

Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Nachrichtentechnik und Informationselektronik



Diplomarbeit

Anforderungen zukünftiger IP-basierter Access-Netzwerke an die Dienstqualität

cand. ing. Thomas Vergin

28. März 2002

Betreuer

Dr.-Ing. H.-D. Melzer

Dipl.-Ing. T. Kessler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Vorwort	19
2 Motivation	21
2.1 Wirtschaftliche Überlegungen zum Breitbandzugang	22
2.2 Prognosen und Studien zur Entwicklung im TK-Markt	23
3 Grundlagen	29
3.1 Einleitung	29
3.2 Quality of Service (QoS)	30
3.3 Vergleich der Internet Protocol Versionen v4 und v6	31
3.3.1 Beschränkungen durch IPv4	32
3.3.2 Änderungen und Vorteile des IPv6	32
3.3.2.1 Adressierungsschema	33
3.3.2.2 Vereinfachung des Headers	35
Traffic Class	38
Flow Label	38
Integriertes Quality of Service	39
3.3.2.3 Autokonfiguration	39
3.3.2.4 Multicast	40
3.3.3 Migration von IPv4 zu IPv6	41
3.4 Normen und Standards	42
3.5 Schnittstellen zwischen Kommunikationssystemen	43
3.6 Klassifizierung von Diensten	45

3.6.1	Service Klassen nach ITU-T I.362	45
3.6.2	Service Klassen nach RFC 2211/2212	48
3.6.3	ATM Service Kategorien	49
3.6.4	Service Klassen für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netz . .	52
3.6.5	Anwendungen für das IP-basierte Access-Netz	54
3.6.5.1	Dienste der Klasse A	54
3.6.5.2	Dienste der Klasse B	55
3.6.5.3	Dienste der Klasse C	55
3.6.5.4	Dienste der Klasse D	55
3.6.5.5	Einordnung der Anwendungen	56
4	Evaluierung der Zugangstechniken	58
4.1	Einführung	58
4.1.1	Technik der heutigen Access-Netze	59
4.1.2	Abschätzung des Bandbreitenbedarfs in zukünftigen Access-Netzen	60
4.2	Migration vom PSTN-Anschluss zum Breitbandzugang: 1. Phase	61
4.2.1	Digital Subscriber Line Technologien (xDSL)	61
4.2.1.1	Asymmetric DSL (ADSL)	67
	ADSL Standards	68
	ADSL im Detail	68
	Protokollwelt von ADSL	71
4.2.1.2	Symmetric DSL (SDSL)	73
4.2.1.3	Very High Bit Rate DSL (VDSL)	74
	VDSL Standards	75
	VDSL Details	75
	VDSL Konvergenz-Schicht	79
	VDSL als Brücke zwischen PON und Teilnehmer	80
4.2.2	Community Antenna Television (CATV)	81
4.2.2.1	CATV Standards	81
4.2.2.2	Datenübertragung in CATV-Netzen	81
4.2.2.3	Einsatzgebiete	83
4.2.3	Powerline Communications (PLC)	84
4.2.3.1	PLC-Standardisierung	84
4.2.3.2	Einflussgrößen und Parameter von PLC-Systemen . . .	85
	Topologie	85

Der Powerline Übertragungskanal	86
Spektrum und Systemübertragungsgeschwindigkeit	87
4.2.3.3 Einsatzgebiete	90
4.2.3.4 Marktchancen	90
4.2.4 Wireless Local Loop (WLL)	91
4.2.4.1 Systeme und Normen	91
4.2.4.2 Parameter der Datenübertragung mittels WLL	92
4.2.4.3 Details des WMAN-Standards IEEE 802.16	94
WMAN-Übertragungsparameter	94
Unterstützung von Dienstgütemerkmalen	96
4.2.4.4 ETSI Broadband Radio Access Networks (BRAN)	98
4.2.4.5 Ausblick	99
4.2.5 Satellitenübertragung	100
4.2.5.1 Standards	101
4.2.5.2 Satellitensysteme	101
4.2.5.3 Datenübertragung	103
4.2.5.4 Anwendungsbereiche	105
4.2.5.5 Zukunftsaussichten	106
4.3 2. Migrationsphase	107
4.3.1 Hybrid Fiber/Twisted Pair (HFTP)	107
4.3.1.1 FTTx Topologien	108
4.3.1.2 Technologien für die optische Zuführung	108
4.3.2 Hybrid Fiber/Coax (HFC)	109
4.3.2.1 HFC Standards	111
4.3.2.2 Datenübertragung in HFC-Netzen	113
Media Access Control in HFC-Netzen	117
Realisierung eines QoS	118
4.3.2.3 Marktprognosen	120
4.4 3. Migrationsphase	120
4.4.1 Passive Optical Networks (PON)	120
4.4.1.1 PON-Systemarchitektur	121
4.4.1.2 ATM PON (APON)	122
4.4.1.3 Ethernet PON (EPON)	123
4.4.1.4 SuperPON	124
4.4.2 IP Transport über optische Medien	126

4.4.3	Fiber to the Home (FTTH)	127
4.5	Zusammenfassung	128
5	Quality of Service Verfahren der höheren Schichten	130
5.1	Einführung	130
5.2	End-to-End QoS-Modelle	130
5.2.1	Integrated Services (IntServ)	131
5.2.2	Resource Reservation Protocol (RSVP)	133
5.2.2.1	RSVP Service Klassen	133
	Controlled Load Service	134
	Guaranteed Service	135
5.2.2.2	Umsetzung der Serviceklassen	136
5.2.3	Differentiated Services (DiffServ)	136
5.3	Multiprotocol Label Switching (MPLS)	138
5.4	Algorithmen zur Umsetzung eines Quality of Service	139
5.4.1	Congestion Management	139
5.4.1.1	First In First Out Queueing (FIFO)	140
5.4.1.2	Weighted Fair Queueing (WFQ)	141
5.4.1.3	Class-Based Weighted Fair Queueing (CBWFQ)	143
5.4.1.4	Priority Queueing (PQ)	143
5.4.1.5	Custom Queueing (CQ)	144
5.4.2	Congestion Avoidance	145
5.4.2.1	Verfahren der Congestion Avoidance	146
5.4.2.2	Weighted Random Early Detection (WRED)	147
5.4.3	Policing und Shaping	148
5.4.4	Evaluierung der Performance von End-to-End QoS Mechanismen	148
6	Zusammenfassung	149
A	Anhang	153
A.1	Adressentypen im IPv6	153
A.1.1	Unicast-Adressen	153
A.1.2	Anycast-Adressen	154
A.1.3	Multicast-Adressen	155
A.2	IP Precedence	157
A.3	Mobile IP	157

A.4 IPv6 Renumbering	158
A.5 T-DSL als Realisierungsbeispiel für einen ADSL-Zugang	158
A.6 VDSL in der DAVIC Spezifikation	160
A.7 Übersicht der Ethernet-Varianten	161
A.8 OPAL als Realisierungsbeispiel für Passive Optical Networks	161
Literaturverzeichnis	163

Abbildungsverzeichnis

2.1	Festnetz-Verbindungsminuten 1997-2001 nach [Dör02]	23
2.2	Struktur des Festnetzverkehrs 2001 (2000) nach [Dör02]	24
3.1	Generisches Modell eines Kommunikationsnetzes	30
3.2	IPv6 Kommunikationstypen (nach [Bra99])	34
3.3	IPv4 Header (nach [RFC0791])	35
3.4	IPv6 Header (nach [RFC2460])	36
3.5	Konzept der IPv6 Erweiterungs-Header (nach [RFC2460])	38
3.6	ATM Schichtenmodell	47
4.1	ADSL-Spektrum (ADSL over ISDN)	69
4.2	ADSL-Referenzmodell (nach [G.992.1])	70
4.3	VDSL-Referenzmodell (nach [G.993.1], [SSWR96a])	77
4.4	VDSL-Spektrum (nach [G.993.1])	77
4.5	Kundenanschluss über PON und VDSL (nach [EBKY00])	80
4.6	Vorschläge für die PLC-Frequenzzuweisung (nach [Ton00])	88
4.7	Darstellung einer Richtfunkverbindung	93
4.8	ETSI Broadband Radio Access Networks	98
4.9	Ausleuchtzonen von GEO/LEO Satelliten	102
4.10	DVB-Referenzmodell für interaktive Systeme (nach [ETS 300 802])	104
4.11	IP-Übertragung via Satellit im DVB-Datenstrom (nach [FF00])	105
4.12	Hybrid Architektur Glasfaser – Kupfer-TAL	107
4.13	Fiber to the x Topologien	109
4.14	Hybrid Architektur Glasfaser – Koax	110
4.15	Baum- und Vollsternstruktur in Breitbandkabelnetzen	114
4.16	Frequenzspektrum in BK-Netzen (nach [BM02], [Vog98])	115
4.17	FSAN-Referenzmodell des Optical Access Networks (nach [G.983.1])	121
4.18	Media Access Control in Passive Optical Networks zur Steuerung des Up-stream Access (nach [EBKY00])	122
5.1	MPLS Label Format (nach [Veg01])	139

5.2	Funktionsweise des FIFO-Queueing (nach [Cis01a])	141
5.3	Funktionsweise des Weighted Fair Queueing (nach [Cis01a])	142
5.4	Funktionsweise des Priority Queueing (nach [Cis01a])	144
5.5	Funktionsweise des Custom Queueing (nach [Cis01a])	145
5.6	Funktionsweise des Weighted Random Early Detection (nach [Cis01a]) .	147
A.1	Unicast-Adresstypen (nach [RFC2373])	154
A.2	Multicast-Adresse (nach [RFC2373])	156
A.3	Type of Service Feld im IPv4 Header (nach [RFC0791])	157
A.4	T-DSL/ISDN Systemkonfiguration	159
A.5	T-DSL Schichtenmodell (nach [End02])	160
A.6	Overhead im T-DSL Schichtenmodell (nach [End01])	160

Tabellenverzeichnis

2.1	Entwicklung ausgewählter Access-Systeme im Zeitraum 01/2001 – 01/2002	26
3.1	Service Klassen (nach ITU-T I.362)	46
3.2	Service Kategorien (nach [AF-TM-0056.00])	50
3.3	Service Klassen für ein IP-basiertes Access-Netz	53
3.4	Einordnung der Anwendungen in das Service Modell für IP-basierte Kommunikationsnetze	57
4.1	Übersicht der xDSL-Technologien	65
4.2	VDSL-Bitraten (nach [Rau99])	76
4.3	VDSL Frequenzpläne (nach [G.993.1])	78
4.4	Übersicht der PLC-Systeme (nach [AZ01])	89
4.5	Bitraten in WMAN-Systemen	95
4.6	Übersicht der Satellitensysteme (nach [AD00, BWZ00])	102
4.7	Vergleich der HFC-Standards (nach [Cis00, Way99])	116
4.8	IEEE 802.1D: Mapping der Verkehrstypen (nach [Fin02])	125
4.9	Zusammenfassung: Evaluierung der Access-Technologien	128
5.1	Zusammenfassung: End-to-End QoS-Modelle	137
5.2	Zusammenfassung: Congestion Management (nach [Cis01a])	146
A.1	Geltungsbereich einer Multicast-Adresse (nach [RFC2373])	156
A.2	VDSL-Bitraten der DAVIC Spezifikation (nach [EG 202 306])	161
A.3	Übersicht der Ethernet-Varianten	162

Abkürzungsverzeichnis

A

AAL	ATM Adaption Layer
ABR	Available Bit Rate
ACL	Access Control List
ACTS	Advanced Communications Technologies and Services
ADSL	Asymmetric DSL
AF	Adaptation Function
AH	Authentication Header
AN	Access Node
ANSI	American National Standards Institute
APON	ATM PON
ARP	Address Resolution Protocol
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATU-C	ADSL Terminal Unit Central Office
ATU-R	ADSL Terminal Unit Remote

B

BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BICC	Bearer-Independent Call Control
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BK	Breitbandkabel
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRAN	Broadband Radio Access Networks

C

CAC	Connection Admission Control
-----	------------------------------

CAP	Carrierless Amplitude Modulation
CATV	Community Antenna Television
CBR	Constant Bit Rate
CBWFQ	Class-Based Weighted Fair Queueing
CDV	Cell Delay Variation
CDVT	Cell Delay Variation Tolerance
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CLR	Cell Loss Ratio
CoS	Classes of Service
CPE	Customer Premises Equipment
CQ	Custom Queueing
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTD	Cell Transfer Delay
CuDA	Kupfer-Doppelader

D

DAVIC	Digital Audio Visual Council
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DiffServ	Differentiated Services
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DS	Downstream
DSCP	Differentiated Services Codepoint
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	DSL Access Multiplexer
DSS1	Digital Subscriber Signalling System No. 1
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DVB	Digital Video Broadcasting
DVMRP	Distance Vector Multicast Routing Protocol

E

ECC	Error Correction Code
-----	-----------------------

EPON	Ethernet PON
ESP	Encapsulating Security Payload
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUI	Extended Unique Identifier

F

FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Equivalence Class
FIFO	First In First Out
FP	Format-Präfix
FSAN	Full Service Access Network
FTP	File Transfer Protocol
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTEx	Fiber To The Exchange
FTTH	Fiber To The Home

G

GEO	Geostationary Earth Orbit
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying

H

HAP	High Altitude Platform
HDSL	High Bit Rate DSL
HDTV	High Definition Television
HEO	Highly Inclined Elliptical Orbit
HFC	Hybrid Fiber/Coax
HIPERACCESS	High Performance Radio Access Network
HIPERLAN/2	High Performance Radio Local Area Network 2
HIPERLINK	High Performance Radio Link

HIPERMAN High Performance Radio Metropolitan Area Network

I

IANA Internet Assigned Numbering Association
ID Identifikation
IDSL ISDN DSL
IEC International Electrotechnical Commission
IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF Internet Engineering Task Force
IGMP Internet Group Management Protocol
IntServ Integrated Services
IP Internet Protocol
IPsec Secure Internet Protocol
IPv4 IP Version 4
IPv6 IP Version 6
ISDN Integrated Services Digital Network
ISO International Organization for Standardization
IST Information Society Technologies
ITU International Telecommunications Union
ITU-T ITU Telecommunication Standardization Sector

K

KVz Kabelverzweiger

L

LAN Local Area Network
LDP Label Distribution Protocol
LED Light Emitting Diodes
LEO Low Earth Orbit
LMDS Local Multipoint Distribution System
LQ Local Queue

LT	Line Termination
LWL	Lichtwellenleiter

M

MAC	Media Access Control
MBS	Maximum Burst Size
MCR	Minimum Cell Rate
MDSL	Medium Bit Rate DSL
MEO	Medium Earth Orbit
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Systems
MoD	Music on Demand
Modem	Modulator/Demodulator
MOSPF	Multicast Open Shortest Path First
MPEG	ISO/IEC Moving Pictures Experts Group
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPR	Minimum Packet Rate
MTU	Maximum Transmission Unit
MUX	Multiplexer
MVDS	Multipoint Video Distribution System

N

NIU	Network Interface Unit
NLA	Next-Level Aggregation
nrt-VBR	Non-Real-Time Variable Bit Rate
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
NT	Network Termination

O

OAM	Operation, Administration and Management
OAN	Optical Access Network
OC	Optical Container

ODN	Optical Distribution Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OOB	Out-Of-Band
OSI	Open Systems Interconnection
OVSt	Ortsvermittlungsstelle

P

P2MP	Point-to-Point
P2P	Point-to-Multipoint
PCR	Peak Cell Rate
PDV	Packet Delay Variation
PHY	PHYsical layer
PMD	Physical Medium Dependent
POF	Plastic Optical Fibre
PON	Passive Optical Network
PLC	Powerline Communication
POTS	Plain Old Telephony Service
PPP	Point-to-Point Protocol
PPPoE	PPP over Ethernet
PQ	Priority Queueing
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTD	Packet Transfer Delay
PVC	Permanent Virtual Circuit

Q

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

QSIG	Unified International corporate network signalling standard
------	---

R

RED	Random Early Detection
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
RES	Reserved
RFC	Request for Comments
RM-cells	Resource Management Cells
RSA	Rivest, Shamir & Adleman
RSVP	Resource Reservation Protocol
rt-VBR	Real-Time Variable Bit Rate
rtPS	Real-Time Polling Service
RTP	Real-Time Protocol

S

SCR	Sustainable Cell Rate
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDSL	Symmetric DSL
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Site-Level Aggregation
SM	Service Module
SNI	Service Node Interface
SOHO	Small Office/Home Office
SONET	Synchronous Digital Network
STB	Set Top Box
STM	Synchronous Transport Module
STU	Set Top Unit
SVC	Switched Virtual Circuit

T

T-DSL	Produktbezeichnung für ein ADSL-Angebot der Deutschen Telekom AG
TAL	Teilnehmeranschlussleitung
TC	Transmission Convergence
TCP	Transmission Control Protocol
TE	Terminal Equipment
TII	Technology Independent Interface
TLA	Top-Level Aggregation
ToS	Type of Service
TP	Twisted Pair
TDMA	Time Division Multiple Access
TTL	Time-to-live

U

UBR	Unspecified Bit Rate
UDP	User Datagram Protocol
UGS	Unsolicited Grant Service
UGS-AD	Unsolicited Grant Service with Activity Detection
UNI	User Network Interface
UPC	Usage Parameter Control
US	Upstream
UTP	Unshielded Twisted Pair

V

VAD	Voice Activity Detection
VBR	Variable Bit Rate
VCI	Virtual Channel Identifier
VDSL	Very high bit rate Digital Subscriber Line
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP

VPI	Virtual Path Identifier
VPN	Virtual Private Network
VTU-O	VDSL Terminal Unit ONU
VTU-R	VDSL Terminal Unit Remote

W

WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplex
WFQ	Weighted Fair Queueing
WLAN	Wireless LAN
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WRED	Weighted Random Early Detection

X

xDSL	Digital Subscriber Line Technologien
------	--------------------------------------

Kapitel 1

Vorwort

Der Umgang mit den Kommunikationsnetzen hat in den letzten Jahren einen gewaltigen Umbruch erfahren. Neben der Sprachübermittlung und dem Surfen im Internet werden mittlerweile eine große Anzahl verschiedenartigster Anwendungen genutzt oder vom Teilnehmer verlangt. Eine Folge dieser Entwicklung ist der gestiegene Bedarf nach Zugangsnetzen mit hohen Übertragungskapazitäten. Herkömmliche Access-Netzwerke sind jedoch nicht in der Lage, Inhalte mit hoher Bandbreite zu transportieren. Zudem bedarf es heute verschiedener Zugangssysteme, um zu kommunizieren oder sich zu informieren¹.

Für den Transport von Daten hat sich weltweit IP als Kommunikationsprotokoll etabliert. Ziel der Entwicklung ist daher ein konvergierendes, IP-basiertes und breitbandiges Access-Netz, das es ermöglicht, alle Dienste und Anwendungen (klassische wie Sprachübertragung, Fernsehen und zukünftige wie z.B. E-Learning, VoD) über ein Medium zu übertragen.

Inhalt dieser Arbeit ist die Evaluierung solcher IP-basierter Access-Netzwerke. Das Kapitel 2 beschäftigt sich mit wirtschaftlichen Überlegungen zum Ausbau der Access-Netze mit Breitbandlösungen. Es wird anhand von Prognosen verschiedener Institute geklärt, wie sich der Bedarf nach Access-Netzen mit hoher Übertragungskapazität in den nächsten Jahren entwickelt. Im Kapitel 3 werden die Merkmale IP-basierter Access-Netzwerke erläutert, Dienste und Anwendungen für ein solches Netz vorgestellt und klassifiziert sowie die Anforderungen an die Dienstqualität herausgestellt. Das Kapitel 4 widmet sich den Erweiterungen und Verbesserungen der derzeitigen Technik und beleuchtet zukünftige Zugangstechnologien in Hinblick auf die Verwendung als Übertragungsmedium für IP-basierte Multiservice Applikationen mit hohen Anforderungen an Bandbreite, Latenz und Quality of Service. Besitzt eine Access-Technik keine Funktionen zur Umsetzung

¹Sprachübermittlung über das PSTN, Fernsehen über BK-Netze oder Satellit, Internetzugang über PSTN oder andere Netze

eines QoS, können diese durch höhere Schichten erbracht werden. Im Kapitel 5 werden von der eingesetzten Zugangstechnologie unabhängige Verfahren zur Sicherung von Dienstgütern betrachtet.

Kapitel 2

Motivation

Durch ein ständig steigendes Angebot an Informations- und Entertainment-Diensten, welche mit einem wachsenden Anspruch an die Quantität und Qualität einhergehen, besteht ein Bedarf nach Technologien, die solche multimedialen Inhalte flexibel und mit ausreichend hoher Bandbreite zum Teilnehmer transportieren können. Die verfügbaren Zugangsnetze, die eine Verbindung zwischen dem Kunden und den Anbietern von Informations- und Unterhaltungsmedien herstellen, weisen entweder eine zu geringe Übertragungskapazität auf (PSTN) oder besitzen eine ungenügende Flexibilität (z.B. BK-Netze ohne Rückkanal), da sie für andere Anwendungen¹ konzipiert worden sind. Nun sollen die Access- und Broadcast-Netze ein wesentlich größeres und vielfältigeres Spektrum an Diensten übertragen. Die daraus resultierenden Probleme und deren Lösungsversuche sind das Thema dieser Arbeit.

Wo liegen die Vorteile eines Access-Netzes, das zur Übertragung der Inhalte auf das Internet Protocol (siehe Kapitel 3.3) zurückgreift? IP ist ein offenes Protokoll zum genormten Datenaustausch im heterogenen Internet. Mit dem Wachstum des Internet hat IP in der weltweiten Kommunikation eine derart große Bedeutung erlangt, dass andere Protokolle nur eine untergeordnete Rolle spielen. Mittels IP können heute alle am Internet angeschlossenen Geräte plattformübergreifend miteinander kommunizieren.

Durch IP-basierte Access-Netzwerke können traditionelle Strukturen mit ihren verschiedenen Zugangstechniken (PSTN für die Telefonie und den Internetzugang, CATV für das Fernsehen) durch ein Netz mit integrativem, universellen und diensteneutralen Charakter ersetzt werden. Das Internet Protocol ermöglicht mit Hilfe seiner hohen Flexibilität die Integration aktueller und zukünftiger Kommunikationsdienste (Konvergenz der Medien und der Infrastruktur). Die Sicherheitsfunktionen des Internet Protocol schützen sensible

¹Das Telefonnetz wurde für die Sprachübertragung mit einer Bandbreite von 3,1 kHz entworfen. Die Teilnehmeranschlussleitung (TAL) zwischen Nutzer und Vermittlungsstelle auf Basis der Kupferdoppelader ist für diesen Verwendungszweck ausreichend.

Daten bei der Übertragung im „offenen“ Internet wie im geschlossenen PSTN. Optionale Funktionen wie Billing/Accounting können zur Rechnungslegung bei Providern und zur Zugangskontrolle herangezogen werden. Ein weiteres Merkmal ist die „always on“ Funktionalität neuer Access-Netze. Der Zwang, sich in das Netz „einwählen“ zu müssen, entfällt. Stattdessen ist der Teilnehmer immer mit einem Netz verbunden bzw. in ein Netz eingebunden. [Lau01]

Der Übergang vom leitungsorientierten PSTN zum paketvermittelnden IP-Netz besitzt nicht nur Vorzüge. Das Telefonnetz stellt den Daten einen dedizierten Kanal mit definierter Bandbreite zur Verfügung. Isochrone Inhalte können so bei gleichbleibender Qualität direkt übertragen werden. In paketvermittelnden Netzen wird die Bandbreite zwar effizienter genutzt, es bedarf jedoch differenzierter Quality of Service Mechanismen, um den priorisierten Transport von Echtzeit-Anwendungen gegenüber anderen Daten in ausgelasteten Netzwerken zu garantieren.

2.1 Wirtschaftliche Überlegungen zum Breitbandzugang

Die Service Provider haben hohe Summen investiert, um die Zugangssysteme in ihrer heutigen Form zu realisieren. Da Access-Netzwerke den größten Teil des Wertes eines Kommunikationsnetzes ausmachen, kann deren Ausbau zum breitbandigen Full-Service-Network nur in einer evolutionären Entwicklung der Infrastruktur erfolgen. Das bedeutet, dass die existierende Technik und vorauszusehende Trends und deren Anforderungen entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Aufgrund der hohen Entwicklungs- und Migrationskosten für ein Access-Netz mit hoher Übertragungskapazität bedarf es einer schnellen Marktdurchdringung der Technologie. Offene Standards bei den Übertragungsverfahren, der Applikationsprogrammierung und der Abrechnung der Inhalte sind hierfür Voraussetzung. Proprietäre Standards und Plattformen behindern den Wettbewerb und Innovation.

Große Unternehmen und deren Niederlassungen werden meist über teure Standleitungen mit hoher Kapazität an die Backbone-Netze angeschlossen. Die hier betrachteten Lösungen für den breitbandigen Zugang zu den Kommunikationsnetzen richten sich daher an private Haushalte und kleine Unternehmen (SOHO). Diese Nutzergruppe legt ein anderen Kosten/Nutzen-Maßstab an. Soll eine rasche Marktdurchdringung der Breitband-Access-Netze erfolgen, muss der Zugang trotz der Attraktivität der angebote-

nen Dienste preislich in den Größenordnungen der bestehenden Technologien liegen.

