R_{c,j}} \geq \frac{\rho_{c,i}}{\rho_{c,j}} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5.27)$$

Dabei bestimmen $R_{c,i}$ und $R_{c,j}$ die Datenratenanforderungen der Leitungen i und j in der Dienstklasse c . Die Terme $\rho_{c,i}$ und $\rho_{c,j}$ bezeichnen die zugewiesenen Datenraten der Leitungen i und j . Die Fairness wird durch die Formulierung (5.28) gewährleistet.

$$\frac{R_{c,i}}{\rho_{c,i}} = \frac{R_{c,j}}{\rho_{c,j}} \quad (5.28)$$

Die einer Leitung i zugewiesene Datenrate $\rho_{c,i}$ bestimmt der eigene Anteil $R_{c,i}$ an der Gesamtdatenrate $\sum_{j=1}^M R_{c,j}$ in der Dienstklasse c (5.29).

$$\rho_{c,i} = \frac{R_{c,i}}{\sum_{j=1}^M R_{c,j}} \quad (5.29)$$

Da die Bitzuweisung in der Realität weder in infinitesimal kleinen Schritten noch mit infinitesimal kleinem Zuwachs möglich ist, bildet die reale Bitzuweisung das infinitesimale System nach. Die Bitzuweisung minimiert deshalb den Abstand zwischen der fairen Rate $\rho_{c,i}$ und der aktuell zugewiesenen Rate $\rho_{c,i}^*$ (5.30).

$$\min (\rho_{c,i} - \rho_{c,i}^*) \quad (5.30)$$

$$i = 1, \dots, M; \quad c = 1, \dots, C$$

Der Term b^* bei der Berechnung von $\rho_{c,i}^*$ bestimmt dabei die Gesamtsumme der Bits, die bereits zugewiesen wurden (5.31).

$$\rho_{c,i}^* = \frac{R_{c,i}}{\sum_{j=1}^M R_{c,j}} b_{c,i}^* \quad (5.31)$$

Bei der konkreten Ausgestaltung der Kostenfunktion können innerhalb der Dienstklasse zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden.

- Minimierung der absoluten Datenratenanforderungen (absolute Zuweisung)
- Minimierung der relativen Datenratenanforderungen (relative Zuweisung)

Bei der Minimierung der absoluten Datenratenanforderungen wird jeweils der Teilnehmer bedient, dem in der gewählten Dienstklasse die größte Menge an Datenrate noch nicht zugewiesen ist. Das Entscheidungskriterium für die Auswahl wird durch (5.32) beschrieben.

$$J(i) = \max \left(R_{c,i} - \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} b_{c,i}^* \right) \quad (5.32)$$

$$\forall i = 1, \dots, M; c = 1, \dots, C$$

Dabei bestimmt $R_{c,i}$ die Datenratenanforderungen eines Teilnehmers i in der Dienstklasse c und $b_{c,i}^*$ die in c dem Teilnehmer i bereits zugeteilte Anzahl von Bits pro Symbol. Die absolute Zuweisung zeigt ein ähnliches Verhalten, wie das sehr weit verbreitete Scheduling-Verfahren Weighted Fair Queueing (WFQ) [183, 184].

Bei der Minimierung der relativen Datenratenanforderungen erfolgt die Zuweisung in Abhängigkeit des relativen Anteils bereits zugewiesener Datenrate. Bei der relativen Entscheidung wird der Leitung i ein Bit zugewiesen, die den größten Abstand zwischen der fairen Rate $\rho_{c,i}$ und der aktuell zugewiesenen Rate $\rho_{c,i}^*$ aufweist. Das Entscheidungskriterium für die Auswahl wird durch (5.33) beschrieben.

$$J(i) = \max(\rho_{c,i} - \rho_{c,i}^*) \quad (5.33)$$

$$\forall i = 1, \dots, M; c = 1, \dots, C$$

Dieser Ansatz ist einem Derivat von WFQ ähnlich, das Worst Case Fair Queueing (WF²Q) [16].

Abbildung 31 kennzeichnet die Unterschiede der beiden Verfahren an einem Beispiel für vier Leitungen. Die Leitungen haben Datenratenanforderungen von sechs Einheiten für Leitung 1 und jeweils zwei Einheiten für die anderen Leitungen. Bei der absoluten Zuweisung wird zuerst die unzugewiesene Datenmenge von Leitung 1 bis auf die Werte der anderen Leitungen von zwei Übertragungseinheiten reduziert. Danach werden die anderen Leitungen auch bedient. Bei der relativen Zuweisung wird nach jeder Einheit von Leitung 1 zu einer der anderen Leitungen gewechselt, da der Anteil von Leitung 1 an der unzugewiesenen Datenmenge kleiner wird als die Anteile der anderen Leitungen.

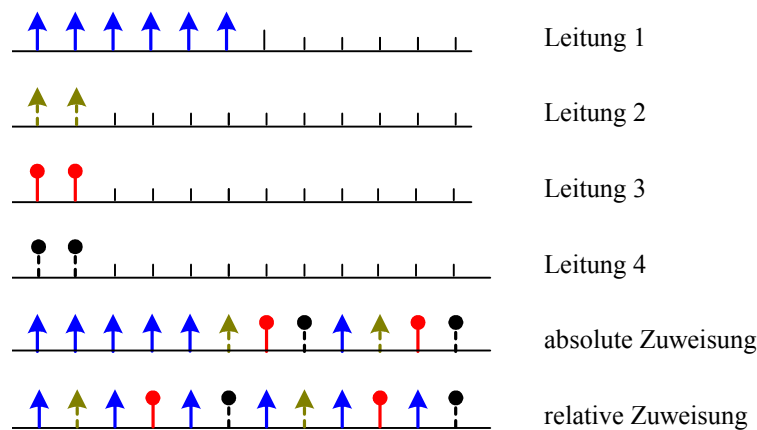


Abbildung 31: Absolute und relative Zuordnung der Datenratenanforderungen

Beide Ansätze kommen den Fairnessbedingungen nach. Dies ist daran zu erkennen, dass vor der Zuweisung des viertletzten Bits alle Leitungen noch jeweils ein Bit zuzuteilen ist. Jede Leitung ist genau ein Bit von der Erfüllung der Datenratenanforderungen entfernt. Damit wird keine Leitungen den anderen Leitungen gegenüber benachteiligt.

Beim relativen Verfahren ist zur Berechnung $\rho_{c,i}^*$ eine Division notwendig. Demgegenüber benötigt das absolute Verfahren nur eine Subtraktion zur Entscheidung. Aufgrund der geringeren Komplexität (Subtraktion statt Division) wird für die simulative Leistungsbewertung in Kapitel 5.3 das absolute Verfahren verwendet.

Sowohl die absolute als auch die relative Zuweisung werden nur für die Auswahl der Leitung bei der Bitzuweisung verwendet. Die Auswahl des Unterträgers erfolgt mittels der benötigten Sendeleistungssteigerung, indem dem Unterträger der ausgewählten Leitung i ein Bit zugewiesen wird, der zur geringsten Steigerung der Gesamtsendeleistung P^* führt (5.34). Wie bei den anderen Kostenfunktionen setzt sich auch bei AQOS-Fair die gesamte Sendeleistung aus beiden Anteilen für die ausgewählte Leitung i und die benachbarten Leitungen zusammen.

$$J(k) = \min(P_i(k, b_i(k) + e_k) - P_i(k, b_i(k)))$$

$$k = 1, \dots, N; i = 1, \dots, M \quad (5.34)$$

Genau wie bei den bereits vorgestellten Kostenfunktionen AQOS-Rate und AQOS-Prio werden inaktive Leitungen nicht in die Bitzuweisung integriert und es ist keine Systemreserve bei der Bitzuweisung notwendig. Die Zuweisung erfolgt auch bei AQOS-Fair auf Basis der Dienstklassen sukzessiv in absteigender Reihenfolge der Wichtigkeit. Ähnlich, wie bei AQOS-Rate, wird auch bei AQOS-Fair die strikte Priorisierung für die Unterscheidung der einzelnen Dienstklassen verwendet. Es gelten damit auch die Erläuterungen über die einheitliche Dienstgütearchitektur für Teilnehmeranschlussleitungen und Zugangsnetz.

5.3 Ergebnisse der Leistungsbewertung

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens wird eine simulative Evaluation der Algorithmen durchgeführt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

5.3.1 Simulationsmodell und Vergleichsverfahren

Für die simulative Leistungsbewertung wird ein Simulationsmodell für ein VDSL-System realisiert. Die VDSL-Umgebung wird gewählt, weil das Verfahren deutlich höhere Datenraten verspricht, als ADSL.

Ein Leitungsbündel bei VDSL besteht aus 50 und mehr Leitungen, deren Leistungsfähigkeit sich gegenseitig durch die elektromagnetische Kopplung beeinflusst. Aus der Literatur [220, 234] ist bekannt, dass aufgrund des Aufbaus der Leitungsbündel die Stärke der Störungen nicht gleich verteilt ist. Vielmehr haben die Störungen weniger Leitungen sehr große Auswirkungen, während die Einkopplungen anderer Leitungen vernachlässigt werden können. Nach den in der Literatur angestellten Analysen kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Störungen durch zwei bis vier Leitungen verursacht wird und dass generell weniger als 10 Leitungen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit haben.

Durch die Übertragung in Frequenzgetrenntlage und die Ausblendung der von anderen xDSL-Systemen genutzten Frequenzbereiche ($< 1,1$ MHz) spielen NEXT-Störungen bei der Simulation des VDSL-Systems keine Rolle. Wegen der Übertragung in unterschiedlichen Frequenzbereichen können die Übertragungsrichtungen Up- und Downstream unabhängig

voneinander betrachtet werden. Da die Upstream-Richtung bestimmend für die symmetrische Leistungsfähigkeit der VDSL-Übertragung ist, geht die Leistungsbewertung vor allem auf diese Übertragungsrichtung ein [146].

Die Simulationsparameter für den VDSL-Kanal sind [68, 69] entnommen. Als definiertes Frequenzspektrum wird Bandplan 998 (siehe Abbildung 11) und der Maximalwert 11 für die Anzahl der pro Unterträger zugeordneten Bits gewählt.

Die SNR-Lücke Γ beträgt 12dB. Ursache dafür sind die Werte für $\gamma_{\text{margin}} = 6\text{dB}$ und $\gamma_{\text{code}} = 3,8\text{dB}$. Die Bitfehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich aus diesen Werten mit 10^{-7} .

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit wird ein Vergleich des vorgeschlagenen Verfahrens mit dem den Stand der Forschung darstellenden Multi-User Discrete Bit-Loading (MUBL) [146] vorgenommen. Ziel von MUBL ist die Minimierung der benötigten Sendeleistung auf allen Leitungen unter Beachtung der Summendatenrate aller Leitungen. Aufgrund des Nah-Fern-Problems wird die Datenrate nicht auf alle Leitungen gleichmäßig verteilt. Datenratenbedürfnisse einzelner Leitungen oder Dienstklassen betrachtet das Verfahren nicht. Daher weist das MUBL den Leitungen Ressourcen zu, ohne zu beachten, ob die Ressourcen auf der jeweiligen Leitung benötigt werden. Das Verfahren versucht, den Leitungen so viel Ressourcen wie möglich zuzuordnen und überträgt immer mit der maximal möglichen Summendatenrate. Die Auswahl der Leitungen basiert ausschließlich auf den Übertragungseigenschaften. Die Anforderungen der Teilnehmer werden nicht beachtet.

Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens werden die folgenden Kriterien definiert:

- Erreichbare Datenrate aller Teilnehmer
- Maximale Reichweite der Übertragung
- Fairness zwischen Teilnehmern auf Leitungen unterschiedlicher Länge

Die Leistungsbewertung vergleicht unterschiedliche Szenarien mit zwei, vier bzw. acht betrachteten Leitungen. Die Länge der Leitungen variiert während der Evaluation. Dabei wird bei einigen Leitungen die Länge bei 300 m belassen. Die Distanz der anderen Leitungen ist veränderlich. Abbildung 32 beschreibt ein Beispielszenario mit jeweils zwei Leitungen konstanter und variabler Länge (2 + 2).

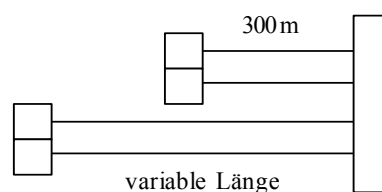


Abbildung 32: Beispielszenario für je zwei Leitungen konstanter und variabler Länge

Für die Simulation sind den Teilnehmern Dienstgüteprofile zugeordnet. Die gesamte nutzbare Datenrate eines Teilnehmers ist auf 10 MBit/s festgelegt. Diese Gesamtdatenrate ist in drei Dienstklassen eingeteilt. Die einzelnen Dienstklassen besitzen folgende Datenraten:

- Dienstklasse 1: 1 MBit/s
- Dienstklasse 2: 6 MBit/s
- Dienstklasse 3: 3 MBit/s

Diese Aufteilung kann beispielsweise konstantratige Echtzeitanwendungen (Telefonie, Videotelefonie) in Dienstklasse 1, variabelratige Echtzeitanwendungen (Video) in Dienstklasse 2 und nicht echtzeitfähige Anwendungen (Streaming, WWW, Mail) in der dritten Dienstklasse unterscheiden. Die gewählten Aufteilungen und Werte sind nicht willkürlich gewählt, sondern basieren auf der Dienstspezifikation des Metro Ethernet Forums [162].

5.3.2 Untersuchung der Datenrate und Fairness

Ein wichtiges Leistungskriterium der Teilnehmeranschlussnetze ist die maximale Datenrate. Anwendungen, deren Verkehrsanforderungen diese Datenrate übersteigen, können von den Teilnehmern nicht mit hoher Qualität genutzt werden. Die Steigerung der verfügbaren Datenrate ermöglicht also die Bereitstellung neuer, hochbitratiger Dienste und schafft damit neue Einnahmequellen für die Netzbetreiber.

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang auch, dass die Datenrate für eine Vielzahl der betrachteten Teilnehmer garantiert werden kann. Nur eine großräumige Verbreitung auf Leitungen unterschiedlicher Länge ermöglicht die flächendeckende Bereitstellung neuer Dienste und Anwendungen. Dies ist bei den Teilnehmeranschlussnetzen aufgrund deren ausgesprochen großer Heterogenität von entscheidender Bedeutung.

Die Abbildungen 33, 34 und 35 zeigen die Simulationsergebnisse für die Betrachtung der Szenarien mit zwei, vier bzw. acht Leitungen. In allen untersuchten Szenarien sinkt die erreichbare Datenrate mit zunehmender Leitungslänge. Diese umgekehrte Proportionalität ist nach den theoretischen Untersuchungen in Kapitel 2.3 zu erwarten. Bei Leitungen, die länger als 1800 m sind, ist praktisch keine Übertragung mehr möglich.

Die in Abbildung 33 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass bei zwei kurzen Leitungen Datenraten über 40 MBit/s möglich sind. Dies deckt sich mit den theoretischen Annahmen der VDSL-Standardisierung, die auf sehr kurzen Leitungen (300 m und weniger) Datenraten von über 50 MBit/s bereitstellen. Diese Ergebnisse konnten durch die Simulationen verifiziert werden.

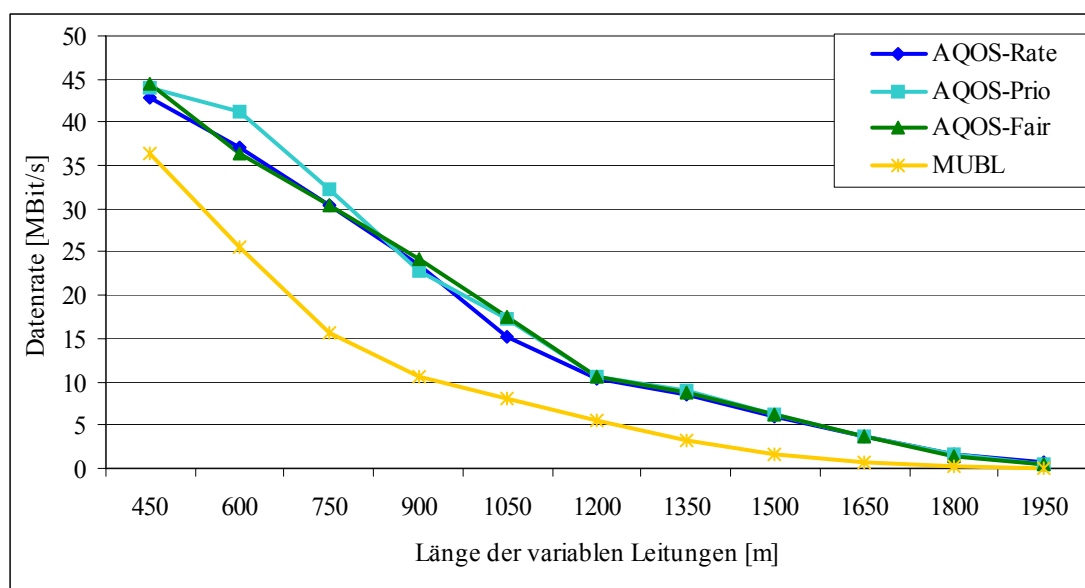


Abbildung 33: Garantierte Datenrate bei zwei Leitungen

Die in Abbildung 34 gezeigten Ergebnisse für die Untersuchung von vier Leitungen belegen, dass die garantierbaren Datenraten bei allen Verfahren geringer sind als bei dem Szenario mit

zwei Leitungen. Dies wird durch die deutlich höheren FEXT-Störungen durch jeweils drei Leitungen verursacht. Die maximalen Datenraten liegen bei diesem Szenario bei 30 MBit/s.

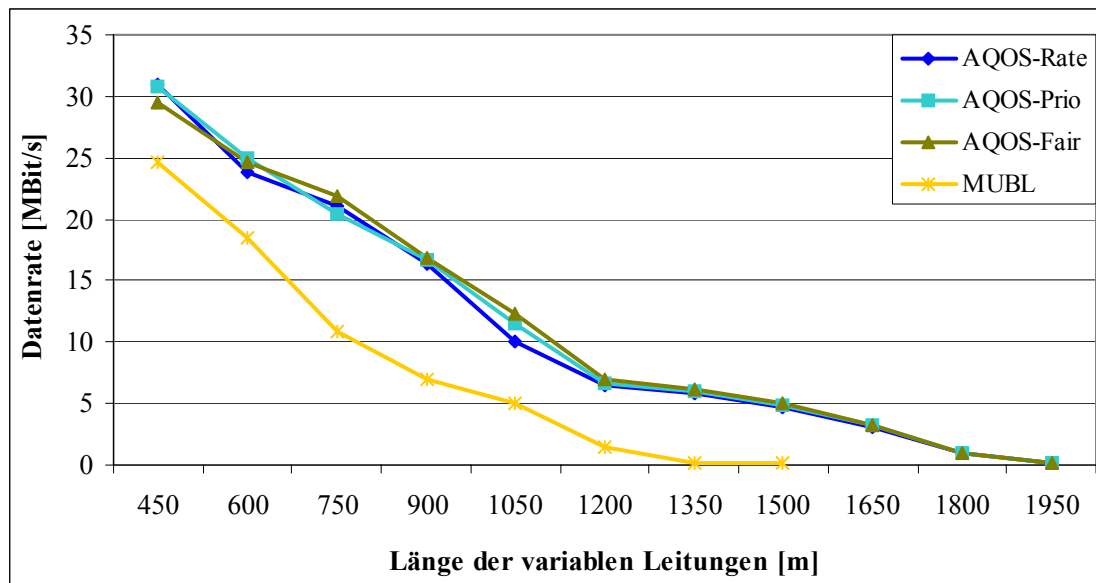


Abbildung 34: Garantierte Datenrate bei vier Leitungen

Die maximal garantierbare Datenrate sinkt mit zunehmender Anzahl betrachteter Leitungen. Dies geht auch aus den in Abbildung 35 vorgestellten Ergebnissen für acht Leitungen hervor. Je größer die Anzahl der involvierten Leitungen, umso mehr Nebensprechstörungen wirken sich auf die Übertragung aus. Die dargestellten Ergebnisse bestätigen die aus der Literatur bekannte Annahme der Begrenzung der Leistungsfähigkeit der Übertragung auf Teilnehmeranschlussleitungen durch FEXT.

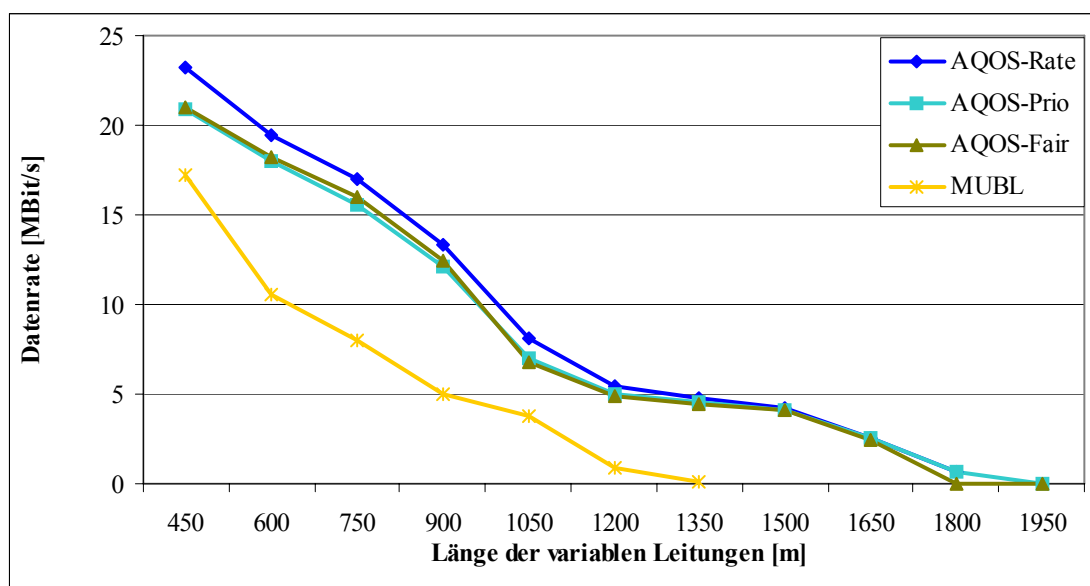


Abbildung 35: Garantierte Datenrate bei acht Leitungen

Besondere Aufmerksamkeit verdient bei der Auswertung der Ergebnisse der Umstand, dass die AQOS-Kostenfunktionen bei allen untersuchten Leitungslängen eine deutlich höhere garantierte Datenrate ermöglichen als das Vergleichsverfahren MUBL. So kann beispielsweise bei einer Leitungslänge von 900 Metern bei den AQOS-Kostenfunktionen eine Datenrate von 22,8 MBits/s (zwei Leitungen), 16,8 MBits/s (vier Leitungen) bzw. 12,1 MBits/s (acht Leitungen) gewährleistet werden. Demgegenüber betragen die maximalen Datenraten bei MUBL 10,7 MBits/s (zwei Leitungen), 7 MBits/s (vier Leitungen) bzw. 5 MBits/s (acht Leitungen). Durch die adaptive Dienstgüte kann den Teilnehmern bei 900 Meter langen Leitungen eine um 12,1 MBits/s (zwei Leitungen), 9,8 MBits/s (vier Leitungen) bzw. 7,1 MBits/s (acht Leitungen) höhere Datenrate geboten werden.

Die Ergebnisse der vorgestellten Szenarien zeigen deutlich, dass alle drei vorgeschlagenen Kostenfunktionen für die adaptive Dienstgüte eine deutlich höhere Datenrate garantieren als das Vergleichsverfahren MUBL. Je nach betrachtetem Szenario beträgt die Steigerung bis zu 15 MBit/s bzw. 80%. Ursache für die höhere Datenrate ist die Einbeziehung der realen Dienstgüteanforderungen in die Bitzuweisung. Dadurch wird der Einfluss der Übertragungseigenschaften auf die Verteilung der Bits auf die Unterträger verringert. Es erfolgt somit eine höhere Zuweisung an längere Leitungen mit schlechteren Übertragungseigenschaften. Im Gegensatz dazu wird bei MUBL kürzeren Leitungen deutlich mehr Datenrate zugewiesen als längeren Leitungen, und die kürzeren Leitungen werden vor den längeren bedient. Die ohnehin schlechteren Übertragungseigenschaften der längeren Leitungen werden zusätzlich beeinträchtigt, da die bereits zugewiesene Datenrate der kürzeren Leitungen Nebensprechstörungen auf den längeren Leitungen erzeugt. Die erreichbare Datenrate der längeren Leitungen wird dadurch verringert. Allerdings ist die Summe der Datenraten aller Leitungen bei MUBL deutlich höher, als bei den AQOS-Kostenfunktionen. Der Anteil der Summendatenrate, welcher oberhalb des Dienstprofils liegt, ist dabei jedoch vergeudet.

Die für die adaptive Dienstgüte vorgeschlagenen Kostenfunktionen garantieren demgegenüber den Teilnehmern ein vordefiniertes Dienstprofil. Dieses Dienstprofil besteht aus der gesamten Datenrate (AQOS-Rate) oder dienstklassenspezifischen Datenraten (AQOS-Prio, AQOS-Fair). Die garantierbare Datenrate der drei vorgeschlagenen AQOS-Kostenfunktionen unterscheiden sich nur geringfügig. Da die Abweichungen innerhalb des Vertrauensintervalls liegen, ist die Leistungsfähigkeit der AQOS-Kostenfunktionen in Bezug auf die erreichbare Datenrate sehr ähnlich.

Durch die Verwendung der garantierbaren Datenrate für alle Teilnehmer ist das Leistungskriterium der Fairness implizit gegeben, denn alle Teilnehmer erhalten die von ihnen geforderten Datenraten, weshalb niemand benachteiligt wird. Die AQOS-Kostenfunktionen gewährleisten eine faire Verteilung der Ressourcen unter den Teilnehmern. Der Einfluss der Leitungslänge auf die erreichbare Datenrate wird beschränkt.

Aus den vorgestellten Simulationsergebnissen geht hervor, dass die für das DDM der adaptiven Dienstgüte entworfenen Verfahrensvorschläge eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit in Form der erreichbaren Datenrate und der Fairness ermöglichen.

5.3.3 Untersuchung der Reichweite

Als weiteres Kriterium für die Leistungsfähigkeit der Übertragungsverfahren bei Teilnehmeranschlussleitungen wird in Kapitel 4.1 die maximale Reichweite in Form der Leitungslänge definiert.

Die Bedeutung der Reichweite resultiert aus den existierenden Topologien bei den Teilnehmeranschlussnetzen mit variablen Leitungslängen je nach zu überbrückender Distanz zwischen Vermittlungsstelle und Teilnehmer. Die Steigerung der Reichweite hat für die

Betreiber der Teilnehmeranschlussnetze große Wirkung, da dieser Effekt mehr Teilnehmer, die an längere Leitungen angeschlossen sind, in den Genuss höherer Datenraten bringt. Damit erhöht sich der Anteil von Teilnehmern, denen breitbandige Dienste zur Verfügung gestellt werden können.

Die Ergebnisse der simulativen Leistungsbewertung listet Tabelle 5 auf. Dabei wird die maximal mögliche Reichweite der Verfahren in verschiedenen Szenarien illustriert, wenn allen Teilnehmern ein Dienstprofil von 10 MBit/s gewährleistet werden soll. Generell ist aus Tabelle 5 zu erkennen, dass die Reichweite abnimmt, wenn mehr Leitungen in die Betrachtung einbezogen werden. Während bei zwei Leitungen der Spitzenwert der Reichweite bei 1236 m liegt, können bei acht Leitungen nur maximal 965 m überbrückt werden. Dies gilt jeweils unter der Annahme der Bereitstellung von 10 MBit/s pro Teilnehmer.

	AQOS-Rate	AQOS-Prio	AQOS-Fair	MUBL
1 + 1	1215	1235	1236	935
2 + 2	1045	1090	1110	750
3 + 3	997	1003	1022	625
4 + 4	955	955	965	620

Tabelle 5: Reichweite der Verfahren in Meter

Abbildung 36 zeigt, dass die AQOS-Kostenfunktionen bei allen betrachteten Szenarien besser abschneiden als das Vergleichsverfahren MUBL. Die Steigerung der Reichweite beträgt bei allen Szenarien mindestens 300 m. Dies bedeutet eine Verbesserung von über 30%.

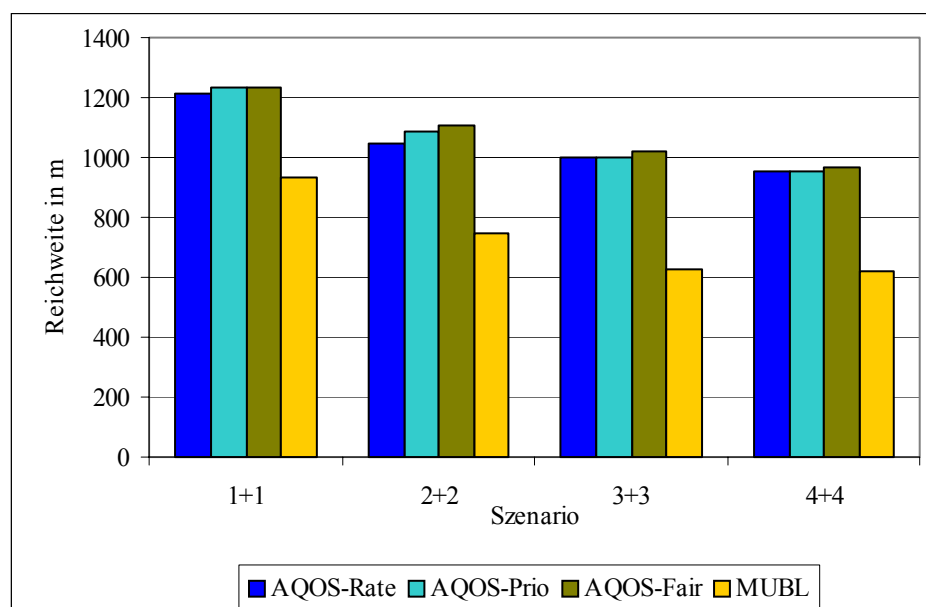


Abbildung 36: Maximale Reichweite für unterschiedliche Szenarien

Aufgrund des Nah-Fern-Problems teilt das Vergleichsverfahren MUBL den Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften mehr Datenrate zu als Leitungen mit schlechteren Übertragungseigenschaften. So wird beispielsweise der kürzeren Leitung die Datenrate von 49,8 MBit/s (Szenario mit zwei Leitungen) bzw. 38,9 MBit/s (Szenario mit acht Leitungen)

zugewiesen. Wenn alle Leitungen das Dienstprofil gewährleisten, bedeutet dies, dass Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften eine Datenrate zugewiesen werden muss, die über dem Dienstprofil liegt. Die überzähligen Ressourcen sind vergeudet. Darüber hinaus werden die Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften zuerst bei der Zuweisung bedient. Daraus folgt, dass die Übertragungseigenschaften der später bedienten Leitungen wegen des Nebensprechens weiter verschlechtert werden.

Die in Tabelle 6 verdeutlichte Ressourcenvergeudung durch die Bevorzugung der Leitungen mit besseren Übertragungseigenschaften und die Reihenfolge der Auswahl der Leitungen führen zu der geringeren erreichbaren Reichweite des MUBL-Verfahrens im Vergleich zu den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Kostenfunktionen für die adaptive Dienstgütesteuerung.

Szenario	Kostenfunktion	Summendatenrate [MBit/s]	nicht genutzte Ressourcen [%]
1 + 1	AQOS	20	0
	MUBL	59,9	66
4 + 4	AQOS	80	0
	MUBL	162,8	51

Tabelle 6: Ressourcenbelastung der verschiedenen Kostenfunktionen

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Reichweite bei AQOS-Prio höher ist als bei AQOS-Rate. Dies wird durch die feinere Granularität der angeforderten Datenraten verursacht. Bei AQOS-Prio werden erst alle Datenratenanforderungen in einer Dienstklasse behandelt, bevor eine andere Dienstklasse bedient wird. Demgegenüber verwendet AQOS-Rate nur die Gesamtdatenrate eines Teilnehmers. Da in die Entscheidung bei beiden Verfahren die Übertragungseigenschaften in Form der Signalsendeleistung involviert sind, werden also bessere kurze Leitungen erst bedient. Bei AQOS-Rate kann dies sogar dazu führen, dass einer kurzen Leitung ihre gesamten Anforderungen gewährleistet werden, bevor eine lange Leitung bedient wird. Die Störeeigenschaften auf der langen Leitung sind dann dementsprechend schlecht. Die mögliche Datenrate auf der langen Leitung wird verringert. Es zeigt sich auch hier, dass durch die Begrenzung des Einflusses der Übertragungseigenschaften auf die Ressourcenverteilung die Reichweite der Verfahren gesteigert wird. Während bei AQOS-Rate die Übertragungseigenschaften das maßgebliche Entscheidungskriterium sind, gilt dies für AQOS-Prio nur innerhalb einer Dienstklasse. Bei AQOS-Fair werden die Übertragungseigenschaften bei der Auswahl der Leitung nicht verwendet.

Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass die maximal mögliche Reichweite von AQOS-Fair höher ist, als bei den anderen beiden vorgeschlagenen Kostenfunktionen. Dies resultiert aus dem geringeren Einfluss der Übertragungseigenschaften innerhalb des Entscheidungsprozesses bei der Bitzuweisung. AQOS-Fair verfolgt die Auswahl der Teilnehmer nach der Menge der benötigten Datenrate. Teilnehmer, die viel Datenrate anfordern, werden auch entsprechend häufiger bedient. Die Übertragungseigenschaften werden nur für die Suche des Unterträgers des ausgewählten Teilnehmers verwendet. Aufgrund der Nebensprechproblematik ist die Reihenfolge der Bitzuweisung von entscheidender Bedeutung für die erzielbare Reichweite. Werden erst kurze Leitungen ausgewählt, verschlimmern sich die ohnehin schon schlechteren Übertragungseigenschaften der langen Leitungen zusätzlich. Dies führt zu einer verringerten Leistungsfähigkeit, da das Potenzial der längeren Leitungen nicht

ausgenutzt werden kann. Bei AQOS-Fair basiert die Zuweisung ausschließlich auf der geforderten Datenrate. Lange Leitungen werden also vor kurzen Leitungen bedient, wenn dort mehr Daten übertragen werden sollen. Dadurch bestehen keine Datenratenunterschiede zwischen kurzen und langen Leitungen. Folglich steigt die Reichweite für das definierte Dienstprofil.

Zur Illustration dieses Umstands zeigt Abbildung 37 die mögliche Reichweite bei unterschiedlichen Dienstprofilen. In diesem Beispiel wird ein Szenario mit drei kürzeren (300 m) und einer längeren Leitung (variable Länge) untersucht. Das Dienstprofil der längeren Leitung beträgt 10 MBit/s in der höchsten Dienstklasse. Das Dienstprofil der kürzeren Leitungen wird während der Simulation variiert. Zur Verdeutlichung der Vorteile der fairen Ausgestaltung der Kostenfunktion werden nur die beiden Kostenfunktionen AQOS-Fair und AQOS-Prio verglichen.

Die in Abbildung 37 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass AQOS-Fair bei unterschiedlichen Datenraten der kurzen Leitungen eine deutlich höhere Reichweite ermöglicht, als AQOS-Prio. Der Unterschied der Reichweite nimmt zu, wenn die genutzte Datenrate der kürzeren Leitungen ansteigt. Ursache dafür ist, dass bei AQOS-Prio zuerst die Anforderungen der kürzeren Leitungen erfüllt werden und erst danach die höheren Anforderungen der langen Leitung bedient werden. Durch die Bitzuweisung an die kurzen Leitungen verschlechtern sich die Übertragungseigenschaften der langen Leitungen. Die Reichweite der langen Leitung wird eingeschränkt.

Demgegenüber wird bei AQOS-Fair zuerst die lange Leitung bedient, da sie höhere Datenratenanforderungen stellt. Erst wenn die lange Leitung das Quantum an nicht zugewiesener Datenrate der kurzen Leitungen erreicht, werden die kurzen Leitungen bei der Bitzuweisung ebenfalls bedient. Dadurch ist die Reichweite bei unterschiedlichen Datenraten der kurzen Leitungen nahezu konstant. Die Reichweite verändert sich nur unmerklich, wenn die zugewiesene Datenrate der kurzen Leitungen variiert.

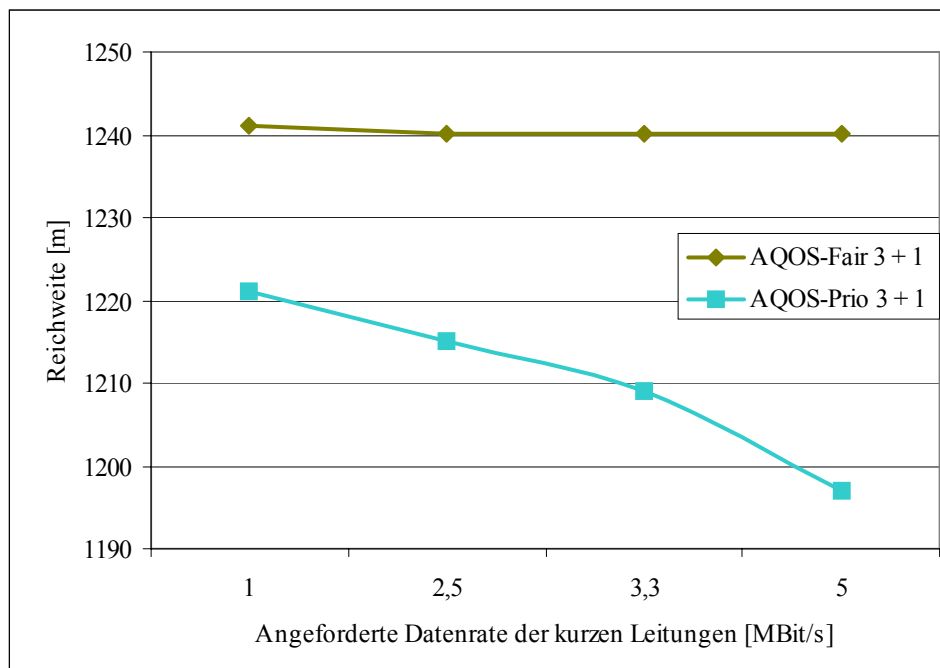


Abbildung 37: Reichweitenvergleich bei unterschiedlichen Dienstprofilen

Aus den vorgestellten Ergebnissen geht hervor, dass die vorgeschlagenen Verfahren zur adaptiven Dienstgütesteuerung eine deutliche Steigerung der Reichweite im Vergleich zu den bekannten Verfahren (MUBL) bei Teilnehmeranschlussnetzen ermöglichen. Durch die faire Ausgestaltung der Kostenfunktion AQOS-Fair wirken sich unterschiedliche Dienstprofile nicht negativ auf die Reichweite aus.

5.3.4 Untersuchung der Sendeleistung

Wie in den bisherigen Verlauf der Arbeit bereits erläutert wird, ist bei den Teilnehmeranschlussnetzen die benötigte Sendeleistung von besonderer Bedeutung. Dies ist auf den oft dezentralen Standort der Geräte ohne direkte Stromversorgung zurückzuführen.

In Abbildung 38 ist die benötigte Sendeleistung des Szenarios mit zwei Leitungen der Länge 300 und 900 Meter und einer garantierten Datenrate von 10 MBit/s dargestellt. Dabei ist bei allen untersuchten Kostenfunktionen die Sendeleistung der kurzen Leitung sehr viel niedriger als die der längeren Leitung. Die Gesamtsumme der Sendeleistung der beiden Leitungen wird vor allem durch die längere Leitung bestimmt. Ursache dafür sind die deutlich besseren Übertragungseigenschaften der 300 m Leitung. Durch die geringere Dämpfung auf dieser Leitung wird eine geringere Sendeleistung benötigt.

Es ist außerdem zu erkennen, dass die Sendeleistung des MUBL-Verfahrens deutlich höher ist, als bei den AQOS-Kostenfunktionen. Dies wird durch den Sachverhalt verursacht, dass beim MUBL-Verfahren nicht die benötigte Datenrate der einzelnen Teilnehmer, sondern die Summenrate aller Teilnehmer optimiert wird. Das MUBL-Verfahren bedient dabei immer zuerst die Leitung mit den besseren Übertragungseigenschaften. Dadurch wird der kurzen Leitung zuerst eine deutlich höhere Datenrate (49,8 MBit/s) zugewiesen, bevor auf der langen Leitung die garantierte Datenrate von 10 MBit/s erreicht wird. Dieses Verhalten illustriert anschaulich den konzeptionellen Vorteil der teilnehmerspezifischen Datenratengarantie der adaptiven Dienstgütesteuerung.

Abbildung 38 illustriert außerdem, wie sich die Verteilung der Sendeleistung zwischen den Leitungen ändert. Dabei wird deutlich, dass die Sendeleistung der kurzen Leitung bei AQOS-Rate am geringsten, bei AQOS-Prio etwas höher und bei AQOS-Fair am höchsten ist. Demgegenüber verhält sich die Sendeleistung der längeren Leitung genau umgekehrt. Ursache dafür ist die unterschiedliche Einbindung der Übertragungseigenschaften in die Kostenfunktion. Je stärker die Übertragungseigenschaften in die Kostenfunktion eingehen, umso größer ist der Unterschied der Sendeleistung zwischen den beiden Leitungen. Der Unterschied liegt darin begründet, dass eine starke Einbindung zu einer niedrigen Sendeleistung auf der kürzeren und einer höheren Sendeleistung auf der längeren Leitung führt. Bei AQOS-Rate werden die Übertragungseigenschaften relativ stark beachtet. Daher sind die Sendeleistungen der kurzen Leitung niedrig und der langen Leitung hoch. Bei AQOS-Fair werden die Übertragungseigenschaften nicht betrachtet. Dann ist die Sendeleistung der kurzen Leitung relativ hoch, während die längere Leitung eine niedrigere Sendeleistung benötigt. AQOS-Prio liegt zwischen den beiden anderen Verfahren. Dies gilt auch für die Summe der Sendeleistungen der beiden Leitungen.

Abbildung 38 zeigt auch, dass die Gesamtsendeleistung maßgeblich von der langen Leitung bestimmt ist. Zur Reduktion der Gesamtsendeleistung muss also vor allen die Sendeleistung der langen Leitung betrachtet werden. Die Optimierung der Sendeleistung auf der langen Leitung hat größeren Einfluss auf die Gesamtsendeleistung, da sie im Vergleich zur kürzeren Leitung sehr viel höher ist. Dies ist bei AQOS-Fair der Fall, weshalb diese Kostenfunktion die geringste Gesamtsendeleistung der drei AQOS-Kostenfunktionen erfordert.

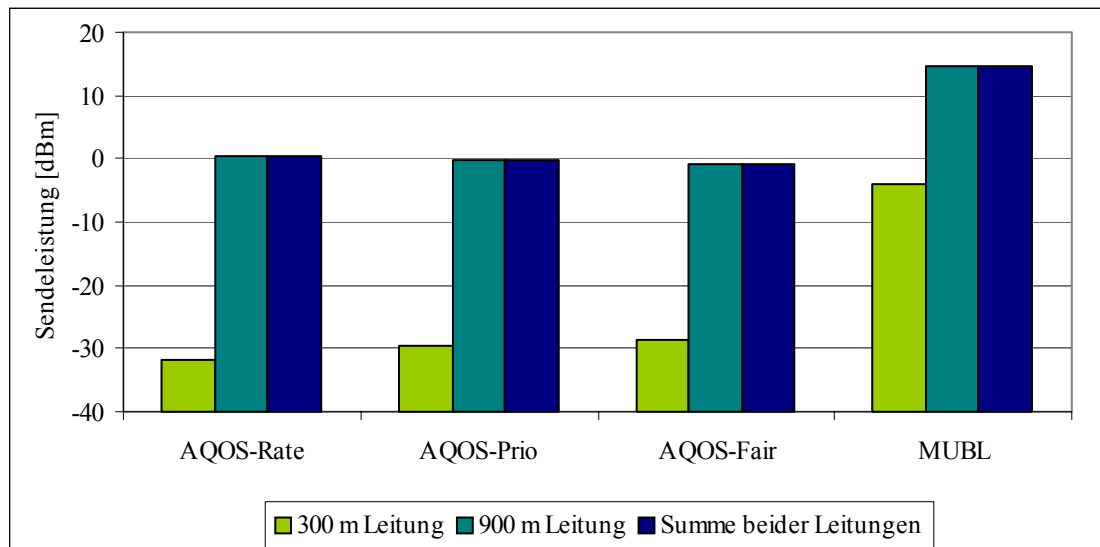


Abbildung 38: Aufteilung der Sendeleistung bei zwei Leitungen

Bei der Untersuchung der Sendeleistung spielt auch die Dynamik der Teilnehmeranforderungen eine wichtige Rolle. Da sich die reale Datenrate an die Veränderungen der Verkehrscharakteristiken angepasst, wird auch die benötigte Sendeleistung variiert. Abbildung 39 zeigt ein Beispiel für die Veränderlichkeit der geforderten Datenrate bei zwei Teilnehmern über ein Intervall von 10 Sekunden. Bei diesem Beispiel wird ein Verkehrsmix aus Telefonie, Video- und Datenübertragung simuliert. Während des Untersuchungsintervalls werden Verbindungen auf- und abgebaut. Die kurzfristige Veränderlichkeit der Datenanwendung innerhalb eines Datenstroms wird in diesem Beispiel vernachlässigt. Trotzdem sind die starken Schwankungen der Datenrate für beide Teilnehmer gut zu erkennen. Unter Beachtung dieser Veränderlichkeit stellt die Untersuchung des Energieverbrauchs bei der durch die adaptive Dienstgütesteuerung möglichen dynamischen Anpassung ein weiteres interessantes Kriterium dar. Dabei wird die zugewiesene Datenrate im laufenden Betrieb an die veränderlichen Verkehrsanforderungen angepasst.

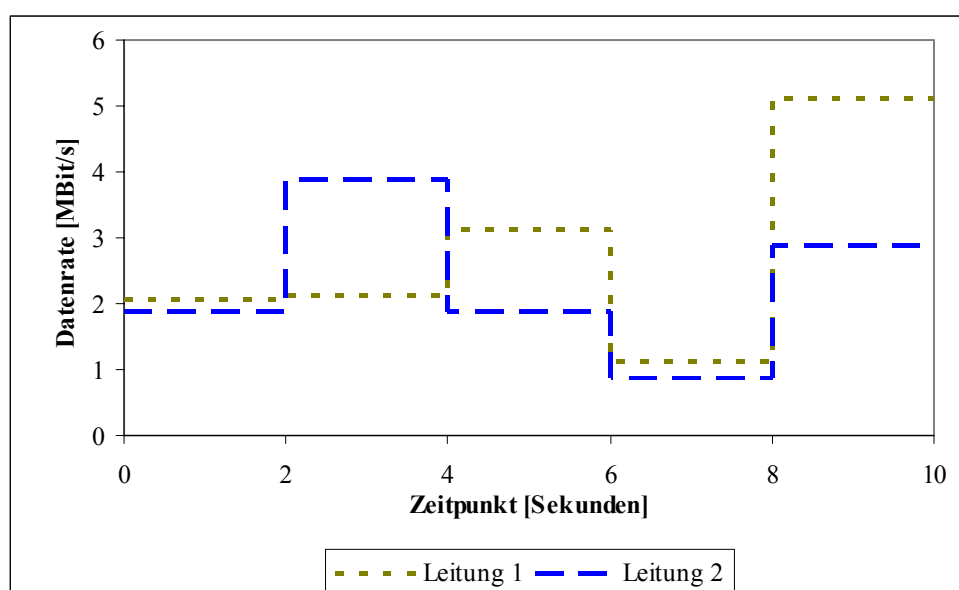


Abbildung 39: Beispiel für die Veränderlichkeit der Datenrate bei zwei Teilnehmern

Abbildung 40 zeigt, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagenen AQOS-Kostenfunktionen einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch ermöglichen. Generell unterscheidet sich der gesamte Energieverbrauch aller drei AQOS-Kostenfunktionen nur geringfügig. Wie bei den vorher vorgestellten Ergebnissen liegt der Energieverbrauch bei AQOS-Rate etwas höher als bei AQOS-Prio und AQOS-Fair. Ursache dafür ist wieder die stärkere Gewichtung der Übertragungseigenschaften in der Kostenfunktion.

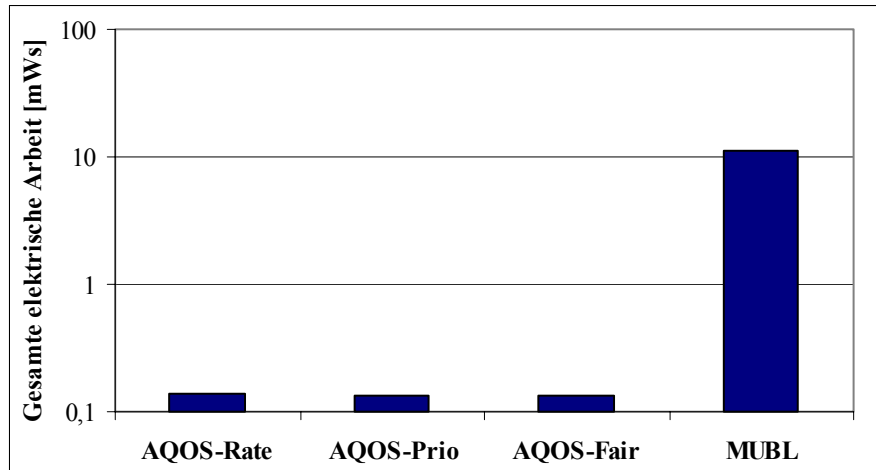


Abbildung 40: Energieverbrauch aller Teilnehmer

Da beim MUBL-Verfahren die dynamische Anpassung bei veränderlichen Verkehrseigenschaften nicht möglich ist, wird im Rahmen der Untersuchung die für die garantierte Datenrate benötigte Sendeleistung für die gesamte Zeitdauer verwendet. Aus Abbildung 40 lässt sich der durch die dynamische Anpassung an die veränderlichen Verkehrseigenschaften deutlich reduzierte Energieverbrauch der adaptiven Dienstgütesteuerung im Vergleich zur statischen Zuweisung beim MUBL-Verfahren ablesen. Der geringere Energieverbrauch resultiert aus der zeitnahen Anpassung der Datenrate an die variablen Verkehrsanforderungen.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein Verfahren für das Dienstgüte- und Datenratenmanagement der adaptiven Dienstgütesteuerung vorgeschlagen. Dessen Aufgaben bestehen in der Steuerung und Verwaltung der Dienstgüte der einzelnen Teilnehmer und der Aufteilung der Datenrate auf die jeweiligen Leitungen und Unterträger.

Das Kernstück des DDM ist ein Greedy-Verfahren, welches die von den Teilnehmern angeforderte Dienstgüte gewährleistet. Dieser Ansatz führt eine lokale Optimierung durch, wobei jede Entscheidung im Suchraum dem aktuell maximalen Vorteil darstellt. Für die hier betrachtete Problemstellung der dienstgüteeerweiterten Bitzuweisung erreicht diese Vorgehensweise die global optimale Lösung.

Das Entscheidungskriterium des Greedy-Verfahrens bildet eine Kostenfunktion. Dabei werden sukzessive den Leitungen und Unterträgern Bits zugewiesen, die jeweils die geringsten Kosten verursachen. Für das DDM der adaptiven Dienstgütesteuerung werden drei verschiedene Kostenfunktionen entwickelt und analysiert, welche die Übertragungseigenschaften und die Dienstgüte in unterschiedlicher Stärke und Granularität berücksichtigen. Die Dienstgüte stellen die Gesamtanforderungen an Datenrate pro Teilnehmer (AQOS-Rate) oder als

dienstklassenspezifische Datenratenanforderungen (AQOS-Prio und AQOS-Fair) dar. Die Übertragungseigenschaften werden bei der Bitzuweisung für die Auswahl der Leitung und des Unterträgers (AQOS-Rate und AQOS-Prio) oder nur für die Auswahl des Unterträgers (AQOS-Fair) eingesetzt. Bei AQOS-Fair basiert die Auswahl des Teilnehmers auf der Datenratenanforderung in der jeweiligen Dienstklasse. Die Datenrate wird den beteiligten Leitungen fair zugewiesen. Keine Leitung wird den anderen gegenüber benachteiligt.

Eine simulative Leistungsbewertung evaluiert das Verfahren anhand eines VDSL-Systems mit unterschiedlicher Anzahl von Teilnehmern und verschiedenen Leitungslängen. Die erzielten Ergebnisse geben zu erkennen, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagenen AQOS-Kostenfunktionen eine deutliche Steigerung der Datenrate und Reichweite ermöglichen. Durch die faire Auswahl der Leitungen bei der Gewährleistung der teilnehmerspezifischen Dienstgüteanforderungen pro Dienstklasse ist die Fairness zwischen unterschiedlich langen Leitungen gegeben. Des Weiteren wird die benötigte Sendeleistung reduziert. Es zeigt sich, dass die alleinige Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften in Form der benötigten Signalsendeleistung zu suboptimalen Ergebnissen und einer Vergeudung von Ressourcen auf Teilnehmeranschlussleitungen führt. Die Optimierung aller veränderlicher Eigenschaften erlaubt durch die Reduktion der Nebensprechstörungen eine deutlich effizientere Nutzung der vorhandenen Übertragungskapazität bei Teilnehmeranschlussleitungen. Außerdem wird deutlich, dass durch die Verbesserung der Übertragung der längeren Leitung die Gesamtsendeleistung des Systems maßgeblich reduziert werden kann. Durch die schlechteren Übertragungseigenschaften ist die Sendeleistung auf längeren Leitungen höher, als auf kürzeren Leitungen. Die Reduktion der höheren Sendeleistung der längeren Leitungen senkt die Gesamtsendeleistung des Systems stärker, als die Verminderung der ohnehin niedrigeren Sendeleistung der kürzeren Leitungen.

Die Beachtung der Veränderlichkeit der Verkehrs- und Übertragungseigenschaften bei der adaptiven Dienstgütesteuerung führt zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme in Form der erreichbaren Datenrate, Reichweite und Fairness.

6 Konzeptvorschlag eines Verfahrens zur Signalisierung

Aus dem in Kapitel 4 vorgestellten Konzept der adaptiven Dienstgütesteuerung ist ersichtlich, dass der schnelle Informationsaustausch für die Effizienz des AQOS-Verfahrens entscheidend ist. Nur durch die zeitnahe Information und Reaktion bei Veränderungen der Eigenschaften ist das kurzfristige Nachführen der Dienstgüte- und Übertragungsparameter möglich. In Kapitel 6 wird ein Verfahren für die Signalisierung der veränderlichen Parameter vorgeschlagen.

Nach einer Einführung in die Protokollentwurfstechniken untersucht Abschnitt 6.2 ein neuartiges Verfahren zur horizontalen und vertikalen Cross-Layer-Signalisierung. Abschnitt 6.3 stellt die konkrete Ausgestaltung und Validierung des entworfenen Signalisierungsprotokolls vor. Dieses wird im Abschnitt 6.4 einer Leistungsbewertung unterzogen. Die wesentlichen Aussagen des Kapitels fasst Abschnitt 6.5 zusammen.

6.1 Einführung

Die konventionelle Protokollstruktur auf Basis des OSI-Referenzmodells ist durch eine strikt hierarchische Struktur gekennzeichnet. Die Kommunikation zwischen verschiedenen Schichten ist streng geregelt. Damit kann auf das dynamische Verhalten der Übertragungs- und Verkehrscharakteristiken bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen nicht mit der notwendigen Flexibilität eingegangen werden. Bei veränderlichen Eigenschaften in einer Protokollschicht gehen die Protokolle der anderen Schichten jeweils von den schlechtest möglichen Bedingungen aus. Eine Anpassung an die sich ändernden Bedingungen erfolgt nicht. Dies führt zu einer ineffizienten Nutzung der Ressourcen. Die Unzulänglichkeit des OSI-Referenzmodells bei zeitvariantem Verhalten zeigt sich vor allem im Fehlen von Möglichkeiten des gemeinsamen Zugriffs auf Informationen durch verschiedene Protokollschichten. Dieser Mangel hat zur Entwicklung von Cross-Layer-Verfahren geführt, welche die gemeinsame Benutzung von Informationen in unterschiedlichen Schichten erlauben.

6.2 Cross-Layer-Entwurf

Die adaptive Dienstgütesteuerung ermöglicht die Reaktion auf sich ändernde Übertragungs- und Verkehrscharakteristiken. Die Abstimmung von Parametern unterschiedlicher Protokollschichten realisiert ein erweitertes Entwurfsschema, das Cross-Layer-Design. Die Anpassung findet bei AQOS in den unteren Schichten des Referenzmodells statt (siehe Abbildung 28 in Kapitel 4). Da die an die Teilnehmeranschlussleitungen angeschlossenen Netzgeräte nur die unteren zwei (Switching) bzw. drei (Routing) Protokollschichten enthalten, können nur deren Parameter angepasst werden. Informationen höherer Schichten, wie die Verkehrsanforderungen, werden aus den Paketinhalten abgeleitet. Diese Parameter werden dann gemeinsam mit den Übertragungseigenschaften optimiert.

Kapitel 4 erläutert, dass der Informationsaustausch bei der adaptiven Dienstgütesteuerung sowohl horizontal zwischen den beteiligten Netzknoten als auch vertikal zwischen den Protokollschichten erfolgt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird auf die grundlegenden Entwurfsregeln und den Informationsaustausch detailliert eingegangen.

6.2.1 Horizontale Signalisierung

Bei der adaptiven Dienstgütesteuerung ist ein horizontaler Informationsaustausch zwischen den an die Teilnehmeranschlussleitung angeschlossenen Geräten notwendig. Infolge der Ausgestaltung der VDSL-Übertragung in Frequenzgetrenntlage erfolgt die Signalisierung als geschlossene Schleife. Dabei wird die Kanalschätzung im Empfänger der jeweiligen Übertragungsrichtungen durchgeführt. Die Veränderung des Modulationsverfahrens erfolgt im Sender.

Bei AQOS wird dieses von den adaptiven Modulationsverfahren (siehe Abschnitt 2.6) bekannte Signalisierungskonzept um eine zentrale Managementinstanz, das bereits vorgestellte DDM, erweitert. Die Kanalschätzungen werden deshalb nicht vom Empfänger an den Sender übermittelt, sondern an das DDM. Das DDM steuert die Festlegung der Übertragungsparameter und deren Übermittlung an die Sender und Empfänger der Übertragungsstrecke.

Bei der in Abbildung 41 dargestellten horizontalen Signalisierung werden die Kanalschätzungen und die zu verwendenden Übertragungsparameter zwischen dem DDM und den betroffenen Netzknoten, DSLAM und Modem, ausgetauscht.

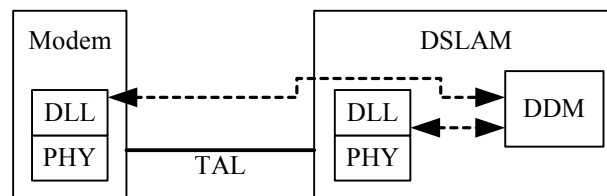


Abbildung 41: Horizontale Signalisierung mit DDM

Relevante Schätzwerte sind z. B. die Kanalimpulsantwort und die Nebensprechfunktionen der Leitungen. Der Informationsaustausch findet hierbei von den Netzknoten zum DDM statt. Diese Parameter ändern sich relativ selten. Ursache für Veränderungen sind meist externe Faktoren, wie z. B. die Umrangierung von Leitungen. Daher tritt ein Austausch der Schätzwerte und eine Neuberechnung der Kanalcharakteristiken durch die Veränderung der Kanalschätzungen nur selten auf.

Im einfachsten Fall bestehen die auszutauschenden Übertragungsparameter aus dem Vektor der neuen Bitbelegung der einzelnen Unterträger. Weitere Parameter, wie z. B. die Sendeleistung oder der Kanalgewinn, können auch übermittelt werden. Der Austausch der Übertragungsparameter vollzieht sich vom DDM zu den Netzknoten. Zur Sicherung der Korrektheit der Daten werden Anfragen (Request) mit Bestätigungsnachrichten (Confirm) beantwortet. Die Korrektheit der Parameter wird durch Bestätigungsnachrichten und Prüfsummen sichergestellt.

6.2.2 Vertikale Signalisierung

Neben der horizontalen Signalisierung erfordert die adaptive Dienstgütesteuerung auch einen vertikalen Informationsaustausch. Dabei werden die in einem Netzknoten gemeinsam genutzten Informationen zwischen den verschiedenen Protokollschichten verteilt.

Durch die vertikale Signalisierung können Parameter einer Schicht aus einer anderen Schicht heraus verändert werden. So ist eine adaptive Anpassung der Übertragungs- und Dienstgüteparameter an die sich ändernden Eigenschaften möglich. Durch die Kopplung der einzelnen Parameter können die Dienstgüte- und Übertragungseigenschaften gemeinsam optimiert werden.

Abbildung 42 beschreibt die vertikale Signalisierung im DSLAM bei einer Ausgestaltung des DSLAM als Switch. Die vertikale Signalisierung im Modem erfolgt analog zu diesem Ansatz.

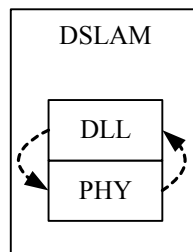


Abbildung 42: Vertikale Signalisierung am Beispiel DSLAM

Bei der adaptiven Dienstgütesteuerung findet die vertikale Signalisierung zwischen der Übertragungs- und der Sicherungsschicht statt. Dabei werden die durch die Auswertung der Informationen höherer Schichten, wie z. B. IP, gewonnenen Verkehrsanforderungen auf die Übertragungsparameter des Kanals abgebildet.

Dadurch wird die Datenrate als übergeordnetes Charakteristikum der Übertragungsqualität mittels unterschiedlicher Parameter in den Schichten dargestellt. Die Veränderung der Datenrate und die entsprechende Anpassung in DLL und PHY ermöglichen die adaptive Steuerung der Übertragung bei veränderlichen Eigenschaften.

Die auszutauschenden Informationen werden in den einzelnen Protokollschichten durch unterschiedliche Parameter dargestellt. Die Anpassung der Parameter bei Veränderung der Eigenschaften erfolgt in der DLL-Schicht durch die Abbildung der genutzten Datenrate auf die Bedienrate der Warteschlangen der einzelnen Dienstklassen. In der Übertragungsschicht wird die Datenrate durch die Bitbelegung auf die einzelnen Unterträger repräsentiert.

Der vertikale Austausch der Informationen läuft zwischen den Protokollschichten innerhalb eines Gerätes ab. Die Übermittlung geht somit durch Funktionsaufrufe in den beteiligten Protokollschichten vonstatten. Die entsprechenden Schnittstellen stehen durch den Cross-Layer-Ansatz zur Verfügung. Die Korrektheit und Akzeptanz der übermittelten Werte wird durch die Rückgabewerte der Funktionsaufrufe bestimmt. Dadurch kann die Übernahme der bereitgestellten Informationen kontrolliert werden.

6.3 Signalisierungsprotokoll

Der Ablauf der Signalisierung wird durch ein Protokoll definiert. In diesem Abschnitt werden das Schema und die konkrete Ausgestaltung des entworfenen Protokolls vorgestellt.

6.3.1 Formale Beschreibungstechniken

Eine umfassende Beschreibung eines Systems enthält eine Vielzahl an Informationen. Diese müssen in einer geeigneten Sprache dargestellt werden. Die natürliche Sprache ist für die präzise und eindeutige Definition von Aufgaben nur bedingt verwendbar.

Formale Beschreibungstechniken werden häufig für die Entwicklung komplexer Systeme eingesetzt. Ein wichtiges Feld der formalen Beschreibung ist die Standardisierung von Diensten und Protokollen in der Telekommunikation und ähnlichen Gebieten. Ursache dafür sind ihre Vorteile, wie z. B. die eindeutige, präzise und lückenlose Beschreibung des Systemverhaltens und die erleichterte Korrektheits- und Vollständigkeitsanalyse [57].

Als konkrete Ausprägung der formalen Beschreibungstechniken ist im Bereich der Telekommunikation die Specification and Description Language (SDL) [123] weit verbreitet. Wegen ihrer Eigenschaften, wie z. B. übersichtliche Strukturierung und Verwendung abstrakter Datentypen, ist SDL für vielfältige Entwicklungsaufgaben geeignet, wie z. B. Spezifikation, Design und Kodierung. Die Verwendung von SDL-Entwurfswerkzeugen erlaubt darüber hinaus die einfache Simulation und Validierung komplexer Systeme.

Die Basis der SDL-Systembeschreibung bilden erweiterte endliche Zustandsautomaten, die auch Prozesse genannt werden. Diese können neben Zuständen auch lokale Daten verwalten und manipulieren. Zur Beschreibung des Verhaltens eines Prozesses dienen Zustände und Zustandsübergänge. Ein Prozess befindet sich entweder gerade in einem Zustandsübergang oder wartet in einem Zustand auf ein Signal. Signale stellen in diesem Kontext Ereignisse dar, auf die das System reagieren soll [61].

Durch die Verbindung von endlichen Zustandsautomaten und abstrakten Datentypen bietet sich SDL für den Entwurf des Signalisierungsprotokolls der adaptiven Dienstgütesteuerung an. Der im Folgenden vorgestellte Protokollentwurf basiert auf formalen Beschreibungstechniken und ist in SDL realisiert.

6.3.2 Protokollentwurf

Der vorliegende Abschnitt zeigt die konkrete Ausgestaltung der Signalisierung für die adaptive Dienstgütesteuerung auf. Zwei unterschiedliche Phasen der Signalisierung können dabei unterschieden werden:

- Austausch der Schätzwerte
- Neuaushandlung und Aktivierung der neuen Übertragungsparameter für beide Übertragungsrichtungen

Die Signalisierung erfolgt für jede Übertragungsrichtung autonom. Damit sind die Aushandlungen für Up- und Downstream-Richtung unabhängig voneinander, können allerdings auch gleichzeitig durchgeführt werden.

Zur Sicherung der Stabilität des AQOS-Verfahrens werden folgende Annahmen für den Entwurf des Signalisierungsprotokolls getroffen:

- Pro Übertragungsrichtung kann zu einem Zeitpunkt nur eine Aushandlung durchgeführt werden.
- Das DDM ist in den DSLAM integriert und koordiniert den Informationsaustausch.

Es wird davon ausgegangen, dass eine neue Aushandlung erst begonnen werden kann, wenn die vorherige beendet ist. Dadurch wird die korrekte Sequenz und Synchronität der Aushandlung sichergestellt. Da die Dauer der Neuaushandlung sehr kurz ist, stellen diese Annahmen keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit dar.

Entsprechend Abbildung 41 stellt der DSLAM den netzseitigen Terminationspunkt für die Signalisierungsnachrichten an das DDM dar. Der Informationsaustausch zwischen Datenebene des DSLAM und DDM findet mittels interner Funktionsaufrufe statt. Die Signalisierungsnachrichten an das DDM werden im DSLAM terminiert. Somit werden für die Signalisierung bei der adaptiven Dienstgütesteuerung ausschließlich Nachrichten auf der Teilnehmeranschlussleitung benötigt. Nur dort wird zusätzlicher Verkehr erzeugt. Die Leistungsfähigkeit anderer Netzteile wird nicht beeinflusst.

6.3.2.1 Signalisierung

Die Art der verwendeten Signalisierung kann in zwei Gruppen, Inband und Outband, unterteilt werden. Bei der Inband-Signalisierung werden die Steuerinformationen über den gleichen Kanal übertragen wie die Nutzdaten. Signalisierungs- und Nutzdaten teilen sich die vorhandenen Ressourcen. Meist werden die Steuerinformationen gegenüber den Nutzdaten priorisiert.

Bei der Outband-Signalisierung werden die Steuerinformationen über einen komplett getrennten Kanal übertragen. Die Trennung kann z. B. durch Verwendung eines anderen Übertragungsmediums oder nicht genutzter Frequenzbereiche erfolgen.

Die adaptive Dienstgütesteuerung bedient sich bei der Signalisierung eines Inband-Verfahrens. Die Steuerdaten nutzen die durch das VDSL-Verfahren bereitgestellten Ressourcen gemeinsam mit den Nutzdaten. Dadurch ist allein das VDSL-System in die Signalisierung involviert. Andere Verfahren sind von den Veränderungen nicht betroffen. Das AQOS-Signalisierungsschema unterscheidet sich von herkömmlichen Inband-Verfahren durch den Einsatz einer höheren Schicht für die Übermittlung von Parametern der Übertragungsschicht. Die bekannten Inband-Verfahren, wie z. B. SIP, RSVP oder SNMP, ordnen den Signalisierungsverkehr von einer höheren Schicht in den Nutzdatenstrom der darunter liegenden Schicht ein. Durch die AQOS-Signalisierung wird diese Top-Down-Strategie durch einen flexibleren Cross-Layer-Ansatz ersetzt, bei dem Informationen höherer und niedrigerer Schichten gemeinsam übermittelt werden.

Bei einem Cross-Layer-System findet ein Informationsaustausch zwischen den beteiligten Schichten statt. Für die horizontale Signalisierung können die Steuerungsdaten als Informationseinheiten einer der beteiligten Schichten übertragen werden. Die vertikale Verteilung erfolgt dann in den beteiligten Geräten.

AQOS bietet die Möglichkeit der Übermittlung der anzuwendenden STPs in der Übertragungs- oder in der Sicherungsschicht. In der Übertragungsschicht der xDSL-Verfahren steht gemeinhin ein Kanal mit begrenzter Übertragungskapazität für Steuerinformationen zur Verfügung. Bei VDSL wird dieser Kanal als VDSL Overhead Channel (VOC) bezeichnet. Durch die Ausgestaltung der leitungsgebundenen Übertragung hat dieser Steuerkanal eine konstante unveränderliche Übertragungskapazität. Eine Dynamisierung des Steuerkanals der Übertragungsschicht ist wegen der notwendigen Synchronisierung und Abstimmung zwischen den Netzknoten ineffizient und sehr kompliziert. Aus diesem Grund sind Verfahren mit variabelratigen Steuerkanälen in der Übertragungsschicht bei der leitungsgebundenen Übertragung nicht üblich.

Die Übertragungsressourcen werden zwischen VOC und anderen Verwaltungsinformationen aufgeteilt. Da diese Ressourcen für die Nutzdatenübertragung verloren sind, wird nur eine relativ niedrige Datenrate für die Signalisierung bereitgestellt. Bei den VDSL-Standards steht eine Datenrate von 32 KBit/s für Kontrollinformationen bereit [69]. Daher kann die Signalisierung nur relativ langsam durchgeführt werden. Unabhängig davon, ob Steuerinformationen zu übertragen sind, wird die konstante Datenrate des VOC immer für die Signalisierung reserviert. Sind keine Nachrichten zu senden, werden durch den dann erzeugten Leerverkehr Ressourcen vergeudet.

Die Verwendung des mit einer relativ niedrigen, konstanten Datenrate ausgestatteten Signalisierungskanals der Übertragungsschicht führt zu einer langsamen Signalisierungsgeschwindigkeit, die für die Anpassung im laufenden Betrieb der adaptiven Dienstgüte nicht geeignet ist. Außerdem ist die dauerhafte Reservierung ineffizient, wenn keine Signalisierungsnachrichten zu übertragen sind.

Deshalb wird die Signalisierung bei AQOS in Form von Informationseinheiten der Sicherungsschicht (Data Link Layer, DLL) durchgeführt. Dabei werden die Signalisierungsnachrichten gemeinsam mit den Nutzdaten über die Übertragungsschicht übertragen.

Ein Vorteil bei diesem Ansatz besteht wegen der höheren Nutzdatenrate in der schnelleren Signalisierung. Außerdem werden die Ressourcen für die Signalisierung nicht dauerhaft reserviert. Die Steuerinformationen werden vielmehr gegenüber den Nutzdaten priorisiert. Wenn diese übermittelt werden sollen, werden die Nutzdaten geringfügig verzögert und erst die Steuerungspakete transferiert. Dadurch ist eine deutlich effizientere Ressourcennutzung möglich.

Ab der Sicherungsschicht werden die Informationen als Rahmenstruktur charakterisiert, sodass die Signalisierung durch DLL-Pakete auch einen stärkeren Fehlerschutz ermöglicht. Jeder Rahmen kann durch Prüfsummen gesichert werden. So können Übertragungsfehler mit sehr großer Wahrscheinlichkeit erkannt werden. Fehlerhaft übertragene Rahmen können dann erneut angefordert werden. Zusätzlich können Fehler durch eine entsprechende Codierung auch korrigiert werden.

Die Signalisierung der neu zu verwendenden Übertragungsparameter bei der adaptiven Dienstgütesteuerung als DLL-Informationseinheit ist im Vergleich zur Verwendung der Übertragungsschicht in verschiedener Hinsicht von Vorteil. Beispiele dafür sind kürzere Signalisierungsdauer, höherer Fehlerschutz und effizientere Ressourcenausnutzung.

Abbildung 43 zeigt das schematische Modell eines so ausgestalteten Systems. Die Signalisierungsnachrichten werden horizontal zwischen den AQOS-Entitäten der beiden beteiligten Geräte ausgetauscht. Zwischen DLL und PHY findet dann eine vertikale Signalisierung statt.

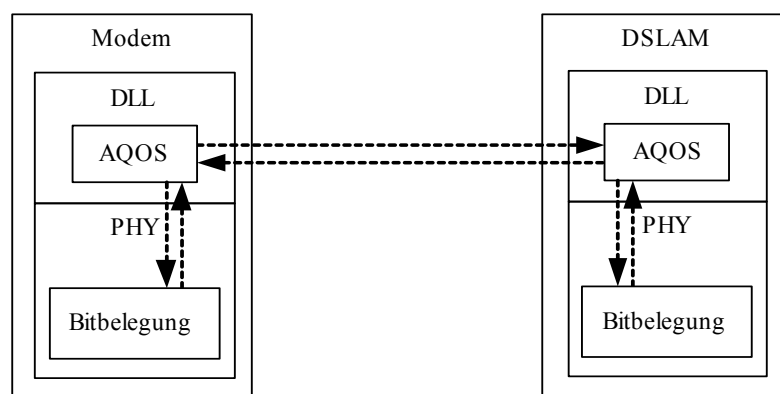


Abbildung 43: AQOS-Signalisierung via DLL-Paketen

Um Kontroll- und Nutzdaten unterscheiden zu können, müssen die entsprechenden Pakete eindeutig gekennzeichnet werden. Dies erfolgt in den Paketköpfen durch Setzen der Felder für Typ und Adressen. Kontrolldaten werden am Typfeld des Paketkopfes in der Sicherungsschicht des Empfangsgerätes erkannt. Die Pakete werden dem Datenstrom entnommen und der AQOS-Entität zugeführt. Dort werden die Paketinhalte ausgewertet und gegebenenfalls via vertikaler Signalisierung an die Übertragungsschicht weitergeleitet.

Die Einordnung der Signalisierungspakete in den Datenstrom findet in den Warteschlangen des Netzknotens statt. Üblicherweise wird für jede Dienstklasse eine eigene Warteschlange bereitgestellt, so auch für den Kontrollverkehr. Bei verschiedenen Dienstgütearchitekturen, wie

z. B. Ethernet IEEE 802.1p/Q, wird diese Verkehrsart als netzkritisch klassifiziert und allen anderen Verkehrsarten gegenüber bevorzugt. Wenn Kontrollinformationen zu übertragen sind, werden diese immer zuerst gesendet. Da die Kontrollinformationen nur beim Auf- bzw. Abbau der Sitzungen zu übermitteln sind, sind die Auswirkungen durch die Verzögerung auf die Nutzdaten gering. Die Bevorzugung des Signalisierungsverkehrs wird durch Bedienung der gefüllten Warteschlange für Kontrollverkehr realisiert.

Die AQOS-Signalisierung erfordert einen ständig aktiven Signalisierungskanal. Sollen nach einer inaktiven Phase Nutzdaten übertragen werden, müssen zuerst Steuerdaten über den Signalisierungskanal ausgetauscht werden. Auf der Basis der darin enthaltenen Informationen wird die Übertragungskapazität für Nutzdaten zur Verfügung gestellt. Für die Übertragung der Steuerdaten wird eine minimale Übertragungskapazität benötigt, die immer vorhanden ist. Die explizite Reservierung von Kapazität für die Signalisierung ist nur dann notwendig, wenn aufgrund der Inaktivität der Übertragung keine Nutzdatenrate zur Verfügung steht. Während der Nutzdatenübertragung kann deren Datenrate auch für die Signalisierung verwendet werden. Somit steht entsprechend (6.1) für die Signalisierung die Menge an Datenrate $R_{\text{Signalisierung}}$ bereit, die entweder für die Nutzdaten $R_{\text{Nutzdaten}}$ oder bei inaktiver Nutzdatenübertragung als minimale Steuerdatenrate R_{min} vorgesehen ist.

$$R_{\text{Signalisierung}} = \max \begin{cases} R_{\text{Nutzdaten}} \\ R_{\text{min}} \end{cases} \quad (6.1)$$

Für den Signalisierungskanal wird durch die Übertragungsschicht eine minimal notwendige Datenrate bereitgestellt, die ausschließlich für Kontrollverkehr eingesetzt wird. Dieser Signalisierungskanal ist beispielsweise mit dem D-Kanal bei ISDN vergleichbar, der 16 KBit/s für Steuerungs- und Verwaltungsdaten vorhält. Bei den von VDSL-Systemen genutzten Datenraten von bis zu 50 MBit/s wirkt sich der Signalisierungskanal nur sehr geringfügig aus.

Zusammenfassend gilt, dass bei der adaptiven Dienstgütesteuerung eine horizontale Inband-Signalisierung angewendet wird. Für den Informationsaustausch werden Pakete der Sicherungsschicht genutzt. Die sich dort befindende AQOS-Entität führt dann die vertikale Weiterleitung der Informationen an die Übertragungsschicht durch. Dieser Ansatz ermöglicht eine schnelle und sichere Signalisierung und ist durch den Gebrauch der Nutzdatenrate deutlich effizienter als die normalerweise eingesetzte Signalisierung in der Übertragungsschicht.