2.2 Prognosen und Studien zur Entwicklung im TK-Markt

Anhand der Verkehrsentwicklung der letzten Jahre wird deutlich, dass die Nutzung von Kommunikationsmedien weiter steigt (siehe Abbildung 2.1). Im Jahr 2001 betrug das Verkehrsvolumen in Deutschland insgesamt 312 Mrd. Minuten. Gegenüber 1997 bedeutet dies eine Zunahme um 75 %. Eine besonders hohe Steigerungsrate weist der Verkehr von den Wählanschlüssen des Festnetzes in das Internet auf (siehe Abbildung 2.2). Mit fast 30 %² (2001) des gesamten Verkehrsvolumens zeigt sich, dass das Medium Internet immer mehr an Bedeutung gewinnt. [Dör02]

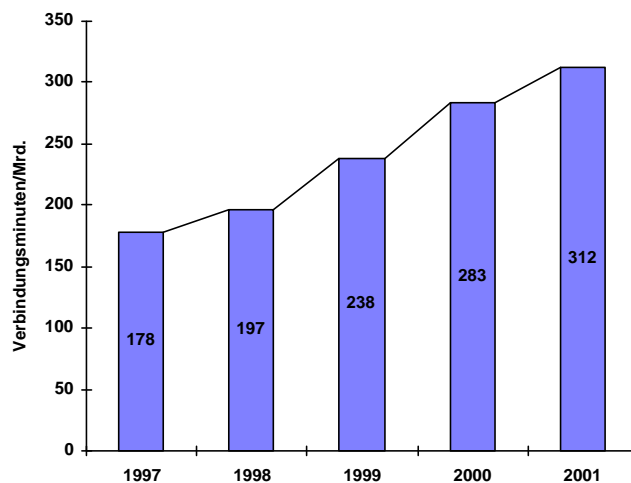


Abbildung 2.1: Festnetz-Verbindungsminuten 1997-2001 nach [Dör02]

Mit der Steigerung der Penetrationsrate (2000: 40 %) von Personal Computern in deutschen Haushalten erhöhte sich laut einer Studie im Auftrag des BMWi die Zahl der Inter-

²Es ist zu beachten, dass die Erhebung nur das Verkehrsvolumen der schmalbandigen Festnetzanschlüsse (POTS/ISDN) berücksichtigt. Ein erheblicher Teil des Internetverkehrs wird inzwischen über Breitbandzugänge (xDSL, CATV usw.) abgewickelt, der in dieser Studie nicht erfasst wurde.

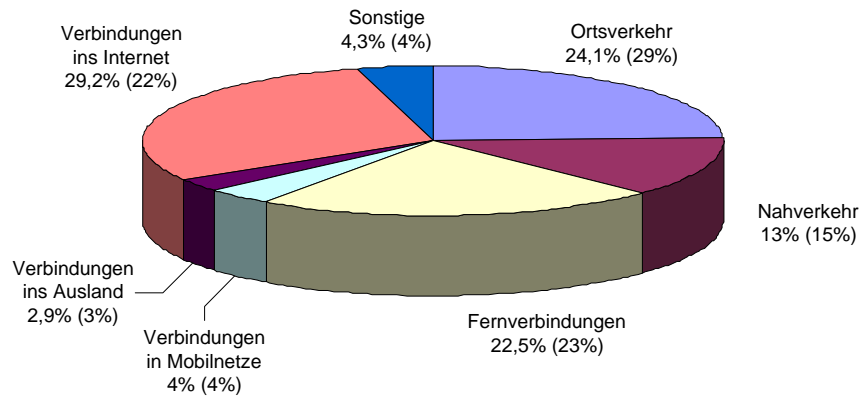


Abbildung 2.2: Struktur des Festnetzverkehrs 2001 (2000) nach [Dör02]

netnutzer um 70 %³ auf rund 25 Mio. Ein weiterer Trend sei in der allgemein starken Verbreitung von Breitband-Anschlüssen zu erkennen. Die Entwicklung von separaten Sprach- und Datennetzen zu einem universellen, integrierten Kommunikationsnetz ist wie die Konvergenz der Dienste abzusehen. [BS01]

Andere Studien im Internet-Bereich zeigen ebenso deutlich, dass die Zahl der Internet-nutzer weiter zunimmt. In einer Schätzung der RegTP wird Ende 2001 von mehr als 30 Mio. Deutschen über 14 Jahre (47 % der Altersgruppe) ausgegangen, die Kontakt mit dem Internet hatten. Für das Frühjahr 2002 prognostiziert die RegTP einen Anstieg auf über 50 % der Bevölkerung über 14 Jahre, die das Internet zur Information oder Unterhaltung nutzen werden. Die Studie Stern Markenprofile Online & E-Business gibt im Bereich der rein privaten Nutzung des Internets in der eigenen Wohnung einen Anteil von 31 % (bezogen auf Herbst 2001) der Bevölkerung zwischen 14 und 64 Jahren an. Die Marktbeobachtungsdaten der RegTP zeigen weiterhin den vermehrten Umstieg von schmalbandigen Zugängen via POTS/ISDN auf breitbandige Anschlüsse. So sollen Ende 2001 bereits 5 % der deutschen Haushalte (entsprechend 15 % der Internethaushalte) über einen Breitband-Access verfügen. Von den insgesamt 2,1 Mio. breitbandigen⁴ Internetzugängen entfielen 2 Mio. auf die so genannten T-DSL-Anschlüsse der Deutschen Telekom AG, etwa 70 000 auf ADSL/SDSL-Zugänge ihrer Wettbewerber, rund 30 000 auf

³Bezogen auf das Jahr 2000.

⁴Die RegTP zählt hierzu alle Internetzugänge mit Übertragungsraten von mehr als 124 kbit/s. Erfasst wurden Access-Systeme auf der Basis der TAL (xDSL), BK-Netze (CATV), Energieversorgungsnetze (PLC) und Satellitenübertragung.

CATV-Anschlüsse, ca. 2 000 auf PLC und eine unbekannte Anzahl auf Internetzugänge über Satellit. [Dör02]

Auch wenn diese Zahlen nur eine zunehmende Nutzung des Internets wiedergeben, so zeigen sie dennoch einen Trend an. Neben der klassischen Informationsquelle World Wide Web stehen mittlerweile eine Vielzahl neuer Anwendungen und Dienste zur Verfügung, die den Gebrauch des Internets zusätzlich stimulieren. Die angebotenen interaktiven Applikationen (z.B. E-Learning, MoD, VoD) zeigen den Weg zur Konvergenz der Medien.

Der Zugang zum Internet über breitbandige Access-Systeme kommt hiermit eine große Bedeutung zu. Sie werden inzwischen als Schlüsseltechnologie in der Informationsverarbeitung angesehen.⁵ Dem EU-Kommissar Erkki Liikanen⁶ zufolge seien Breitbandzugänge die grundlegende technische Infrastruktur der Informationsgesellschaft.

Nach einer Studie^{7,8} des Marktforschungsunternehmens NetValue⁹ verfügten im August 2001 7,8 % aller deutschen Internet-Nutzer über einen privaten Breitbandanschluss via ADSL, CATV oder Satellit. In der Nutzung von Breitband-Technologien nimmt Deutschland damit die Führungsposition im europäischen Vergleich ein¹⁰. Die Zahl der Nutzer, die über einen Anschluss mit Breitbandtechnik verfügen, hat sich gegenüber August 2000 (3,2 %) mehr als verdoppelt. Für diese Entwicklung ist nach Ansicht von Netvalue das starke Wachstum von ADSL verantwortlich (August 2001: 4,2 %). Die Studie zeigt demgegenüber auch das hohe Entwicklungspotential, da im August 2001 92,2 %¹¹ aller deutschen Privathaushalte über einen Schmalbandzugang ins Internet zu gelangen.

Eine 6 Monate später durchgeführte Studie¹² von NetValue ergab, dass in Deutschland der Anteil der Nutzer mit einem Breitband-Zugang im Zeitraum Januar 2001 – Januar 2002 von 4,6 % auf 12 % gestiegen ist. Die Hauptursache für die schnelle Zunahme

⁵WILKENS, ANDREAS: *Internet-Zugang per Breitbandanschluss wird der EU immer wichtiger*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/anw-13.02.02-001/>

⁶http://europa.eu.int/comm/commissioners/liikanen/index_de.htm

⁷BLEICH, HOLGER: *Zahl der Surfer mit Breitbandanschluss wächst schnell*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/hob-19.09.01-000/>

⁸DELBROUCK, DIRK : *Studie: Immer mehr Breitbandanschlüsse*. ZDNet Deutschland News

<http://news.zdnet.de/story/0,,t101-s2095595,00.html>

⁹<http://de.netvalue.com>

¹⁰In den USA ist der Marktanteil privater Breitbandzugänge mit 15,7 % doppelt so hoch.

¹¹Davon 53,1 % per analogem Modem und 39,1 % via ISDN.

¹²BAGER, JO: *Studie: Boom für Breitband-Internet*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/jo-12.03.02-000/>

sei wiederum die zunehmende Verbreitung von ADSL-Anschlüssen (siehe Tabelle 2.1). Es konnte zudem festgestellt werden, dass sich das Nutzungsverhalten ändert. Teilnehmern, die an einem Breitbandzugang angeschlossen sind, verweilen wesentlich länger im Internet¹³ und nutzen vermehrt andere Dienste (Audio-, Videoapplikationen, Peer-to-Peer-Netze zum Datenaustausch, Chatforen und Online-Spiele).

Zugang	Januar 2001 %	Januar 2002 %
Analog. Modem	56,2	55,3
ISDN	35,9	32,6
ADSL	2,0	8,8
CATV	2,6	3,2

Tabelle 2.1: Entwicklung ausgewählter Access-Systeme im Zeitraum 01/2001 – 01/2002

Bei europaweiter Betrachtung ist das Wachstum im Bereich der Internetzugänge mit Breitbandtechnik nicht so stark ausgeprägt. Die Erwartungen der Analysten sind hier wesentlich gedämpfter. So ist einer im Dezember 2001 veröffentlichten Studie^{14,15} des Marktforschungsunternehmens GartnerG2 zufolge der Bedarf für Breitbandanschlüsse in Europa überbewertet. Gartner prognostiziert bis 2005 einen Marktanteil von 10 % für breitbandige Internetzugänge bei privaten Haushalten. Als Ursache werden neben höheren Kosten vor allem fehlende Inhalte genannt, die von Breitbandangeboten profitieren. Laut Forrester Research^{16,17} besitzen heute in Europa nur 4 % aller Haushalte einen Internetanschluss mit Breitband-Access. Ein Marktanteil von 10 % soll sogar erst im Jahre 2006 erreicht werden. Auch hier würden erst neue Formen der Unterhaltung für einen deutlichen Erfolg nötig sein.

¹³Diese Aussage muss in Relation zu den existierenden Tarifmodellen gesehen werden. Für PSTN-Zugänge gibt es im privaten Nutzungsbereich keine Flatrate-Tarife. Bei den Breitbandanschlüssen existieren dagegen eine Vielzahl von zeitunabhängigen Tarifmodellen.

¹⁴LÖDING, TORGE: *Magere Aussichten für Breitband-Internet*. heise online.
<http://www.heise.de/newsticker/data/tol-05.02.02-001/>

¹⁵DAUM, ADAM: *Broadband: The Revolution's on Hold in Europe Just Now*.
<http://www.gartnerg2.com/research/rpt-1201-0198.asp>

¹⁶WILKENS, ANDREAS: *Verhaltene Hoffnung auf Wachstumsschub beim Breitband-Internet*. heise online.
<http://www.heise.de/newsticker/data/anw-06.02.02-002/>

¹⁷<http://www.forrester.com/Home/0,3257,1,FF.html>

Vor allem hohe Kosten und fehlende Inhalte würden die Verbreitung von Breitband-Internetzugängen behindern. Zu diesem Schluss kommt eine Studie¹⁸ des Marktforschungsunternehmens Jupiter MMXI¹⁹. Der Nutzer erwarte vor allem Unterhaltungs- und Multimedialinhalte wie Musik und Videos. Tauschbörsen für Fotos, Musik und Videos sind ein weiterer Grund für Nutzer auf breitbandige Zugänge zu wechseln. Service und Content Provider sollen der Studie zufolge an einem gemeinsamen Konzept arbeiten, um die Akzeptanz der Nutzer gegenüber Breitbandanschlüssen zu erhöhen.

In Deutschland sind neben attraktiven Angeboten für Internetanschlüsse mit hohen Übertragungsraten auch Breitband-Inhalte (z.B. durch Content-Anbieter wie Arcor²⁰, Premiere²¹ oder RTL²²) bereits verfügbar oder für die nahe Zukunft geplant, so dass hier die Bedingungen für eine schnelle Marktdurchdringung von Breitband-Access-Netzen günstiger ausfallen. Eine Studie²³ der Unternehmensberatung Frost & Sullivan²⁴ zeigt das hohe Potential von VoD-Angeboten. Es werden für das Jahr 2006 europaweit 8,5 Mio. Abonnenten prognostiziert.

In einer aktuellen Studie²⁵ von Frost & Sullivan wird ausgehend von den USA auch für den europäischen Breitbandmarkt ein starkes Wachstum ab 2003 erwartet. Die Zahl der Breitbandnutzer soll in Europa von momentan 3,8 Millionen auf 28,1 Millionen im Jahr 2008 steigen. Grund für diese Annahme liefert das Ergebnis einer Untersuchung von AC Nielsen²⁶/Net Ratings, aus der hervorgeht, dass im Januar 2002 Teilnehmer mit Breitbandanschlüssen erstmalig mehr Zeit online waren, als solche mit schmalbandigen Zugängen.

Aus den wiedergegebenen Zahlen können zwei Trends abgeleitet werden. Einerseits wird die steigende Nachfrage nach multimedialen (Breitband-)Diensten im Internet anhalten.

¹⁸OPITZ, RUDOLF: *Schneller Internetzugang: zu wenig Service und zu teuer*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/rop-26.11.01-000/>

¹⁹<http://www.jupitermmxi.com/europelanding.html>

²⁰JURRAN, NICO: *Arcor startet Angebot für Video-on-Demand*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/nij-11.12.01-000/>

²¹ZOTA, VOLKER: *Premiere und Arcor planen Video-on-Demand*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/vza-06.03.02-000/>

²²PERSSON, CHRISTIAN: *RTL will Fernsehserien online vermarkten*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/cp-03.02.02-000/>

²³HANSEN, SVEN: *Studie: Video on Demand bald Massenmarkt*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/sha-07.09.01-000/>

²⁴<http://www.frost.com>

²⁵LÖDING, TORGE: *Studie sieht Breitbandboom ab 2003*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/tol-06.03.02-002/>

²⁶<http://www.acnielsen.com>

Das führt auf der anderen Seite dazu, dass die unbefriedigenden Bandbreiten des PSTN den Bedarf nach Breitbandzugängen anziehen lassen werden.