6.3.2.2 Austausch der Schätzwerte

Eine Aufgabe der Signalisierung stellt der Austausch der Schätzwerte der veränderlichen Eigenschaften dar.

Für die Schätzung der Verkehrscharakteristiken wird bei AQOS ein zentraler Ansatz verwendet. Die Gewinnung der Parameter erfolgt im DSLAM als zentraler Steuerinstanz. Ansätze zur Schätzung werden im bisherigen Verlauf der Arbeit bereits vorgestellt. Durch die Umsetzung im DSLAM wird für die Verkehrsschätzung keine horizontale Signalisierung benötigt. Die Parameter werden im AQOS-Modul der Sicherungsschicht des DSLAMs extrahiert und via Funktionsaufruf an das DDM-Modul weitergeleitet. Die Weiterleitung der Schätzwerte des Verkehrs an das DDM vollzieht sich analog zur Übertragung der im DSLAM gewonnenen Parameter der Kanalschätzung.

In Bezug auf den Cross-Layer-Entwurf stellt die Signalisierung der Kanalschätzung die interessantere Aufgabenstellung dar. Wie bereits in Abschnitt 2.6 erläutert wird, kann wegen der nichtreziproken Kanäle die Kanalschätzung nur im Empfänger der Übertragungsstrecke

durchgeführt werden. Ein zentraler Ansatz kommt dafür nicht in Frage. Die extrahierten Schätzwerte werden dezentral im jeweils empfangenden Netzknoten ermittelt und mittels horizontaler und vertikaler Signalisierung an das DDM-Modul übermittelt.

Abbildung 44 beschreibt den funktionalen Ablauf der Signalisierung der geschätzten Kanalparameter von Modem und DSLAM. Dabei wird zwischen externen und internen (unterbrochene Striche) Nachrichten unterschieden. Interne Nachrichten sind reine Funktionsaufrufe innerhalb eines Gerätes. Diese Nachrichten sind im Allgemeinen keinen Veränderungen oder Verfälschungen durch Übertragungsfehler unterworfen. Diese Nachrichten enthalten durch den Rückgabewert implizit eine Information über die Korrektheit des Austausches und werden nicht explizit bestätigt.

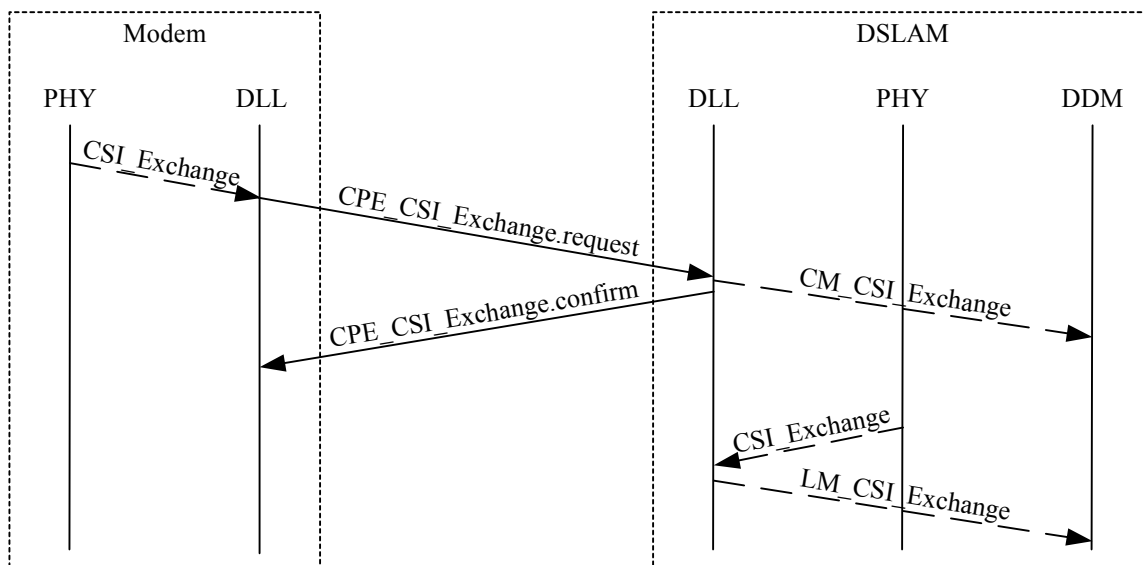


Abbildung 44: Austausch der Schätzwerte

Externe Nachrichten werden zwischen den Geräten über die reale Übertragungsstrecke ausgetauscht. Dabei können Informationen verändert werden oder verloren gehen. Die fehlerfreie Übertragung externer Nachrichten kann nicht in jedem Fall angenommen werden. Daher werden externe Nachrichten immer explizit bestätigt.

Die Zustandsinformationen des Kanals (Channel State Information, CSI) werden von der Übertragungsschicht an das AQOS-Modul der Sicherungsschicht per CSI_Exchange-Nachricht übertragen. Der Austausch dieser Nachricht geschieht intern.

Die horizontale Signalisierung der Schätzwerte erfolgt zwischen AQOS-Modulen in den Sicherungsschichten von Modem (Customer Premise Equipment, CPE) und DSLAM via CPE_CSI_Exchange.request. Diese Nachricht wird durch CPE_CSI_Exchange.confirm bestätigt, um eventuelle Übertragungsfehler erkennen und beheben zu können. Erreicht das Modem keine Bestätigung für eine Anfrage, wird diese wiederholt. Die Übertragung erfolgt entsprechend des DLL-Signalisierungsschemas in Informationseinheiten der Signalisierungsschicht, die auch Rahmen genannt werden.

Die Schätzwerte des Modems werden von der Sicherungsschicht des DSLAMs mithilfe der CM_CSI_Exchange-Nachricht an das DDM weitergeleitet. Diese enthält wiederum wegen der internen Auslegung als Funktionsaufruf implizit eine Bestätigung in Form des Rückgabewertes.

Die Weiterleitung der im DSLAM ermittelten Kanalschätzungen wird ebenfalls durch eine CSI_Exchange-Nachricht von der Übertragungsschicht an die Sicherungsschicht des DSLAMs eingeleitet. Eine Unterscheidung der Nomenklatur dieser Nachricht zwischen Modem und

DSLAM ist überflüssig, da sie ausschließlich lokale Bedeutung hat. Die Kanalschätzungen des DSLAMs werden von der DLL via LM_CSI_Exchange an das DDM weitergeleitet. Hierbei ist die Kenntlichmachung der Informationsquelle durch das vorgestellte LM für Linecard-Management notwendig. Die Nachrichten vom CPE werden durch ein CM gekennzeichnet.

Es kann zusammengefasst werden, dass die Signalisierung der geschätzten Kanalparameter von den Übertragungsschichten der Netzknoten an das DDM den internen vertikalen und den externen horizontalen Austausch von Informationen erfordert. Die Realisierung erfolgt mittels Cross-Layer-Entwurfsverfahren. Dabei werden Informationen an die Übertragungs- und Sicherungsschicht übermittelt und von diesen gemeinsam verwendet. Zur Vermeidung von Übertragungsfehlern wird der Empfang horizontaler Nachrichten bestätigt.

6.3.2.3 Upstream-Signalisierung

Die Signalisierung der Parameter für die beiden Übertragungsrichtungen erfolgt unabhängig voneinander. Dieser Abschnitt beschreibt die Signalisierung für die Upstream-Übertragung vom Teilnehmer zum Netz. Den Ablauf des erfolgreichen Informationsaustausches für die Information und Aktivierung neuer Übertragungsparameter zeigt Abbildung 45. Die Nomenklatur und Kennzeichnung der vertikalen und horizontalen Nachrichten lehnt sich an den Austausch der Schätzwerte an.

Die Signalisierung neuer Übertragungsparameter wird durch das DDM mit einer CM_STP_Create.request-Nachricht initiiert. Ziel dieser Nachricht ist die Etablierung eines neuen STP für die Upstream-Richtung und dessen Aktivierung. Bei Erhalt einer solchen Nachricht fragt die Sicherungsschicht durch ein CPE_Store.request die Übertragungsschicht des DSLAM, ob die gewählten Parameter akzeptiert werden. Bei positiver Antwort (CPE_Store.confirm) werden die Informationen an das Modem übermittelt.

Im Modem findet ebenfalls zuerst eine Abfrage statt, ob die gewählten Parameter prinzipiell eingesetzt werden können (CPE_Store.request => CPE_Store.confirm). Damit wird sichergestellt, dass die durch das DDM gewählten Übertragungsparameter wirklich verfügbar sind.

Bei positiver Bestätigung wird die Übertragungsschicht durch ein CPE_Activate.request aufgefordert, den neuen STP zu aktivieren und im weiteren Verlauf der Übertragung zu benutzen. Die erfolgreiche Aktivierung wird dem AQOS-Modul in der Sicherungsschicht durch eine CPE_Activate.confirm-Nachricht mitgeteilt.

Durch die DLL des Modems wird eine horizontale Signalisierung an die Partnerinstanz im DSLAM durchgeführt. Dadurch wird der DSLAM von der Aktivierung der neuen Übertragungsparameter informiert.

Die Aktivierung der neuen Parameter wird ebenfalls in der Übertragungsschicht angezeigt. Aus der Literatur [130] sind dazu verschiedene Ansätze bekannt. In dieser Arbeit wird die Verwendung eines Bits (Trigger Bit), welches die Aktivierung des neuen STP anzeigt, verwendet. Der Name der Signalisierungsinformation (Trig_Bit.up) ist davon abgeleitet. Es ist zu erwähnen, dass diese Information keine eigenständige Nachricht darstellt, sondern als Kontrollinformation in der Rahmenstruktur übermittelt wird. Da dem Empfänger die neuen Übertragungsparameter bereits bekannt sind, kann theoretisch auf Trig_Bit.up verzichtet werden. In dieser Arbeit wird aus Gründen der höheren Zuverlässigkeit jedoch von der expliziten Signalisierung in der Übertragungsschicht ausgegangen. Bei Verlust der Information durch Übertragungsfehler kann auf die selbstständige Erkennung der Bitbelegung zurückgegriffen werden.

Das Erkennen des neuen STP wird der DLL des DSLAM mitgeteilt (CPE_Trig_Bit.confirm). Die gesamte Signalisierung wird durch die CM_STP_Create.confirm-Nachricht durch die DLL des DSLAM an das DDM abgeschlossen. Zur Erhaltung der Konsistenz der Übertragung und der Stabilität des Verfahrens kann das DDM vor dem Empfang dieser Nachricht keine neue Upstream-Signalisierung initiieren. Es kann immer nur eine Signalisierung pro Richtung durchgeführt werden.

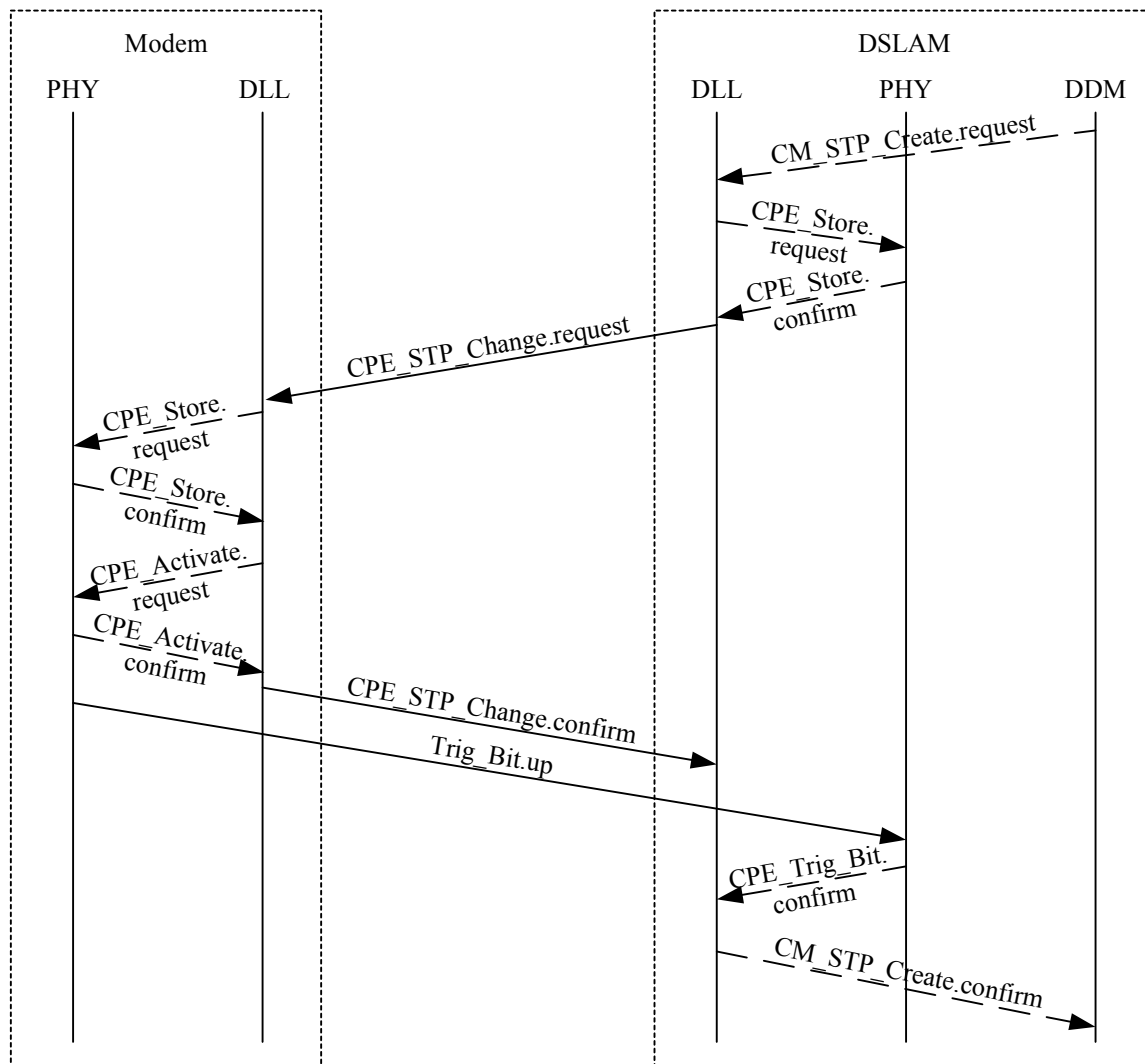


Abbildung 45: Neuaushandlung und Aktivierung in Upstream-Richtung

Das in Abbildung 45 vorgestellte Signalisierungsschema illustriert die Sequenz der fehlerfreien Aktivierung des STP. Natürlich beachtet der Protokollentwurf auch eventuell auftretende Übertragungsfehler. Dazu werden Bestätigungen und intervallbasierte Zeitgeber (Timer) verwendet. Bei Ausbleiben einer Rückmeldung geht das Protokoll nach einer bestimmten Zeitspanne davon aus, dass die Nachricht verloren gegangen ist. Je nach Bedarf wird die Nachricht dann wiederholt oder die Signalisierung abgebrochen. Die Fehlerschutzmechanismen sind ausschließlich für die Nachrichten der horizontalen Signalisierung notwendig, welche zwischen den Netzknoten ausgetauscht werden. Aufgrund ihrer internen Behandlung sind die vertikalen Nachrichten nicht von Verfälschungen betroffen. Der vollständige Protokollentwurf wird in Anhang A vorgestellt.

Als Fazit der Erläuterungen dieses Abschnitts wird festgestellt, dass die Signalisierung der Übertragungsparameter eine Kombination aus interner vertikaler und externer horizontaler Signalisierung darstellt. Intern werden die Nachrichten zwischen den Protokollschichten ausgetauscht. Die externe Signalisierung vollzieht sich zwischen den beteiligten Netzknoten. Durch dieses Cross-Layer-Entwurfsverfahren wird sichergestellt, dass die Informationen allen involvierten Schichten mitgeteilt werden und dass der Austausch auch bei Übertragungsfehlern reibungslos vonstatten geht.

6.3.2.4 Downstream-Signalisierung

Abbildung 46 zeigt die vollständige Neuaushandlung und Aktivierung der Übertragungsparameter in Downstream-Richtung vom DSLAM zum Modem. Auch in diesem Fall wird die Signalisierung vom DDM durch eine LM_STP_Create.request-Nachricht ausgelöst. Ziel dieser Nachricht ist die Etablierung eines neuen STP in den Netzknoten und dessen Aktivierung.

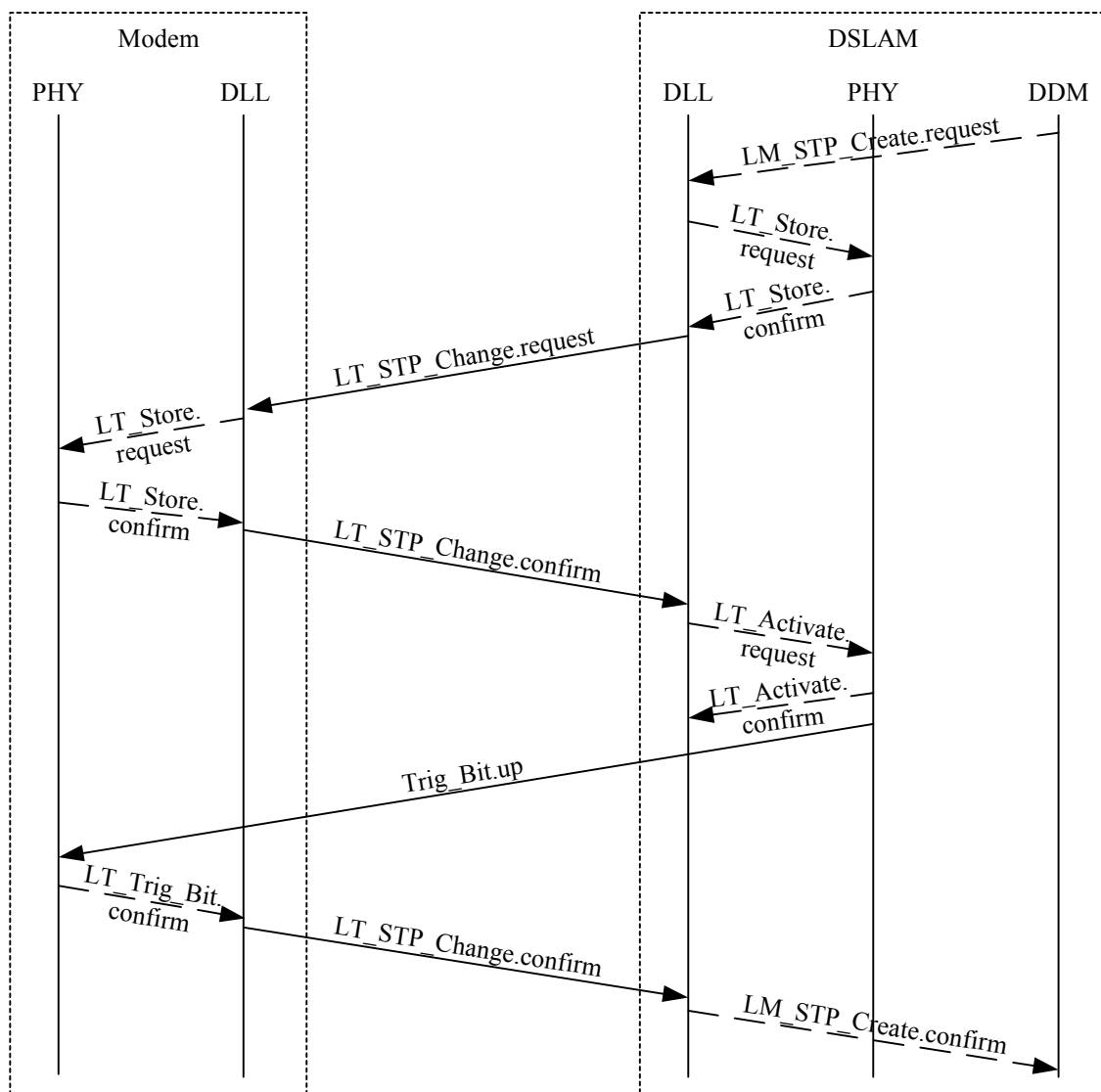


Abbildung 46: Neuaushandlung und Aktivierung in Downstream-Richtung

Nach Erhalt dieser Nachricht in der Sicherungsschicht validiert die Übertragungsschicht des DSLAM die gewählten Parameter. Die Übertragungsschicht des DSLAM wird über den neuen

STP per vertikaler Signalisierung informiert. Nach deren erfolgreichen Abschluss erfolgt die horizontale Signalisierung (LT_STP_Change.request) an die DLL des Modems. Im Modem wird ebenfalls geprüft (LT_Store.request => LT_Store.confirm), ob der neue STP in der Übertragungsschicht anwendbar ist. Ist dies der Fall, erfolgt eine Bestätigung der Bereitstellung (LT_STP_Change.confirm) des neuen STP an die DLL der DSLAM.

Nach der Übermittlung der neuen Übertragungsparameter an das Modem kann der STP aktiviert werden. Die entsprechende Anfrage (LT_Activate.request) wird durch die Übertragungsschicht beantwortet (LT_Activate.confirm).

Bei der Aktivierung des neuen STP wird auch bei der Downstream-Signalisierung ein Bit in der Rahmenstruktur der Übertragungsschicht gesetzt (Trig_Bit.up). Daran kann der Empfänger erkennen, dass der neue STP aktiv ist. Natürlich gilt auch hier, dass das Setzen des Bits nicht notwendig ist. Allerdings erhöht es die Zuverlässigkeit der Signalisierung signifikant.

Das Erkennen des neuen STP wird der DLL des Modems mitgeteilt (LT_Trig_Bit.confirm). Diese informiert seine Partnerinstanz im DSLAM via LT_STP_Change.confirm. Die gesamte Signalisierung wird durch die LM_STP_Create.confirm-Nachricht durch die DLL des DSLAM an das DDM abgeschlossen. Aus Gründen der Stabilität und der Datenkonsistenz kann das DDM vor dem Empfang dieser Nachricht keine neue Downstream-Signalisierung initiieren. Es kann immer nur eine Signalisierung pro Richtung durchgeführt werden.

Bei der Signalisierung wird besonderes Augenmerk auf die Konsistenz der Daten und die Erhaltung der Synchronisierung der beteiligten Netzknoten gelegt. Die Benutzung fehlerhafter STP hätte fatale Folgen und könnte zur Unterbrechung der Übertragung führen. Deshalb erfolgt stets zuerst die Information über die neuen Parameter, bevor diese verwendet werden. Dadurch sind die betroffenen Instanzen bereits vor der Aktivierung über die Veränderung informiert. Dies erhöht die Stabilität und Sicherheit der Adaption.

Die vorgestellte Nachrichtensequenz bildet die fehlerfreie Signalisierung ab. Der vollständige Protokollentwurf beachtet auch mögliche Übertragungsfehler und ist in Anhang A dargestellt.

6.3.3 Protokollvalidierung

Der vorgeschlagene Cross-Layer-Protokollentwurf für die AQOS-Signalisierung wird einer Analyse und Validierung anhand des in Abbildung 47 beschriebenen Modells unterzogen. In diesem Modell sind alle benötigten Komponenten und ihre Funktionen realisiert.

Das Modell besteht generell aus zwei Teilen, dem Modem und dem DSLAM. Das im Protokollentwurf auch CPE genannte Modem besteht aus den drei Teilen Sicherungsschicht (DLL), Übertragungsschicht (PHY) und Link-Monitor. Aufgaben des Link-Monitors sind die Überwachung des Kanals und die Information über Veränderungen der Eigenschaften an die Übertragungsschicht. Die Übertragungsschicht interagiert vor allem mit der Sicherungsschicht, aber auch durch die Trigger-Bit-Nachricht mit der Partnerinstanz im anderen beteiligten Netzknoten. Der Großteil der Signalisierung wird durch die DLL gesteuert.

Der Aufbau des auch LT genannten DSLAM ist prinzipiell ähnlich. Zusätzlich zu der Funktionalität des Modems ist das Dienstgüte- und Datenratenmanagement in den DSLAM integriert. Die DLL des DSLAMs stellt die Schnittstelle zwischen dem DDM und den anderen Komponenten dar.

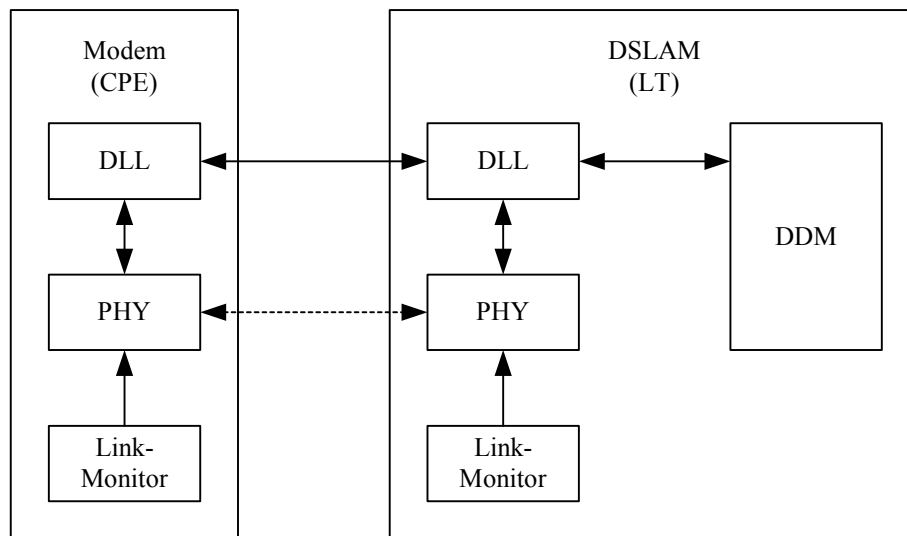


Abbildung 47: Cross-Layer-Systemmodell des Protokolls

Das entworfene Protokoll wird mithilfe eines SDL-Validators [226] auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Dabei wird die Eindeutigkeit des entworfenen Automaten getestet. Beispielsweise wird untersucht, ob alle Zustände erreicht und auch wieder verlassen werden können. Dabei werden sowohl zufällige als auch baumstrukturierte Nachrichtenabläufe verwendet. Darüber hinaus werden Tests mit verschiedenen Nachrichtensequenzen (Message Sequence Charts) durchgeführt und die korrekte Abwicklung getestet. Ein Beispiel für eine Sequenz wird in Anhang A vorgestellt.

Die Ergebnisse der Validierung des AQOS-Signalisierungsprotokolls listet Tabelle 7 auf. Sie zeigen die Plausibilität des entworfenen Cross-Layer-Verfahrens. Das Protokoll ist frei von redundanten Zuständen und kann auch nicht dauerhaft blockiert werden.

Parameter	Ergebnis
Anzahl der Zustände	420
redundante Zustände	0
dauerhaft blockierende Zustände	0
Anzahl der Reporte	0

Tabelle 7: Ergebnisse der Protokollvalidierung

6.4 Ergebnisse der Leistungsbewertung

Nach der Vorstellung und Validierung des Signalisierungsprotokolls für die adaptive Dienstgütesteuerung in Abschnitt 6.3 bewertet der vorliegende Abschnitt die Leistungsfähigkeit des Cross-Layer-Verfahrens.

6.4.1 Simulationsmodell und Vergleichsverfahren

Die Leistungsbewertung des Signalisierungsprotokolls basiert auf einem VDSL-Simulationsmodell entsprechend [68, 69]. Das vorgeschlagene Signalisierungsverfahren wird mit den durch die VDSL-Standards definierten Verfahren zur Veränderung der Bitbelegung verglichen. Konkret erfolgt eine Leistungsbewertung der AQOS-Signalisierung und des Informationsaustausches mittels des VDSL Overhead Channels (VOC) [69].

Der VOC bietet die Möglichkeit, Veränderungen der Übertragungsparameter zu kommunizieren. Die entsprechende Funktionalität wird in der VDSL-Nomenklatur als Bit Swapping bezeichnet. Das Bit Swapping und seine Erweiterung Express Swapping ist für die langsame Reaktion auf Veränderungen der Übertragungsparameter spezifiziert. Die dynamische Anpassung der Datenrate ist im Standard explizit nicht erlaubt [6]. Aufgrund seiner größeren Schnelligkeit wird im weiteren Verlauf das Express Swapping als Referenz bei der Leistungsbewertung des AQOS-Signalisierungsverfahrens verwendet.

Der VOC dient der Übertragung von Konfigurations- und Aktivierungsnachrichten für die Übertragungsstrecke. Mit den durch die Standards definierten Vorgaben kann eine Datenrate von 32 KBit/s im VOC erreicht werden.

Die Express Swap Nachricht wird im VOC übermittelt und dient der Veränderung der Bitbelegung. Zwischen verschiedenen VOC-Nachrichten werden mindestens 20 Leerbytes gesendet, um die Nachrichten zu unterscheiden. Diese Leerbytes werden auch dann übertragen, wenn keine VOC-Daten zu transferieren sind.

6.4.2 Signalisierungsverzögerung

Der Vergleich der Verzögerung einer Signalisierungsnachricht bei verschiedenen Datenraten leitet die Leistungsbewertung des vorgeschlagenen Signalisierungsverfahrens ein. Die Signalisierungsverzögerung wird ausgewählt, da sie ein Maß für die Dauer der Signalisierung darstellt. Eine kurze Dauer ist wünschenswert, da sie zeitnahe Reaktionen auf Veränderungen der Parameter ermöglicht.

Abbildung 48 vergleicht die zeitliche Verzögerung bei der Übermittlung einer 512 Byte großen Signalisierungsnachricht bei AQOS und VDSL Express Swapping in Abhängigkeit von der verfügbaren Datenrate.

Bei der VDSL-Signalisierung ändert sich die Übertragungsdauer nicht, weil stets der VOC mit konstanter Datenrate genutzt wird. Demgegenüber kann bei der AQOS-Signalisierung auf die gesamte Nutzdatenrate zurückgegriffen werden. Die benötigte Zeit für die Übermittlung einer Nachricht sinkt deshalb mit zunehmender Datenrate. Abbildung 48 illustriert, wie die Übertragungsdauer fällt, wenn die Gesamtdatenrate von 32 KBit/s auf 256 KBit/s gesteigert wird. Dieser Bereich wird aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit gewählt. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die gesamte Datenrate bei VDSL sehr viel höher ist, als in dem beschriebenen Beispiel. Bei den in der Standardisierung geforderten Datenraten von mehreren 10 MBit/s ist die tatsächliche Dauer der Übertragung bei AQOS noch weitaus geringer. Beispielsweise dauert der Transport einer Nachricht bei AQOS etwa 400 Mikrosekunden, wenn die Datenrate 10 MBit/s beträgt.

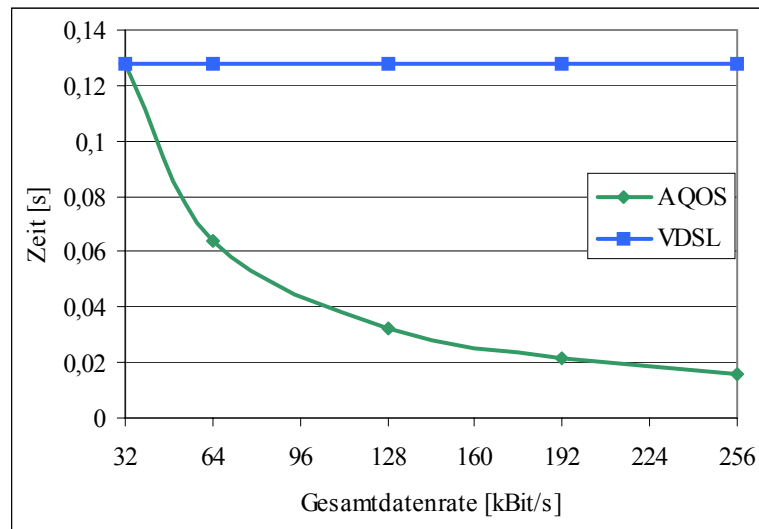


Abbildung 48: Signalisierungsverzögerung für 512 Byte große Nachrichten

Dies zeigt den großen Vorteil des Cross-Layer-Verfahrens bei AQOS gegenüber der herkömmlichen VDSL-Signalisierung via VOC. Durch die Nutzung der im Vergleich zum physikalischen Kontrollkanal sehr hohen Nutzdatenrate wird die Dauer des Nachrichtenaustausches deutlich reduziert. Die Signalisierung erfolgt bei AQOS sehr viel schneller als bei den herkömmlichen Verfahren. Somit kann auf Veränderungen der Eigenschaften bereits nach sehr kurzer Zeit reagiert werden. Die Anpassung der Parameter erfolgt direkt nach dem Auftreten der Veränderungen.

Dank der schnellen Cross-Layer-Signalisierung kann das AQOS-System sofort auf veränderliche Eigenschaften reagieren und die Datenrate kurzfristig anpassen. Wegen der raschen Einstellung des optimalen Arbeitspunktes des AQOS-Systems wird die Vergeudung von Ressourcen durch unnötig starke Störungen vermieden. Je schneller auf Veränderungen reagiert werden kann, umso weniger wird die Übertragung anderer Teilnehmer gestört. Die effizientere Nutzung der Übertragungskapazität wird für eine deutliche Leistungssteigerung der Übertragung auf Teilnehmeranschlussleitungen genutzt. Die Leistungsbewertung zeigt die im Vergleich zur VOC-Signalisierung deutlich kürzere Dauer für den Austausch und die Aktivierung der neuen Übertragungsparameter. Folglich ermöglicht AQOS eine schnelle Reaktion auf Veränderungen und eine Adaption der verwendeten Übertragungsparameter im laufenden Betrieb.

6.4.3 Dauer der gesamten Signalisierung

Aufgrund der Konzeption der AQOS-Signalisierung ergeben sich Unterschiede in der Signalisierungsdauer in Abhängigkeit von der Signalisierungsrichtung. Ein Kriterium des Protokollentwurfs besteht darin, dass beide Netzknoten erst über neue Übertragungsparameter informiert werden, bevor diese zum Einsatz kommen. Aus Abbildung 45 geht hervor, dass bei der Upstream-Signalisierung die Aktivierung der neuen Bitbelegung durch das Modem bereits nach der ersten horizontalen Signalisierungsnachricht vom DSLAM durchgeführt werden kann. Die interne Signalisierung im DSLAM erfolgt bereits vorher. Im Gegensatz dazu muss bei der Downstream-Signalisierung entsprechend Abbildung 46 zuerst das Modem informiert werden. Danach kann der DSLAM die neue Bitbelegung aktivieren.

Wegen dieser Entwurfsunterschiede der Signalisierung in Up- und Downstream-Richtung ergibt sich eine Differenz in der Signalisierungsdauer von mindestens der Laufzeit einer

horizontalen Nachricht. Tabelle 8 listet die gesamte Signalisierungsdauer in Abhängigkeit von der Übertragungsrichtung und Paketgröße der Nachrichten auf. Als Paketgrößen werden die Werte 256 Byte, 512 Byte und 1024 Byte gewählt. Unter Beachtung der maximalen Anzahl von etwa 1000 Parametern je 4 Bit pro Nachricht und entsprechender Komprimierung decken diese Werte das Spektrum der zu erwartenden Nachrichtengröße ab.

Datenrate [kBit/s]	Downstream			Upstream		
	256 Byte	512 Byte	1024 Byte	256 Byte	512 Byte	1024 Byte
16	0,139	0,267	0,523	0,134	0,262	0,518
32	0,071	0,135	0,263	0,068	0,132	0,26
64	0,037	0,069	0,133	0,035	0,067	0,131
96	0,025	0,047	0,090	0,024	0,045	0,088
128	0,020	0,036	0,068	0,018	0,034	0,066
256	0,011	0,019	0,035	0,010	0,018	0,034

Tabelle 8: Signalisierungsdauer in Sekunden je Richtung und Paketgröße

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass die Unterschiede in der Gesamtdauer der Signalisierung nur sehr gering sind und im Millisekundenbereich liegen. Bei dem vorgeschlagenen Cross-Layer-Verfahren kann also von einer sehr schnellen Signalisierung in beide Richtungen ausgegangen werden.

Da die Downstream-Signalisierung etwas länger dauert und die Upstream-Signalisierungsnachrichten beim Austausch von DSLAM zu Modem den Downstream-Nutzdatenpfad verwenden, sollte bei bidirektionaler Anpassung zuerst die Veränderung der Downstream-Richtung initiiert werden. Dadurch kommt die Upstream-Signalisierung bei bereits erfolgter Downstream-Signalisierung in den Genuss der neuen Transportparameter, die besser an die aktuellen Eigenschaften angepasst sind. Generell gilt jedoch, dass die Unterschiede der Gesamtdauer der Signalisierung ausgesprochen gering sind. Prinzipiell dauert die Signalisierung bei größeren Paketen länger. Dieses Ergebnis ist verständlich, weil mehr Daten zu übertragen sind. Aus Tabelle 8 geht hervor, dass bei einer Datenrate von 32 KBit/s die Signalisierung und Aktivierung stets weniger als 263 Millisekunden dauert.

Die Signalisierung erfolgt meist beim Aufbau einer Verbindung. Zu diesem Zeitpunkt sind kurze Verzögerungen durchaus tolerabel. Ein Anwendungsbeispiel ist die Verzögerung des Wähltons nach dem Abheben eines Telefonhörers. Es kann angenommen werden, dass eine Verzögerung von etwa 260 Millisekunden von den meisten Teilnehmern nicht bemerkt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Verringerung der zu signalisierenden Datenmenge und Erhöhung der Signalisierungsdatenrate der Informationsaustausch deutlich beschleunigt werden kann. Die Datenmenge kann beispielsweise durch eine geeignete Codierung reduziert werden. Verfahren der Lauflängencodierung bieten sich dazu an.

Die in dem Beispiel gewählten niedrigen Signalisierungsdatenraten von 16-32 KBit/s stellen die unteren Grenzen der verfügbaren Kapazität dar. Beispielsweise setzt das vergleichsweise schmalbandige ISDN ebenfalls einen Steuerkanal mit 16 KBit/s ein. Daher sind die oben genannten Werte als absolut unterste Grenze zu werten. Unter normalen Umständen werden deutlich höherer Kapazitäten eingesetzt. Die niedrige Signalisierungsdauer bei geringer Datenrate verdeutlicht die guten Eigenschaften der AQOS-Signalisierung in einem breiten Spektrum von Anwendungsszenarien.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein Verfahren für die schnelle horizontale und vertikale Signalisierung bei der adaptiven Dienstgütesteuerung vorgeschlagen. Während bei der horizontalen Signalisierung Nachrichten zwischen den beiden beteiligten Netzknoten DSLAM und Modem transferiert werden, beinhaltet die vertikale Signalisierung die Informationsverbreitung zwischen den einzelnen Protokollschichten innerhalb eines Gerätes.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird ein Cross-Layer-Signalisierungsverfahren für die adaptive Dienstgütesteuerung bei Teilnehmeranschlussnetzen entworfen, validiert und leistungsbewertet.

Die Signalisierung der Übertragungsparameter bei der adaptiven Dienstgütesteuerung stellt eine Kombination aus interner vertikaler und externer horizontaler Signalisierung dar. Intern werden die Nachrichten zwischen den Protokollschichten ausgetauscht. Die externe Signalisierung vollzieht sich zwischen den beteiligten Netzknoten. Durch dieses Cross-Layer-Entwurfsverfahren wird sichergestellt, dass die Informationen allen involvierten Schichten mitgeteilt werden, und dass der Austausch auch bei Übertragungsfehlern reibungslos vonstatten geht.

Die horizontale Signalisierung verläuft Inband und nutzt die gleichen Übertragungsressourcen, wie die Nutzdaten. Für die Informationsübermittlung werden Pakete der Sicherungsschicht verwendet. Aus der Sicherungsschicht erfolgt dann die vertikale Weiterleitung der Informationen an die Übertragungsschicht. Dieser Ansatz ermöglicht eine schnelle und sichere Signalisierung und ist durch die Verwendung der Nutzdatenrate deutlich effizienter als die sonst übliche Signalisierung in der Übertragungsschicht. Die Neuartigkeit des AQOS-Verfahrens besteht darin, dass durch den Cross-Layer-Ansatz Parameter der Übertragungsschicht als Informationseinheit der höheren Sicherungsschicht übertragen werden. Diese Vorgehensweise ist flexibler als das normalerweise eingesetzte Top-Down-Schema, bei dem Informationen höherer Schichten in darunter liegenden Schichten im Nutzdatenstrom übermittelt werden.

Die Ergebnisse der Validierung zeigen die Plausibilität des entworfenen Cross-Layer-Verfahrens. Zur simulativen Leistungsbewertung wird ein Vergleich mit dem Express Swapping von VDSL durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Inband-Cross-Layer-Signalisierung von AQOS zu einer deutlich schnelleren Reaktion auf Veränderungen führt.

Aufgrund der schnellen Cross-Layer-Signalisierung kann das AQOS-System sofort auf veränderliche Eigenschaften reagieren. Die Datenrate kann kurzfristig an die sich ändernden Eigenschaften angepasst werden. Die rasche Einstellung des optimalen Arbeitspunktes des AQOS-Systems vermeidet die Vergeudung von Ressourcen durch unnötig starke Störungen. Je schneller auf Veränderungen reagiert werden kann, umso weniger wird die Übertragung anderer Teilnehmer gestört. AQOS ermöglicht eine schnelle Reaktion auf Veränderungen und eine Anpassung der Transportparameter im laufenden Betrieb. Dadurch kann bei Veränderungen der beste Arbeitspunkt schnell wieder hergestellt werden. Dies mündet in einer optimierten Übertragung bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen.

7 Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung

Dieses Kapitel beleuchtet Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung am Beispiel von Netzprozessoren. Nach einer Einführung in Abschnitt 7.1 stellt Abschnitt 7.2 grundlegende Aspekte der Netzprozessoren dar. In Abschnitt 7.3 werden Realisierungsmöglichkeiten der adaptiven Dienstgütesteuerung bei Netzprozessoren untersucht. Der Abschnitt 7.4 diskutiert Aspekte der Dimensionierung eines AQOS-Systems. Des Weiteren wird in Abschnitt 7.5 die Komplexität des Dienstgüte- und Datenratenmanagements abgeschätzt. Abschnitt 7.6 fasst die Realisierungsaspekte zusammen.

7.1 Einführung

In der Frühzeit der paketvermittelten Übertragung war die Funktionalität in den Netzgeräten so aufgeteilt, dass die Übertragungsschicht in Hardware und die Aufgaben der höheren Protokollschichten als Software auf einem Mehrzweckprozessor (General Purpose Processor, GPP) realisiert wurden. Durch die starke Zunahme der Datenraten in der Folgezeit zeigte sich immer deutlicher, dass die Software im Nutzdatenpfad den Flaschenhals in Bezug auf die Bearbeitungsgeschwindigkeit darstellte.

Als Reaktion darauf wurden anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) entwickelt, welche die ursprüngliche Software-Funktionalität in höherer Geschwindigkeit ausführen konnten und können. Die gegenwärtige ASIC-Generation bearbeitet die Aufgaben der Sicherungs- und Vermittlungsschicht bei Datenraten von bis zu 10 GBit/s [53]. Aufgrund des zeitaufwändigen Entwicklungsprozesses und des spezifischen Entwurfs sind ASICs für die schnellen Veränderungen der genutzten Protokolle und ihrer Eigenschaften nur ungenügend geeignet.

Anwendungsspezifische Prozessoren (Application Specific Integrated Processor, ASIP) vereinen die von ASICs bekannte Bearbeitungsgeschwindigkeit mit der Flexibilität von Software-Lösungen. ASIPs sind flexibel programmierbar, realisieren allerdings zeitkritische Aufgaben als Hardware. Damit können die Operationen verschiedener Protokolle generisch entwickelt werden. Auch während der Entwurfsphase können noch neue Funktionen hinzugefügt und Fehlfunktionen gehoben werden. Darüber hinaus lassen sich Probleme, die während des Betriebs der Geräte auftreten durch Erneuerung der Software lösen.

Folgende Implementierungsmöglichkeiten für die Funktionalität zur Übertragung sind derzeit gebräuchlich:

- ASIC
Spezifische Hardware-Lösung
- ASIP
Prozessor mit anwendungsspezifischem Instruktionssatz
- Ko-Prozessor
Hardware-Lösung mit begrenzt möglicher Konfiguration und Programmierung
- Field Programmable Gate Array (FPGA)
Auf Gatterebene programmier- und veränderbares Gerät
- Mehrzweckprozessoren (GPP)
Prozessor mit allgemein verwendbarem Instruktionssatz

Abbildung 49 ordnet die verfügbaren Implementierungsmöglichkeiten im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit und Flexibilität. ASICs besitzen die größte Leistungsfähigkeit, sind aber sehr unflexibel. Demgegenüber sind GPP sehr flexibel. Allerdings ist ihre Leistungsfähigkeit am geringsten. FPGAs und Ko-Prozessoren bieten einen Kompromiss zwischen beiden Eigenschaften und sind daher für verschiedene Anwendungsgebiete geeignet. Ein Nachteil von FPGAs sind die hohen Herstellungskosten.

Der Vergleich zeigt, dass ASIPs für viele Realisierungen von Übertragungssystemen der beste Ansatz sind [207]. Durch die Implementierung wichtiger Teilaufgaben in Hardware erreichen sie eine hohe Leistungsfähigkeit und sind aufgrund ihrer Programmierfähigkeit sehr flexibel.

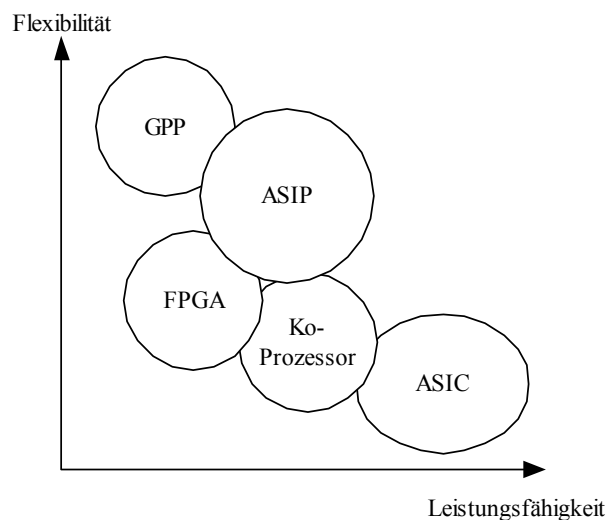


Abbildung 49: Einordnung der Realisierungsmöglichkeiten

Generell bieten ASIPs viele Vorteile, wie z. B. kürzere Entwicklungsphasen, Wiederverwendbarkeit und Flexibilität des Designs, Funktions-Upgrade bei bereits installierten Geräten und leichte Realisierung von kundenspezifischen Merkmalen.

Im Bereich der Datenübertragung werden diese ASIPs auch als Netzprozessoren (NP) bezeichnet. Ein anderes Beispiel für ASIPs sind digitale Signalprozessoren (DSP). Anwendungsgebiete von DSPs sind insbesondere arithmetische Operationen. Im weiteren Verlauf der Ausführungen wird aufgrund der besonderen Eignung für die adaptive Dienstgütesteuerung vorrangig auf Netzprozessoren eingegangen.

7.2 Grundlagen der Netzprozessoren

Eine Vielzahl verschiedener Netzprozessoren für unterschiedlichste Anwendungsfälle wurde in den letzten Jahren entwickelt. Nahezu alle führenden Hersteller, wie z. B. Intel [112, 113, 114], IBM [105] und Motorola [167], bieten entsprechende Produkte an.

Netzprozessoren werden häufig für die Bearbeitung der Pakete in den Netzgeräten verwendet. Typische Aufgaben von NPs sind beispielsweise Paketweiterleitung, Paketsegmentierung und -zusammenfügung, Paketmodifikation, Klassifizierung und Dienstgütebereitstellung [53].

NPs werden vor allem für die Bewältigung zeitkritischer Aufgaben eingesetzt. Weniger zeitsensitive Funktionen, wie z. B. Konfiguration, werden weiterhin in GPPs realisiert, weil sie zu komplex sind, um als Hardware implementiert zu werden. Ein Hauptvorteil von NP gegenüber GPP besteht in ihrem Design für Echtzeitanwendungen mit einer deterministischen Ausführungsdauer des Programmcodes. Im Gegensatz dazu können GPP wegen Techniken, wie Branch-Prediction und Interrupt-Handhabung, nur statistische Aussagen über die Ausführungsdauer des Codes machen [53]. Dies führt zu einer Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit der Geräte von der Last und zu Paketverlusten.

Gegenwärtige Ansätze versuchen, die Vorteile von NP und GPP zu vereinen. Daraus resultieren Konzepte, die NP und den als Host-Prozessor bezeichneten GPP innerhalb einer Hardware-Plattform umsetzen. Beispielsweise wird in [90] ein solches Konzept für den Einsatz in Edge-Geräten, wie dem DSLAM, vorgeschlagen. Dabei ist der NP für die Modifikation und Weiterleitung der Pakete und der Host-Prozessor für die Kontrollfunktionen und die Verwaltung der Zustandsinformationen verantwortlich. Abbildung 50 illustriert ein solches Realisierungsschema, bei dem sich das Gesamtsystem aus der NP-Plattform und dem Host-Prozessor zusammensetzt. Zwischen beiden Komponenten besteht eine echtzeitfähige Verbindung. Die Hauptkomponenten der NP-Plattform sind der NP selbst, die physikalischen Schnittstellen und die Speicher. Static Random Access Memory (SRAM) ist ein schneller und zuverlässiger Speicher, der nicht aufgefrischt werden muss. Leider ist SRAM sehr teuer und wird deshalb oft nur als Cache genutzt. Dynamic RAM (DRAM) ist der in herkömmlichen Computern meist verwendete Speicher. NPs sind oft mit einer kleinen Menge SRAM und einer größeren Kapazität an DRAM als Speicher ausgestattet. Der Host-Prozessor enthält neben dem Chipset noch den Prozessor (CPU) und DRAM-Speicher.

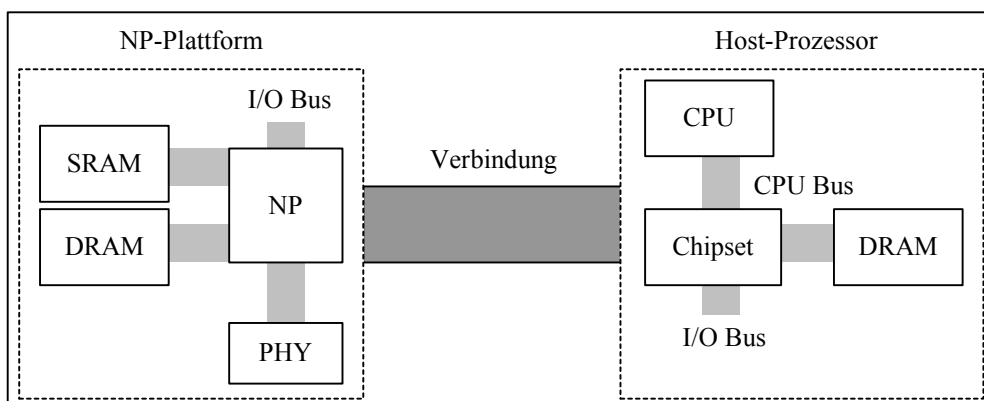


Abbildung 50: Kombinierte Realisierung von NP und Host-Prozessor

Die Realisierung eines NP-basierten DSLAM auf Basis der Trennung von Weiterleitungs- und Kontrollaufgaben wird in [172] gezeigt. Auf Basis dieser Entwicklungen soll im weiteren Verlauf des Kapitels ein Konzept für die Implementierung der AQOS-Funktionalität im

Netzprozessor Motorola C-5 Digital Communications Processor (DCP) vorgestellt werden. Der Motorola C-5 DCP wird wegen seiner guten Eignung für Edge-Knoten gewählt [207]. Aus den insbesondere in Kapitel 4 angestellten Überlegungen geht hervor, dass der DSLAM bei vielen Netzarchitekturen ein solcher Edge-Knoten ist. Damit ist der C-5 DCP für die Umsetzung der AQOS-Funktionalität im DSLAM geeignet.

Der Motorola C-5 DCP [167, 168] ist ein Mehrprozessor-NP. Er besteht aus 16 Kanalprozessoren (CP) und einem Host-Prozessor zur Koordination des Systems. Der C-5 DCP besitzt die folgenden fünf Ko-Prozessoren mit spezifischen Aufgaben:

- Executive Processor (XP)
Koordination mit externen Prozessoren (z. B. Host-Prozessor)
- Fabric Processor (FP)
Zur gemeinsamen Verwendung mehrerer C-5 DCP
- Table Lookup Unit (TLU)
Aufbau und Durchsuchung von Tabellen
- Queue Management (QMU)
Verwaltung der Paketwarteschlangen
- Buffer Management (BMU)
Schnelles und flexibles Speichermanagement

Abbildung 51 zeigt die generelle Architektur des Motorola C-5 DCP. Die Kanalprozessoren können einzeln genutzt oder für komplexere Aufgaben bzw. höhere Geschwindigkeiten gruppiert werden. Jeder Kanalprozessor besteht aus einem Prozessor mit reduzierter Instruktionsmenge (RISC) und zwei seriellen Datenprozessoren (SDP). Aufgaben des RISC-Prozessors sind z. B. Klassifizierung, Überwachung und Scheduling. Die SDP sind unter anderem für Validierung der Header, Extraktion von Inhalten, Prüfsummenbehandlung und Kodierung der ein- und ausgehenden Datenströme verantwortlich. Abbildung 52 verdeutlicht die Aufteilung der SDP für die Empfangs- (RxSDP) und Senderichtung (TxSDP).

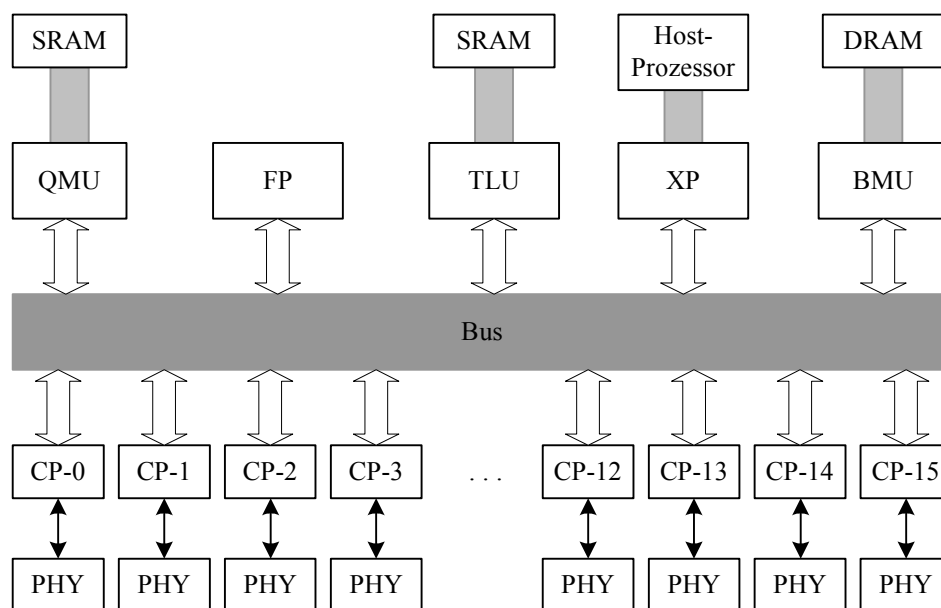


Abbildung 51: Vereinfachtes Blockdiagramm des Motorola C-5 DCP

Die SDP enthalten Hardware-Blöcke für die Bit- und Byte-Manipulation. Der gesamte Datenstrom einer Übertragungsrichtung durchläuft den jeweiligen SDP. So können im RxByte-Prozessor des RxSDP kontextbezogene Paketinhalte auf einfache Weise gewonnen werden, indem die entsprechenden Bytes extrahiert werden. Dies ermöglicht die effiziente Inspektion der Paketköpfe höherer Schichten (Deep Inspection).

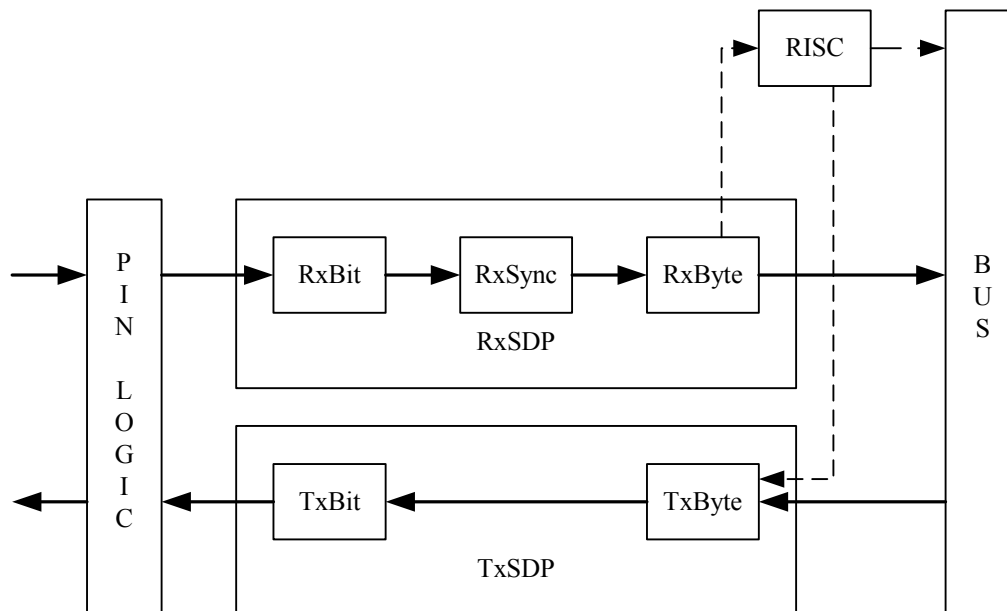


Abbildung 52: Vereinfachter Aufbau eines Kanalprozessors [103]

7.3 Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung im C-5 DCP

Bei der Realisierung der adaptiven Dienstgüte in Netzprozessoren sind die prinzipielle Eignung, die Aufteilung der AQOS-Funktionalität und deren Zuordnung zu den einzelnen Ko-Prozessoren und Hardware-Blöcken von besonderem Interesse. Die geschickte Aufteilung und die Ressourcen schonende Zuordnung sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit der im C-5 DCP zu implementierenden Funktionalität. Im Folgenden wird daher die Aufteilung der AQOS-Funktionalität und deren Zuordnung zu den NP-Komponenten untersucht und daraus die prinzipielle Eignung des C-5 DCP für die AQOS-Realisierung abgeleitet.

Bei der Realisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung sind die hier aufgelisteten Funktionen im NP-System zu realisieren:

- Dienstgüte- und Datenratenmanagement
- Verkehrsschätzung
- Verkehrsklassifizierung
- AQOS-Signalisierung
- Kanalschätzung

Die zeitnahe Reaktion der adaptiven Dienstgüte auf Veränderungen der Eigenschaften erfordert die Realisierung des DDM auf der gleichen Plattform wie die restliche AQOS-Funktionalität. So kann der Informationsaustausch zwischen den Netzknoten (Modem und DSLAM) und dem DDM in einer Weise stattfinden, die große zeitliche Verzögerungen vermeidet. Beim DDM ist für die Lösung des Gleichungssystems nach (5.11) eine Invertierung der Matrix $I - A_k$

erforderlich. Die dafür benötigte Rechenleistung übersteigt die bei den meisten Netzprozessoren verfügbaren Ressourcen deutlich. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei den herkömmlichen Aufgaben der Paketweiterleitung solch komplexe mathematische Berechnungen nicht notwendig sind. Daher wird beim Design der Netzprozessoren kein Wert auf die entsprechende Berechnungskapazität und -funktionalität gelegt. Beispielsweise unterstützt der Instruktionssatz des beim Motorola C-5 DCP für Offline-Berechnungen vorgesehenen Executive Processor keine Multiplikation und Division.

Die Neuberechnung der Übertragungsparameter erfolgt am Anfang und Ende der Übertragung eines Datenstroms. Deshalb wird die DDM-Funktionalität im Vergleich zur Paketbearbeitung bei der Weiterleitung relativ selten benötigt. Folglich ist die ständige Bereitstellung der für die Berechnung unabdingbaren mathematischen Ressourcen im NP wenig vorteilhaft.

Für die Realisierung des DDM in den Netzprozessoren bieten sich zwei verschiedene Ansätze an. Im ersten Fall wird das beispielsweise beim Netzprozessor Motorola C-5 DCP verwendete Entwurfsprinzip der Modularisierung und Aufteilung der Funktionalität in spezifische Ko-Prozessoren aufgegriffen. Im zweiten Fall kann die DDM-Funktionalität in den Host-Prozessor ausgelagert werden.

In ersterem Fall wird ein spezifischer Ko-Prozessor oder Hardware-Baustein für die DDM-Berechnung in den NP integriert. Dieser Ansatz führt zu einem speziellen Netzprozessorentwurf für das in den DSLAMs benötigte DDM. Aufgrund der relativ niedrigen Stückzahlen ist dieses Vorgehen mit hohen Entwurfs- und Produktionskosten der Netzprozessoren verbunden. Weiterhin werden relativ teure Ressourcen in den NP eingebunden, die nur sehr selten zum Einsatz kommen.

Demgegenüber bietet der zweite Ansatz mehrere Vorteile. Weil das DDM im Host-Prozessor durchgeführt wird, bedarf es keines spezifischen Entwurfs des Netzprozessors. Der NP bewahrt seine flexible Struktur und kann auch bei anderen Szenarien angewendet werden. Durch die höheren Stückzahlen entsteht ein erheblicher Kostenvorteil. Das Netzprozessor-Konzept basiert generell auf dem Ansatz, für die Paketweiterleitung nicht benötigte Funktionen außerhalb des NP zu implementieren. Die Auslagerung folgt diesem Grundsatz. Als Host-Prozessor kommen herkömmliche Mehrzweckprozessoren zum Einsatz. Dank der Realisierung des DDM auf dem Host können zudem die größere Flexibilität und der erweiterte Instruktionssatz im Host-Prozessor genutzt werden.

Wegen der mannigfaltigen Vorteile der Auslagerung der DDM-Funktionalität in den Host-Prozessor wird dieser Ansatz für die Implementierung bei Netzprozessor-Plattformen vorgeschlagen. Abbildung 53 zeigt die Einordnung des DDM in ein so gestaltetes Netzprozessorsystem. Die Kommunikation zwischen NP und Host-Prozessor koordiniert der XP. Der Host wird dabei über eine Peripheral Component Interconnect (PCI) Schnittstelle angebunden. Über die PCI-Schnittstelle kann das DDM direkt auf die Ressourcen des globalen I/O-Busses des NP zugreifen und von den NP-Blöcken angesprochen werden.

Die Kommunikation zwischen DDM und den anderen AQOS-Funktionen läuft also trotz der Auslagerung so ab, als ob das DDM im XP implementiert ist. Die entsprechende Funktionalität ist im Host-Prozessor umgesetzt. Im XP existieren nur Platzhalter für die Prozeduraufrufe des DDM. Für die Realisierung der DDM-Funktionalität kann der allgemeine Instruktionssatz des Host-Prozessors verwendet werden. Dies ermöglicht eine strukturierte und anwendungsspezifische Entwicklung unter Verwendung verschiedener Entwurfs- und Implementierungswerkzeuge.

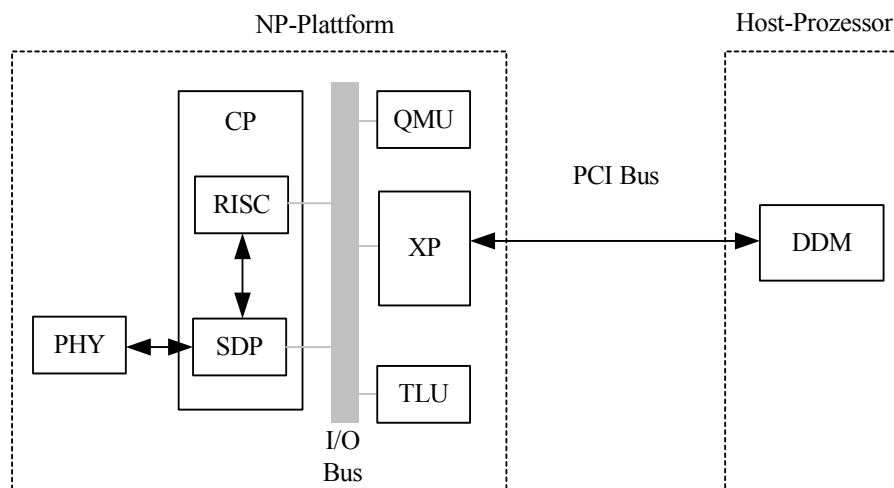


Abbildung 53: Einordnung des DDM im NP

Die für die Verkehrsklassifizierung und -schätzung notwendigen Informationen werden durch die Deep Inspection aus den zu übertragenden Nutzdaten gewonnen. Die in den Steuerpaketen (z. B. SIP oder RSVP) von QoS-Datenströmen enthaltenen Informationen können für die Schätzung der Art und Menge der zu übertragenden Daten genutzt werden. Dazu werden bei dem entsprechenden eintreffenden Paket die Bytes an den relevanten Positionen im RxByte-Prozessor extrahiert und an den RISC-Prozessor weitergeleitet. Dies ist sehr einfach möglich, da der gesamte Bytestrom den RxByte-Prozessor durchläuft. Der RxByte-Prozessor zählt vom Beginn eines Pakets die Bytes und überträgt die Inhalte bestimmter Stellen, der jeweiligen Positionen der Protokollkennzeichnungen, über den Speicher an den RISC-Prozessor. Auf die gleiche Weise können die für die AQOS-Klassifizierung benötigten Typinformationen aus den Paketköpfen der Nutzdaten extrahiert werden. Im RISC-Prozessor werden die Bytes ausgewertet und die Informationen über die Verkehrscharakteristiken an das DDM übermittelt. Bei der Auswertung kann Content Addressable Memory (CAM) verwendet werden. CAM-Befehle verringern bei Mehrfachentscheidungen und den daraus resultierenden Sprüngen die Codegröße erheblich.

Bei der Cross-Layer-Signalisierung werden Steuerungs- und Nutzdaten gemeinsam über den Kanal übertragen. Bei dieser Inband-Signalisierung ist die Unterscheidung und entsprechende Einordnung der einzelnen Verkehrsarten von besonderer Bedeutung. Aufgaben der Signalisierung sind vor allem das Senden und Empfangen sowie die Generierung und Auswertung der Signalisierungspakete. Beim Senden von Signalisierungsnachrichten muss der Nutzdatenstrom angehalten und ein Paket erzeugt werden. Die entsprechende Funktionalität wird im RISC-Prozessor realisiert, der über Registereinträge die Paketübertragung steuert. Die Paketinhalte werden vom DDM an den RISC-Prozessor geliefert und von dort über einen gemeinsamen Speicher an den TxByte-Prozessor weitergeleitet. Beim Empfangen wird auf die bereits beschriebene Klassifizierungsfunktion zurückgegriffen, die im RxByte-Prozessor implementiert ist. Auf Basis der Nachrichteninhalte entscheidet der RISC-Prozessor, wie mit der Nachricht zu verfahren ist (z. B. Weiterleitung an DDM oder Information des PHY).

Die Kanalschätzung findet in den Übertragungsbausteinen statt. Dabei werden Referenzdaten ausgewertet. Die Kanalschätzungen werden über den I/O-Bus an das DDM transferiert.

Für die Aufteilung der gesamten AQOS-Funktionalität bietet sich die folgende Struktur an:

- Host-Prozessor
 - Dienstgüte- und Datenratenmanagement (DDM)
- RISC-Prozessor des Kanalprozessors (CP)
 - AQOS-Signalisierung
 - Verkehrsschätzung
- SDP des Kanalprozessors
 - Verkehrsklassifizierung
- Physikalische Schnittstelle (PHY)
 - Kanalschätzung
- Executive Prozessor (XP)
 - Kommunikation zwischen den Funktionsblöcken des NP und Host-Prozessor

Auf Basis dieser Strukturierung kann der funktionale Ablauf des Informationsaustausches der adaptiven Dienstgüte im C-5 DCP entsprechend Abbildung 54 realisiert werden. Das DDM-Modul informiert den RISC-Prozessor des entsprechenden Kanalprozessors über den Wunsch zur Übertragung von AQOS-Steuerdaten. Danach wird im Sender der Nutzdatenstrom durch den RISC-Prozessor gestoppt. Dieser Vorgang erfolgt in der Pause zwischen zwei Paketen.

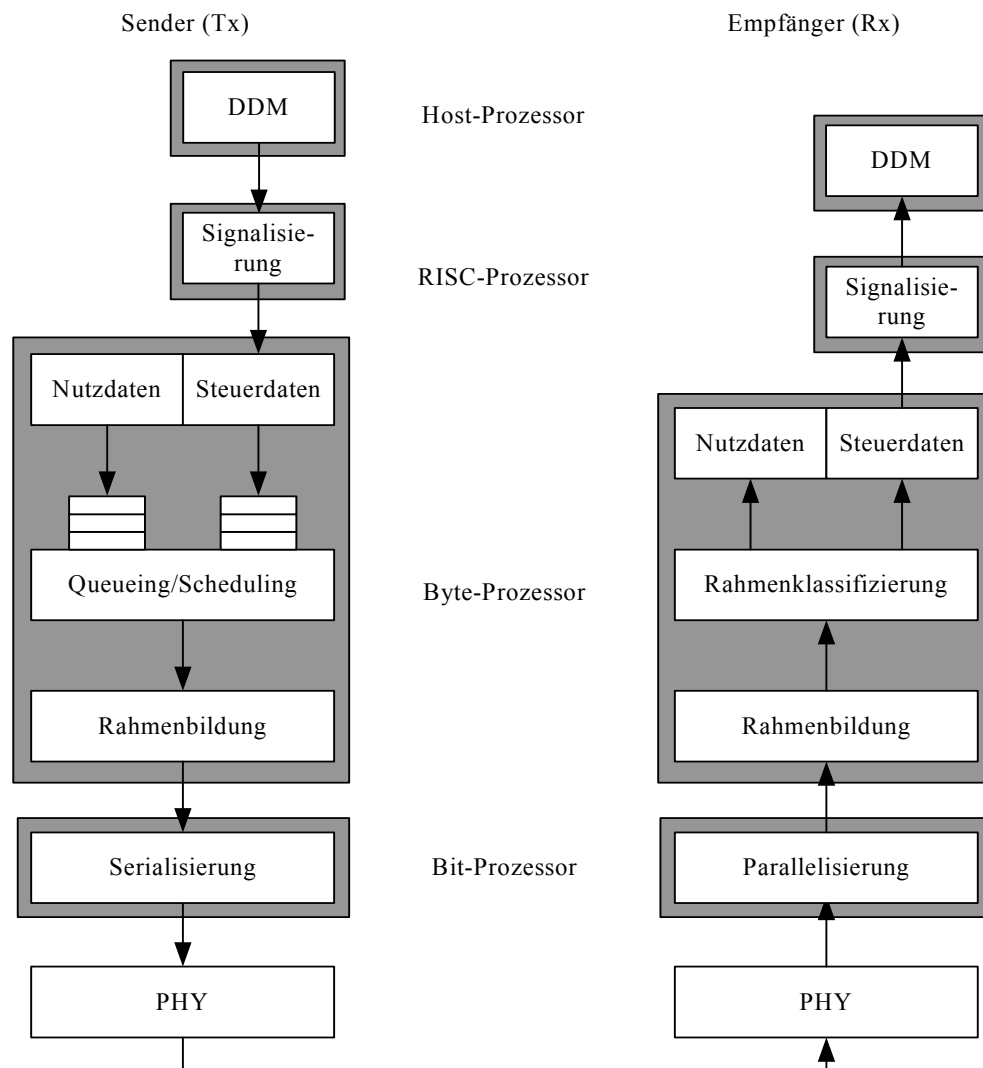


Abbildung 54: Funktionaler Ablauf der adaptiven Dienstgüte im C-5 DCP

Der RISC-Prozessor schreibt die Byte-Sequenz, die das AQOS-Signalisierungspaket darstellt, in den gemeinsam mit dem TxByte-Prozessor genutzten Speicher. Das Format der Nachricht und die Inhalte sind dem RISC-Prozessor bekannt. Der TxByte-Prozessor liest die Daten aus dem Speicher und formt daraus die aufeinander folgenden Bytes, die vom TxBit-Prozessor in einen Bitstrom serialisiert und über den Kanal übertragen werden.

Im Empfänger wird die Bitsequenz im RxBit-Prozessor zu Bytes parallelisiert und via RxSync-Prozessor an den RxByte-Prozessor übermittelt. Dieser entfernt die Rahmenmarken und extrahiert die Protokollmarke. Für die beispielsweise bei der Klassifizierung notwendige Auswertung der Inhalte kann wiederum CAM verwendet werden. Wird eine AQOS-Nachricht erkannt, übermittelt der RxByte-Prozessor nach erfolgreicher Prüfsummenvalidierung die Nutzdaten an den RISC-Prozessor. Dieser entnimmt die enthaltenen Informationen und leitet diese an die betroffenen Komponenten, z. B. DDM-Modul, zur Bearbeitung weiter.

7.4 Aspekte der AQOS-Systemdimensionierung

Zur Betrachtung der Systemdimensionierung wird in diesem Abschnitt ein Vergleich zwischen der Komplexität der AQOS-Funktionalität und den aus der Literatur (z. B. [152] und [172]) bekannten DSLAM- und Dienstgüterealisationen auf Basis von Netzprozessoren vorgenommen.

Die AQOS-Funktionalität wird je nach Auslegung der Verkehrsschätzung jeweils beim Auf- und Abbau von Verbindungen oder Sitzungen benötigt. Zu diesen Zeitpunkten ändern sich die Datenratenanforderungen durch neue oder beendete Datenströme. Aufgrund der stärkeren Schwankung der Verkehrseigenschaften erfolgt die Ausführung der adaptiven Dienstgüte sehr viel häufiger infolge von veränderten Verkehrsanforderungen. Daher kann der Einfluss der Kanalschätzung auf die Ausführungshäufigkeit der adaptiven Dienstgütesteuerung vernachlässigt werden.

Die Ausführung der AQOS-Funktionalität beim Auf- und Abbau der Verbindungen oder Sitzungen wirkt sich nicht auf die für die Paketbehandlung (z. B. Weiterleitungsentscheidung, und PPP-Terminierung, Dienstgüte) benötigten Ressourcen aus, da zum Zeitpunkt der Ausführung von AQOS die entsprechenden Nutzdatenströme noch nicht oder nicht mehr aktiv sind. Mit anderen Worten vollzieht sich AQOS vor und nach der jeweiligen Übertragung. AQOS beeinflusst die Prozessorlast bei der Paketbehandlung während der Datenübertragung nicht negativ. Durch den gleichzeitigen Ablauf der AQOS-Signalisierung und des oft mehrere 100 Millisekunden dauernden Verbindungsaufbaus der Anwendungen (z. B. TCP, SIP) vermeidet das Verfahren zusätzliche Verzögerungen der Nutzdaten. D. h., die AQOS-Signalisierung ist abgeschlossen, bevor die Übertragung der Nutzdaten begonnen hat. Des Weiteren wird die AQOS-Funktionalität im Vergleich zu der regelmäßigen Behandlung der Nutzdatenpakete sehr selten ausgeführt. Je nach verwendetem Ansatz für die Verkehrsschätzung und betrachteter Verkehrsart liegt die Zeitspanne zwischen den Ausführungen der AQOS-Funktionalität im Bereich von etwa 100 Sekunden bis zu 100 Minuten. Beispielsweise wird AQOS nur beim Auf- bzw. Abbau einer Video-Übertragung angewendet, während die Paketbehandlung jedes einzelne übertragene Nutzdatenpaket betrachtet. Dabei bedarf es mitunter einer ausgesprochen komplexen Verkehrsbehandlung (z. B. Prüfsummenbehandlung und PPP-Terminierung) im Millisekundenbereich.

Bei der Systemdimensionierung ist die Komplexität der AQOS-Funktionalität der maßgebliche Faktor. Im Folgenden wird daher die Komplexität der einzelnen Funktionen abgeschätzt.

Der benötigte Aufwand für die AQOS-Signalisierung unterscheidet sich von der standardisierten VDSL-Signalisierung im VDSL Overhead Channel [6] vor allem durch die

Verwendung von DLL-Paketen im Nutzdatenstrom der Sicherungsschicht. Dies führt zu keiner Steigerung der benötigten Systemkomplexität. Im Vergleich zum VDSL Bit Swapping ergeben sich durch die AQOS-Signalisierung sogar einige Vereinfachungen, wie z. B. die nicht notwendigen mehrmaligen Übertragungen und die seltenere Timernutzung.

Die AQOS-Signalisierung erfordert eine mit der VDSL-Signalisierung vergleichbare Menge an Ressourcen. Aus der Literatur ist bekannt, dass die VDSL-Signalisierung „unangestrengt“ im Netzprozessor realisiert werden kann [172]. Dies gilt auch für die AQOS-Signalisierung.

Für die Beurteilung der Komplexität der Verkehrsklassifizierung und -schätzung sind aus der Literatur einige Studien bekannt (z. B. [174]). Die Komplexität der Klassifizierung wird mit $O(N^2)$ bei N Klassifizierungsregeln angegeben. Dieser Aufwand ist kein bestimmender Faktor für die Komplexität des Gesamtsystems [152]. Die Verkehrsschätzung basiert auf der Extrahierung der Inhalte bestimmter Pakete. Dies bezieht sich allerdings nur auf den Signalisierungsverkehr der entsprechenden Anwendungen, wie z. B. SIP oder RSVP. Produkte, welche die entsprechende Deep Inspection in Netzprozessoren realisieren, sind gegenwärtig bereits erhältlich [216].