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Einleitung

Kommunikationsnetze lassen sich in zwei Gruppen einteilen: die Ebene der Access-Netze und die Ebene der Backbone-Netze. Die Zugangs-Netze verbinden mit Hilfe verschiedener Access-Technologien Anwender und Service Provider. Die Kommunikationsverbindungen der Teilnehmer werden in einem Access-Multiplexer gebündelt und deren Datenverkehr in ein Core-Netz weitergeleitet. Die Strecke des Anschlussnetzes zwischen dem Übergabepunkt (Network Termination) des Nutzers und dem Access-Multiplexer wird i.A. als Local Loop oder Letzte Meile bezeichnet. Die räumliche Ausdehnung der Zugangsnetze wird durch übertragungstechnische Parameter der jeweiligen Access-Technologie bestimmt. Die Datenübertragung zwischen den Service Providern verläuft über die Backbone-Netze. Diese beinhalten das Routing verbindungsloser und verbindungsorientierter Kommunikation über große geographische Entfernungen.

Die Grenzen des Access Netzes werden entsprechend der ITU Empfehlung G.902¹ durch die Nutzer-Netz-Schnittstelle (UNI) auf der einen und der Schnittstelle zu einem Dienste-Zugangsknoten (SNI) markiert (siehe Abbildung 3.1). Das UNI definiert eine Schnittstelle zwischen dem Anschlussnetz und einem teilnehmerseitigen Netzwerk (CPE). [EG 202 306]

Die Verkehrsentwicklung der letzten Jahre zeigt ein weiter anhaltendes Wachstum IP-basierten Traffics. Das Verkehrsvolumen verschiebt sich immer weiter in Richtung der Datennetze, so dass der Informationsaustausch über traditionelle Kommunikationsnetze (z.B. PSTN) demgegenüber an Bedeutung verlieren wird. Aufgrund der Tatsache, dass klassische Informationsdienste wie z.B. die Sprachübermittlung als eine Sonderform des Datenaustausches verstanden werden können, ist eine durchgängig IP-basierte Kommunikationsinfrastruktur bis zum Teilnehmer die logische Konsequenz. Mit der Integrati-

¹ITU-T RECOMMENDATION G.902: *Framework recommendation on functional access networks.*

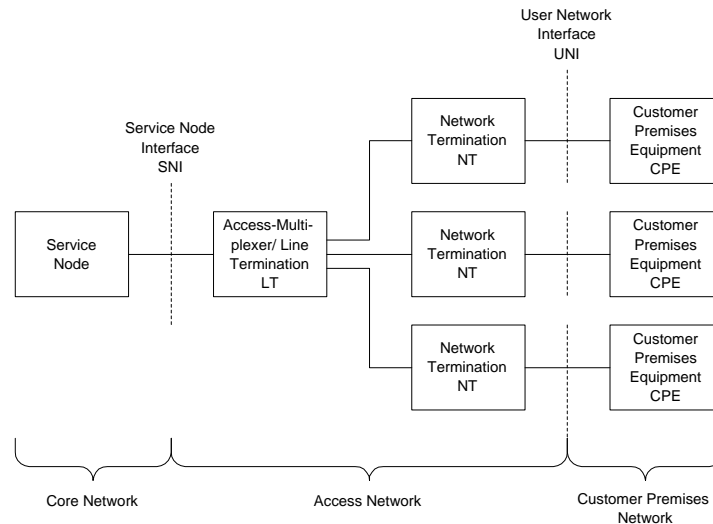


Abbildung 3.1: Generisches Modell eines Kommunikationsnetzes

on existierender und zukünftiger Anwendungen entsteht ein konvergentes Full-Service-Access-Network, d.h. alle angebotenen Applikationen erhält der Nutzer über ein Übertragungsmedium mit einer definierten Schnittstelle.

3.2 Quality of Service (QoS)

IP ist für die Kommunikation im Internet entwickelt worden und als solches optimiert für die paketbasierte Übertragung von Datendiensten. Reine Datendienste zeichnen sich durch eine relativ hohe Unempfindlichkeit gegenüber auftretenden Verzögerungen aus. Der Transport der Daten mittels IPv4 erfolgt daher mit der Best Effort (BE) Charakteristik (siehe Kapitel 5.2).

Mit der BE Charakteristik können interaktive Echtzeitanwendungen zusammen mit nicht zeitkontinuierlichen Diensten nur unter Einschränkungen in der Qualität übertragen werden. Durch Quality of Service Algorithmen und Mechanismen können bestimmte Datenströme bevorzugt behandelt werden, damit sie trotz schwankender Bedingungen im Netz mit gleichbleibender Güte ihr Ziel erreichen (siehe Kapitel 5). Diese Qualität wird über Dienstgütemerkmale beschrieben.

Die Dienstgüte wird von den folgenden Parametern beeinflusst: Der Begriff Bandbreite kennzeichnet die Übertragungskapazität eines Mediums, Protokolls oder einer Verbin-

dung. Die Verzögerung oder Latenz eines Paketes setzt sich aus der Serialisation Delay², der Propagation Delay³, der Switching Delay⁴ und der Queueing Delay zusammen. Während die ersten 3 Anteile fix sind, variiert die Queueing Delay mit der Auslastung⁵ des Netzwerkes. In stark beanspruchten Netzen werden von den Netzelementen Puffer (Queues) angelegt, um die Daten zwischenspeichern, bis im Netz wieder freie Ressourcen zur Übertragung der Pakete bereitstehen (siehe Kapitel 5.4.1). Die entstehende Varianz in den Latenzzeiten wird als Paket-Jitter bezeichnet. Jitter kann in den Empfängern durch zusätzliche Puffer ausgeglichen werden, die jedoch die Delay weiter erhöhen. Durch Paketverluste infolge von Buffer Overflows⁶ oder Fehlern in der Übertragungsstrecke (Bit/Burst Errors) werden einige Anwendungen in ihrer Qualität stark beeinträchtigt. Diesen Diensten wird vom Netzwerk eine höhere Priorität eingeräumt, um Paketverlusten vorzubeugen. [Veg01]

Für die Verzögerung gelten Grenzwerte, die bei der Übertragung interaktiver Echtzeit-Applikationen eingehalten werden müssen, um deren Qualität nicht einzuschränken.

- Delay < 150 ms: Keine Beeinträchtigung der Sprachübermittlung.
- Delay 150-400 ms: Nur mit Hilfe einer Echo Cancellation Funktion kann eine ausreichende Sprachqualität sichergestellt werden.
- Delay > 400 ms: Die Sprachübermittlung erhält einen Halb-Duplex-Charakter. Kommunikationsnetze mit derart hohen Verzögerungszeiten sind nicht geeignet für interaktive Echtzeitanwendungen.

3.3 Vergleich der Internet Protocol Versionen v4 und v6

Die aktuelle Internet Protocol Version 4 wird aufgrund einiger Beschränkungen den Anforderungen in einem durchgängig IP-basierten Kommunikationsnetz nicht mehr gerecht.

²Die Zeit die benötigt wird, um ein Paket über eine serielle Verbindung zu übertragen. Sie ist abhängig von der Größe des Paketes und der Bandbreite des Mediums.

³Eine durch die begrenzte physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Felder hervorgerufene Latenz.

⁴Die durch die Paketverarbeitung eines Netzelementes beanspruchte Zeit zwischen dem Eintreffen und dem Senden eines Paketes.

⁵Die nicht zeitkontinuierliche Datenübertragung mit seinen Paketbursts verursacht Netzüberlastungen (Congestion) mit relativ kurzer Zeitdauer.

⁶Buffer Overflows entstehen, wenn über einen längeren Zeitraum mehr Daten eintreffen, als eine Netzwerkverbindung aufnehmen kann.

Die IETF hat daher 1992 damit begonnen, eine neue Internet Protocol Version zu entwickeln. Diese Entscheidung wurde dazu genutzt, eine völlig neue Konzeption zu schaffen, die die Vorteile des alten Protokolls beibehält und die entstandenen Schwachpunkte tilgt.

3.3.1 Beschränkungen durch IPv4

Die augenscheinlichste Einschränkung stellt der Adressraum durch die 32-bittige Adressierung dar. Seit der Einführung von IPv4 im Jahr 1981 zeigt sich ein exponentielles Wachstum der vergebenen Adressen (1985: $\approx 6\%$, 1990: $\approx 12,5\%$, 1995: $\approx 25\%$, 2000: $\approx 50\%$).⁷ Mit über 0,4 Mrd. Internetnutzern Anfang 2001, einem stark wachsenden Bedarf an Internetzugängen in Asien, sowie Milliarden von Geräten (Handys, Autos, Haushaltsgeräte usw.), die in den nächsten Jahren an das Internet angeschlossen werden sollen, ist abzusehen, dass der Adressraum des IPv4 bald erschöpft ist.⁷

Ein echtes Multi-Service Netz muss eine Vielzahl von Verkehrsklassen mit unterschiedlichen Anforderungen an das Netz bzw. Quality of Service übertragen können. IPv4 hat lediglich eingeschränkte Funktionen, um zwischen verschiedenen Diensten zu differenzieren. Nur mit Hilfe diverser Erweiterungen ist mit IPv4 die Realisierung eines End-to-End QoS möglich (siehe Kapitel 5.2).

Weiterhin lässt sich mit IPv4 ein immer stärkeres Wachstum der Routing-Tabellen in den Backbone-Routern feststellen, die die Performance dieser Router beeinflussen. Der Aufbau des IPv4-Headers ist den heutigen Anforderungen ebenfalls nicht gewachsen. Er beansprucht viel Rechenzeit in den Routern (z.B. Checksummenberechnung) und ist wenig flexibel im Bereich der IP-Optionen. IPv4 besitzt keine Funktionen zur Sicherung des Datenverkehrs und dessen Integrität vor unberechtigten Zugriff. Solche Mechanismen müssen durch Erweiterungen wie IPsec integriert werden.

3.3.2 Änderungen und Vorteile des IPv6

IPv6 wurde nicht mit dem Ziel konzipiert, ein völlig neuartiges Übertragungsprotokoll zu schaffen. Stattdessen galt der Wahrung der Abwärtskompatibilität mit IPv4 das Hauptaugenmerk. IPv6 soll an den Stellen Verbesserungen bringen, bei denen IPv4 zwar funk-

⁷CISCO SYSTEMS: *Cisco IPv6 Services – Integration & Co-Existence*. Präsentation, Cisco IOS Days, September 2001.

http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/iosw/prodlit/extns_pg.ppt

tioniert, jedoch nicht mehr den gestiegenen Anforderungen der Nutzer gerecht werden kann. IPv6 besitzt deswegen die gleiche Funktionalität wie das alte Internet Protocol. Nur die Positionen, die mit IPv4 Probleme bereiteten, wurden in der neuen Spezifikation geändert oder ganz entfernt. Die nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über die Änderungen bei der Implementierung von IPv6:

- Erweiterung des Adressraumes
- Erweiterte Routingfähigkeiten
- Implementation eines Anycast-Adresstypen, Abschaffung des IP-Broadcast
- Vereinfachung des Headers
- Verbesserte Unterstützung von Optionen und Änderung der Kodierung der IP Header Optionen
- Funktionen zum Kennzeichnen (Labeling) von Paketen
- Verbesserte Skalierbarkeit beim Multicast-Routing
- Integrierte Quality of Service Fähigkeiten
- Funktionen für Identifikationsüberprüfung (Authentication) und Verschlüsselung und Erweiterungen zur Sicherstellung der Identität, Datenintegrität und Vertraulichkeit
- Verbessertes Mobile IP (siehe Kapitel A.3)

Im Folgenden werden die genannten Änderungen ausführlich dargestellt. [Gon99]

3.3.2.1 Adressierungsschema

Mit seinen 32 Bit breiten Adressen bietet der IPv6 Vorläufer IPv4 Raum für über vier Milliarden individueller Knoten im Internet. Dies erschien ausreichend für jedes netzwerkfähige Gerät auf der Welt. Durch eine allzu großzügige Adresszuweisung⁸ in früheren Jahren ist ohne eine komplexe und teure Neuordnung der IP-Adressen langsam absehbar, wann die freien Adressen erschöpft sind. Der Adressraum ist heute schon zu 60 Prozent belegt.

⁸So erhielten z.B. die University of California in Berkeley (UCB) und Digital Equipment (DEC) jeweils ein Klasse A Subnetz mit rund 16 Millionen adressierbaren Knoten.

IPv6-Adressen sind 128 Bit lang. Die Notation ändert sich gegenüber IPv4 zu einer Reihe von 16-Bit-Blöcken in Hexadezimal-Schreibweise, die durch Doppelpunkte getrennt werden. Folgen von Nullen können einmalig durch „::“ abgekürzt werden. Die Host-Local-Adresse, die funktional dem Local Host 127.0.0.1 bei IPv4 entspricht, wird durch „::1“ ausgedrückt (bestehend aus führenden Nullen und als letztes Bit eine „1“).