Durch die Auslagerung auf den Host-Prozessor wirkt sich das DDM nicht auf die Leistungsfähigkeit des Netzprozessors aus. Die Schätzung der benötigten Komplexität für das DDM wird deshalb separat in Abschnitt 7.5 betrachtet.

Aus den Überlegungen kann zusammenfassend geschlossen werden, dass die adaptive Dienstgüte keine signifikante Erhöhung der Komplexität des DSLAM-Gesamtsystems zur Folge hat. Insbesondere ergibt sich durch die Ausführung der AQOS-Funktionalität vor und nach der Nutzdatenübertragung keine Beeinträchtigung der Paketbehandlung der Nutzdatenströme. Die für AQOS benötigte Komplexität ist mit den aus der Literatur bekannten DSLAM- und Dienstgüterrealisierungen auf Basis von Netzprozessoren vergleichbar. AQOS kann somit ohne Einschränkungen der Leistungsfähigkeit auf Netzprozessoren realisiert werden.

7.5 Aufwandsabschätzung des Dienstgüte- und Datenratenmanagements

Das Dienstgüte- und Datenratenmanagement ist aufgrund der benötigten mathematischen Operationen entscheidend für die Komplexität der adaptiven Dienstgüte. Daher wird die Auslagerung der DDM-Funktionalität in den Host-Prozessor vorgeschlagen. In diesem Abschnitt wird der benötigte Aufwand für das Verfahren abgeschätzt und ein Ansatz für eine Reduktion der Komplexität vorgestellt.

Die Lösung des Gleichungssystems nach (5.11) bedingt die Invertierung der Matrix $I - A_k$. Die Matrixinvertierung auf Basis der oft verwendeten Gauß-Eliminierung erfordert $O(M^3)$ Operationen [148]. Bei der Gauß-Eliminierung wird das zu lösende Gleichungssystem nach (5.11) in eine obere Dreiecksform überführt, ohne die Lösung zu ändern. Dabei wird eine Grundidee vieler Algorithmen der numerischen linearen Algebra beachtet. Diese besteht darin, die zu bewältigende Aufgabe in eine einfache Form zu transformieren, bei der die Lösung „abgelesen“ werden kann. Sehr einfach zu berechnende Gleichungssysteme sind beispielsweise die so genannten Dreieckssysteme.

Bei der Gauß-Eliminierung wird das λ -fache der Zeile j mit der i -ten Zeile ($i > j$) addiert. Das resultierende obere Dreieckssystem wird durch Substitution gelöst.

Die Komplexität der Gauß-Eliminierung kann durch Nutzung der invertierten Matrix der Bitbelegung $b_i(k)$ für die neue Bitbelegung $b_i(k) + e_k$ mit (7.1) und (7.2) verringert werden.

Zur Erläuterung diesen Sachverhalts wird eine Matrix $D_k(b_i(k))$ eingeführt, die den Term $I - A_k$ für die Bitbelegung $b_i(k)$ kennzeichnet. Mit dem Lemma für Matrixinvertierungen¹ gilt (7.1).

$$D_k^{-1}(b_i(k) + e_k) = D_k^{-1}(b_i(k)) - \frac{1}{1 + h^T D_k^{-1}(b_i(k)) e_k} (D_k^{-1}(b_i(k)) e_k) (h^T D_k^{-1}(b_i(k))) \quad (7.1)$$

In dieser Formulierung wird h^T durch (7.2) beschrieben.

$$h^T = (\Gamma(2^{b_i(k)} - 1) - \Gamma(2^{b_i(k)+1} - 1)) \left[\frac{|H_{i,1}(k)|^2}{|H_{i,i}(k)|^2} \dots 0 \dots \frac{|H_{i,M}(k)|^2}{|H_{i,i}(k)|^2} \right] \quad (7.2)$$

Damit kann der Berechnungsaufwand für die Matrixinvertierung auf $O(M^2)$ reduziert werden. Die Gesamtkomplexität des DDM ist bei AQOS-Fair proportional zu (7.3).

$$\sum_{i=1}^M \sum_{c=1}^C R_{c,i} (O(N+M) + O(M^2)) \quad (7.3)$$

Dabei kennzeichnet $\sum_{i=1}^M \sum_{c=1}^C R_{c,i}$ die gesamten Datenratenanforderungen aller

Teilnehmer (Anzahl der Iterationen), $O(N+M)$ und $O(M^2)$ die Operationen zum Auffinden bzw. Erneuern der minimalen Kosten. Unter Beachtung entsprechender Benchmarks [62] für Netzprozessorsysteme [169] zeigt die Abschätzung, dass für die zeitnahe Ausführung (Dauer < 0,25 Sekunden) des DDM in realistischen Szenarien (ca. fünf beteiligte Leitungen, Gesamtdatenrate pro Teilnehmer 10 MBit/s) die Leistungsfähigkeit der Implementierungen um den Faktor 10 zu steigern ist. Die Komplexität des DDM ist allerdings geringer als bei den bekannten Bitzuweisungsalgorithmen für die Einzel- [101] bzw. Mehrnutzerbetrachtung [146] und bietet eine deutlich größere Leistungsfähigkeit.

7.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung am Beispiel von Netzprozessoren untersucht. Netzprozessoren stellen eine relativ neue Hardware-Plattform für Kommunikationssysteme dar, die Flexibilität und Leistungsfähigkeit vereinen. Der als Implementierungsbeispiel verwendete Netzprozessor Motorola C-5 DCP zeichnet sich durch eine modulare Struktur und die Separation der Funktionalität aus und ist daher für die Realisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung im DSLAM geeignet. Für spezifische Teilaufgaben der Paketweiterleitung stehen beim C-5 DCP Ko-Prozessoren und Hardware-Blöcke zur Verfügung. So kann beispielsweise die effiziente Umsetzung der Deep Inspection in den SDPs des C-5 für die Verkehrsschätzung und Klassifizierung der adaptiven Dienstgüte eingesetzt werden. Der modulare Aufbau erlaubt die Zuordnung der AQOS-Funktionalität zu bestimmten Ko-Prozessoren.

Bei der Aufteilung der Funktionalität wird ersichtlich, dass die spezifischen Eigenschaften des Netzprozessors zu einer modularen Realisierung der adaptiven Dienstgütesteuerung führt.

1. $(A + bc^T)^{-1} = A^{-1} - \frac{1}{1 + c^T A^{-1} b} (A^{-1} b) (c^T A^{-1})$

Dadurch ist das System gut strukturiert und skalierbar zu implementieren. Bei der Systemdimensionierung zeigt sich, dass AQOS in NP ohne Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit verwirklicht werden kann.

Bei der Implementierung des DDM empfiehlt sich die Auslagerung auf einen externen Host-Prozessor. Dieses Entwurfsschema ermöglicht durch seine Vorteile, wie z. B. Wahrung der NP-Designparadigmen, Flexibilität und Strukturierung, die Verwendung allgemeiner Netzprozessoren für die spezifischen Aufgaben der adaptiven Dienstgütesteuerung.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird die Komplexität des DDM untersucht. Bei der Aufwandsabschätzung wird dargelegt, wie die Komplexität der Algorithmen durch Gauß-Eliminierung und Matrixinvertierung reduziert werden kann.

Die Aufteilung der Funktionalität und die Auslagerung des DDM in den externen Host-Prozessor erlaubt die Realisierung der gesamten AQOS-Funktionalität in einem Netzprozessorsystem. Durch die Implementierung des DDM im Host-Prozessor werden die Ressourcen des NP-Kerns geschont und dessen flexibles Entwurfsschema beibehalten. In Verbindung mit den gewonnenen Erkenntnissen über die Ausgestaltung der Signalisierung im NP kann konstatiert werden, dass die modulare Struktur des C-5 DCP für die Ausformung der adaptiven Dienstgütesteuerung gut geeignet ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Konvergenz der Netze auf Basis des Internetprotokolls ist ein bestimmender Trend der Telekommunikation der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart. Dies bedeutet, dass das gesamte Anwendungsportfolio über eine einheitliche IP-basierte Netzplattform übertragen wird. Die Gewährleistung der unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Verkehrstypen erfolgt durch die Bereitstellung von Dienstgüte durch die Netze. Dienstgüte bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Anwendungsanforderungen an Parameter, wie z. B. Durchsatz, Verzögerung oder Paketverlustrate, durch die Netze garantiert werden.

Neben dieser Entwicklung ist der technologische Fortschritt von ständig steigenden Anforderungen nach höheren Datenraten getrieben. Durch die Verwendung von Glasfasersystemen in Kern- und Zugangsnetzen erweisen sich vor allem die Teilnehmeranschlussnetze als der Engpass in Bezug auf die verfügbare Datenrate. Wegen ihrer weiten Verbreitung sind dabei in erster Linie die Teilnehmeranschlüsse auf Basis von Kupferdoppeladern hervorzuheben. Aufgrund der sehr hohen Infrastrukturkosten für den Ausbau dieser Teilnehmeranschlussleitungen ist auch in Zukunft nicht zu erwarten, dass die verfügbaren Datenraten die Anforderungen der Teilnehmer übersteigen werden.

In Bezug auf die vom Teilnehmer wahrgenommene Qualität der Übertragung sind die Teilnehmeranschlussleitungen von besonderer Bedeutung. Sie bilden die Schnittstelle des Teilnehmers mit den Netzen und stellen einen wichtigen limitierenden Faktor der Übertragungseigenschaften dar. Daher ist in diesem Bereich die Verwendung effizienter Mehrträgerübertragungsverfahren und Dienstgütemechanismen auf Grundlage der bestehenden Infrastruktur ein Erfolg versprechender Ansatz für die Erzielung höherer Datenraten und einer besseren Dienstgüte.

Diese Problematik greift die vorliegende Arbeit auf. Es wird ein Dienstgüteverfahren entwickelt und untersucht, das die speziellen Eigenschaften der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme für eine Optimierung der Übertragung nutzt. Dabei wird insbesondere auf das veränderliche Verhalten der Verkehrs- und Übertragungseigenschaften eingegangen. Eine wesentliche Randbedingung dieser Arbeit besteht in der Übernahme der bereits standardisierten xDSL-Systemstruktur.

Nach den in die Thematik einführenden Erläuterungen in Kapitel 1 stellt Kapitel 2 die für diese Arbeit wesentlichen Grundlagen der OFDM-Übertragung vor. Nach einer Darlegung der Eigenschaften der leitungsgebundenen Systemumgebung wird auf die Veränderlichkeit der Übertragungseigenschaften eingegangen. Diese resultieren vor allem aus den Nebensprechstörungen infolge von elektromagnetischer Kopplung zwischen den Leitungen. Bei der anschließenden Ausführung der Bitzuweisungsverfahren zeigt sich, dass die Verwendung von Worst-Case-Annahmen bei der Einzelnutzerbitzuweisung zu einer ineffizienten Ressourcenauslastung führt. Demgegenüber bevorzugt die Mehrnutzerbitzuweisung kurze Leitungen und verteilt die Datenrate unfair. Adaptive Modulationsverfahren erlauben die Reaktion auf Veränderungen der Übertragungseigenschaften durch die Anpassung der genutzten Signalraumkonstellationen. Im

weiteren Verlauf des Kapitels wird das Spektrummanagement beschrieben, dass eine Steigerung der Datenrate durch eine Reduktion der durch die Übertragung erzeugten Störungen anstrebt. Diese Ansätze reagieren nur auf Veränderungen der Übertragungseigenschaften, nicht aber der ebenfalls zeitvarianten Verkehrscharakteristiken. Daher ist bei zeitweiser Inaktivität der Teilnehmer die Übertragung nicht unterbrochen. Stattdessen wird nutzloser Leerverkehr gesendet, welcher sich durch Nebensprechen negativ auf die Leistungsfähigkeit der Übertragung benachbarter Systeme auswirkt. In den gegenwärtig bekannten xDSL-Systemen werden deshalb die vorhandenen Ressourcen nicht effizient genutzt.

Kapitel 3 widmet sich den wesentlichen Aspekten der Dienstgütebereitstellung. Bei der Analyse grundlegender Dienstgütemechanismen werden die zeitvarianten Eigenschaften der Datenströme vieler Anwendungen dargelegt. Phänomene, wie Selbstähnlichkeit, Heavy-Tail-Verteilung und Langzeitabhängigkeit führen beispielsweise zu einer sprunghaften Änderung der zu übertragenden Datenmenge. Darüber hinaus wird das Zusammenspiel der einzelnen QoS-Mechanismen in verschiedenen Dienstgütearchitekturen untersucht. Dabei zeigt sich, dass Dienstgütearchitekturen mit expliziter Reservierung von Einzelströmen, wie z. B. IntServ, harte Garantien für die Dienstqualität realisieren können. Leider zeichnen sich diese Architekturen durch eine hohe Komplexität aus und skalieren nicht in großen Netzen. Demgegenüber bilden Architekturen mit relativer Dienstgüte Verkehrsaggregate, die mit deutlich geringerem Aufwand zu verwalten sind.

Das Kapitel arbeitet heraus, dass die bekannten Dienstgütearchitekturen an die spezifischen Eigenschaften der leitungsgebundenen Mehrträgersysteme nur begrenzt angepasst sind. So fließen beispielsweise in den Teilnehmeranschlussnetzen nur sehr wenige Datenströme. Folglich existieren keine ausreichend großen Aggregate, um eine Glättung der Verkehrscharakteristiken durch statistisches Multiplexen zu erreichen. Außerdem erwarten die Dienstgütearchitekturen konstante Übertragungsressourcen, wie sie z. B. bei Glasfaserleitungen vorhanden sind. Auf zeitliche Veränderungen der verfügbaren Datenrate bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen vermögen die bekannten Dienstgütearchitekturen infolge der fehlenden Interaktion zwischen den Protokollschichten nicht effizient zu reagieren. Cross-Layer-Verfahren beheben diesen Mangel und erlauben die gemeinsame Informationsnutzung durch verschiedene Protokollschichten. Diese Verfahren sind vor allem von der leitungslosen Übertragung bekannt, können aber wegen der speziellen Eigenschaften der leitungsgebundenen Systemumgebung nicht einfach übernommen werden.

Aus diesen Gründen ist mit den gegenwärtig existierenden Dienstgütemechanismen eine rationelle Ressourcennutzung in xDSL-basierten Teilnehmeranschlussnetzen nur bedingt möglich. Gerade in diesen, den Engpass bei der Multimediaübertragung darstellenden Netzen ist aber eine Steigerung der Leistungsfähigkeit erwünscht, da in den meisten Fällen die Qualität der Ende-zu-Ende-Übertragung signifikant verbessert wird. Die gemeinsame Optimierung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften verspricht eine effizientere Ressourcenauslastung in diesem Bereich.

Die Leistungsfähigkeit bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen kann primär an den drei Parametern Datenrate, Reichweite und Fairness zwischen Leitungen unterschiedlicher Länge festgemacht werden.

In Kapitel 4 wird ein grundlegend neuartiges Konzept für ein an die spezifischen Eigenschaften der leitungsgebundenen Teilnehmeranschlussnetze angepasstes Dienstgüteverfahren vorgeschlagen. Diese adaptive Dienstgütesteuerung ermöglicht die gemeinsame Verbesserung der veränderlichen Verkehrs- und Übertragungseigenschaften. Das AQOS-Konzept basiert

entsprechend Abbildung 55 auf der bidirektionalen Reaktion auf die Variation der Parameter. Da sowohl Verkehrs- als auch Übertragungseigenschaften veränderlich sind, kann bei der Änderung einer Eigenschaft die jeweils andere dynamisch mitgeführt werden.

In der Anpassungsrichtung von Verkehrseigenschaften zu Übertragungseigenschaften werden die bereitgestellten Netzressourcen dynamisch an die von den Teilnehmer angeforderten Verkehrstypen und -mengen angepasst. Die Adaption der verwendeten Datenrate an die aktuellen Anforderungen vermeidet Leerverkehr und verringert dadurch die Nebensprechstörungen, welche die Leistungsfähigkeit einschränken. Auf den benachbarten Leitungen wird ein deutlich höherer Signalausgabestand erreicht, der für eine höhere Datenrate genutzt werden kann.

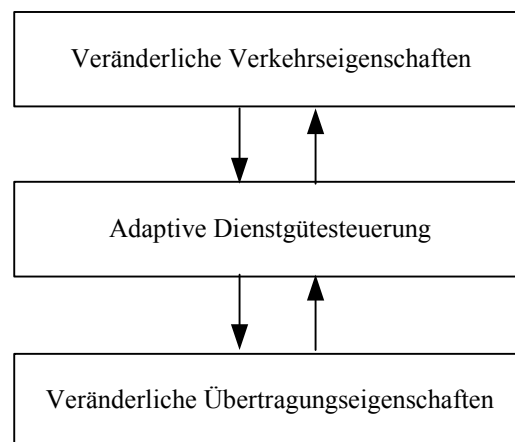


Abbildung 55: Konzeptionelles Modell der adaptiven Dienstgütesteuerung

In umgekehrter Anpassungsrichtung adaptiert die Dienstgüte an die Übertragungseigenschaften, wie z. B. die Auslastung. Dabei gleicht sich die erzielbare Dienstgüte an die sich ändernden Eigenschaften des Übertragungskanal an. Die Dienstgüteparameter passen sich an, wenn die Eigenschaften der Teilnehmeranschlussleitung oder der benachbarten Netze variieren. Dadurch kann auf die aktuellen Zustände der Übertragungsstrecke eingegangen und die Dienstgütezuteilung variabel gestaltet werden. Zu Zeiten niedriger Auslastung steht eine höhere Dienstgüte bereit, als während der Hauptverkehrszeit.

Die Dienstgüteeinstellung kann auch auf das benachbarte Zugangsnetz ausgedehnt werden. Die angebotene Dienstgüte auf den Teilnehmeranschlussleitungen und im Zugangsnetz sind dann aufeinander abgestimmt. Für den Teilnehmer ist nur die Ende-zu-Ende-Dienstgüte relevant. Daher macht sich im Falle der Bereitstellung unterschiedlicher Dienstgüteeinstellungen in diesen beiden Netzabschnitten nur die geringere der beiden Dienstgüteeinstellungen bemerkbar. Die Adaption der bereitgestellten Dienstgüte zwischen Teilnehmeranschlussleitung und Zugangsnetz verhindert unnötigen Aufwand und die Vergeudung von Ressourcen.

Für die Realisierung der adaptiven Dienstgüte bietet sich die Integration von AQOS in den DSLAM an. Einerseits stellt der DSLAM die Schnittstelle zwischen Teilnehmeranschluss- und Zugangsnetz dar. Andererseits erlaubt dieser zentral koordinierte Ansatz die Einbindung der AQOS in die gegenwärtig laufenden Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Spektrummanagements und sichert die Stabilität der adaptiven Dienstgüteeinstellung. Das resultierende dynamische dienstgüteeingestrichene Spektrummanagement steuert und verwaltet die Übertragungs- und Dienstgüteeigenschaften der Teilnehmeranschlussleitungen. Das Realisierungskonzept ermöglicht auch eine Interaktion mit dem Netz- bzw. Dienstanbieter. So

kann die bereitgestellte Dienstgüte auf den Teilnehmeranschlussleitungen und im Zugangsnetz abgestimmt werden.

Für die Anpassung der in verschiedenen Protokollschichten beheimateten veränderlichen Eigenschaften werden Cross-Layer-Entwurfsmethoden verwendet. Dabei stellt die Datenrate den gemeinsamen Abstrahierungsparameter des Cross-Layer-Verfahrens dar, der in der Übertragungsschicht durch die Bitbelegung und in der Sicherungsschicht durch die Bedienrate der Warteschlangen repräsentiert wird.

Das AQOS-Systemmodell fügt einige neue Funktionen in die Steuerungs- und Verwaltungsebene der involvierten Protokollschichten ein. In der Steuerungsebene erfolgen die Verkehrsklassifizierung, Verkehrsschätzung, Kanalschätzung und Signalisierung. Die Verwaltungsebene enthält das Dienstgüte- und Datenratenmanagement.

Verkehrsklassifizierung, Verkehrs- und Kanalschätzung sind Funktionen, die aus gegenwärtigen Dienstgütearchitekturen und Übertragungssystemen bekannt sind. Aufgabe der Klassifizierung ist die Einordnung der Datenströme in die vom Netz zur Verfügung gestellten Dienstklassen. Damit lässt AQOS im Gleichklang mit den derzeit vorherrschenden Dienstgütearchitekturen qualitative Aussagen über die angebotene Qualität der Übertragung zu. Verkehrs- und Kanalschätzung werden zur Beurteilung und Vorhersage der Verkehrsmenge und Kanalcharakteristiken eingesetzt.

Die schnelle Signalisierung erlaubt die zeitnahe Reaktion auf Veränderungen und die gemeinsame Nutzung von Informationen durch verschiedene Protokollschichten. Das Dienstgüte- und Datenratenmanagement berechnet in Abhängigkeit von den Verkehrs- und Kanalcharakteristiken die bereitgestellte Dienstgüte und die Bitbelegung der Leitungen und Unterträger. DDM und Signalisierung bilden den Kern der adaptiven Dienstgütesteuerung. Die für diese Funktionalitäten entwickelten Verfahren werden im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht.

In Kapitel 5 wird ein Verfahren für das Dienstgüte- und Datenratenmanagement der adaptiven Dienstgütesteuerung vorgeschlagen und analysiert. Dessen Aufgaben bestehen in der Steuerung und Verwaltung der Dienstgüte der einzelnen Teilnehmer und der Aufteilung der Datenrate auf die jeweiligen Unterträger. Die im Rahmen dieser Arbeit erstmals untersuchte Kombination von Dienstgütebereitstellung und Bitzuweisung erweitert das bekannte dynamische Spektrummanagement. Im Gegensatz zu DSM werden bei AQOS nicht nur die veränderlichen Übertragungscharakteristiken, sondern auch die Verkehrseigenschaften für eine Optimierung der Übertragung genutzt. Aus den beiden variablen Eigenschaften werden Dienstgüteanforderungen für einzelne Teilnehmer und Dienstklassen berechnet, welche durch die den Teilnehmern angebotene Datenrate repräsentiert werden. Die Verteilung der Datenrate auf die Unterträger und Leitungen koordiniert der Bitzuweisungsalgorithmus.

Das Kernstück des DDM bildet ein Greedy-Verfahren. Dieses realisiert eine lokale Optimierung, wobei jede Entscheidung im Suchraum den aktuell maximalen Vorteil findet. Eine Problemstellung ist greedy-lösbar, wenn sich die optimale Lösung des Gesamtproblems aus optimalen Lösungen von Teilproblemen zusammensetzen lässt, und die global optimale Lösung durch eine Aneinanderreihung lokal optimaler Entscheidungen im Suchraum erreichbar ist. Das Greedy-Verfahren führt bei Problemstellungen, die sich als Teilmengensystem mit Matroidstruktur beschreiben lassen, zu einer optimalen Lösung. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass es sich bei der dienstgüteerweiterten Bitzuweisung um eine solche Problematik handelt. Wegen der Konvexität der Datenratenfunktion ist für die Zuweisung umso mehr zusätzliche Sendeleistung erforderlich, je mehr Bits bereits zugeteilt wurden. Daher optimiert die lokale Entscheidung des Greedy-Verfahrens die dienstgüteerweiterte Bitzuweisung global.

Eine Kostenfunktion bildet das Entscheidungskriterium des Greedy-Verfahrens. Diese ordnet sukzessiv den Teilnehmern und Unterträgern Bits zu, welche die geringsten Kosten verursachen. Für das DDM der adaptiven Dienstgütesteuerung werden drei verschiedene Kostenfunktionen entwickelt und analysiert, welche die Übertragungseigenschaften und die Dienstgüte in unterschiedlicher Stärke und Granularität berücksichtigen. Die Dienstgüte ist als Gesamtanforderung an Datenrate pro Teilnehmer (AQOS-Rate) oder als dienstklassenspezifische Datenratenanforderung (AQOS-Prio und AQOS-Fair) realisiert. Die Übertragungseigenschaften finden bei der Bitzuweisung für die Auswahl der Leitung und des Unterträgers (AQOS-Rate und AQOS-Prio) oder nur für die Wahl des Unterträgers (AQOS-Fair) Berücksichtigung. In letzterem Fall basiert die Festlegung des Teilnehmers auf der Datenratenanforderung in der jeweiligen Dienstklasse. Durch die neuartige faire Ausgestaltung der Bitzuweisung wird kein Teilnehmer den anderen gegenüber benachteiligt.

Eine simulative Leistungsbewertung untersucht das Verfahren an einem VDSL-System mit unterschiedlicher Anzahl von Teilnehmern und verschiedenen Leitungslängen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die eingeführten AQOS-Kostenfunktionen eine Steigerung der garantierten Datenrate um etwa 80% und der Reichweite um etwa 30% ermöglichen. Aufgrund der Auslegung der Kostenfunktionen und der Garantie der teilnehmerspezifischen Dienstgüteeinforderungen ist Fairness zwischen verschiedenen langen Leitungen gegeben. Des Weiteren wird durch die dynamische Anpassung der Datenrate an die Verkehrsanforderungen die erforderliche Sendeleistung reduziert. Der maßgebliche Einfluss der längeren Leitungen auf die Gesamtsendeleistung wird herausgearbeitet. Es erweist sich, dass die Berücksichtigung aller veränderlichen Charakteristiken die Ungleichbehandlung der unterschiedlich langen Leitungen und die Vergeudung von Ressourcen auf Teilnehmeranschlussleitungen vermeiden. Die Anpassung der Übertragung und Dienstgüteebereitstellung unter Berücksichtigung der veränderlichen Übertragungs- und Verkehrseigenschaften führt zu einer deutlich effizienteren Nutzung der vorhandenen Übertragungskapazität bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen.

Das Konzept der adaptiven Dienstgüte beinhaltet die gemeinsame Anpassung von Übertragungs- und Dienstgüteparametern bei Veränderungen der Kanal- oder Verkehrseigenschaften. Kapitel 6 erläutert den dazu notwendigen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten und Protokollschichten. Dazu wird die strikte Trennung der Informationen des OSI-Referenzmodells aufgehoben und durch ein Cross-Layer-Verfahren erweitert. Cross-Layer-Entwurfsverfahren ermöglichen den Austausch und die gemeinsame Nutzung von Informationen durch unterschiedliche Protokollschichten. Gerade bei adaptiven Verfahren ist dies unerlässlich. Durch den Cross-Layer-Entwurf wird sichergestellt, dass die Informationen allen involvierten Schichten mitgeteilt werden und dass der Austausch auch bei Übertragungsfehlern reibungslos vonstatten geht.

Die adaptive Dienstgütesteuerung muss in Echtzeit auf auftretenden Veränderungen reagieren. Nur so gelingt eine unterbrechungsfreie Adaption an die aktuellen Eigenschaften. Die schnelle Reaktion auf Veränderungen erfordert, dass der Informationsaustausch ohne große zeitliche Verzögerung realisiert werden kann.

Die verschiedenen Arten des AQOS-Informationsaustausches lassen sich in folgende beiden Gruppen einteilen:

- Horizontaler Informationsaustausch
- Vertikaler Informationsaustausch

Die horizontale Signalisierung tauscht Informationen zwischen den Partnerinstanzen der gleichen Protokollschicht unterschiedlicher Netzknoten, wie z. B. DSLAM und Modem, aus.

Sie verläuft Inband und nutzt die Ressourcen der Nutzdatenübertragung. Für den Informationsfluss werden Pakete der Sicherungsschicht verwendet. Aus der Sicherungsschicht erfolgt dann die vertikale Weiterleitung der Informationen an die Übertragungsschicht. Dieser Ansatz ermöglicht eine schnelle und sichere Signalisierung und ist durch den Gebrauch der Nutzdatenrate deutlich effizienter als die normalerweise verwendete Signalisierung in der Übertragungsschicht.

Bei der vertikalen Signalisierung werden Informationen zwischen unterschiedlichen Protokollschichten innerhalb eines Gerätes transferiert. Bei der adaptiven Dienstgütesteuerung betrifft das die Übertragungsschicht und die Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells. AQOS erfordert den gemeinsamen Zugriff auf die Parameter dieser Schichten.

Ein Protokoll spezifiziert die horizontale und vertikale Signalisierung. Der Protokollentwurf bedient sich formaler Beschreibungstechniken auf der Basis von SDL. Das entstandene Protokoll wird einer Validierung unterzogen. Deren Ergebnisse belegen die Plausibilität des entworfenen Cross-Layer-Verfahrens. Das Protokoll wird auch per Simulation leistungsbewertet. Dazu wird ein Vergleich mit dem Express Swapping von VDSL durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Inband-Cross-Layer-Signalisierung von AQOS zu einer schnelleren Adaption ($<0,1$ Sekunden) bei Veränderungen führt. Durch die rasche Einstellung des optimalen Arbeitspunktes des AQOS-Systems wird auf Veränderungen der Kenngrößen zeitnah reagiert und die Störung der Übertragung benachbarter Teilnehmer minimiert.

Die Realisierungsaspekte der adaptiven Dienstgütesteuerung werden am Beispiel von Netzprozessoren in Kapitel 7 untersucht. Netzprozessoren stellen eine relativ neue Hardware-Plattform für Kommunikationssysteme dar. Sie vereinen Flexibilität und Leistungsfähigkeit und eignen sich daher sehr gut für die AQOS-Realisierung im DSLAM. Am Implementierungsbeispiel des Netzprozessor Motorola C-5 DCP wird verdeutlicht, wie die AQOS-Funktionalität auf die einzelnen Ko-Prozessoren und Hardware-Blöcke des NP aufgeteilt werden können. Wegen seiner modularen Struktur erlaubt der C-5 DCP eine flexible und skalierbare Verwirklichung der AQOS-Funktionalität. Bei der Implementierung des Dienstgüte- und Datenratenmanagements empfiehlt sich die Auslagerung auf einen externen Host-Prozessor. Diese macht die Umsetzung der gesamten AQOS-Funktionalität in einem Netzprozessorsystem möglich, ohne die Flexibilität des Entwurfs einzuschränken. Die Aufwandsschätzung des DDM veranschaulicht, dass durch die Gauß-Eliminierung und das Lemma für die Matrixinvertierung die Komplexität der Algorithmen gemindert werden kann.

Für die weitere Verringerung des Rechenaufwandes ist die Untersuchung anderer Optimierungsstrategien ein vielversprechender Forschungsschwerpunkt. Vor allem die Lagrange-Optimierung gilt dabei als ein aussichtsreicher Kandidat. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, die Parameter der DDM durch vorherige Berechnung schnell verfügbar zu machen. Hieraus ergibt sich allerdings ein Speicherbedarf, der je nach Granularität der benutzten Verkehrsprofile sehr hoch sein kann.

Ein anderer Aspekt für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen ist die dezentrale Auslegung der Verwaltungsinstanz. Bestimmte Anwendungsbeispiele besitzen keine zentrale Instanz, wie der DSLAM bei den Teilnehmeranschlussleitungen. Die Nutzung des Ansatzes erfordert dann die Verteilung der Funktionalität auf die jeweils beteiligten Geräte. Die dezentrale Steuerung stellt besondere Aufgaben an die Signalisierung und das Management. Auch in diesem Bereich besteht weiterer Forschungsbedarf.

Der AQOS-Ansatz beschränkt sich nicht auf die xDSL-basierten Verfahren. Auch auf anderen Anwendungsgebieten, bei denen infolge der adaptiven Dienstgütesteuerung eine Reduktion der Störungen herbeigeführt werden kann, ist eine effizientere Übertragung zu erwarten. So kann unter anderem bei funkbasierten Einsatzgebieten von Mehrträgerverfahren, wie z. B. WiMAX IEEE 802.16 und WLAN IEEE 802.11, das AQOS-Verfahren für eine Verbesserung der Übertragung Anwendung finden. Für eine exakte Abschätzung der Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens in derartigen Applikationen sind weiterführende Forschungsaktivitäten notwendig.

Der Neuwert dieser Arbeit besteht darin, aufzuzeigen, dass die gemeinsame Optimierung von Dienstgüte und Übertragungseigenschaften und die faire Ausgestaltung der Bitzuweisung zu einer deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit bei leitungsgebundenen Mehrträgersystemen führt. Die Verbesserung beruht auf der dynamischen Reaktion auf Veränderungen der Eigenschaften, der Reduktion der auftretenden Störungen und der effizienteren Nutzung der Ressourcen. Dank der adaptiven Dienstgütesteuerung werden wichtige Parameter für die Leistungsfähigkeit der Teilnehmeranschlussnetze, wie Datenrate, Reichweite und Fairness, optimiert. Der Einsatz spezifischer, an die jeweiligen Übertragungsbedingungen angepasster Dienstgütealgorithmen kann für die leitungsgebundenen Mehrträgersysteme empfohlen werden und treibt die flächendeckende Bereitstellung breitbandiger Teilnehmeranschlüsse als Basis für die weitere Entwicklung der Informations- und Wissensgesellschaft voran.

9 Literaturverzeichnis

- [1] R. Addie, M. Zukerman, T. Neame, „Fractal Traffic: Measurements, Modelling and Performance Evaluation“, IEEE INFOCOM - The Conference on Computer Communications, S. S. 977-984, 1995
- [2] E. Amir, S. McCanne, H. Zhang, „An Application Level Video Gateway“, ACM Multimedia, San Francisco, 1995
- [3] ANSI T1E1, „Network and Customer Installation Interfaces - Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface“, ANSI, 1998
- [4] ANSI T1E1, „Spectrum Management for Loop Transmission Systems“, ANSI Contribution T1.417-2001, 2001
- [5] ANSI T1E1, „Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL) Metallic Interface Part 1: Functional Requirements and Common Specification“, T1E1.4 Contribution 2002-031R2, 2002
- [6] ANSI T1E1, „Very-high bit-rate Digital Subscriber Lines (VDSL) Metallic Interface, Part 3: Technical Specification of a Multi-Carrier Modulation Transceiver“, T1E1.4 Contribution 2002-099R1, 2002
- [7] K. Asatani, S. Nogami, „Trends in the Standardization of Telecommunications on GII, Multimedia, and Other Network Technologies and Services“, IEEE Communications Magazine, Bd. 34, Nr. 6, S. 32-46, 1996
- [8] ATM Forum, „UNI signaling 4.0“, UNI4-0, 1996
- [9] ATM Forum, „Traffic Management Specification“, Version 4.0, 1996
- [10] Aquila-Projekt, <http://www.ist-aquila.org/>
- [11] N. C. Audsley, A. Burns, M. F. Richardson, A. J. Wellings, „Hard Real-Time Scheduling: The Deadline-Monotonic Approach“, 8th IEEE Workshop on Real-Time Operating Systems and Software, 1991
- [12] E. Baccarelli, M. Biagi, „Optimal integer bit-loading for multicarrier ADSL systems subject to spectral-compatibility limits“, Signal Processing, Bd. 84, Nr. 4, S. 729-741, 2004
- [13] A. Baiocchi, N. B. Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, R. Winkler, „Loss performance analysis of an ATM multiplexer loaded with high-speed on-off sources“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 9, Nr. 3, S. 388-393, 1991
- [14] A. Bak, W. Burakowski, F. Ricciato, S. Salsano, H. Tarasiuk, „Traffic Handling in AQUILA QoS IP Network“, 2nd International Workshop on Quality of future Internet Services, S. 243-260, 2001,
- [15] F. Baker, C. Iturralde, F. Le Faucheur, B. Davie, „Aggregation of RSVP for IPv4 and IPv6 Reservations“, IETF Standard, RFC 3175, 2001

- [16] J. Bennett, H. Zhang, „Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms“, IEEE/ACM Transactions on Networking, Bd. 5, Nr. 5, S. 675-689, 1997
- [17] J. Beran, R. Sherman, M. S. Taqqu, W. Willinger, „Long-Range Dependence in Variable-bit rate Traffic“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 43, Nr. 2/3/4, S. 1566-1579, 1995
- [18] D. Bertsekas, R. Gallager, „Data Networks“, Prentice-Hall, New Jersey, 2nd edition, 1992
- [19] V. Bharghavan, K. Lee, S. Lu, S. Ha, J. Li, D. Dwyer, „The TIMELY Adaptive Resource Management Architecture“, IEEE Personal Communication Magazine, Bd. 5, Nr. 4, S. 20-31, 1998
- [20] G. Bianchi, A. Campbell, R. Liao, „On Utility-Fair Adaptive Services in Wireless Networks“, International Workshop on Quality of Service (IEEE/IFIP IWQoS), 1998
- [21] J. A. Bingham, „Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come“, IEEE Communications Magazine, Bd. 28, Nr. 5, S. 5-14, 1990
- [22] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss, „An Architecture for Differentiated Services“, IETF Standard, RFC 2475, 1998
- [23] B. Braden, D. Clark, J. Crowcroft, B. Davie, S. Deering, D. Estrin, S. Floyd, V. Jacobson, G. Minshall, C. Partridge, L. Peterson, K. Ramakrishnan, S. Shenker, J. Wroclawski, L. Zhan, „Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet“, IETF Standard, RFC 2309, 1998
- [24] R. Braden, D. Clark, S. Shenker, „Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview“, IETF Standard, RFC 1633, 1994
- [25] R. Braden, Ed., L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, „Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification“, IETF Standard, RFC 2205, 1997
- [26] P. Brady, „A Techniques for investigating ON-OFF Patterns in Speech“, Bell System Technical Journal, Nr. 44, S. 1-21, 1965
- [27] F. Büllingen, P. Stamm, „Entwicklungstrends im Telekommunikationssektor bis 2010“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Wissenschaftliches Institut für Kommunikationsdienste GmbH, 2001
- [28] C. Brandauer, W. Burakowski, M. Dabrowski, B. Koch, H. Tarasiuk, „AC Algorithms in AQUILA QoS IP Networks“, 9th Polish Teletraffic Symposium, 2nd Polish-German Teletraffic Symposium PGTS'02, 2002
- [29] J. Campello de Souza, „Discrete Bit Loading For Multicarrier Modulation Systems“, Dissertation, Stanford University, 1999
- [30] J. Campello de Souza, „Practical bit loading for DMT“, IEEE International Conference on Communications (ICC), S. 801-805, 1999
- [31] M. Casoni, „On the Performance of TCP over TDD-TD/CDMA Architecture“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), Bd. 21, Nr. 1, S. 2452-2456, 2002
- [32] J. W. Causey, H. S. Kim, „Comparison of Admission Control Schemes“, International Journal of Communication Systems, 1995
- [33] J. K. Cavers, „Variable-rate transmission for Rayleigh fading channels“, IEEE Transactions on Communication, Bd. COM-20, S. 15-22, 1972

- [34] R. Cendrillon, W. Yu, M. Moonen, J. Verlinden, T. Bostoen, „Optimal Multi-user Spectrum Management for Digital Subscriber Lines“, IEEE International Communications Conference (ICC), Paris, June 2004
- [35] K. Chandra, „Statistical Multiplexing“, The Wiley Encyclopedia of Telecommunications, Editor J. G. Proakis, EOT280, ISBN 0-471-36972-1, John Wiley & Sons, Inc., 2002
- [36] R. W. Chang, „Synthesis of Band-limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission“, Bell Systems Technical Journal, Bd. 45, S. 1775-1796, 1966
- [37] J. Charzinski, „TDMA-Medienzugriffsverfahren im Rückkanal passiver optischer ATM-Zugangsnetze“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1999
- [38] J. Charzinski, „Messung und Modellierung von Internet-Verkehr“, Workshop Konvergenz der Netze, ITG Fachtagung, 1999
- [39] W. Chen, „The Development and Standardization of Asymmetrical Digital Subscriber Line“, IEEE Communications Magazine, Bd. 37, Nr. 5, S. 68-72, 1999
- [40] P. S. Chow, J. M. Cioffi, „Method and Apparatus for adaptive, variable high-speed data Transmission of a Multicarrier Signal over Digital Subscriber Lines“, United States Patent, Nr. 5479447, 1995
- [41] P. S. Chow, J. M. Cioffi, J. A. C. Bingham, „A Practical Discrete Multitone Tranceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 43, S. 773-775, 1995
- [42] S. T. Chung, J. M. Cioffi, „Rate and power control in a two-user multicarrier channel with no coordination: the optimal scheme vs. a suboptimal method“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 51, S. 1768-1772, 2003
- [43] S. T. Chung, A. J. Goldsmith, „Degrees of Freedom in Adaptive Modulation: A Unified View“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 49, Nr. 9, S. 1561-1571, 2001
- [44] J. M. Cioffi, „A Multicarrier Primer“, 1991, <http://www-isl.stanford.edu/people/cioffi/pdf/multicarrier.pdf>
- [45] J. M. Cioffi, „The Essential Merit of Bit Swapping“, ANSI Contribution T1E1.4/98-318R1, 1998
- [46] J. M. Cioffi, „Proposal for Study of Dynamic Spectrum Management for the Evolving Unbundling Architecture of DSL“, ANSI Contribution T1E1.4/2001-090, 2001
- [47] D. D. Clark, D. L. Tennenhouse, „Architecture Considerations for a New Generation of Protocols“, ACM SIGCOMM'90, S. 200-208, 1990
- [48] A. Croll, E. Packman, „Managing Bandwith: Deploying QoS in Enterprise Networks“, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2000
- [49] M. E. Crovela, A. Bestavros, „Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity“, Computer Science Department, Boston University, 1995
- [50] M. E. Crovela, A. Bestavros, „Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes“, ACM SIGMETRICS'96, S. 160-169, 1996
- [51] B. Davie, A. Charny, J.C.R. Bennet, K. Benson, J.Y. Le Boudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu, D. Stiliadis, „An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behaviour)“, IETF Standard, RFC 3246, 2002
- [52] J. D. Day, H. Zimmermann, „The OSI Reference Model“, Proceedings of the IEEE, Bd. 71, S. 1334-1340, 1983

- [53] G. Dittmann, „Programmable Finite State Machines for High-speed Communication Components“, Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2000
- [54] DSL Forum, <http://www.dslforum.org/>
- [55] N. G. Duffield, N. O'Connell, „Large Deviation and Overflow Probabilities for the General Single-Server Queue“, Dublin Institute for Advanced Studies, 1993
- [56] D. E. Duffy, A. A. McIntosh, M. Rosenstein, W. Willinger, „Statistical Analysis of CCSN/SS7 Traffic Data from Working Subnetworks“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 12, Nr. 3, S. 544-551, 1994
- [57] J. Eberspächer, „Skriptum zum Praktikum Systementwicklung mit SDL“, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Technische Universität München, 1996
- [58] J. Eberspächer, „Dramatischer Wandel in der Informations- und Kommunikationstechnik: Das „Netzwerk ITG“ liefert Orientierung!“, Vorwort zum ITG-Workshop Konvergenz der Netze, München, 1999
- [59] O. Edfors, „Low Complexity Algorithms in Digital Receivers“, Dissertation, Lulea University of Technology, ISSN 0348-8373, 1996
- [60] G. Eichler, H. Hussmann, G. Mamais, I. Veneiris, C. Prehofer, S. Salsano, „Implementing Integrated and Differentiated Services for the Internet with ATM Networks: A Practical Approach“, IEEE Communications Magazine, Bd. 38, Nr. 1, S. 132-141, 2000
- [61] J. Ellsberger, D. Hogrefe, A. Sarma, „SDL: Formal Object-oriented Language for Communication Systems“, Prentice Hall, 1997
- [62] Embedded Microprocessor Benchmark Consortium, <http://www.eembc.hotdesk.com/>
- [63] H. Esaki, K. Iwamura, T. Kodama, T. Fukida, „Connection admission control in ATM networks“, IEICE Transactions on Communications., Bd. E77-B, Nr. 1, S. 25–27, 1994
- [64] Ethernet in the First Mile Alliance, <http://www.efmalliance.org/>
- [65] ETSI Digital Audio Broadcasting (DAB), „Radio broadcasting systems, Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers“, European Telecommunication Standard ETS 300 401, 1995
- [66] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB), „Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T)“, European Telecommunication Standard ETS 300 74, 1997
- [67] ETSI Broadband Radio Access Networks (BRAN), „Hiperlan Type 2; Physical (PHY) Layer“, European Telecommunications Standard ETSI TS 101 475, 2001
- [68] ETSI Transmission and Multiplexing (TM), „Access transmission systems on metallic access cables; Very high speed Digital Subscriber Line (VDSL); Part 1: Functional requirements“, European Telecommunications Standard ETSI TS 101 270-1 V1.1.2, 1999
- [69] ETSI Transmission and Multiplexing (TM), „Access transmission systems on metallic access cables; Very high speed Digital Subscriber Line (VDSL); Part 2: Transceiver specification“, European Telecommunications Standard ETSI TS 101 270-1 V1.1.1, 2001
- [70] A. Erramilli, O. Narayan, W. Willinger, „Experimental Queueing Analysis with Long-Range Dependent Traffic“, IEEE/ACM Transactions on Networking, Bd. 4, Nr. 2, S. 209-223, 1996

- [71] A. Federgruen, H. Groenevelt, „The greedy procedure for resource allocation problems: necessary and sufficient conditions for optimality“, *Operations Research*, Vo. 34, Nr. 6, S. 909-918, 1986
- [72] T. Ferrari, „QoS Support for Integrated Networks“, Dissertation, University of Bologna, 1998
- [73] P. Ferguson, G. Huston, „Quality of Service: delivering QoS on the Internet and in corporate networks“, Wiley and Sons, Inc., New York, 1998
- [74] R. F. Fischer, J. B. Huber, „A New Loading Algorithm for Discrete Multitone Transmission“, *IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM)*, S. 724-728, 1996
- [75] S. Floyd, V. Jacobson, „Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 1, Nr.4, S. 397-413, 1993
- [76] R. G. Gallager, „Information Theory and Reliable Communication“, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968
- [77] M. Garrett, „A Service Architecture for ATM From Applications to Scheduling“ *IEEE Network*, Bd. 10, Nr. 3, S. 6-14, 1996
- [78] M. Garrett, W. Willinger, „Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video traffic“, *ACM SIGCOMM*, 1994
- [79] M. Grasse, „Analysis of Variable Bit Rate Video Traffic“, Dissertation, University of New South Wales, Canberra, Australia, 1996
- [80] R. J. Gibbens, F. P. Kelly, P. B. Key, „A decision-theoretic approach to call admission control in ATM networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 13, Nr. 6, S. 1101–1114, 1995
- [81] G. Ginis, J. M. Cioffi, „Vectorized transmission for digital subscriber line systems“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 20, Nr. 5, S. 1085-1104, 2002
- [82] J. Glasmann, „Ressourcenmanagement für Echtzeitverkehre in Intranets“, Dissertation, Technische Universität München, 2003
- [83] D. L. Goeckel, „Adaptive coding for time-varying channels using outdated fading estimates“, *IEEE Transactions on Communication*, Bd. 47, S. 844–855, 1999
- [84] A. J. Goldsmith, S. Chua, „Variable-rate variable-power MQAM for fading channels“, *IEEE Transactions on Communication*, Bd. 45, S. 1218–1230, 1997
- [85] A. J. Goldsmith, L. Greenstein, „Effect of average power estimation error on adaptive MQAM modulation“, *IEEE International Communications Conference (ICC)*, S. 1105–1109, 1997
- [86] A. J. Goldsmith, P. Varaiya, „Capacity of fading channels with channel side information“, *IEEE Transactions on Information Theory*, Bd. 43, S. 1986–1992, 1997
- [87] P. Gupta, N. McKeown, „Algorithms for Packet Classification“, *IEEE Network*, Bd. 15, Nr. 2, S. 24-32, 2001
- [88] Z. J. Haas, „A Protocol Structure for High-Speed Communications over ISDN“ *IEEE Communications Magazine*, Bd. 5, Nr. 1, S. 64-70, 1991
- [89] Z. J. Haas, „Design Methodologies for Adaptive and Multimedia Networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 39, Nr. 11, S. 106-107, 2001

- [90] F. T. Hady, T. Bock, M. Cabot, J. Chu, J. Meinecke, K. Oliver, W. Talarek, „Platform Level Support for High Throughput Edge Applications: The Twin Cities Prototype“, IEEE Networks, Bd. 17, Nr. 4, S. 22-27, 2003
- [91] M. Handley, H. Schulzrinne, E. Schooler, J. Rosenberg, „SIP: Session Initiation Protocol“, IETF Standard, RFC 2543, 1999
- [92] L. Hanzo, W. T. Webb, T. Keller, „Single and Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation“, Wiley-IEEE Press, New York, 2000
- [93] R. Hasholzner, „Adaptive Entzerrung zeitvarianter Störungen bei orthogonalem Frequenz-multiplex für drahtlose Festanschlüsse“, Dissertation, Technische Universität München, ISBN 3-98056621-7-4, 1999
- [94] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, J. Wroclawski, „Assured Forwarding PHB Group“, IETF Standard, RFC 2597, 1999
- [95] S. Hemami, „Robust Image Communication over Wireless Channels“, IEEE Communications Magazine, Bd. 39, Nr. 11, S. 120-124, 2001
- [96] D. Heyman, A. Tabatabai, T. Lakshman, „Statistical Analysis and Simulation Study of Video Teleconferencing Traffic in ATM Networks“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), S. 21-27, 1991
- [97] T. Holliday, A. Goldsmith, „Optimal power control and source-channel coding for delay constrained traffic wireless channels“, IEEE International Communications Conference (ICC), Bd. 25, Nr. 1, S. 831-83, 2003
- [98] L. Hoo, A. Salvekar, C. Aldana, J. M. Cioffi, P. Chow, J. Carlo, „Express and Confirmation AOC Swapping Commands for DMT DSLs“, ANSI Contribution T1E1.4/99-118, 1999
- [99] L. Hoo, A. Salvekar, C. Aldana, J. M. Cioffi, „Analysis of Express Swapping Speeds and Reliability“, ANSI Contribution T1E1.4/99-119, 1999
- [100] C. Hoogendoorn, K. Schrodi, M. Huber, C. Winkler, J. Charzinski, „Towards Carrier-Grade Next Generation Networks“, International Conference on Communication Technology, 2003
- [101] D. Hughes-Hartogs, „Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media“, US Patent 4679227 (1987), US Patent 4731816 (1988), US Patent 4883706 (1989)
- [102] H. E. Hurst, „Long-term storage capacity or reservoirs“, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., Bd. 76, Nr.11, 1950
- [103] D. Husak, R. Gohn, „Network Processor Programming Models: The Key to Achieving Faster Time-to-Market and Extending Product Life“, White Paper, Motorola Corporation, 2000
- [104] D. Husak, „Communication Processors: a definition and comparison“, White paper, Motorola Corporation, 2000
- [105] IBM Corporation, „IBM Network Processor (IBM32NPR161EPXCAC100)“, Product Overview, 1999
- [106] IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force, <http://www.ieee802.org/3/efm/index.html>
- [107] IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks, „Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Common

- specifications - Part 3: Media Access Control (MAC) Bridges“, IEEE Standard P802.1D, 1999
- [108] IEEE LAN/MAN Standard Committee „Draft Supplement to the Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks, Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Frequency Band“, IEEE P802.11/a D7, 1999
- [109] IEEE LAN/MAN Standard Committee „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2.11 GHz“, ISBN 0-7381-3567-4 SS95079, 2003
- [110] A. Iera, A. Molinaro, S. Manaro, „Wireless Broadband Applications: The Teleservice Model and Adaptive QoS Provisioning“, IEEE Communications Magazine, Bd. 26, Nr. 1, S. 428-432, 1999
- [111] Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE, „Entwurf der ITG Empfehlung 5.2-03 Begriffe der Verkehrstheorie“, 1997
- [112] Intel, „IXP1200 Network Processor“, Product Brief, 1999
- [113] Intel, „IXP2400 Network Processor“, Product Brief, 2002
- [114] Intel, „IXP2800 Network Processor“, Product Brief, 2002
- [115] Internet2-Projekt, <http://www.internet2.edu/>
- [116] Internet Statistiken, <http://www.tlh-is.de>
- [117] Internet Systems Consortium, <http://www.isc.org/ds>
- [118] ITU-T Recommendation G.993.1, „Very high speed Digital Subscriber Line Foundation (VDSL)“, 2001
- [119] ITU-T Recommendation I.121, „Broadband aspect of ISDN“, 1991
- [120] ITU-T Recommendation I.371, „Traffic control and congestion control in BISDN“, 1996
- [121] ITU-T Recommendation H.323, „Packet-Based Multimedia Communications Systems“, 1998
- [122] ITU-T Recommendation X.641, „Information technology - Quality of service: framework“, 1997
- [123] ITU-T Recommendation Z.100, „Specification and Description Language (SDL)“, 1994
- [124] V. Jacobson, K. Nichols, K. Poduri, „An Expedited Forwarding PHB“, IETF Standard, RFC 2598, 1999
- [125] W. C. Jakes, „Microwave Mobile Communications“, Classic Reissue, IEEE Press, 1974
- [126] S. Jamin, S. Shenker, P. B. Danzig, „Comparison of Measurement-based Admission Control Algorithms for Controlled-Load Service“, IEEE INFOCOM - The Conference on Computer Communications, S. 973-980, 1997
- [127] W. Jiang, H. Schulzrinne, „Analysis of On-Off Patterns in VoIP and Their Effect on Voice Traffic Aggregation“, 9th IEEE International Conference on Computer Communication Networks, 2000
- [128] K. D. Kammeyer, „Nachrichtenübertragung“, Teubner, Stuttgart, 1996

- [129] H. Kaneko, J. Stankovic, S. Sen, K. Ramamritham, „Integrated Scheduling of Multimedia and Hard Real-Time Tasks”, 17th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '96), S. 206-219, 1996
- [130] T. Keller, L. Hanzo, „Adaptive Multicarrier Modulation: A Convenient Framework for Time-Frequency Processing in Wireless Communications“, Proceedings of the IEEE, Bd. 88, Nr. 5, S. 611-640, 2000
- [131] W. Kellerer, L. Choi, E. Steinbach, „Cross-Layer Adaptation for Optimized B3G Service Provisioning“, 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Special Session on Applications and Services in Wireless Networks, 2003
- [132] K. J. Kerpez, „DSL Spectrum Management Standard“, IEEE Communications Magazine, Bd. 41, Nr. 9, S. 116-123, 2002
- [133] S. Khandekar, „Developing A QoS Framework For Metro Ethernet Networks To Effectively Support Carrier-Class SLAs“, IIR Conference on Deploying Metro Ethernet, 2002, London
- [134] R. Klinski, „Referenzdatenfreie Kanalschätzung für Multiträgerübertragung“, Dissertation, Technische Universität München, 2002
- [135] E. Knightly, N. Shroff, „Admission Control for Statistical QoS: Theory and Practice“, IEEE Networks Magazine, Bd. 13, Nr. 2, S. 20-29, 1999
- [136] C. Köse, D. L. Goeckel, „On power adaptation in adaptive signaling systems“, IEEE Transactions on Communication, Bd. 48, S. 1769–1773, 2000
- [137] B. S. Krongold, K. Ramchandran, D. L. Jones, „Computational efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems“, IEEE Transactions on Communication, Bd. 48, Nr. 1, S. 23-27, 2000
- [138] H. Lackner, „High Performance Networking ATM in lokalen Netzen“, in „Kommunikation“, PIK 18(3), S. 127-139, K.G. Saur Verlag, München, 1995
- [139] T. Langguth, R. Steffen, M. Zeller, H. Steckenbiller, R. Knorr, „Performance Study Of Access Control In Power Line Communication“, 4th International Symposium On Power-line Communications And Its Applications, S. 97-104, 2000
- [140] T. Langguth, M. Zeller, R. Knorr, „Adaptive Dienstgüteunterstützung in Teilnehmeranschlußnetzen mit veränderlicher Datenrate“, Tagungsband 3. ITG-Fachtagung Netze und Anwendungen, S. 69-74, 2002
- [141] T. Langguth, R. Knorr, „Using Adaptive Quality of Service for OFDM Performance Improvement“, 8th International OFDM-Workshop (InOWo'03), S. 289-293, 2003
- [142] T. Langguth, R. Knorr, „Combining Quality of Service and dynamic Spectrum Management for DSL Performance Improvement“, XVth International Symposium on Services and Local Access, 2004
- [143] T. La Porta, M. Schwartz, „Performance Analysis of MSP Feature-rich High-Speed Transport Protocol“, ACM/IEEE Transactions on Networking, Bd. 1, Nr. 6, S. 740-753, 1993
- [144] E. Lawler, „Combinatorial Optimization: Networks and Matroids“, Dover Publications, ISBN 0486414531, 2001

- [145] T. H. Lee, K. C. Lai, S. T. Duann, „Real time call admission control for ATM networks with heterogeneous bursty traffic“, IEEE International Communications Conference (ICC), S. 80–85, 1994
- [146] J. Lee, R. V. Sonalkar, J. M. Cioffi, „Multi-user discrete bit-loading for DMT-based DSL systems“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), Nr. 1, S. 1268-1272, 2002
- [147] J. Lee, R. V. Sonalkar, J. M. Cioffi, „A multi-user rate and power control algorithm for VDSL“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), Nr. 1, S. 1273-1277, 2002
- [148] J. Lee, R. V. Sonalkar, J. M. Cioffi, „Multi-user bit-loading for multi-carrier systems“, submitted to IEEE Transactions on Communications, 2004, <http://www.stanford.edu/~jungwon/research/mbitloading.pdf>
- [149] S. Leischner, „Kompensation von Impulsstörungen in Multiträgersystemen“, Dissertation, TU München, 2002
- [150] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson, „On the Self-Similarity Nature of Ethernet traffic“, ACM SIGCOMM, S. 183-193, 1993
- [151] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson, „On the Self-Similarity Nature of Ethernet traffic (Extended Version)“, IEEE/ACM Transactions on Networking, Bd. 2, Nr. 1, S. 1-15, 1994
- [152] Y. Lin, Y. Lin, S. Yang, Y. Lin, „DiffServ Edge Routers over Network Processors: Implementation and Evaluation“, IEEE Network, Bd. 17, Nr. 4, S. 28-34, 2003
- [153] D. Linn, R. Morris, „Dynamics of Random Early Detection“, ACM SIGCOMM, S. 127-137, Sophia Antipolis, Frankreich, 1997
- [154] A. B. MacKenzie, S. B. Wicker, „Game Theory and the Design of Self-Configuring, Adaptive Wireless Networks“, IEEE Communications Magazine, Bd. 39, Nr. 11, S. 126-131, 2001
- [155] P. Marcus, P. Siegel, R. Roth, „Constrained systems and coding for recording channels“, Handbook of Coding Theory, Kapitel 20, ed. W. C. Huffman und V. Pless, Elsevier Press, 1998
- [156] H. Matsuoka, S. Sampei, N. Morinaga, Y. Kamio, „Adaptive modulation system with variable coding rate concatenated code for high quality multi-media communication systems“, IEICE Transactions on Communication, Bd. E79-B, S. 328–334, 1996
- [157] P. J. W. Melsa, R. C. Younce, C. E. Rohrs, „Impulse Response Shortening for Discrete Multitone Transceivers“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 44, Nr. 12, S. 1662-1672, 1996
- [158] M. Menth, S. Gehrsitz, J. Milbrandt, „Fair Assignment of Efficient Network Admission Control Budgets“, International Teletraffic Congress (ITC18), S. 1121-1130, 2003
- [159] M. Menth, S. Kopf, J. Milbrandt, „A Performance Evaluation Framework for Network Admission Control Methods“. 10th IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS), 004
- [160] A. Mertz, M. Pollakowski, „xDSL & Access Networks“, Prentice Hall, München, 2002
- [161] Metro Ethernet Forum, <http://www.metroethernetforum.org/>
- [162] Metro Ethernet Forum, „Ethernet Services Model, Phase 1“, Technical Specification MEF 1, 2003

- [163] Metro Ethernet Forum, „Metro Ethernet Networks - A Technical Overview“, 2003
- [164] Metro Ethernet Forum, „Metro Ethernet Networks - A Technical Overview“, 2002
- [165] D. Mitra, „An asynchronous distributed algorithm for power control in cellular 4G systems“, 4th Winlab Workshop Third Generation Wireless Information Network, Rutgers University, 1993
- [166] Y. Miyao, „A call admission control scheme in ATM networks“, IEEE International Communications Conference (ICC), S. 391–396, 1991
- [167] Motorola Corporation „C-5 Digital Communications Processor“ Product Brief, 2000
- [168] Motorola Corporation, „C-Ware Software Toolset“, Product Brief, 2000
- [169] Motorola Corporation, „AudioCodes™ Selects Motorola Network Processor for Its Next-Generation Voice over Packet Media Gateway Solutions“, http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,,3332_2752_23,00.html
- [170] T. Murase, H. Suzuki, S. Sato, T. Takeuchi, „A call admission control scheme for ATM networks using a simple quality estimate“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 9, Nr. 9, S. 1461–1470, 1991
- [171] K. Nahrstedt, D. Xu, D. Wichadakul, B. Li, „QoS-Aware Middleware for Ubiquitous and Heterogeneous Environments“, IEEE Communications Magazine, Bd. 39, Nr. 11, S. 140–148, 2001
- [172] R. Neogi, K. Lee, K. Panesar, J. Zhou, „Design and Performance of a Network-Processor-Based Intelligent DSLAM“, IEEE Networks, Bd. 17, Nr. 4, S. 56–62, 2003
- [173] Networking Glossary - Dictionary of Computer, Internet and Network Terms, <http://compnetworking.about.com/library/glossary/blglossary.htm>
- [174] L. V. Nguyen, T. Evers, J. F. Chicharo, „Differentiated Services Performance Analysis“, 5th IEEE Symposium on Computing and Communication, S. 328–333, 2000
- [175] K. Nichols, B. Carpenter, „Definition of Differentiated Services Per Domain Behaviors and Rules for their Specification“, IETF Standard, RFC 3086, 2001
- [176] K. Nichols, V. Jacobson, L. Zhang, „A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet“, IETF Standard, RFC 2638, 1999
- [177] I. Norros, „A storage model with self-similar input“, Queueing Systems Theory and Applications, 1994
- [178] A. Oppenheim, R. Schaffer, „Discrete-time signal processing“, Prentice-Hall, New York, 1989
- [179] T. J. Ott, T. V. Lakshman, L. H. Wong, „SRED: Stabilized RED“, IEEE INFOCOM - The Conference on Computer Communications, S. 1346–1355, 1999
- [180] M. Ott, G. Michelitsch, D. Reininger, G. Welling, „An Architecture for Adaptive QoS and its Application to Multimedia Systems Design“, Special Issue of Computer Communications on Building Quality of Service into Distributed Systems, Bd. 21, Nr. 4, S. 334–349, 1998
- [181] P. Pan, E. Hahne, H. Schulzrinne, „BGRP: Sink-Tress-Based Aggregation for Inter-Domain Reservations“, KICS, Journal of Communications and Networks, Bd. 2, Nr. 2, 2000

- [182] P. Pan, H. Schulzrinne, „YESSIR: A Simple Reservation Mechanism for the Internet”, International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), S. 141-151, 1998
- [183] A. Parekh, R. Gallager, „A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single Node Case“, IEEE/ACM Transactions on Networking, Bd. 1, Nr. 3, S. 344-357, 1993
- [184] A. Parekh, R. Gallager, „A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Multiple Node Case“, IEEE INFOCOM - The Conference on Computer Communications, S. 521-530, 1993
- [185] V. Paxson, S. Floyd, „Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling“, IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995
- [186] A. Peled, A. Ruiz, „Frequency Domain Data Transmission using Reduced Computational Complexity Algorithms“, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, S. 964-967, 1980
- [187] H. Perros, K. Elsayed, „Call Admission Control Schemes: A Review”, IEEE Communications Magazine, Bd. 34, Nr. 11, S. 82-91, 1996
- [188] M. Pollakowski, „xDSL - Hochratige Datenübertragung im Anschlussleitungsnetz“, Der Fernmeldeingenieur, Hefte 7/8, 1998
- [189] G. A. Politis, P. Sampatakis, I. S. Venieris, „Design of a Multi-Layer Bandwidth Broker Architecture“, Interworking 2000, S. 316-325, 2000
- [190] A. Popescu, „Traffic Self-Similarity“, IEEE International Conference on Telecommunications (ICT 2001), 2001
- [191] J. Postel, „Transmission Control Protocol“, IETF Standard, RFC 793, STD07, 1981
- [192] J. Proakis, „Digital Communications“, McGraw-Hill, New York, 1995
- [193] M. De Pryker, „Asynchronous Transfer Mode: Solution for Broadband ISDN“, 2. Ed., S. 352 ff, ISBN 0131785427, Prentice Hall, 1993
- [194] QBone Architecture (v1.0) , <http://qbone.internet2.edu/arch/>
- [195] QBone Bandwidth Broker Architecture, <http://qbone.internet2.edu/bb/bboutline2.html>
- [196] R. Ramaswamy, N. Weng, T. Wolf, „Considering Processing Cost in Network Simulations“, ACM SIGCOMM, Workshop on Models, Methods and Tools for Reproducible Network Research, S. 47-56, 2003
- [197] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (Reg-TP), „Jahresbericht 2003 - Marktdaten der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post“, <http://www.regtp.de>
- [198] R. Rejaie, D. Estrin, M. Handley, „Quality Adaptation for Congestion Controlled Video Playback over the Internet”, ACM SIGCOMM, 1999
- [199] C. Roberge, J. Adoul, „Fast on-line speech/voicebanddata discrimination for statistical multiplexing of data with telephone conversations“, IEEE Transactions on Communication, Bd. 34, Nr. 8, S. 744-751, 1986
- [200] J. Roberts, U. Mocci, J. Virtamo, „Broadband Network Teletraffic“, Final Report of Action COST 242, 1996

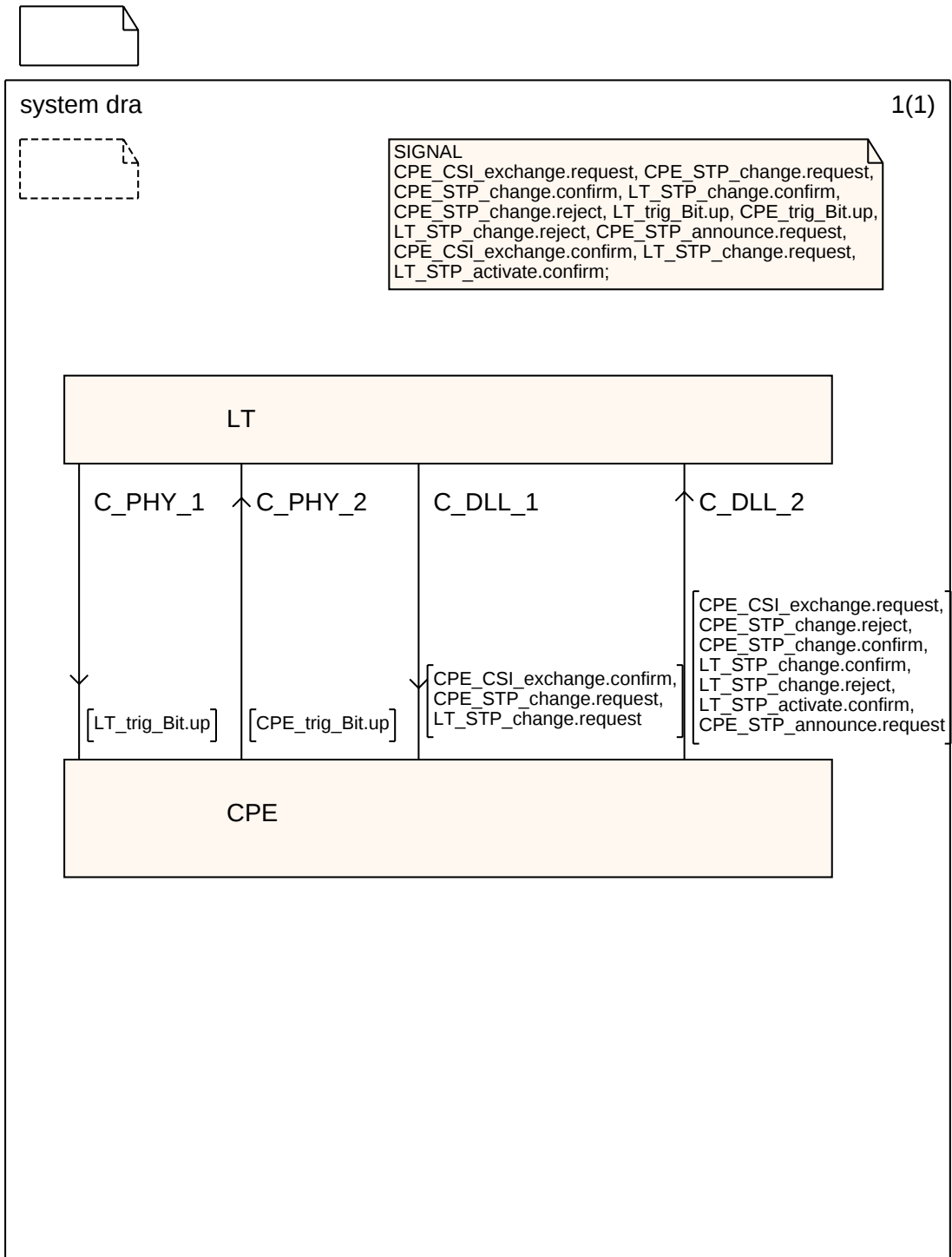
- [201] P. Robertson, S. Kaiser, „Analysis of the Effect of Phase-Noise in Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Systems“, IEEE International Conference on Communications (ICC), S. 1652-1657, 1995
- [202] M. Russel, G. Stüber, „Interchannel Interference analysis of OFDM in a mobile environment“, IEEE Vehicular Technology Conference, Bd. 2, S. 820-824, 1995
- [203] H. Saito, „Call admission control in an ATM network using upper bound cell loss probability“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 9, Nr. 40, S. 1512–1521, 1992
- [204] H. Saito, K. Shiimoto, „Dynamic call admission control in ATM networks“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 9, Nr. 7, S. 982–989, 1991
- [205] B. R. Saltzberg, „Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System“, IEEE Transactions on Communication, Bd. COM-15, S. 805-811, 1967
- [206] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson, „RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications“, IETF Standard, RFC 3550, 2003
- [207] N. Shah, „Understanding Network Processors“, Master Arbeit, Dept. of Electrical Engineering & Computer Sciences, University of California, Berkeley, 2001
- [208] S. Shah, K. Chen, K. Nahrstedt, „Dynamic Bandwidth Management in Single-hop Ad hoc Wireless Networks“, IEEE PerCom 2003, 2003
- [209] Z. Shen, J. G. Andrews, B. L. Evans, „Optimal Power Allocation in Multiuser OFDM Systems“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), S. 337 - 341, 2003
- [210] S. Shenker, C. Partridge, R. Guerin, „Specification of Guaranteed Quality of Service“, IETF Standard, RFC 2212, 1997
- [211] M. R. Sherif, I. W. Habib, M. Nagshineh, P. Kermani, „Adaptive allocation of resources and call admission control for wireless ATM using genetic algorithms“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 18, Nr. 2, S. 262-282, 2000
- [212] K. Shiimoto, S. Chaki, „Adaptive connection admission control using real-time traffic measurements in ATM networks“, IEEE Transactions on Communication, Bd. E78-B, Nr. 4, S. 458–464, 1995
- [213] K. Shiimoto, N. Yamanaka, T. Takahashi, „Overview of Measurement-based Connection Admission Control Methods in ATM Networks“, IEEE Communications Surveys, S. 2-13, 1999
- [214] W. Simpson, „The Point-to-Point Protocol (PPP)“, IETF Standard, RFC 1661, STD 51, 1994
- [215] W. Simpson, „PPP in HDLC-like Framing“, IETF Standard, RFC 1662, STD 51, 1994
- [216] Solidum Systems Corporation, „PAX.ware 1200 Evaluation“, Product Brief, 2001
- [217] R. V. Sonalkar, „A Practical Bit-Loading Algorithm for Achieving Bi-directional Shannon Capacity with Frequency-overlapped DSL Modems“, 36th Annual Conference on Information Sciences and System“, 2002
- [218] R. V. Sonalkar, R. R. Shively, „An efficient bit-loading algorithm for DMT application“, IEEE Communication Letters, Bd. 4, Nr. 3, S. 80-82, 2000
- [219] G. Song, Y. Li, „Utility-based joint physical-MAC layer optimization in OFDM“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), Bd. 21, Nr. 1, S. 680-684, 2002

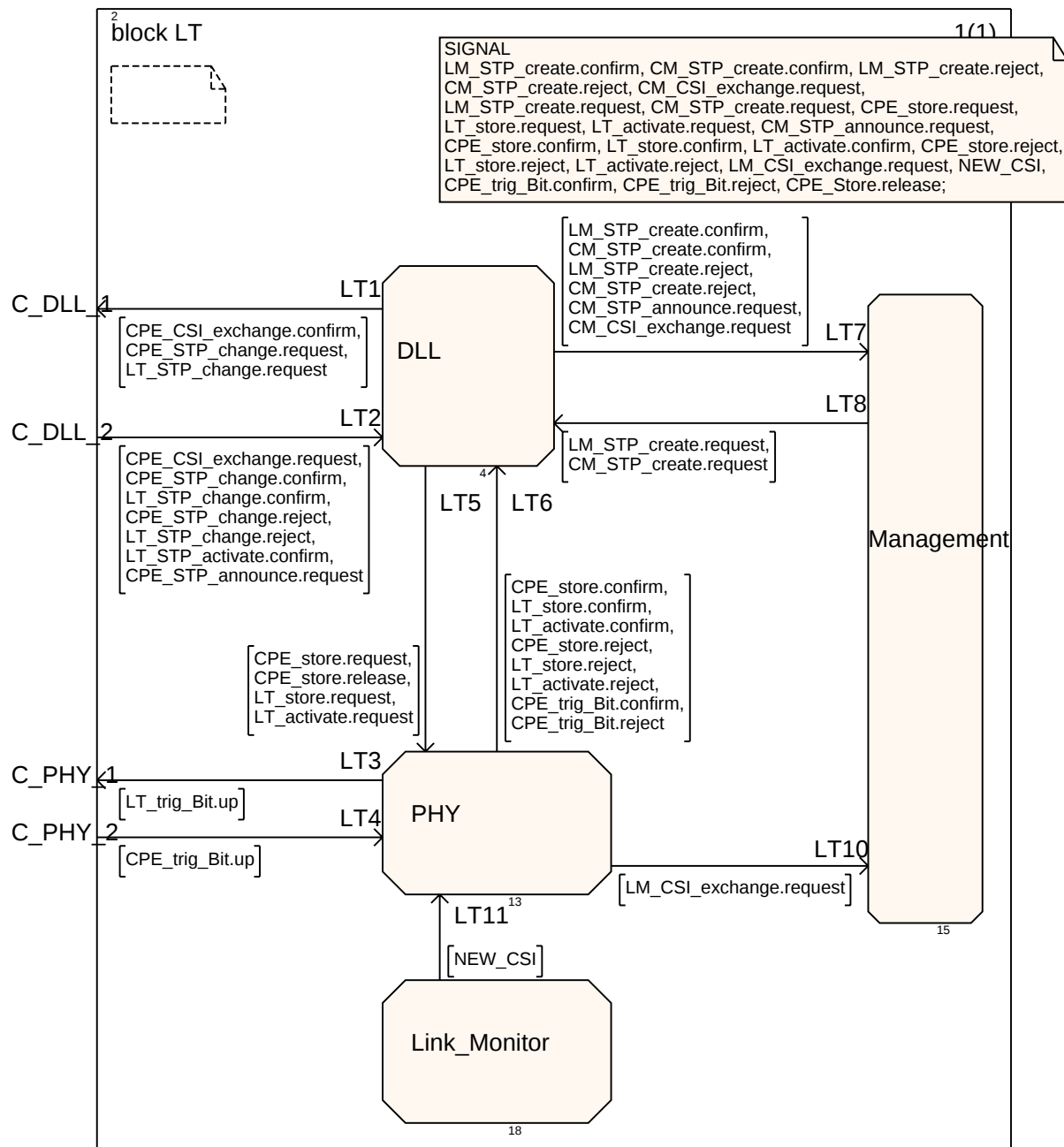
- [220] K. B. Song, S. T. Chung, G. Ginis, J. M. Cioffi, „Dynamic Spectrum Management for Next-Generation DSL Systems“, IEEE Communications Magazine, Bd. 40, Nr. 10, S. 101-109, 2002
- [221] T. Starr, J. M. Cioffi, P. J. Silvermann, „Understanding Digital Subscriber Line Technology“, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999
- [222] R. Stelle, W. Webb, „Variable rate QAM for data transmission over Rayleigh fading channels“, IEEE Wireless, S. 1-14, Calgary, 1991
- [223] W. Tan, A. Zakhor, „Real-Time Internet Video Using Error Resilient Scalable Compression and TCP-Friendly Transport Protocol“, IEEE Transactions on Multimedia, S. 40-405, 1999
- [224] A. Tanenbaum, „Computer Networks“, 4. Auflage, Prentice Hall, New York, USA, 2002
- [225] M. S. Taqqu, W. Willinger, R. Sherman, „Proof of Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling“, Computer Communication Review, 1997
- [226] Telelogic AB, „Telelogic TAU SDL Suite“, <http://www.telelogic.com/products/tau/sdl/index.cfm>
- [227] TEQUILA-Project, <http://www.ist-tequila.org>
- [228] H. Többen, „Konzeption eines marktorientierten Routingverfahrens für ATM-Netze auf der Basis Intelligenter Agenten“, Dissertation, Fachbereich 13 - Informatik, TU Berlin, 2000
- [229] H. Tong, T. X. Brown, „Adaptive call admission control under quality of service constraints: A reinforcement learning solution“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Bd. 18, Nr. 2, S. 209-221, 2000
- [230] L. Tong, Q. Zhao, G. Mergen, „Multipacket Reception in Random Access Wireless networks: From Signal Processing to Optimal Medium Access Control“, IEEE Communications Magazine, Bd. 39, Nr. 11, S. 108-112, 2001
- [231] T. Tuan, K. Park, „Congestion Control for Self-Similar Network Traffic“, Purdue University, 1998
- [232] J. Turner, „Managing bandwidth in ATM networks with bursty traffic“, IEEE Network, Bd. 6, Nr. 5, S. 50-58, 1992
- [233] T. Ue, S. Sampei, N. Morinaga, „Symbol rate and modulation level controlled adaptive modulation/TDMA/TDD for personal communication systems“, IEEE Vehicular Technology Conference, S. 306-310, 1995
- [234] A. Voglsang, H. Hutzelmann, H. Steckenbiller, „Effektive Nutzung von Telefonanschlussleitungen durch optimierte Kabelbelegung“, Tagungsband zur 10. ITG-Fachtagung Kommunikationskabelnetze, Köln, 2003
- [235] J. L. Wang, A. Erramilli, „Monitoring Packet Traffic Levels“, IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM), S. 274-280, 1994
- [236] W. T. Webb, R. Steele, „Variable rate QAM for mobile radio“, IEEE Transactions on Communication, Bd. 43, S. 2223-2230, 1995
- [237] S. B. Weinstein, P. M. Ebert, „Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform“, IEEE Transactions on Communications, Bd. 19, Nr. 5, S. 628-634, 1971