IPv6 sieht keine Broadcast-Nachrichten vor, die in bestimmten Netzwerkszenarien zu hoher Netzlast führen können. Informationen, die in IPv4 mit Broadcasts verbreitet wurden, werden in IPv6 nur mittels Multicast-Messages transportiert. Diese Funktion wird im Kapitel A.1.3 am Beispiel eines ARP Request erläutert.

IPv6 unterscheidet zwischen 3 Adresstypen: Unicast-, Anycast- und Multicast-Adressen (siehe Abbildung 3.2 und Kapitel A.1). Der Typ der Adressierung wird durch ein definiertes Format-Präfix in einer IPv6-Adresse bestimmt. Einer Unicast-, Anycast- oder Multicast-Adresse wird immer nur ein Interface zugeordnet, jedoch kein Host. [Bra99, RFC2373]

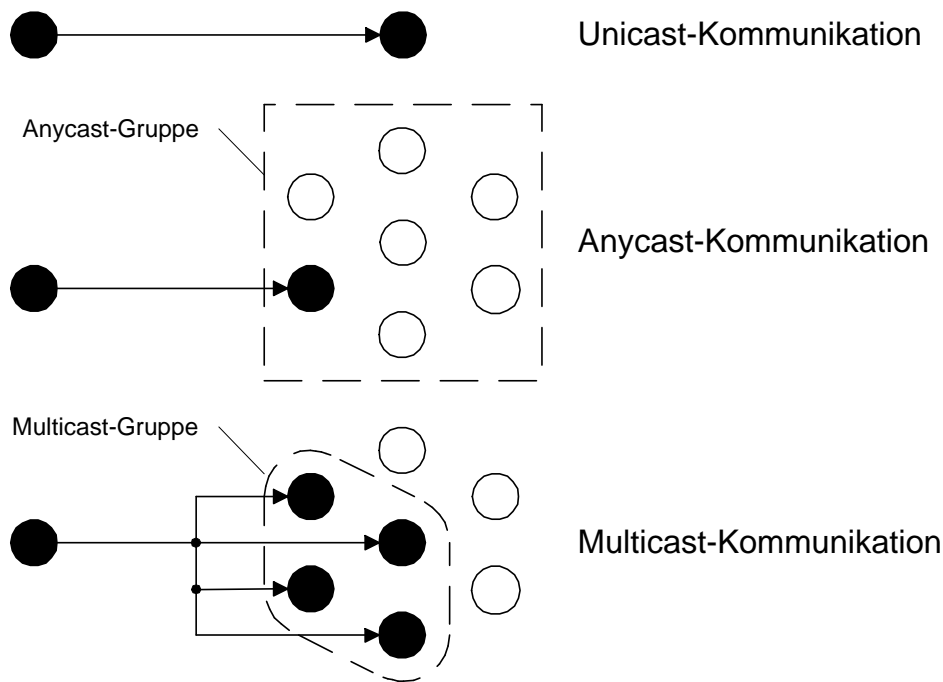


Abbildung 3.2: IPv6 Kommunikationstypen (nach [Bra99])

3.3.2.2 Vereinfachung des Headers

Der Header des neuen Internet Protocol IPv6 hat gegenüber IPv4 gravierende Änderungen erfahren. Die Änderungen waren nötig, um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden. Bei der Entwicklung des neuen Headers standen die Senkung der Verarbeitungskosten für IP-Datagramme beim Routing und die Bedingung, den Bandbreitenbedarf von IPv6 trotz der größeren Adressfelder so gering wie möglich zu halten, im Vordergrund. Ein IPv6 Header enthält wesentlich weniger Felder als ein IPv4 Header und benötigt deswegen weniger Zeit für die Verarbeitung. Die Effizienz des neuen Headers wird daran deutlich, dass sich ungeachtet der viermal größeren Adressen die Größe des IPv6-Headers im Vergleich zum Vorgänger nur verdoppelt hat.

Die Änderungen des Headers zwischen beiden Protokollversionen werden in den Abbildungen 3.3 und 3.4 ersichtlich. Router sind unter IPv4 damit beschäftigt, Checksummen

0	4	8	16	19	24	32
version	length	type of service	total length			
identification			flags	fragment offset		
time to live		protocol	header checksum			
source IP address						
destination IP address						

Abbildung 3.3: IPv4 Header (nach [RFC0791])

zu prüfen und Pakete zu fragmentieren. Bei dem Durchsatz heutiger Backboneverbindungen wird hierfür sehr viel Rechenleistung in den Routern gebunden. Um diesen Anteil zu verringern, wird der IPv6-Header nicht durch eine Prüfsumme (IPv4 Header: *header checksum*) gesichert. Die Fehlerfreiheit der Daten wird stattdessen im darüber liegenden Transport Layer (TCP, UDP) durch CRC-Bildung angezeigt. Layer 4 Daten sind für den Router transparent und benötigen daher keine weitere Rechenzeit. Fehlerhafte Pakete werden nun erst im Empfänger erkannt und müssen von dort neu angefordert werden. Die Felder *length* und *identification* sind ebenfalls entfernt worden. Andere Felder des IPv4 Headers wie Optionen und Fragmentierungsinformationen (*flags*, *fragment offset*) sind durch verschiedene Erweiterungsheader ersetzt worden. Diese werden zwischen dem IPv6 Header und dem Transport Layer eines Paketes plaziert (siehe Abbildung 3.5). Die Art des Erweiterungsheaders wird durch das Feld *next header* kodiert. Die IPv6

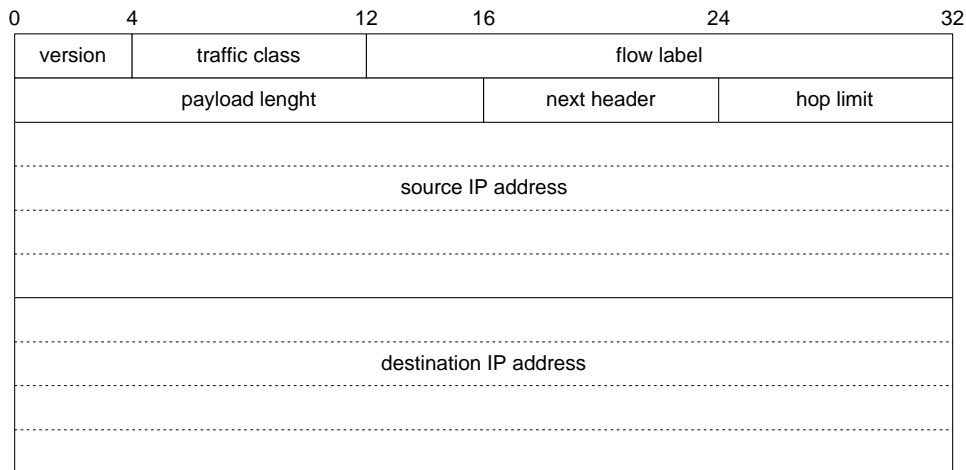


Abbildung 3.4: IPv6 Header (nach [RFC2460])

Erweiterungsheader werden abgesehen von Ausnahmen (Hop-by-Hop Options, Routing-Header) von keinem Router entlang des Datenpfades geprüft oder bearbeitet, bis das Datagramm sein Ziel erreicht. Damit wird eine Steigerung der Routerperformance erreicht, denn mit IPv4 musste bei Vorhandensein einer Option alle Optionen durch den Router geprüft werden. Ein weiterer Fortschritt ist die Aufhebung der Limitierung auf 40 Bytes für alle Optionen. Mit den Erweiterungsheadern lassen sich so sehr flexibel Funktionen realisieren, die sich mit IPv4 nur über Umwege bewerkstelligen ließen. Im Folgenden wird eine Übersicht über die in IPv6 implementierten Erweiterungsheader gegeben:

Hop-by-Hop Options Der Hop-by-Hop Options Header wird eingesetzt, um optionale Informationen zu übertragen, die von jedem Knoten entlang des Übermittlungspfades überprüft und ausgewertet werden müssen. Dazu gehören u.a. die Router-Alert-Option, um dem Router Pakete anzuzeigen, die eine besondere Beachtung benötigen (z.B. RSVP-Signalisierungsinformationen) und die Jumbo-Payload-Option zur Vergrößerung der maximalen Paketlänge. [RFC2113]

Routing Mit Hilfe des Routing Headers kann eine IPv6 Quelle eine Liste von Zwischensystemen (Router oder Topologiebereiche) bestimmen, die auf dem Weg zum Zielknoten passiert werden sollen. Durch diese Funktion kann der Weg eines Datagramms beeinflusst werden, um z.B. die Dienstqualität zu sichern. Die Funktionalität des Routing Headers ähnelt der Loose Source und Record Route Option im

IPv4.

Fragment Der Fragment Header wird von einer IPv6 Quelle benötigt, um größere Pakete zu senden, als es die Pfad-MTU⁹ (Maximum Transmission Unit) zulässt. Im Gegensatz zu IPv4 wird die Segmentierung/ Reassemblierung von Datagrammen nur in den Endknoten durchgeführt, nicht mehr durch die Router entlang des Übertragungspfades. Treffen IP-Pakete mit einer zu großen MTU bei einem IPv6-Router ein, wird eine Fehlermeldung für den Absender generiert, damit dieser die maximale Paketgröße mittels Path MTU Discovery anpasst. Schlägt dieses Verfahren durch fehlerhafte oder falsch konfigurierte Netzwerkelemente fehl, wird bei Einsatz von IPv4 die MTU auf einen Minimalwert von 64 Byte festgelegt, womit durch die benötigte große Paketanzahl ein unwirtschaftlich hoher Protokoll-Overhead entsteht. Bei IPv6 wurde deshalb die kleinste einstellbare Maximum Transmission Unit von 64 auf 1280 Bytes erhöht.

Destination Options Der Destination Header kann für die Übermittlung optionaler Informationen genutzt werden. Nur der (die) Zielknoten werten den Inhalt dieses Erweiterungsheaders aus.

Authentication Der IP Authentication Header (AH) dient der Sicherstellung der Integrität und Identität des Datenursprungs (authentication) bei verbindungsloser Kommunikation sowie dem Schutz vor Replayattacks¹⁰. [RFC2402]

Encapsulating Security Payload ESP stellt Funktionen zur Sicherung der Vertraulichkeit (confidentiality) und Integrität der Daten, für die Authentifizierung des Senders (authentication), für den Schutz vor Replayattacks und für eine begrenzte Vertraulichkeit des Verkehrsflusses bei verbindungsloser Kommunikation zur Verfügung. [RFC2406]

Die Mehrheit der übertragenen IP-Pakete weisen keine optionalen Informationen auf. Die genannten Änderungen tragen dazu bei, die Verarbeitungskosten für solche IP-Datagramme und die Bandbreite für einen minimalen Header zu verringern.

Die Felder *type of service*, *total length*, *time to live* und *protocol* wurden in IPv6 durch *traffic class*, *payload length*, *hop limit* und *next header* ersetzt. Um eine weitere Entlastung

⁹Die Pfad-MTU wird durch die minimale Link-MTU zwischen Quell- und Zielknoten bestimmt. Die zwischen zwei Knoten maximal übertragbare Größe eines Datagramms wird dabei als Link-MTU bezeichnet. Sie ist abhängig vom Netzwerktyp.

¹⁰Hierfür werden die Sequenznummern einer Integritätsprüfung unterzogen.

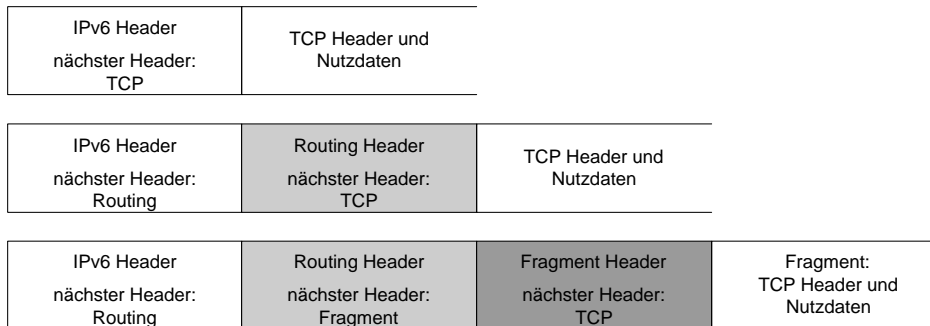


Abbildung 3.5: Konzept der IPv6 Erweiterungs-Header (nach [RFC2460])

der Router zu erreichen, ist die Länge des Headers festgesetzt¹¹ und die Adressfelder auf 64-Bit-Grenzen ausgerichtet (64 bit aligned) worden. Durch so genanntes falsches Alignment werden heutige Prozessoren beim Speicherzugriff um bis zu 300 % ausgebremst. [Bra99, Lei01b]

Traffic Class

Das Feld *traffic class* ermöglicht es den Quell-Knoten oder Routern entlang des Übertragungspfades Differentiated Services (siehe Kapitel 5.2.3) innerhalb des IPv6 zu nutzen. Die Informationen des *traffic class* Feldes können durch Router manipuliert werden, so dass es nicht für die Berechnung von Prüfsummen und zur Authentifizierung herangezogen werden darf. [Bra99, RFC2474]

Im Gegensatz zur Klassifizierung mittels IP Precedence (siehe Kapitel A.2) des IPv4 können bis zu 64 Verkehrsklassen unterschieden werden.