- [238] H.-W. Wellhausen, „Eigenschaften symmetrischer Kabel der Ortsnetze und generelle Übertragungsmöglichkeiten“, *Der Fernmeldeingenieur*, Heft 10/11, 1989
- [239] B. J. West, B. Deering, „The Lure of Modern Science Fractal Thinking“, *Studies of nonlinear Phenomena in Life Sciences*, 1995
- [240] W. Willinger, V. Paxson, M. S. Taqqu, „Self-Similarity and Heavy Tails: Structural Modeling of Network Traffic“, in R. Adler, R. Feldman, M. S. Taqqu (Ed.), „A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications“, Birkhauser, Boston, 1998
- [241] W. Willinger, M. S. Taqqu, A. Erramilli, „A Bibliographical Guide to Self-Similar Traffic and Performance Modeling for Modern High-Speed-Networks“, *Stochastic Networks: Theory and Applications*, Oxford University Press, 1996
- [242] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Shermanand, D. V. Wilson, „Self-Similarity through High Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 5, Nr. 1, S. 71-86, 1997
- [243] S. K. Wilson, „Digital audio braodcasting in a fading and dispersive channel“, *Dissertation*, Stanford University, 1994
- [244] J. Wroclawski “The Use of RSVP with IETF Integrated Services”, *IETF Standard*, RFC 2210, 1997
- [245] J. Wroclawski, „Specification of the Controlled-Load Network Element Service”, *IETF Standard*, RFC 2211, 1997
- [246] X. Xiao, L.M. Ni, „Internet QoS: the Big Picture“, *IEEE Network*, Bd. 13, Nr. 2, S. 8-18, 1999
- [247] W. Yu, J. M. Cioffi, „Competitve Equilibrium in the Gaussian Interference Channel“, *IEEE ISIT*, S. 431 ff, 2000
- [248] W. Yu, G. Ginis, J. M. Cioffi, „Distributed multiuser power control for digital subscriber lines“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 20, Nr. 5, S. 1105-1115, 2002
- [249] W. Yu, G. Ginis, J. M. Cioffi, „An adaptive multiuser power control algorithm for VDSL“, *IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM)*, Nr. 1, S. 394-398, 2001

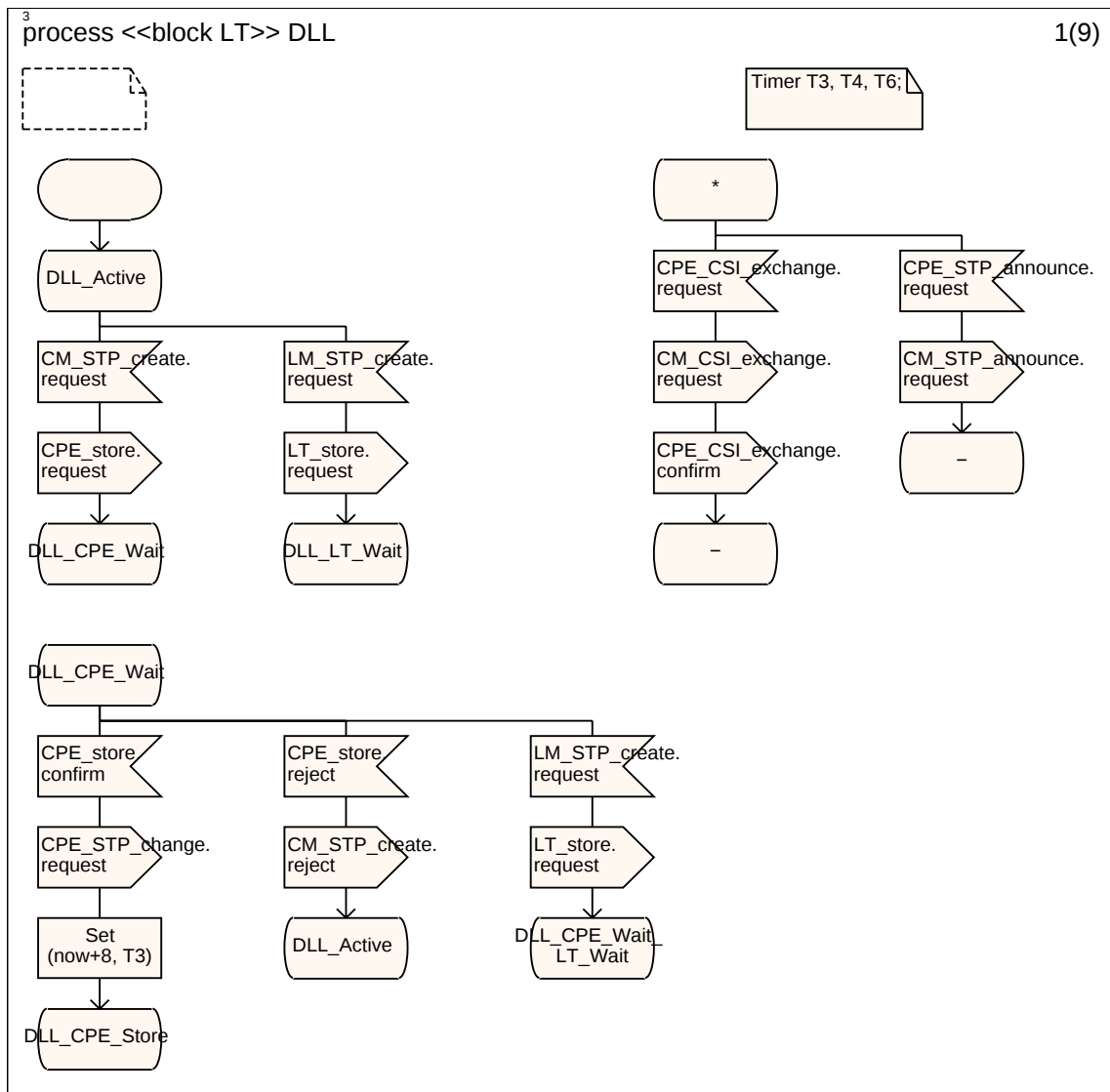
Anhang A - Entwurf des Signalisierungsprotokoll

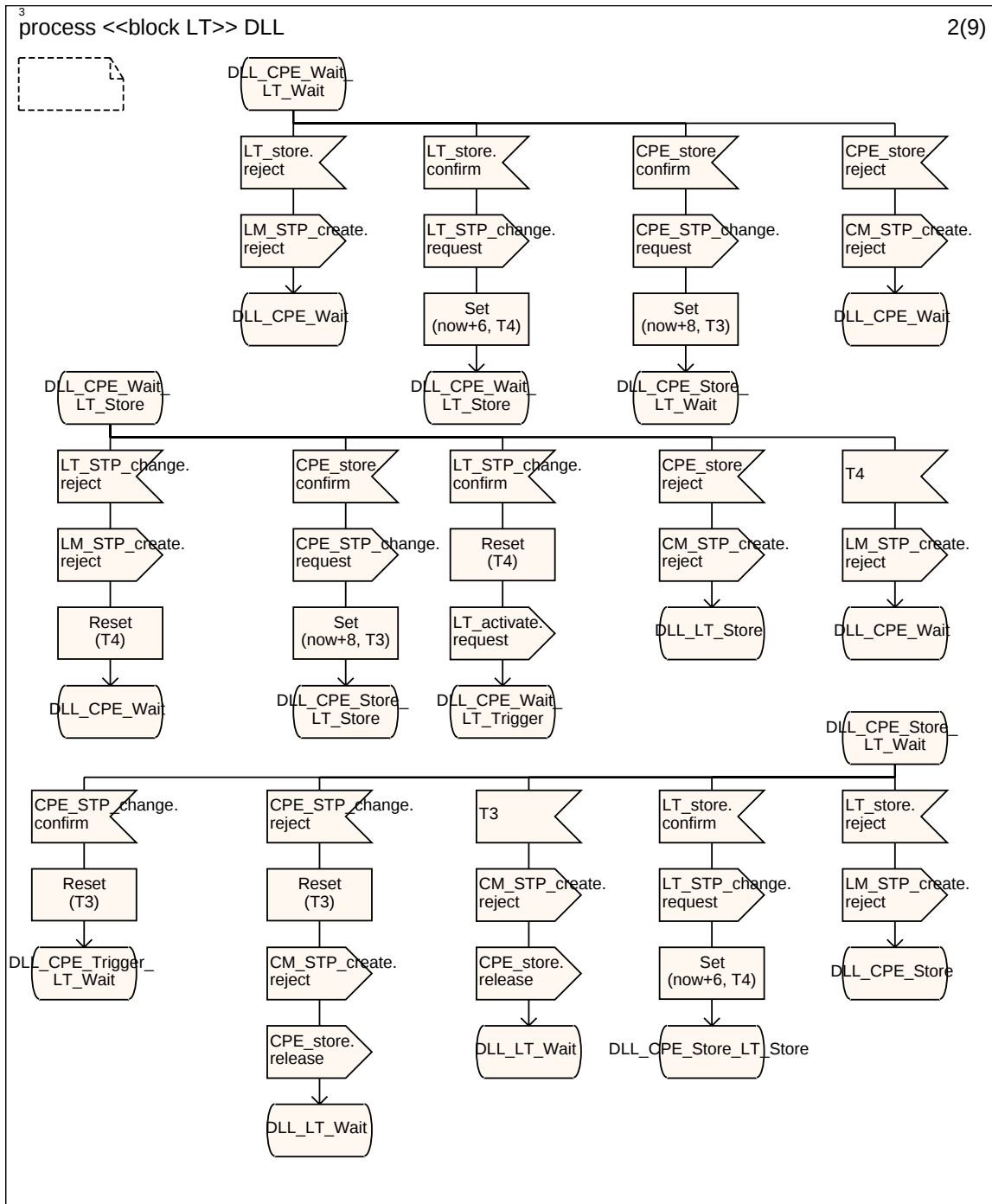
A1 Gesamtsystem

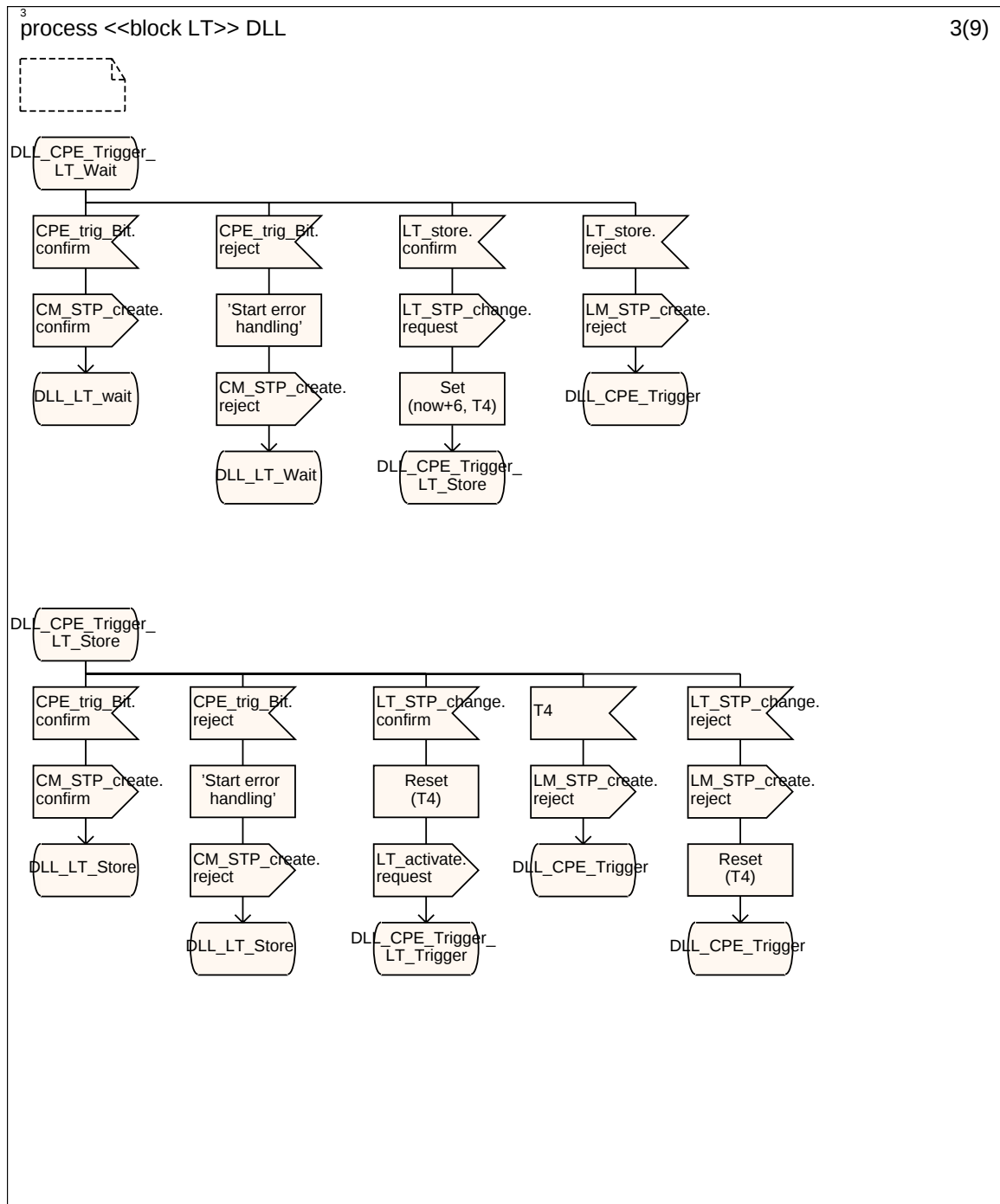


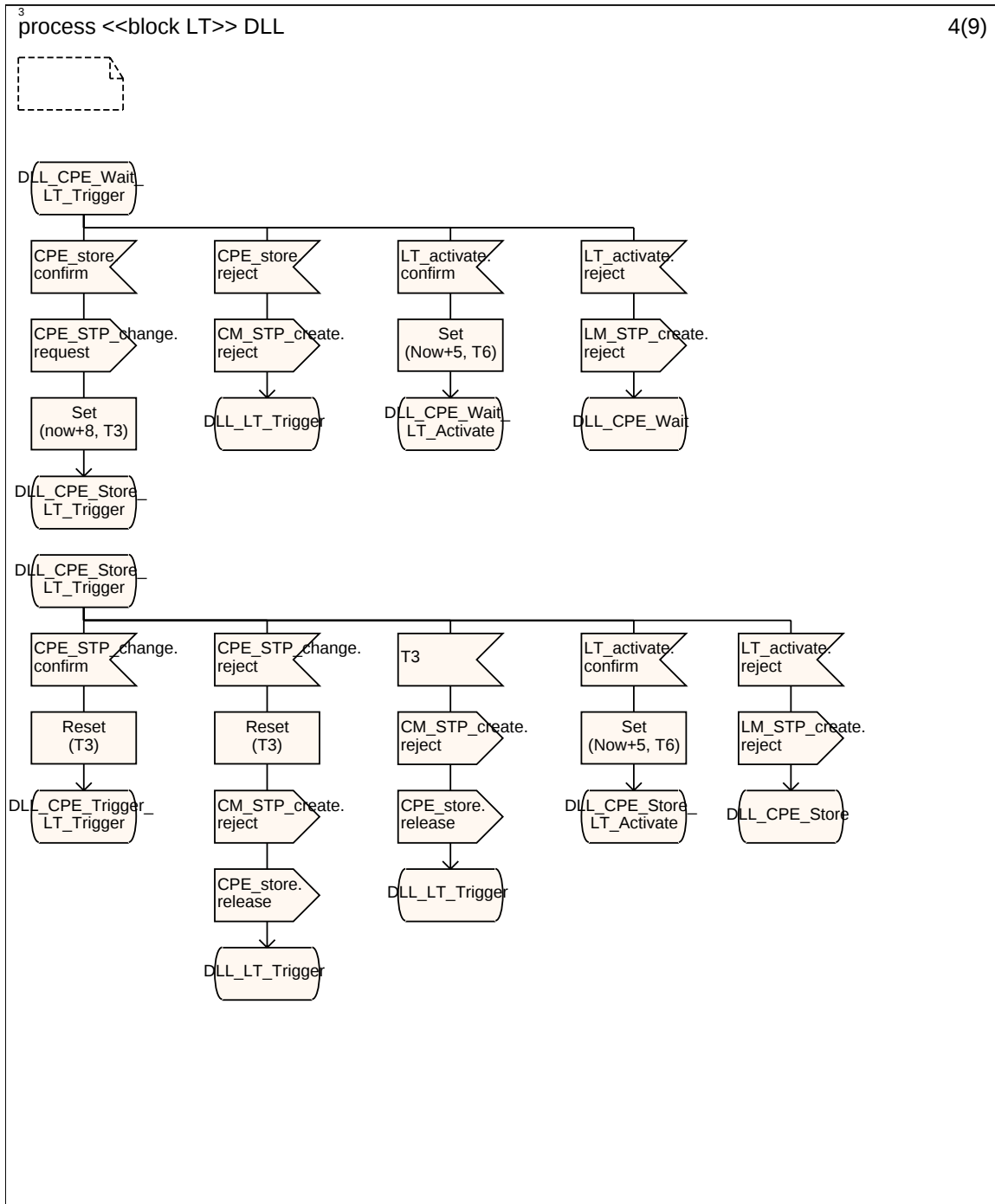


A2.1 Sicherungsschicht



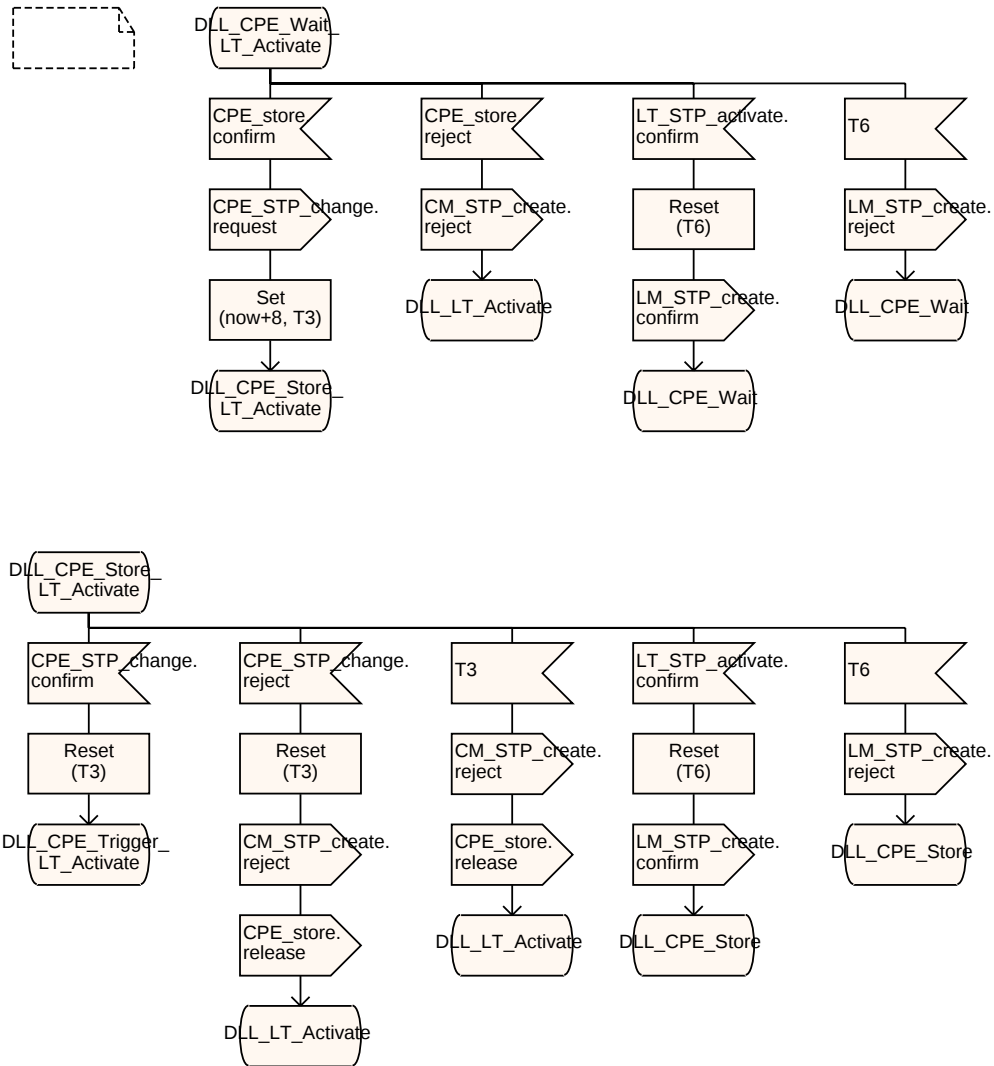


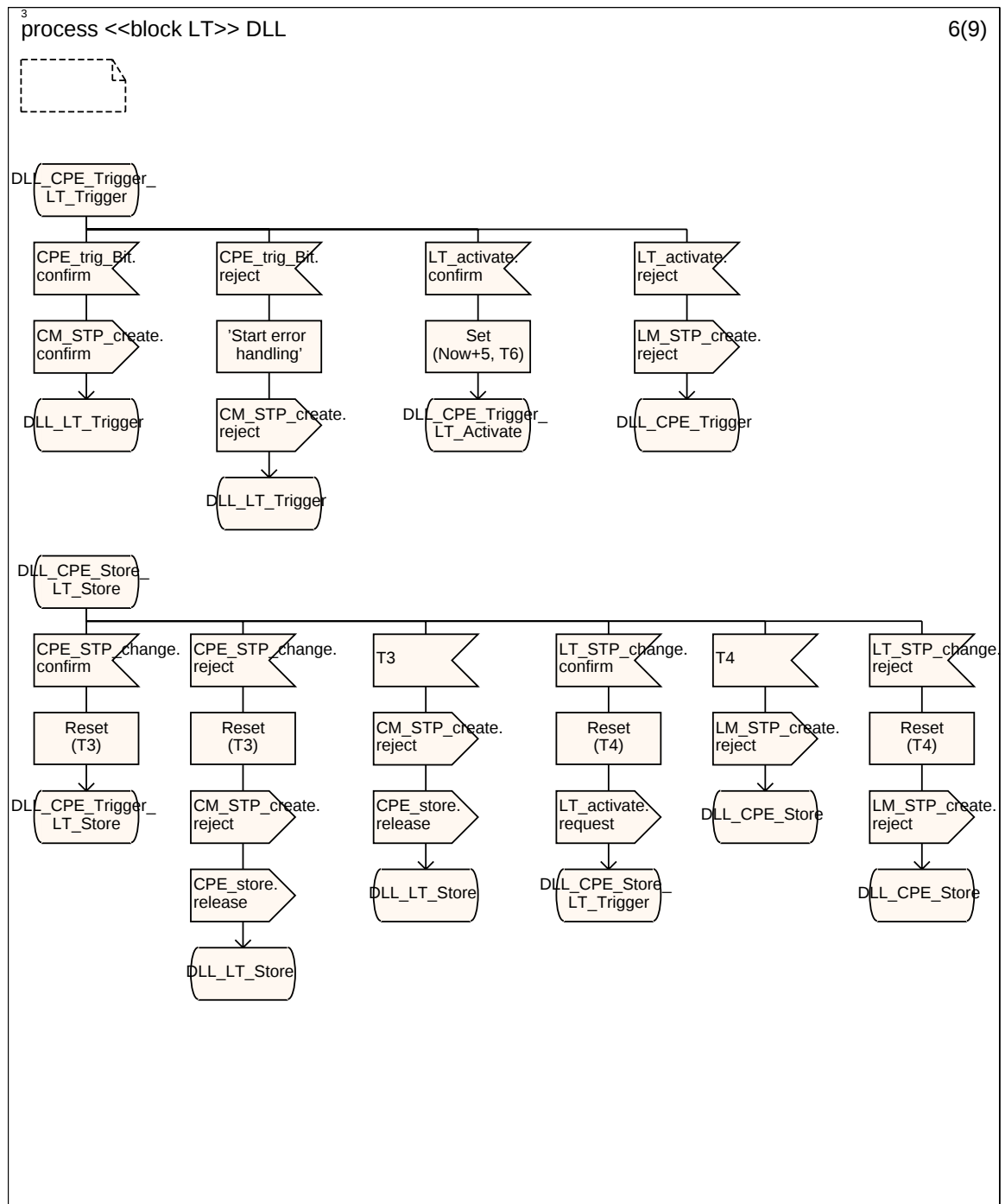


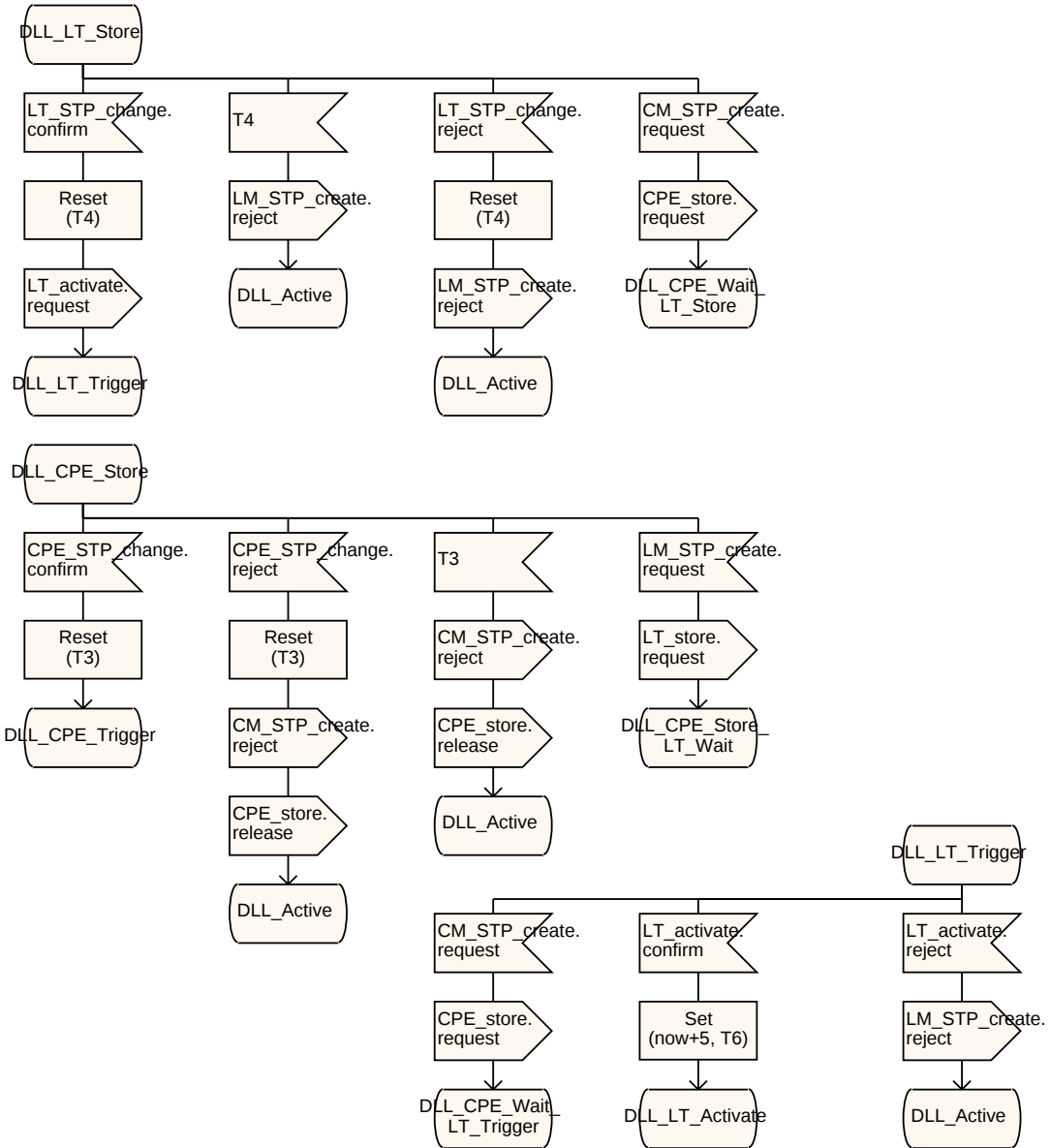


³
process <<block LT>> DLL

5(9)

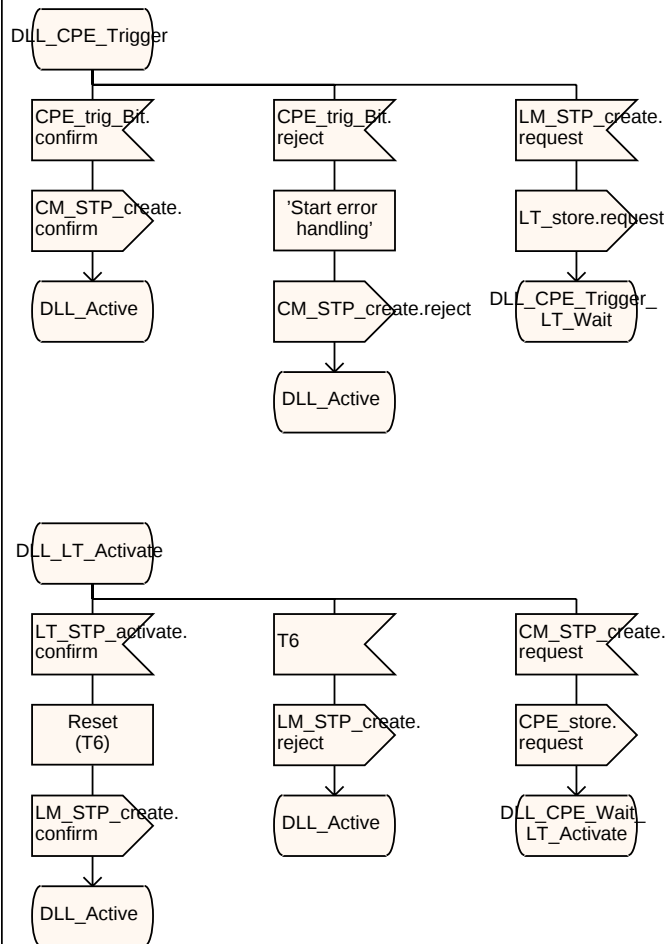






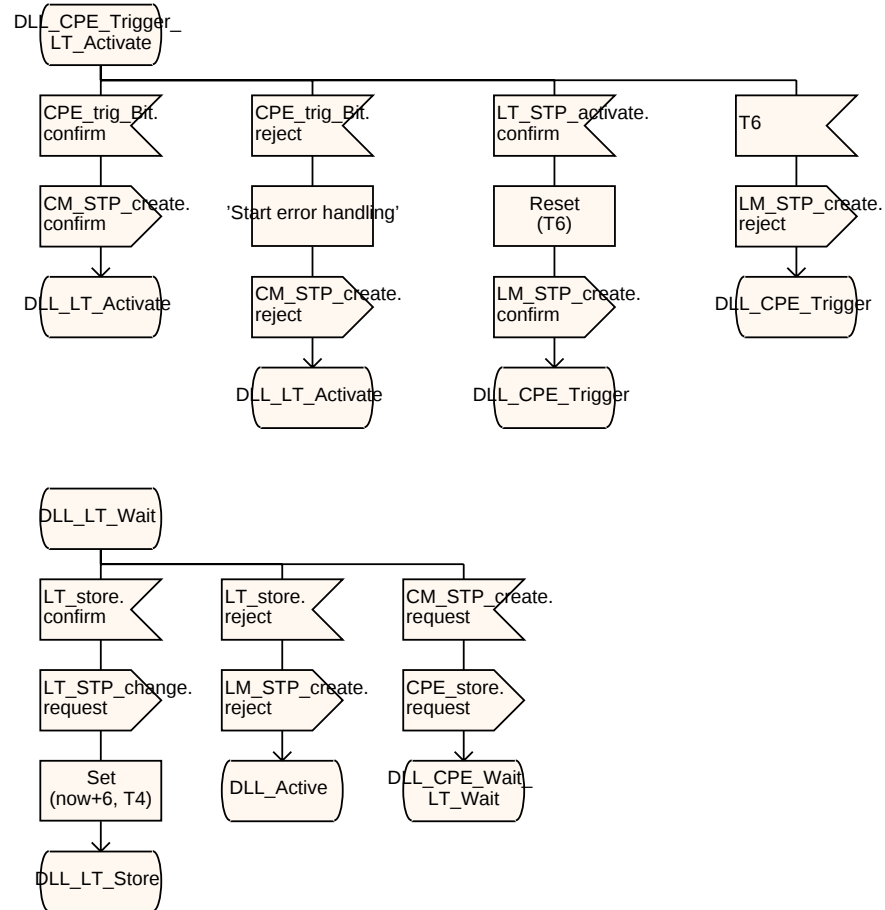
³
process <<block LT>> DLL

8(9)

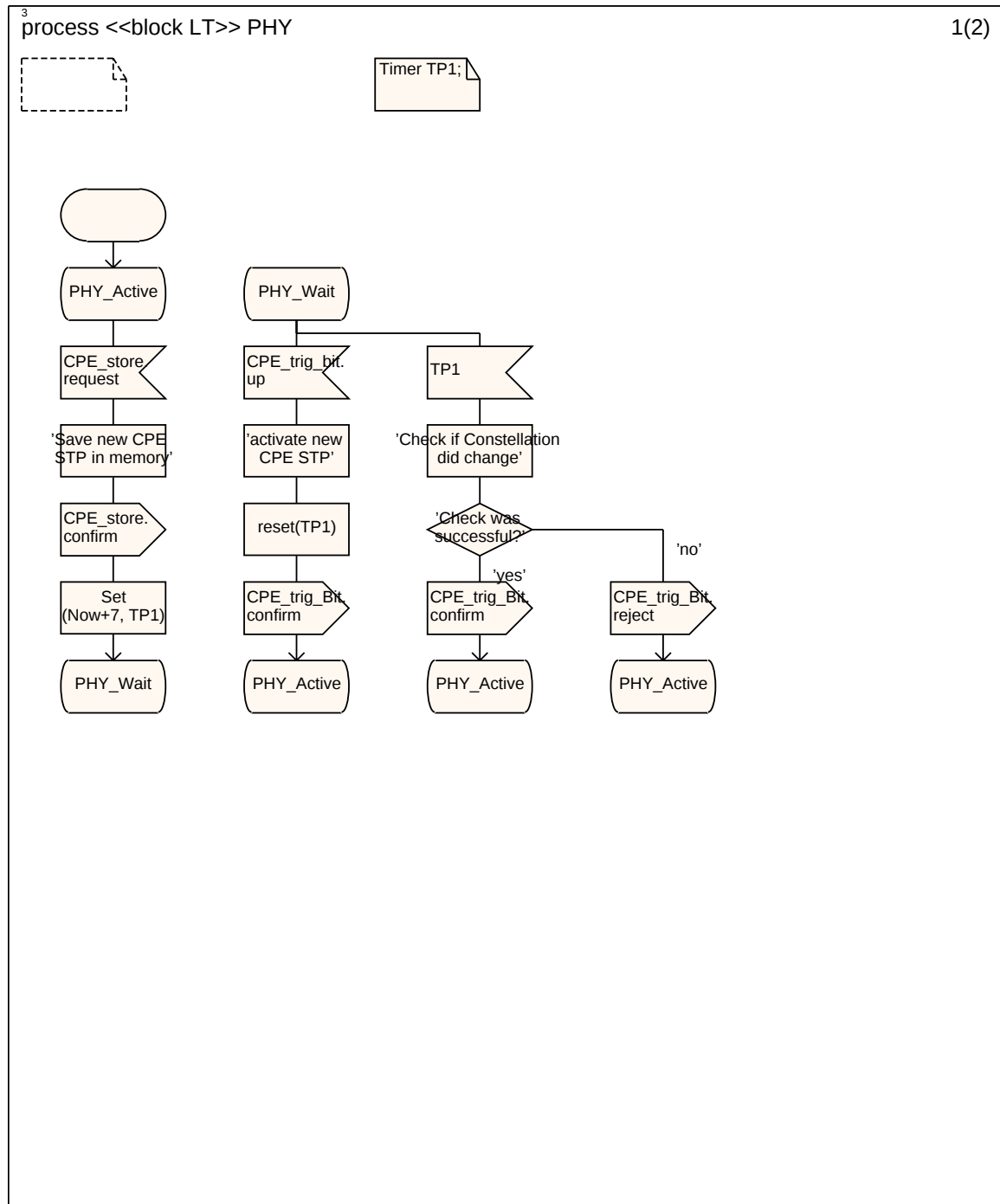


³
process <<block LT>> DLL

9(9)