Flow Label

Mit Hilfe des *flow label* lassen sich Pakete eines bestimmten Verkehrsstroms¹² kennzeichnen, um eine gesonderte Behandlung bei der Verarbeitung anzufordern (z.B. QoS für Echtzeitdaten). Die Umsetzung dessen kann entweder explizit per OOB-Signalisierung (z.B. RSVP) oder durch eine In-Band-Signalisierung¹³ (z.B. Hop-by-Hop Options)

¹¹IPv4 arbeitet mit Headern variabler Größe.

¹²Ein Flow besteht aus Paketen, die die gleichen Quell- und Zieladressen sowie Portnummern aufweisen.

¹³Die Informationen zur Umsetzung des QoS befinden sich innerhalb des Paketes.

erfolgen.

Insbesondere die Kombination Flow Label/RSVP verspricht Vorteile bei der Verarbeitungsgeschwindigkeit, da RSVP ebenfalls flow-basiert arbeitet. Die Verknüpfung IPv4/RSVP bedingt eine Zuordnung der IPv4-Pakete zu entsprechenden RSVP-Flows in den Routern, die unnötig Rechenzeit verbraucht. Diese Zuordnung entfällt bei Einsatz der Flow Labels.

Flow Labels ermöglichen weiterhin ein schnelleres Routing, da die Bearbeitung von Paketen eines Flows (Extrahieren der Zieladresse, Suchen des Ausgangs-Interfaces in der Routing-Tabelle) nur einmal erfolgen muss (so genanntes Label Switching). Mit MPLS (siehe Kapitel 5.3) steht jedoch ein Protokoll für die selbe Aufgabe zur Verfügung. Da es in einer tieferen Schicht arbeitet, ist ein Geschwindigkeitsvorteil gegenüber dem Flow Label Mechanismus des IPv6 zu verzeichnen. [Bra99, Lei01b, RFC1809]

Integriertes Quality of Service

Das Handling von Daten mit verschiedenen QoS-Anforderungen ist gegenüber IPv4 wesentlich verbessert worden, da die Integration in IntServ- oder DiffServ-Modelle durch die Neugestaltung des IPv6-Headers mit den Feldern Traffic Class und Flow Label vereinfacht wurde.

3.3.2.3 Autokonfiguration

Damit Nutzer an ihren Rechnern keine manuelle Einstellungen vornehmen müssen, um in ein Netz eingebunden zu werden, ist die Adresszuweisung für ein Netzwerkelement automatisiert worden. Unter IPv4 wurde hierfür das Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) genutzt. Da DHCP servergebunden arbeitet, stellt es nicht in allen Umgebungen die optimale Lösung dar.

Mit der Entwicklung von IPv6 wurde die Adresszuweisung weiter vereinfacht. IPv6-Geräte erhalten vollautomatisch eine IP-Adresse für jedes Interface. Link-Local-Adressen (siehe Kapitel A.1.1) werden direkt aus der Ethernet-MAC- oder einer anderen Layer-2-Adresse gebildet. Somit verfügt jedes vernetzte Gerät für jeden Anschluss über eine Link-Local-Adresse. Mittels der Neighbor Solicitation Funktion kann ein Host kontrollieren, ob eine Link-Local-Adresse bereits vergeben ist. Erhält das System daraufhin keine Antwort (Neighbor Advertisement), ist die Adresse gültig und kann für die Kommunikation genutzt werden. Eine Link-Local-Adresse besitzt nur im Subnet Geltung. Mit ihr kann ein Endgerät per Multicast ein Router (Router Solicitation) suchen, um eine globale IP-Adresse an-

zufordern. Alle Router, die Router-Solicitation-Pakete empfangen, propagieren dem anfragenden Host daraufhin Präfixe mit Lease Timeouts, MTU und Hop Count. Die EUI-64 aus der der Link-Local-Adresse wird beibehalten. Router weisen dem Host somit keine konkrete IP-Adresse zu, sondern nur das Präfix für das eigene Netz. Aus dem Präfix und der EUI-64 als Suffix erzeugt sich der Host seine IP-Adresse. Der Router benötigt durch dieses Verfahren keinen zusätzlichen Speicher, um sich die bereits vergebenen Adressen zu merken.

Ein Host kann auf diese Weise mit einem minimalen Konfigurationsaufwand als Node in ein Netzwerk eingebunden werden. Hiermit kann die Zeit für die Konfiguration und Verwaltung der Adressvergabe reduziert werden. IPv6-Hosts können pro Router mehrere IP-Adressen besitzen und über alle gleichzeitig erreichbar sein. Der Host sucht sich automatisch die richtige Route und den richtigen Router. [Bra99, Gon99, Lei01b]

Die Umstellung ganzer Adressbereiche (z.B. beim Providerwechsel) lässt sich für ein Unternehmen mittels der Renumbering Funktion des IPv6 einfach realisieren (siehe Kapitel A.4).

3.3.2.4 Multicast

Multicast ist eine Erweiterung des IPv4, die es erlaubt, IP-Pakete an eine Gruppe von Empfängern anstatt eines einzelnen Empfängers zu transportieren (siehe Abbildung 3.2). Diese Gruppe wird durch eine IP-Multicast-Adresse gekennzeichnet. Ein Vorteil des Multicasting besteht darin, dass ein Multicast-Paket für die Mitglieder der Gruppe nur einmal gesendet werden muss und dass es jeden Übertragungsabschnitt zwischen Sender und Empfänger nur einmal passiert. Zudem erreicht Multicast eine hohe Skalierbarkeit. Das Hinzufügen eines Nutzers zu einer Multicast-Gruppe beeinflusst nicht die benötigte Bandbreite. Dieses Verfahren eignet sich aufgrund der effizienteren Bandbreitenausnutzung für die simultane Verbreitung von Informationen z.B. Video- und Audio-Streaming mit hoher Bandbreite.

Die Gruppenzugehörigkeit ist dynamisch. Hosts können ihr zu jeder Zeit beitreten oder sie verlassen. Ein Host kann mehreren Gruppen angehören. Ein Quell-Host sendet ein Multicast-Datagramm an das angeschlossene Subnetz. Gruppenmitglieder im Subnetz empfangen das Paket direkt. Die an das Subnetz angeschlossenen Router leiten das Paket an alle Netze weiter, in denen sich Mitglieder der Multicast-Gruppe befinden. Die Router dieser Netze transportieren die Datagramme als lokale Multicast-Pakete zu den entsprechenden Hosts. So werden die Daten nur an den Knotenpunkten vervielfältigt, die

mit Subnetzen – bzw. direkt mit den der Gruppe zugehörigen Hosts – verbunden sind, die weitere Gruppenmitglieder enthalten.

Um zu ermitteln, über welche Routen Gruppenmitglieder zu erreichen sind, tauschen die Router über Multicast-Routing-Protokolle wie DVMRP oder MOSPF Informationen zur Multicast-Topologie (so genannte Distribution Trees) aus. Über das Internet Group Management Protocol (IGMP) melden einzelne Hosts eines Subnetzes den nächstgelegenen Multicast-Routern die Mitgliedschaft in einer Multicast-Gruppe. [Bra99, RFC1112, RFC2236]

Der Transport der Pakete erfolgt mit der selben Best-Effort-Charakteristik wie bei einer Unicast-Übertragung, d.h. es wird weder die Ankunft für alle Empfänger der Gruppe, noch die Reihenfolge der Datagramme garantiert. Infolge dessen sind für die Multicast-Routing-Protokolle Quality of Service Erweiterungen definiert worden. Einen Überblick zu diesem Thema liefern [BCPR01, WH00].

IPv6 integriert den Multicast-Support (siehe Kapitel A.1.3). Multicast ist damit nicht mehr nur auf lokale Netze oder auf einige Multicast-Backbones im Internet (z.B. MBone) beschränkt. Durch das Scope-Feld in einer IPv6-Multicast-Adresse kann der Gültigkeitsbereich und damit die Reichweite einer Multicast-Datenübertragung in feinen Stufen bestimmt werden. Mit IPv4 wird der Gültigkeitsbereich entweder über verschiedene Adressbereiche¹⁴ geregelt oder kann durch Verringerung des TTL-Wert¹⁵ begrenzt werden. Beim Sicherstellen eines Dienstgütemerkmals besitzt IPv6 mit der integrierten DiffServ-Funktionalität (via Traffic Class) Vorteile gegenüber IPv4. Die Realisierung eines QoS auf der Basis von IPv6 wird in [SL00] beschrieben. Im IST Projekt GCAP¹⁶ (Global Communication Architecture and Protocols for new QoS services over IPv6 networks) werden neue End-to-End Multicast Transport Protokolle mit integrierter QoS-Unterstützung spezifiziert und evaluiert.

3.3.3 Migration von IPv4 zu IPv6

Eine der größten Herausforderungen bei der Einführung des neuen Internet Protocols vor dem Hintergrund der Realisierbarkeit dieses Prozesses ist die Schaffung von Bedingungen für die Einhaltung einer durchgehenden Kompatibilität mit IPv4, die es erlauben,

¹⁴Siehe [RFC2365].

¹⁵Der Wert des TTL-Feldes legt die Anzahl der Hops fest, die ein Datagramm passieren darf.

¹⁶http://dbs.cordis.lu/fep/cgi/srchidadb?ACTION=D&CALLER=PROJ_IST&QF_EP_RPG=

die Vorteile von IPv6 zu nutzen, ohne das ganze Internet auf einen Schlag aufzurüsten. Verschiedene Gremien (z.B. die NGtrans-Arbeitsgruppe der IETF) beschäftigen sich mit der Umstellung von IPv4 auf IPv6. Um die Funktion der IPv4-Infrastruktur nicht zu beeinträchtigen, vollzieht sich die Migration in kleinen Schritten. Damit trotzdem IPv6 Anwendungen in Umgebungen arbeiten können, die IPv6 nicht unterstützen, bedient man sich zweier Ansätze zum transparenten Transport von IPv6-Diensten in IPv4-Netzen.

Im ersten Fall werden so genannte Dual Stacks eingesetzt, mit dem ein System IPv6 und IPv4 gleichzeitig unterstützt. IPv4-Adressen werden hierfür in IPv6-Adressen eingebettet (siehe Abbildung A.1: IPv4-mapped IPv6 address). Das System erkennt Verbindungsversuche von IPv6 Anwendungen an ihren Adressen und stellt tatsächlich eine IPv4-Verbindung her. Mit der Tunnelung von IPv6 Datagrammen in einer IPv4-Infrastruktur steht ein weiterer Transitionsmechanismus zur Verfügung. In multicast-fähigen Netzen lassen sich die Tunnel automatisch einrichten. Mit der 6BONE¹⁷ Initiative existiert bereits ein IPv6 Backbone-Netz auf Basis von statischen IPv4 Tunneln.

Anhand der vorgestellten Merkmale des Internet Protocol in der Version 4 konnte herausgestellt werden, dass es den Anforderungen eines zukünftigen Multiservice-Access-Netzes nicht oder nur bedingt gerecht wird. Insbesondere die Verknappung des Adressraumes und die eingeschränkten Multicast und Quality of Service Fähigkeiten lassen einen Bedarf für das neue IPv6 erkennen. In dieser Arbeit werden daher die IP-spezifischen Funktionen, Anforderungen usw. der Access-Netze und QoS-Algorithmen nach Möglichkeit in Hinsicht auf den Einsatz des IPv6 betrachtet.

3.4 Normen und Standards

Offene Standards und Normen bilden die Grundlage für den interoperablen Betrieb von Geräten verschiedener Hersteller und sichern den Wettbewerb innerhalb eines Marktes, da einzelne Anbieter nicht durch undokumentierte Schnittstellen und Procedere von der Entwicklung eigener Produkte abgehalten werden.

In dieser Arbeit werden daher in den jeweiligen Kapiteln Standards, Normen und Industrieforen zu den einzelnen Technologien aufgeführt und dargestellt, ob sie die Technik in allen Punkten spezifizieren, die für die optimale Funktion nötig sind. Existiert für eine Technologie keine Norm, so dass die Interoperabilität eingeschränkt ist, wird dies entsprechend vermerkt. Abhängigkeiten zwischen den Normen werden – soweit bekannt

¹⁷<http://www.6bone.net>

– herausgestellt. Es werden weiterhin Protokolle und Mechanismen betrachtet, die für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netz benötigt werden, um die Dienste auf dem Link abzubilden. Die Arbeit wird weiterhin in den betreffenden Abschnitten um eine Aufzählung aktueller oder gerade beendeter Forschungsarbeiten mit dem Ziel einer Standardisierung ergänzt. Insbesondere die Forschungsprogramme der EU (bis 1999: ACTS¹⁸, aktuell: IST¹⁹) und des BMBF sind hier von Bedeutung.