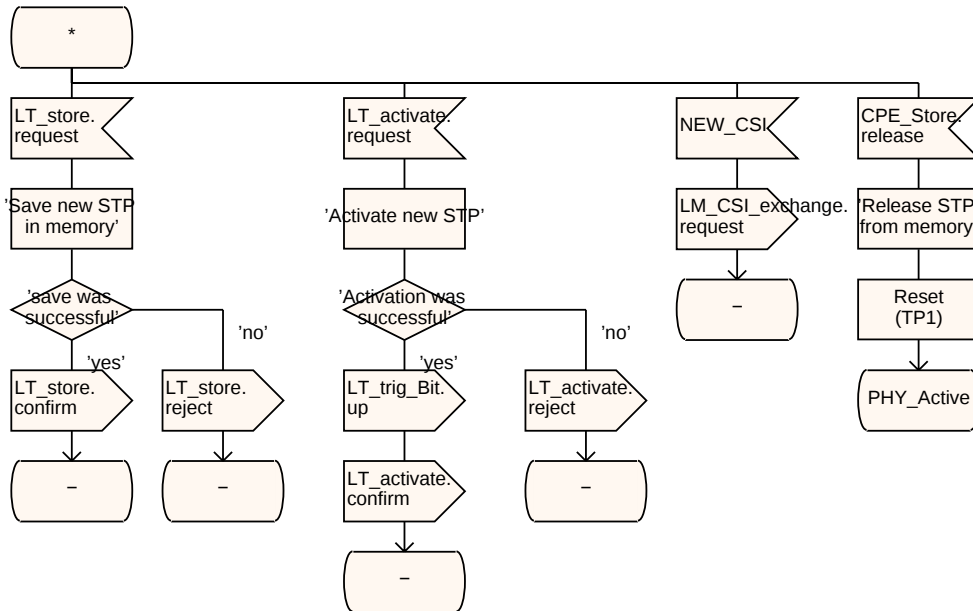


A2.2 Übertragungsschicht

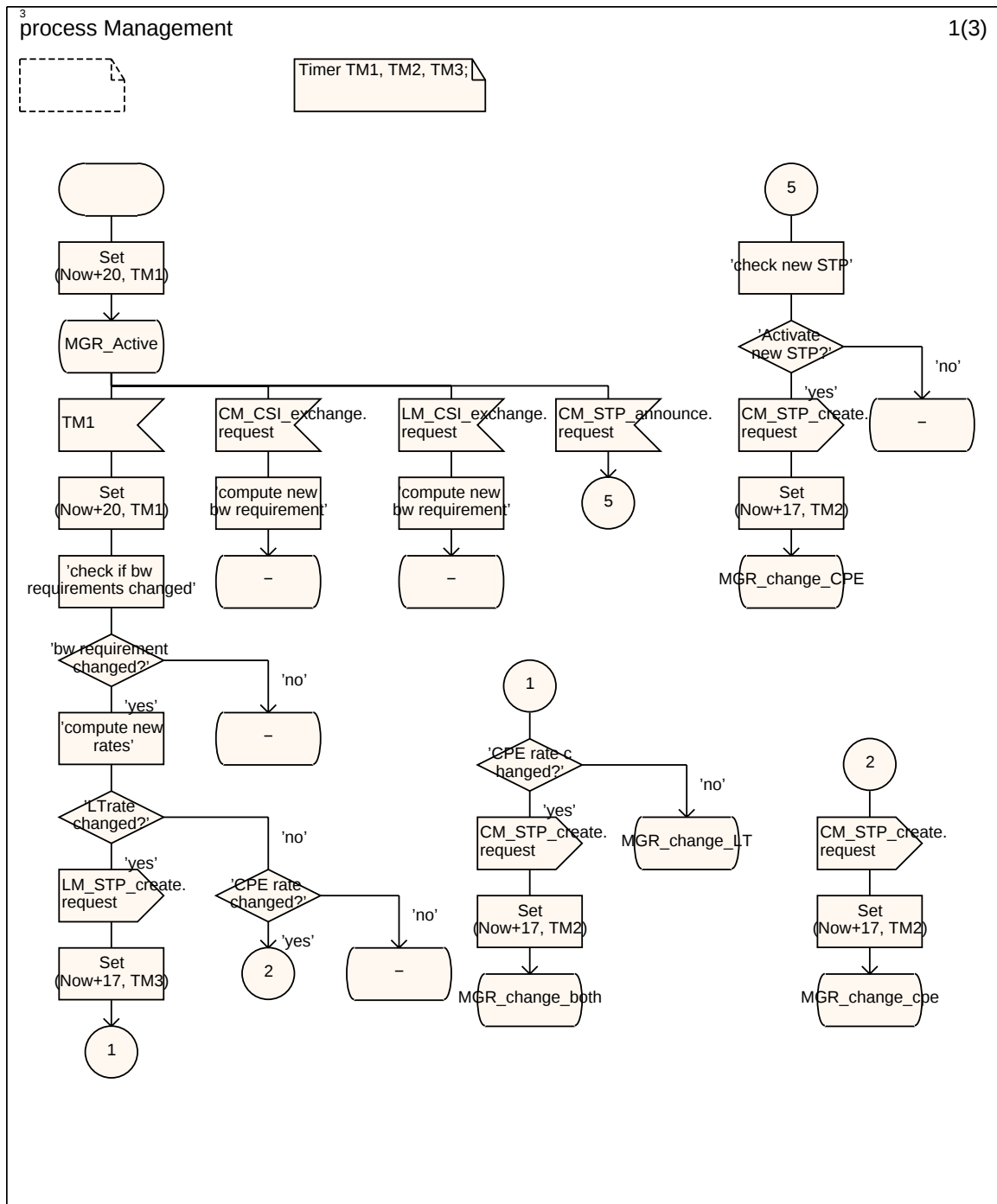


³
process <<block LT>> PHY

2(2)

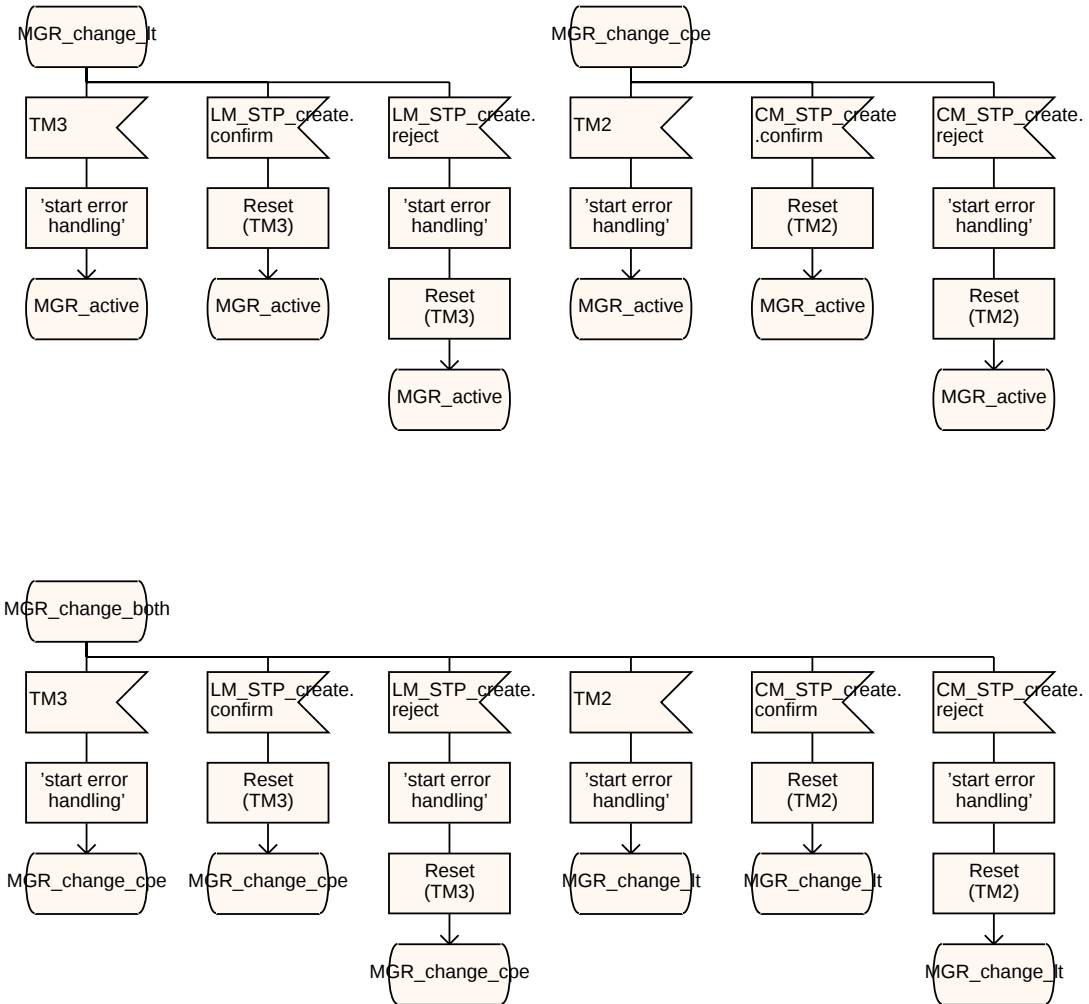


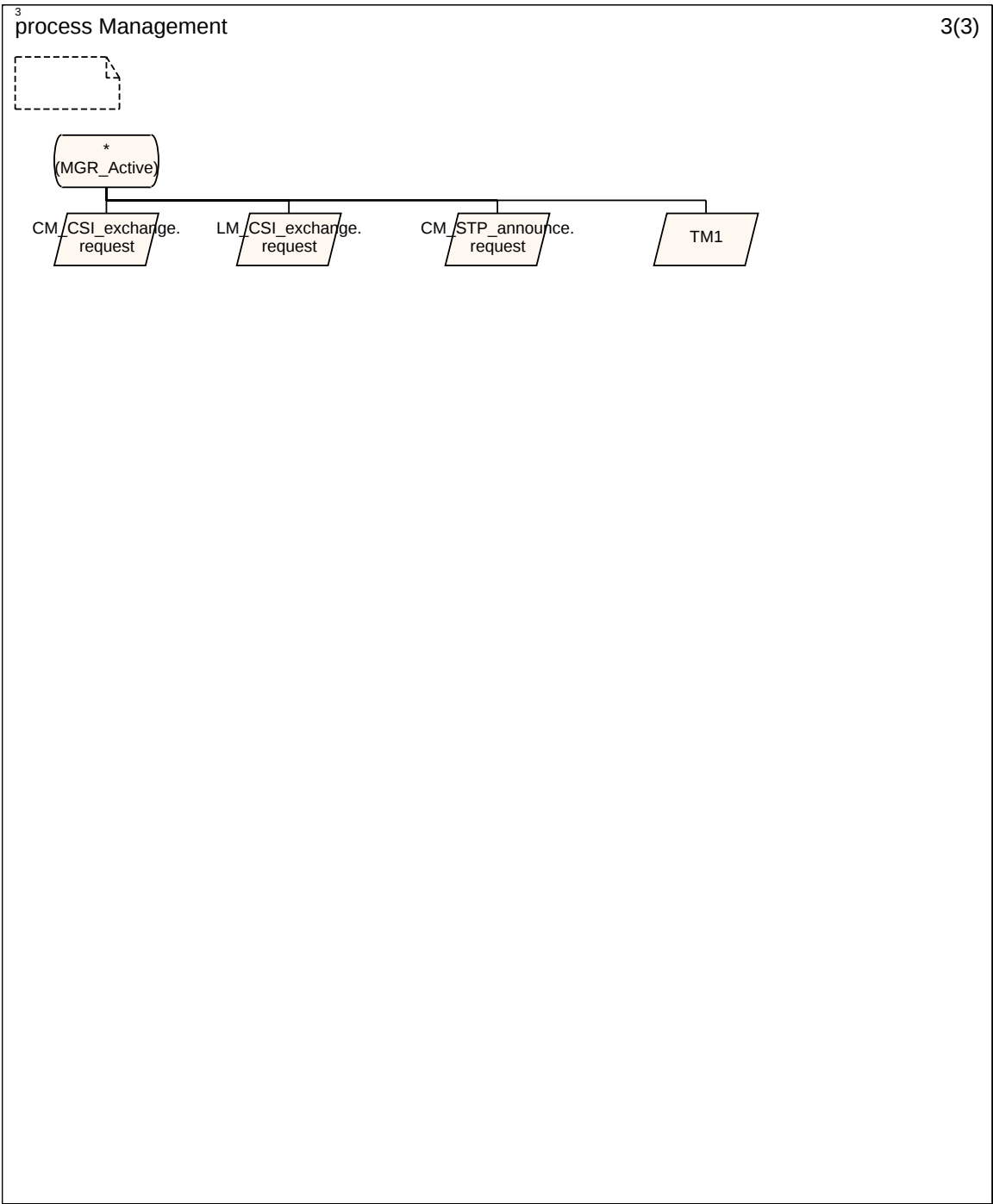
A2.3 Dienstgüte- und Datenratenmanagement



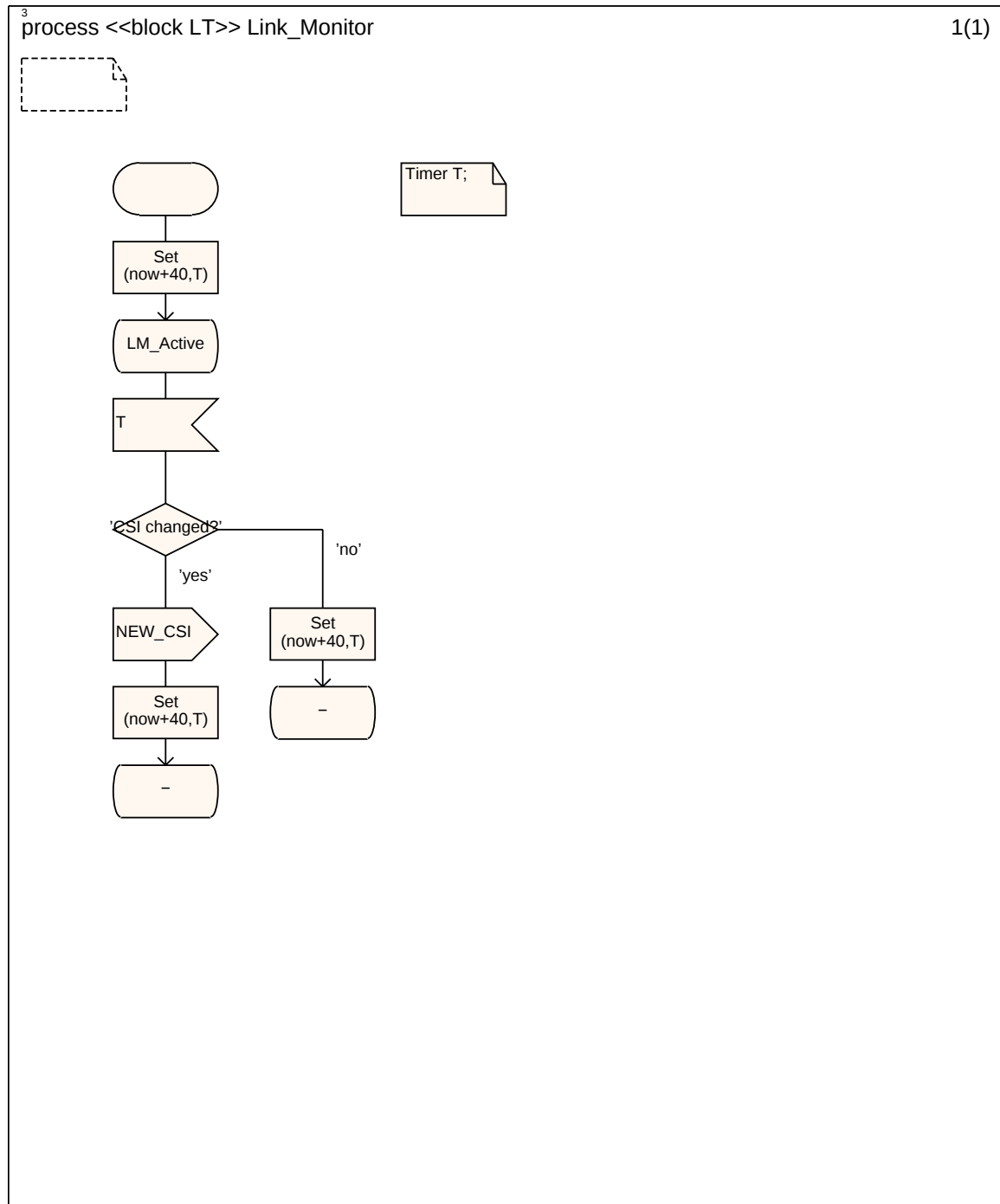
process Management

2(3)

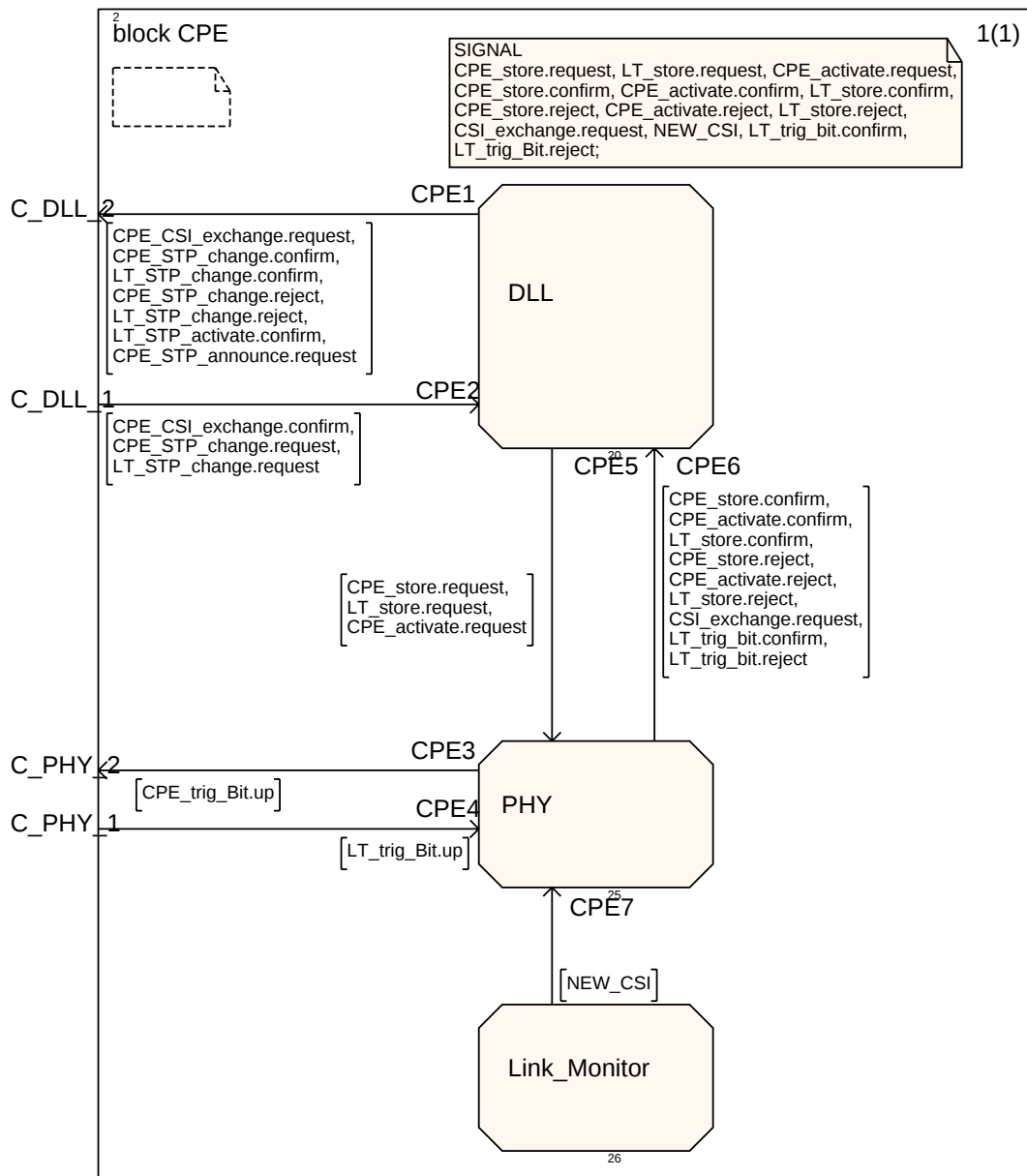




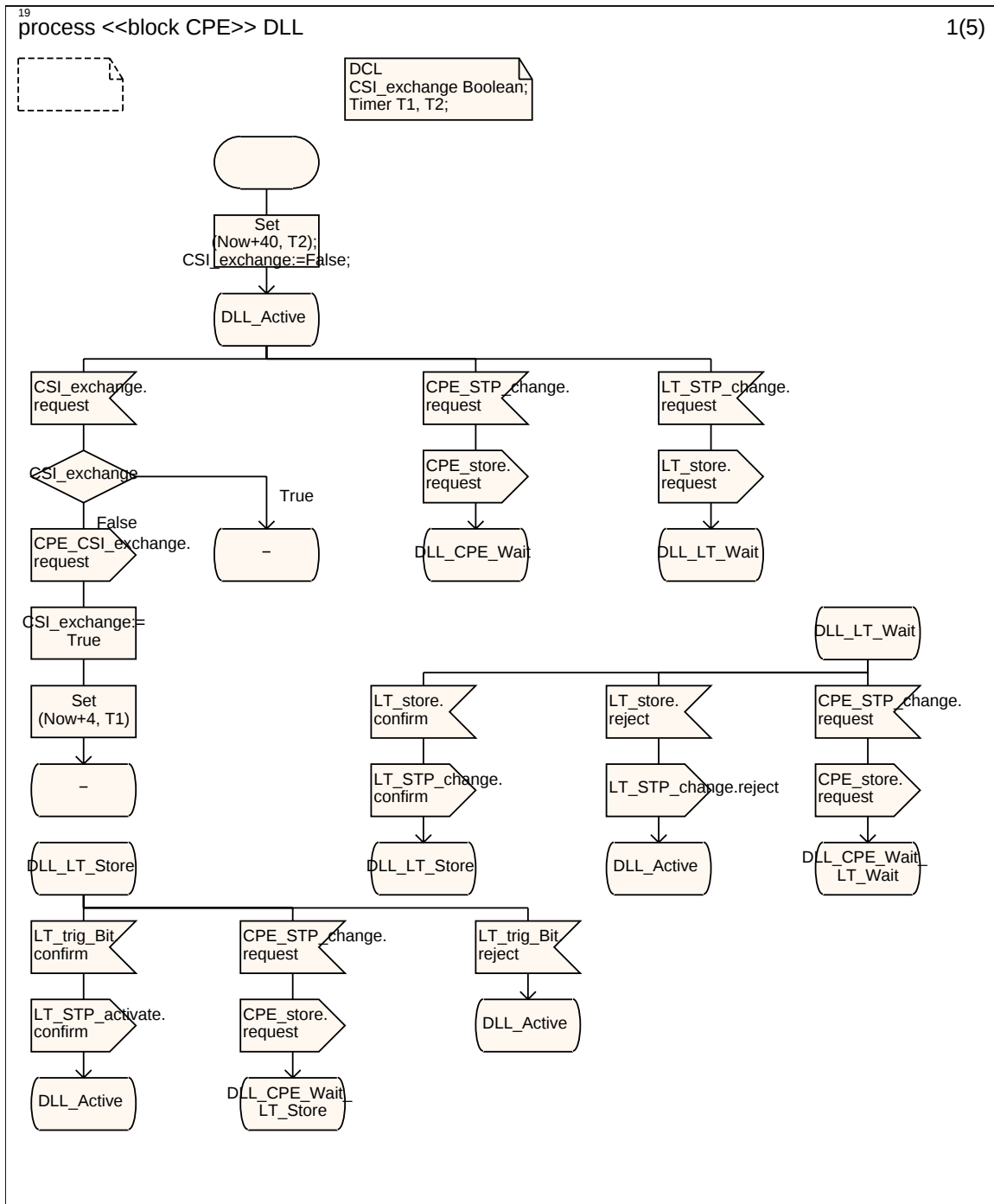
A2.4 Link-Monitor



A3 Modem (CPE)

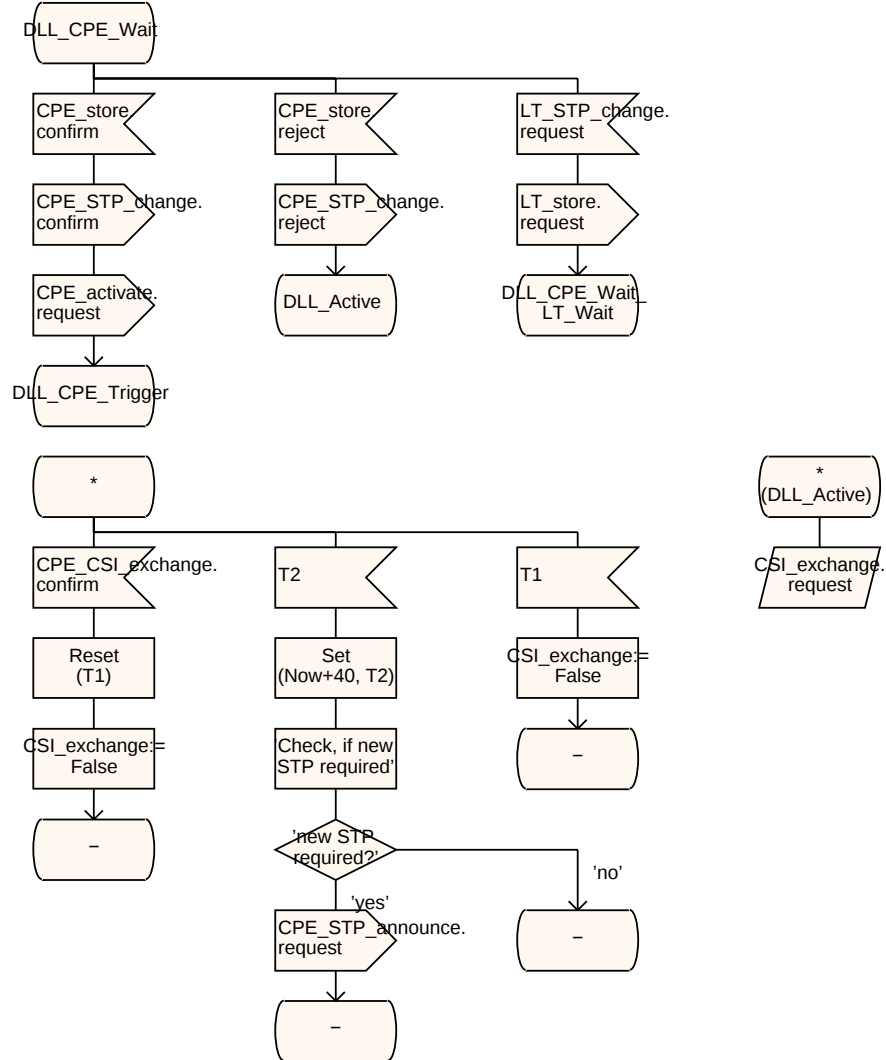


A3.1 Sicherungsschicht



¹⁹
process <<block CPE>> DLL

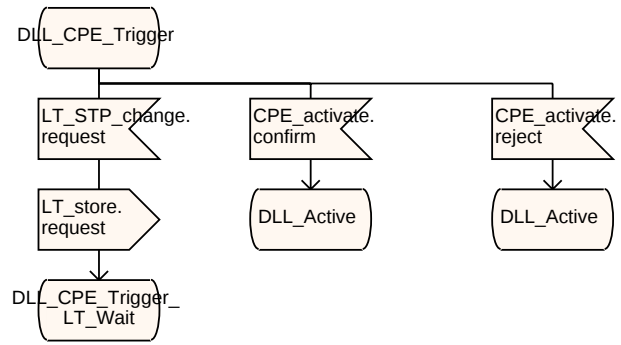
2(5)



19

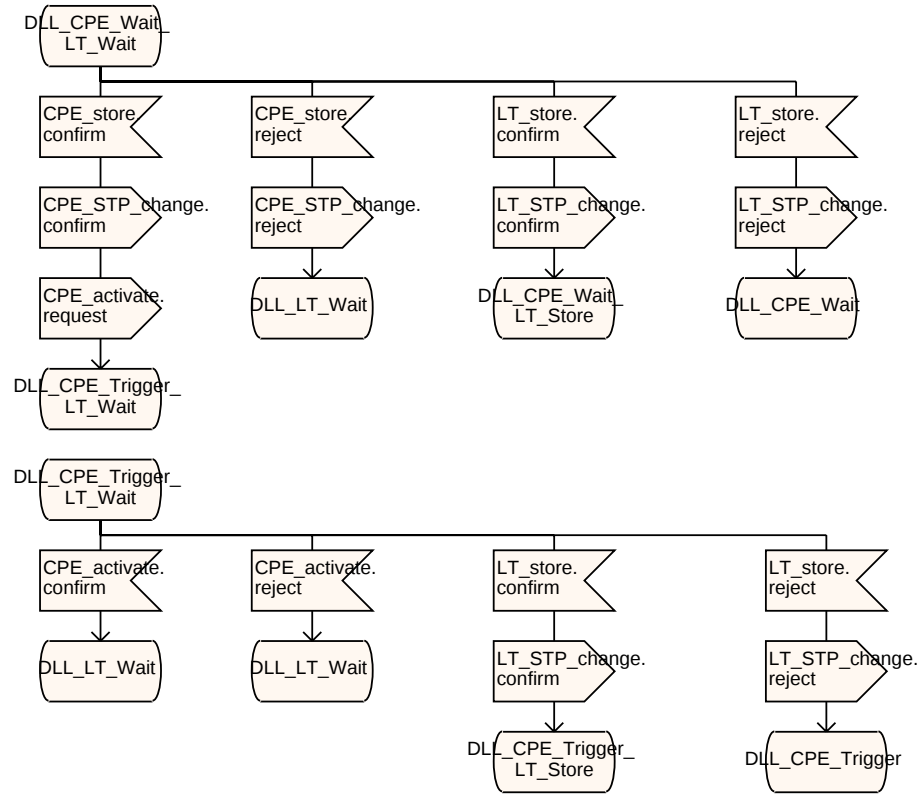
process <<block CPE>> DLL

3(5)



¹⁹
process <<block CPE>> DLL

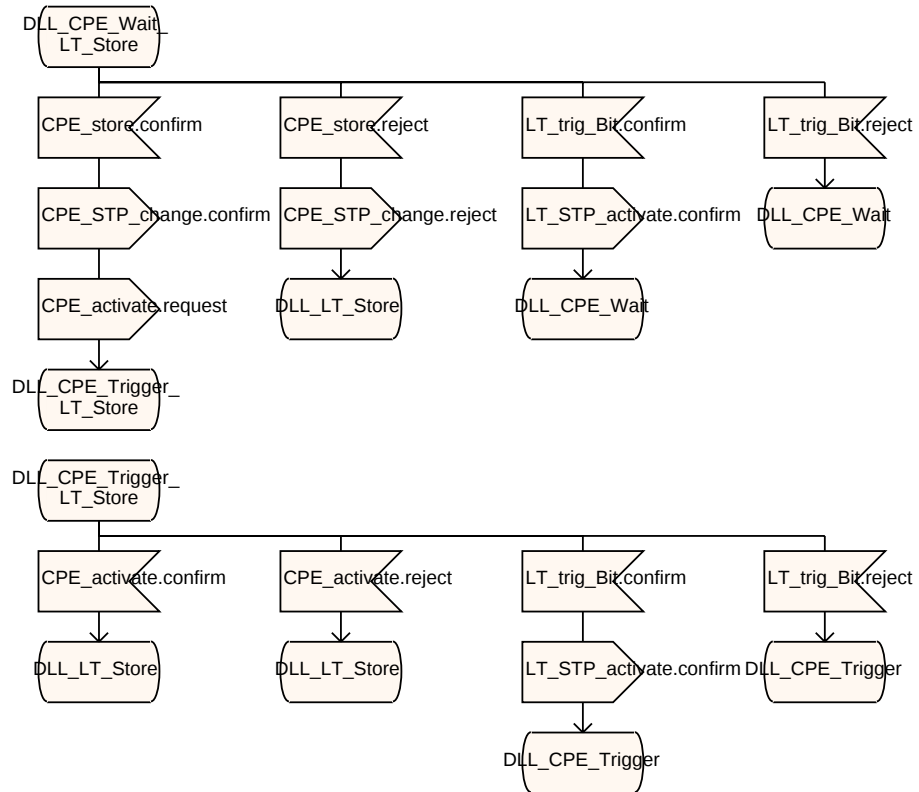
4(5)



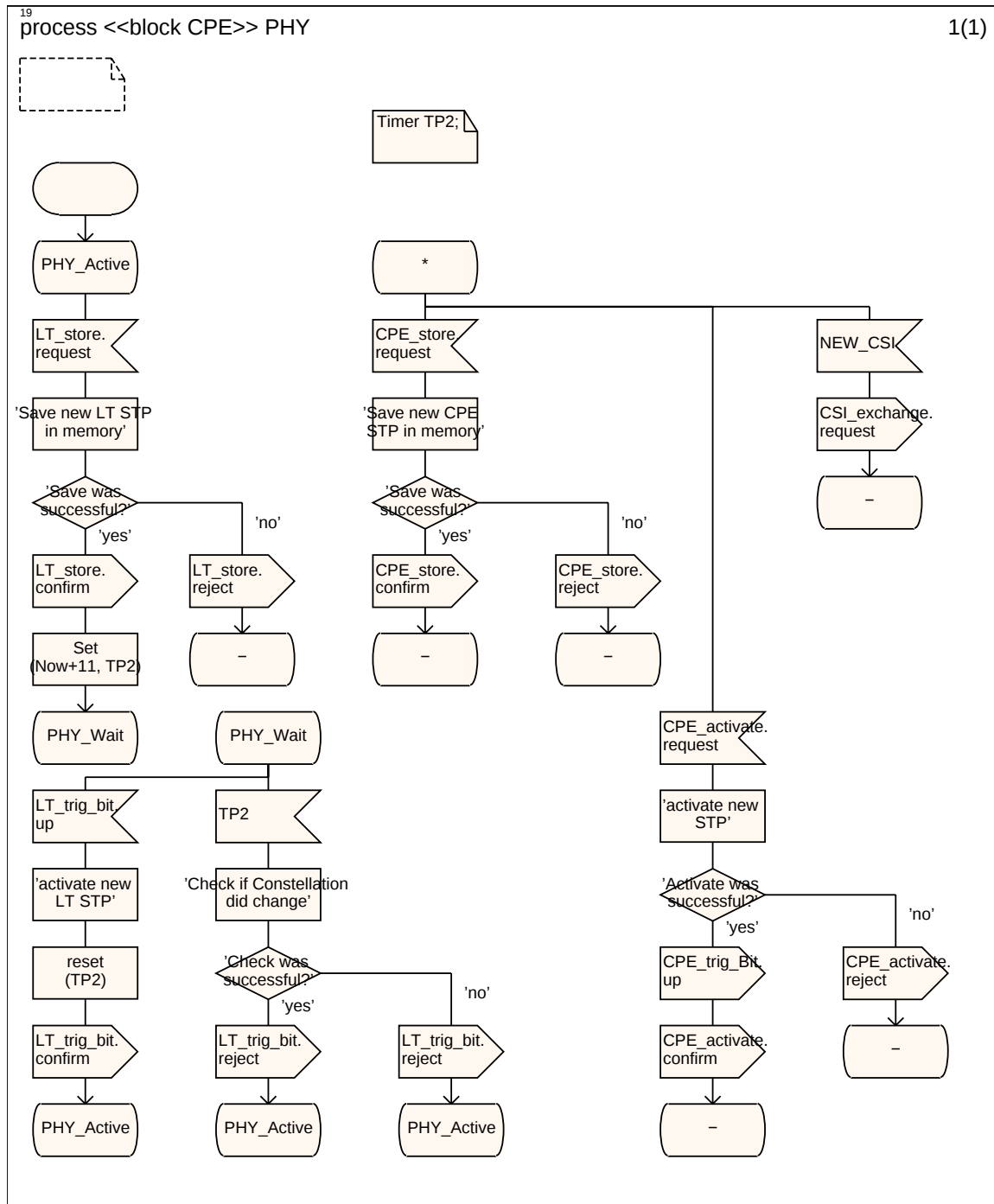
19

process <<block CPE>> DLL

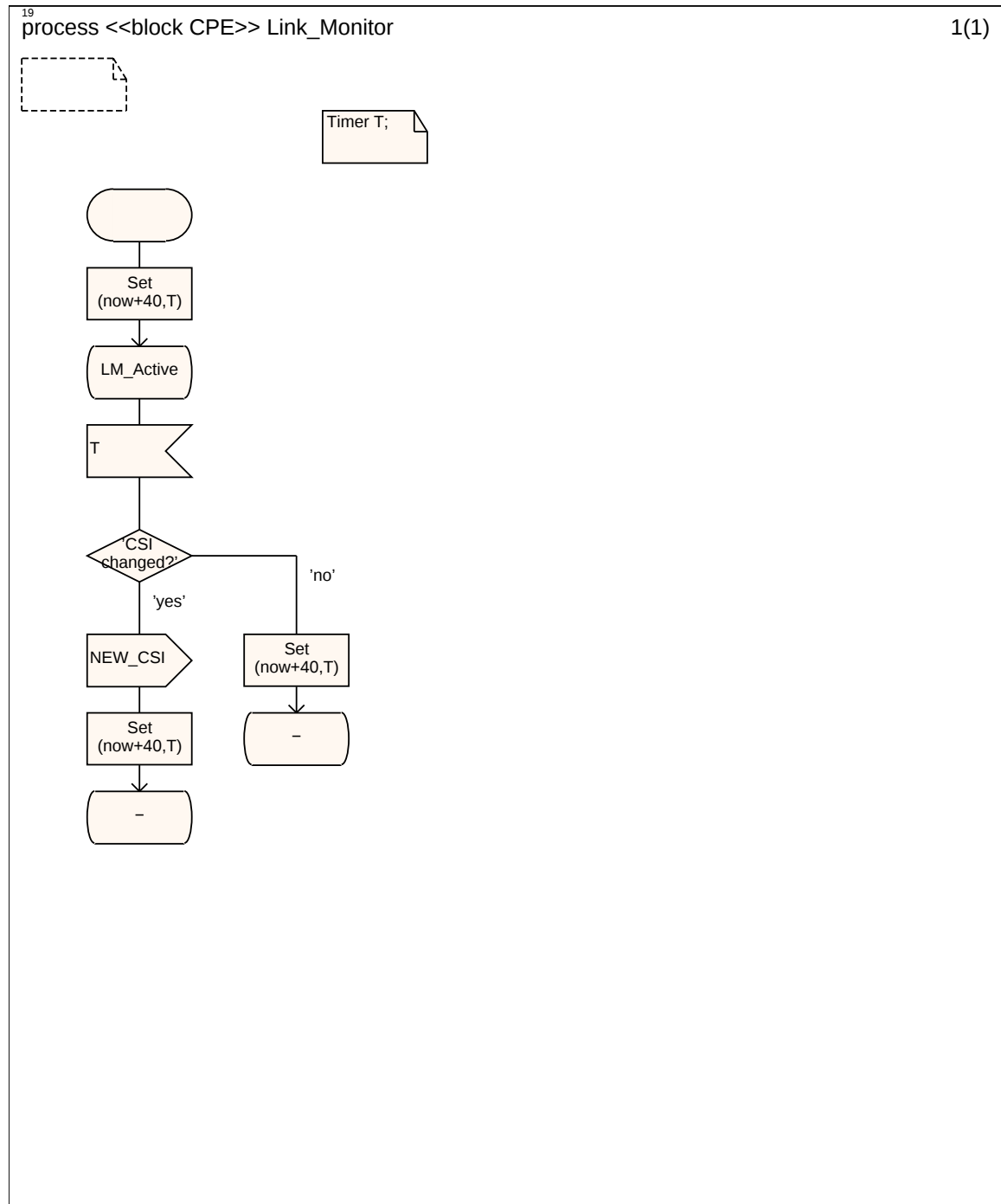
5(5)



A3.2 Übertragungsschicht



A3.3 Link-Monitor



A4 Beispiel einer Nachrichtensequenz