3.5 Schnittstellen zwischen Kommunikationssystemen

Schnittstellen bilden die Verbindung zwischen Anwender und Access-Netz (UNI) und zwischen Access-Netz und Backbone-Netz (SNI). In Deutschland sind an schmalbandigen Nutzer-Netz-Schnittstellen POTS (ITU-T Q.552²⁰, ETS 300 001²¹) und ISDN (ITU-T I.430²², ETS 300 012-1²³) gebräuchlich. Breitband-UNIs existieren für TP-basierte, optische und STU-basierte Schnittstellen. ETS 300 811²⁴ und I.432.5²⁵ definieren ein Interface mit 25,6 Mbit/s über Twisted Pair Kabel. Dieses Interface ist als low-cost Schnittstelle mit minimalen Wartungsfunktionen zur Verwendung in privaten Haushalten vorgesehen. Als übergeordnete Transportprotokolle kommen ATM²⁶ oder Ethernet (10BaseT) zum Einsatz. Die ITU-T Empfehlung I.432.4²⁷ sieht ferner eine Verbindung mit 51,84 Mbit/s über UTP3 Medien vor. Das ATM-Forum arbeitet an einer Spezifikation²⁸ für eine auf optischen Medien basierende Schnittstelle. Um die Kosten für die optischen Interfaces zu senken, werden Plastic Optical Fibre (POF) und 650 nm Light Emitting Diodes (LED)

¹⁸<http://www.actsline.org>

¹⁹<http://www.cordis.lu/ist/overv-1.htm>

²⁰ITU-T RECOMMENDATION Q.552: *Transmission characteristics at 2-wire analogue interfaces of digital exchanges.*

²¹ETSI ETS 300 001: *Attachments to the Public Switched Telephone Network (PSTN); General technical requirements for equipment connected to an analogue subscriber interface in the PSTN.*

²²ITU-T RECOMMENDATION I.430: *Basic user-network interface - Layer 1 specification.*

²³ETSI ETS 300 012-1: *Integrated Services Digital Network (ISDN); Basic User Network Interface (UNI); part 1: Layer 1 specification.*

²⁴ETSI ETS 300 811: *Transmission and Multiplexing (TM); Broadband Integrated Services Digital Network (B-ISDN); Transmission Convergence (TC) and Physical Media Dependent(PMD) sublayers for the S_B reference point at a bit-rate of 25,6 Mbit/s over twisted pair cable.*

²⁵ITU-T RECOMMENDATION I.432.5: *B-ISDN UNI Physical layer specification for 25 600 kbit/s.*

²⁶ATM FORUM AF-PHY-0040.000: *Physical Interface Specification for 25,6 Mbit/s over Twisted Pair Cable.*

²⁷ITU-T RECOMMENDATION I.432.4: *B-ISDN UNI Physical layer specification for 51 840 kbit/s.*

²⁸ATM FORUM BTD-RBB-001.04: *Baseline text for the Residential Broadband Working Group.*

verwendet. Es werden Datenraten bis 155 Mbit/s angestrebt. STU-Schnittstellen werden innerhalb der DVB Spezifikation definiert (EN 50256²⁹, EN 50201³⁰). [EG 202 306]

Die Standardisierung der Schnittstelle zwischen Access- und Core-Netz (SNI) wird im Gegenteil zur Vielfalt der UNIs komplett über die V5 Familie abgedeckt. Die V-Interfaces sind unabhängig von der Access-Technologie, die eine spezielle V-Schnittstelle bereitstellt. Die Standards ETS 300 324-1³¹ und ITU-T G.964³² definieren das V5.1 Schmalband-SNI mit 2,048 Mbit/s. Das V5.2 Interface wird in ETS 300 347-1³³ und G.965³⁴ genormt. V5.2 Schnittstellen erweitern den V5.1 Standard u.a. um die Möglichkeit, 16 physikalische Interfaces a 2,048 Mbit/s zusammenzufassen. [EG 202 306]

Breitband-SNIs werden in den VB5 Standards genormt. Der VB5-Referenzpunkt der ITU Empfehlung G.902³⁵ existiert in zwei Varianten. Der auf der EN 301 005-1³⁶/ITU-T G.967.1³⁷ aufbauende VB5.1 Referenzpunkt sieht einen ATM Cross Connect mit einer Provisioned Connectivity vor. Der VB5.2 Referenzpunkt nach EN 301 217-1³⁸/ITU-T G.967.2³⁹ ermöglicht zudem eine Anschlussmöglichkeit auf Anforderung (on Demand) innerhalb des Access-Netzes. [EG 202 306, Gil01]

²⁹ETSI EN 50256: *Characteristics of DVB receivers.*

³⁰ETSI EN 50201: *Interfaces for digital video broadcast integrated receiver decoder (DVB-IRD).*

³¹ETSI ETS 300 324-1: *Signalling Protocols and Switching (SPS); V interfaces at the digital Local Exchange (LE); V5.1 interface for the support of Access Network (AN); part 1: V5.1 interface specification.*

³²ITU-T RECOMMENDATION G.964: *V interfaces at the digital local exchange (LE) – V5.1 interface (based on 2 048 kbit/s) for the support of access network (AN).*

³³ETSI ETS 300 347-1: *Signalling Protocols and Switching (SPS); V interfaces at the digital Local Exchange (LE); V5.2 interface for the support of Access Network (AN); part 1: V5.2 interface specification.*

³⁴ITU-T RECOMMENDATION G.965: *V interfaces at the digital local exchange (LE) – V5.2 interface (based on 2 048 kbit/s) for the support of access network (AN).*

³⁵ITU-T RECOMMENDATION G.902: *Framework recommendation on functional access networks.*

³⁶ETSI EN 301 005-1: *V interfaces at the digital Service Node (SN); Interfaces at the VB5.1 reference point for the support of broadband or combined narrowband and broadband Access Networks (ANs), part 1: Interface specification.*

³⁷ITU-T RECOMMENDATION G.967.1: *V-Interfaces at the service node (SN) - VB5.1 Reference point specification.*

³⁸ETSI EN 301 217-1: *V interfaces at the digital Service Node (SN); Interfaces at the VB5.2 reference point for the support of broadband or combined narrowband and broadband Access Networks (ANs); Part 1: Interface specification.*

³⁹ITU-T RECOMMENDATION G.967.2: *V-Interfaces at the service node (SN) - VB5.2 Reference point specification.*

3.6 Klassifizierung von Diensten

Die Zugangsnetze müssen neben den Daten einer Vielzahl heute verfügbarer Dienste auch die zukünftiger Anwendungen übertragen. Die Dienste stellen aufgrund der unterschiedlichen Übertragungsverhalten jeweils andere Anforderungen an das Netz hinsichtlich der Übertragungsparameter. So darf beispielsweise bei zeitkritischen Anwendungen wie Voice over IP die zum Übermitteln eines Paketes benötigte Zeit einen Maximalwert nicht überschreiten. Bei reinen Datendiensten (z.B. FTP) spielt die Latenz dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

In Anbetracht dessen ist eine Klassifizierung der Applikationen anhand ihrer Übertragungscharakteristik unabdingbar, um das Netzwerk nicht an jede Anwendung speziell anpassen zu müssen. Zu diesem Zweck wurden unter anderem durch die IETF, ITU-T und das ATM-Forum Service Klassen definiert. Deren Empfehlungen erlauben es, mit einem Minimum an Klassen viele Dienste zu unterstützen.

Die auf ATM-Netze ausgerichteten Empfehlungen der ITU-T und des ATM-Forum lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Netzstrukturen nicht ohne weiteres für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netzwerk übernehmen. Im Folgenden werden die bisherigen Ansätze erläutert und dargestellt, warum die vorhandenen Herangehensweisen nicht für das betrachtete IP-basierte Access-Netz verwendet werden können.

3.6.1 Service Klassen nach ITU-T I.362

Die ITU-T Empfehlung I.362⁴⁰ definiert 4 Service Klassen mit Hilfe von 3 Parametern. Zur Unterteilung des Dienstespektrums wird der Zeitbezug zwischen Sender und Empfänger (zeitkontinuierlich oder nicht zeitkontinuierlich), die Bitrate (konstant oder variabel) und der Verbindungstyp herangezogen (siehe Tabelle 3.1). Mit dem Zeitbezug kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Anwendung auf einen kontinuierlichen Datenstrom angewiesen ist bzw. die Verzögerung zwischen den Datenpaketen einen Grenzwert nicht überschreiten darf. Beim Verbindungstyp wird in der ITU-T I.362 zwischen verbindungsorientierten oder verbindungslosen Datenübertragungen unterschieden. Bei der verbindungsorientierten Datenübertragung wird für den Informationsaustausch eine virtuelle Verbindung (virtual circuit) zwischen den Kommunikationspartnern etabliert. Erst nach einer expliziten Signalisierungsphase, in der z.B. Verbindungsparameter ausgehandelt werden, können die eigentlichen Daten ausgetauscht werden. Durch einen optiona-

⁴⁰ITU-T RECOMMENDATION I.362: *B-ISDN ATM adaptation layer (AAL) functional description*.

len Quittierungsbetrieb (acknowledgements) und eine Flusskontrolle kann sichergestellt werden, dass die Informationen fehlerfrei übertragen wurden und bei Bedarf die Übermittlung wiederholt werden. Im Falle der verbindungslosen Datenübertragung werden die Informationen als Best-Effort Service ohne die Etablierung eines virtual circuit übermittelt. Es kann somit nicht sichergestellt werden, ob die Daten den Empfänger erreichen. Diese Funktion muss von höheren Schichten übernommen werden. Der Overhead ist hier jedoch geringer als bei der verbindungsorientierten Datenübertragung. Anwendung

Parameter	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
Zeitbezug	zeitkontinuierlich		nicht zeitkontinuierlich	
Bitrate	konstant	variabel		
Verbindung	verbindungsorientiert			verbindungslos
Beispiele	Sprachübertragung (Telefon)	Video mit variabler Bitrate	verbindungsorientierte Datenübertragung (Frame Relay)	verbindungslose Datenübertragung (LAN-Kopplung)

Tabelle 3.1: Service Klassen (nach ITU-T I.362)

findet die Empfehlung I.362 im ATM Schichten-Modell. Den 4 Service Klassen sind die in der ITU-T I.363 beschriebenen AAL-Typen der ATM Adaptionsschicht zugeordnet. Die ATM Adaption Layer (AAL) befindet sich im Referenzmodell zwischen der ATM-Schicht und den höheren Schichten (siehe Abbildung 3.6). Sie ist verantwortlich für die Anpassung der Daten höherer Schichten an die darunterliegende ATM Schicht. Sie übernimmt die Informationen, teilt sie in einzelne Blöcke auf und ergänzt sie je nach AAL-Typ um entsprechende Funktionen, die der Unterstützung spezifischer Dienste dienen (z.B. Einhaltung einer definierten Varianz der Zell-Übermittlungszeit (CDV), Synchronisation der Daten).

Die Klasse A beschreibt Applikationen, die Daten zeitkontinuierlich und mit konstanter Bitrate übermitteln. Die digitale Sprachübermittlung (Telefon) oder die transparente Übertragung von T1 oder E1⁴¹ Signalen sind Anwendungsbeispiele für diese Klasse. Sie ermöglicht den Ersatz leitungsvermittelnder Netze und wird deswegen auch als „Circuit Emulation“ bezeichnet. Die Dienste der Klasse B ähneln mit ihrem zeitkontinuierlichen

⁴¹Während T1 eine amerikanische Übertragungsnorm ist, bezeichnet dessen europäische Variante E1 die Festverbindung zweier Punkte mit 2,048 Mbit/s.

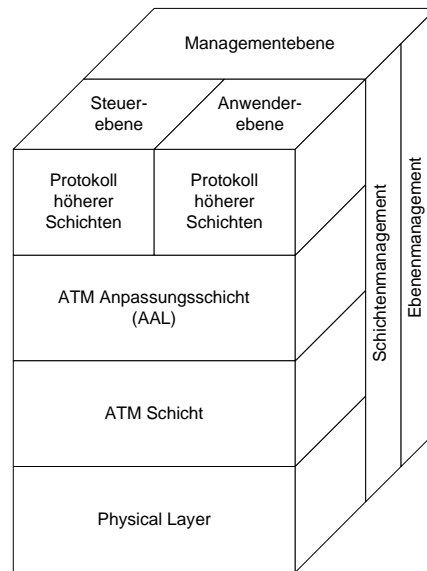


Abbildung 3.6: ATM Schichtenmodell

und verbindungsorientierten Übertragungsverhalten der Klasse A. Als Beispiele sind hier vor allem Audio- und Videoübermittlungen mit nicht konstanter Bitrate zu nennen. Die variable Datenrate entsteht beim Einsatz von Kompressionsalgorithmen oder Voice Activity Detection⁴² zur Reduzierung der benötigten Bandbreite. Die Applikationen der Klassen C und D besitzen keinen Zeitbezug zwischen Sender und Empfänger und beschränken sich somit auf reine Datendienste. Sie unterscheiden sich nur durch ihren Verbindungsmodus. Klasse C Dienste arbeiten verbindungsorientiert, Anwendungen der Klasse D haben einen verbindungslosen Charakter. Frame Relay und X.25 Paket- und Signalisierungs Dienste sind Beispiele für Klasse C Applikationen. LAN-Kopplungen sind der Klasse D zuzuordnen.

Die Klassifizierung nach ITU-T I.362 ist für ein IP-basiertes Access-Netzwerk nicht geeignet, da dessen Parameter den Charakter dieses Konzeptes nur ungenügend widerspiegeln. Das wichtigste Ausschlusskriterium besteht nach Meinung des Autors im Mangel eines Parameters zur Bestimmung verzögerungssensitiver Dienste. Die Anforderungen an das Netzwerk bei der Übertragung verzögerungsempfindlicher Echtzeitsignale wie einer Videokonferenz sind wesentlich höher im Vergleich zu einfachen zeitkontinuierlichen Anwendungen wie dem Video-on-Demand. Beim VoD lassen sich hohe Varianzen der

⁴²Beim Einsatz von Voice Activity Detection (VAD) bei der Sprachübermittlung werden in den Gesprächspausen keine Daten übertragen.

Übertragungsverzögerung durch den Einsatz entsprechend großer Puffer kompensieren, ohne das dadurch die Anwendung beeinträchtigt wird.

Die Circuit Emulation ist in IP-Netzen nur von geringer Bedeutung, da zeitkontinuierliche Dienste mit konstanten Bitraten hier ungebräuchlich sind. Bei der digitalen Sprachübertragung werden aus wirtschaftlichen Gründen Kompressionsalgorithmen und Techniken zur Sprachpausenerkennung genutzt, so dass daraus Dienste mit variabler Bitrate entstehen. Die Zusammenschaltung von TK-Anlagen mittels VoIP führt – wie beschrieben – zu einem der Klasse B entsprechendem Dienst. Die erweiterten Funktionen des DSS1 oder Q-SIG Protokolls für die Kopplung von TK-Anlagen müssen durch andere Mechanismen erbracht werden, um einen vollwertigen Ersatz zu schaffen. So kann die Verbindungskontrolle durch verschiedene Entwicklungen wie das Bearer-Independent Call Control (BICC) oder Session Initiation Protocol (SIP) realisiert werden. Diese Funktionsmerkmale können der Klasse C zugeordnet werden. Daraus lässt sich ableiten, dass die Bitrate als Parameter in einem Service Klassen Modell für IP-basierte Netze nicht als Unterscheidungsmerkmal dienen kann. [KNH01, RFC2543]

3.6.2 Service Klassen nach RFC 2211/2212

Das von der IETF verabschiedete Resource Reservation Protocol unterscheidet lediglich zwischen 2 Dienstklassen, dem Controlled Load Service und dem Guaranteed Service (siehe Kapitel 5.2.2.1). Mit dem Controlled Load Service wird lediglich sichergestellt, dass durch eine Zugangskontrolle zugelassene Anwendungen in einem überlasteten Netzwerk ähnliche Bedingungen vorfinden, wie im unbelasteten Netz. Die End-to-End Verzögerung, die ein Paket auf dem Weg vom Sender zum Empfänger erfährt, ist unbestimmt. Der Guaranteed Service ermöglicht Dienstvereinbarungen mit definierter maximaler Queueing Delay für zeitkritische und gegenüber Verzögerung empfindlich reagierende Applikationen. Die Latenzzeit des Übertragungsweges durch Signallaufzeiten usw. muss hingegen separat bestimmt werden. [RFC2211, RFC2212]

Die Berücksichtigung einer „worst case“ Queueing Delay ist gegenüber der ITU-T Empfehlung I.362 hervorzuheben. Zudem sehen sowohl der Controlled Load Service als auch der Guaranteed Service die Möglichkeit einer Priorisierung einzelner Verkehrsklassen in einem belasteten Netz vor. Trotz dieser Konditionen ist davon abzusehen, die in in [RFC2211] und [RFC2212] definierten Service Klassen für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netzwerk zu übernehmen. Eine Unterteilung in lediglich 2 Klassen ist nicht ausreichend, um alle aktuellen und zukünftigen Dienste zu charakterisieren und die jeweils

optimalen Übertragungsparameter zur Verfügung zu stellen.

3.6.3 ATM Service Kategorien

Eine primäre Rolle eines Traffic Managements ist es, das Netz und die Endsysteme vor Überlastung (Congestion) zu schützen, um eine hohe Netzwerk-Performance zu erreichen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erhöhung der Effizienz bei der Nutzung der Netz-Ressourcen. Deshalb wurden durch das ATM-Forum 5 Service Kategorien spezifiziert, für die jeweils ein Satz an Parametern existiert, um sowohl den Traffic als auch das vom Netzwerk benötigte Quality of Service zu beschreiben (siehe Abbildung 3.2). Die ATM Service Kategorien der Traffic Management Specification des ATM-Forums weisen eine ähnliche Einteilung auf wie die Service Klassen nach ITU-T I.362, sind jedoch detaillierter. Aufbauend auf den ITU-T Empfehlungen I.150⁴³, I.356⁴⁴, und I.371-draft⁴⁵ sind einzelne Themen für die Traffic Management Specification erweitert worden. [AF-TM-0056.00]

Zu den Verkehrsparametern gehören die Peak Cell Rate (PCR), die Cell Delay Variation Tolerance (CDVT), die Sustainable Cell Rate (SCR), die Maximum Burst Size (MBS) und die Minimum Cell Rate (MCR). Die PCR gibt eine obere Grenze für die Datenrate an, die über eine ATM-Verbindung verschickt werden kann. Mit der SCR – oder Dauertransferrate – wird dagegen ein Grenzwert für die mittlere Rate über eine bestimmte Zeit definiert. Diese Zeitspanne ist relativ lang gegenüber der PCR. Die CDVT beschreibt die obere Grenze der CDV einer Verbindung, die durch das Cell Multiplexing hervorgerufen wird. Es ist darauf zu achten, dass die CDVT einen Verkehrsparameter darstellt, mit der CDV jedoch eine Einflussgröße des Quality of Service gemeint ist.

Die ATM Service Kategorien unterscheiden zwischen folgenden QoS Parametern: Peak-to-peak Cell Delay Variation (peak-to-peak CDV), Maximum Cell Transfer Delay (maxCTD) und Cell Loss Ratio (CLR). Beim Multiplex von Zellen einer oder mehrerer Verbindungen, tritt eine Verzögerung der Zellen einer gegebenen Verbindung ein, wenn Zellen einer anderen Verbindung in den Ausgang des Multiplexers eingefügt werden. Die dadurch verursachten verschiedenen Übertragungszeiten der Zellen werden durch die Cell Delay Variation beschrieben. Das „peak-to-peak“ bezieht sich auf die Differenz zwischen dem günstigsten und dem unvorteilhaftesten Fall der Cell Transfer Delay. Im besten

⁴³ITU-T RECOMMENDATION I.150: *B-ISDN asynchronous transfer mode functional characteristics*.

⁴⁴ITU-T RECOMMENDATION I.356: *B-ISDN ATM layer cell transfer performance*.

⁴⁵DRAFT ITU-T RECOMMENDATION I.371: *Traffic control and congestion control in B-ISDN*.

Parameter	CBR	rt-VBR	nrt-VBR	UBR	ABR
PCR and CDVT ^{a, b}	angegeben			angegeben ^c	angegeben ^c
SCR, MBS, CDVT ^{a, b}	–	angegeben		–	
MCR ^b	–				angegeben
peak-to-peak CDV	angegeben		nicht angegeben		
maxCTD	angegeben		nicht angegeben		
CLR ^b	angegeben			nicht ang.	^e
Feedback	nicht angegeben				angegeben

^aPCR und CDVT sind entweder explizit oder implizit für PVCs oder SVCs angegeben.

^bCDVT bezeichnet die Cell Delay Variation Tolerance. Diese wird nicht signalisiert. Die CDVT einer Verbindung hat keinen eindeutigen Wert. Die Werte können durch jedes Interface auf dem Übertragungspfad erzeugt werden.

^cUnterliegt nicht Connection Admission Control and Usage Parameter Control Prozessen.

^dStellt die maximale Datenrate dar, mit der eine ABR Quelle senden könnte. Die aktuelle Rate ist abhängig von den Kontrollinformationen.

^eQuellen, die ihren Zellfluss in Abhängigkeit von Kontrollinformationen einstellen, weisen eine geringe Cell Loss Ratio auf. Ob ein quantitativer Wert für die CLR angegeben wird, ist netzspezifisch.

Tabelle 3.2: Service Kategorien (nach [AF-TM-0056.00])

Falle entspricht die CTD der fixen Verzögerung der Übertragungsstrecke (hervorgerufen durch Laufzeiten usw.). Maximum Cell Transfer Delay bezeichnet die maximale Übertragungsverzögerung einer Zelle bestehend aus der fixen Verzögerung und der peak-to-peak CDV. Die Cell Loss Ratio einer Verbindung ist definiert als Quotient aus Anzahl der verlorenen Zellen zur Anzahl aller übertragener Zellen. Feedback Kontrollelemente sind definiert als Set von Funktionen des Netzes und der Endpunkte, um den Verkehr auf ATM Verbindungen entsprechend dem Status der Netzwerkelemente zu regulieren. [AF-TM-0056.00]

Die Traffic Management Specification definiert die ATM Service Kategorien Constant Bit Rate (CBR), Real-Time Variable Bit Rate (rt-VBR), Non-Real-Time Variable Bit Rate (nrt-VBR), Unspecified Bit Rate (UBR) und Available Bit Rate (ABR). Die Service Kategorien verbinden die Verkehrseigenschaften und deren QoS Anforderungen mit dem „Netzwerkverhalten“. Die Definition der Constant Bit Rate (CBR) Service Kategorie ist auf Verbindungen gerichtet, die eine fixe Bandbreite anfordern, die während der gesamten Verbindungszeit verfügbar ist. Diese Bandbreite wird durch die Peak Cell Rate (PCR) charakterisiert. Das Netz verpflichtet sich gegenüber dem Nutzer, der Ressourcen via CBR

reserviert, dass das ausgehandelte QoS für alle Zellen gewährleistet wird, wenn sich deren Parameter innerhalb des Verkehrsvertrages bewegen, d.h. die Datenrate die PCR nicht überschreitet. Der CBR Service ist bestimmt für die Unterstützung von Echtzeit-Anwendungen mit engen Grenzen bei der Varianz der Zellverzögerung (z.B. Sprachübermittlung, Circuit Emulation), jedoch nicht darauf beschränkt.

Die Real-Time Variable Bit Rate (rt-VBR) Service Kategorie wird von Applikationen genutzt, die ebenfalls engen Grenzen bei der Varianz und der Zelldelay für eine einwandfreie Funktion unterliegen. Dazu gehören Voice- und Videoanwendungen. rt-VBR Verbindungen werden durch die Peak Cell Rate, Sustainable Cell Rate und die Maximum Burst Size charakterisiert, d.h. die Bitrate ist nicht konstant. Sowohl für CBR als auch rt-VBR Dienste gilt, dass bei Zellen, deren Verzögerung größer ist als dem mit maxCTD spezifizierten Wert, die Qualität der betreffenden Applikation signifikant reduziert wird. Der Real-time VBR Service kann statistisches Multiplexing von Echtzeitquellen unterstützen. Die Service Kategorie Non-Real-Time Variable Bit Rate (nrt-VBR) charakterisiert nicht echtzeitfähige Anwendungen mit variabler Bitrate, d.h. es wechseln sich Burst- und Ruhephasen ab. PCR, SCR und MBS kennzeichnen nrt-VBR Verbindungen. Es werden keine Grenzen für die Zellverzögerung ausgehandelt. Anwendungen erwarten eine geringe CLR für Zellen, die innerhalb der Parameter des Verkehrsvertrages übertragen werden. Auch der Non-Real-time VBR Service kann statistisches Multiplexing von Echtzeitquellen unterstützen.

Der Unspecified Bit Rate (UBR) Service ist bestimmt für nicht echtzeitfähige Applikationen, d.h. für Anwendungen, die keine engen Grenzen bei der Varianz und der Zelldelay voraussetzen. Herkömmliche Datenkommunikationsdienste, wie E-Mail, FTP usw. sind als Beispiel für UBR-Anwendungen zu nennen. Mit UBR werden keine verkehrsbezogenen Servicegarantien spezifiziert. Weder für die CLR einer UBR Kommunikationsverbindung, noch für die CTD der Zellen dieser Verbindung wird ein numerischer Wert angegeben. Das Netz kann PCR für CAC oder UPC Funktionen verwenden. Wird darauf verzichtet, besitzt die Angabe der PCR rein informativen Wert. Congestion Control Mechanismen müssen durch höhere Schichten erbracht werden. UBR Dienste werden durch den Best Effort Indicator im ATM User Cell Rate Information Element angezeigt.

Mit Hilfe der Available Bit Rate (ABR) Service Kategorie kann ein schneller Zugang zu ungenutzter Bandbreite bis hin zur Peak Cell Rate realisiert werden, wann immer Ressourcen im Netzwerk verfügbar sind. Dazu können die Verkehrsparameter eines ATM-Links nach dem Verbindungsaufbau geändert werden. Der ABR-Service spezifiziert ein Flusskontrollmechanismus, mit dem mittels verschiedener Feedback-Meldungen die Quellrate

in Abhängigkeit sich ändernder ATM Übertragungseigenschaften gesteuert werden kann. Diese Rückmeldungen werden über spezielle Steuerzellen, den sogenannten Resource Management Cells oder RM-cells zur Quelle übermittelt. End-Systeme, die ihren Traffic entsprechend dem Feedback anpassen, weisen eine geringere Cell Loss Ratio auf und erhalten einen angemessenen Teil der Bandbreite gemäß einer Allokationsrichtlinie. Der ABR Service unterstützt jedoch keine Begrenzung der Delay oder Delay Variation und ist somit nicht für die Übertragung von Echtzeit-Applikationen geeignet. [AF-TM-0056.00] Durch die Ähnlichkeit der ATM Service Kategorien der Traffic Management Specification mit den Service Klassen nach ITU-T I.362 gelten die in Kapitel 3.6.1 genannten Kriterien für den Ausschluss als Service Klassen Schema für IP-basierte Access-Netze. Zudem sieht die Konzeption der ATM Service Kategorien nur eine reine Ausrichtung auf ATM-Netze⁴⁶ vor, so dass dessen Parameter den Charakter eines IP-basierten Access-Netzes nur ungenügend wiedergeben.

3.6.4 Service Klassen für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netz

Aus den vorangegangenen Abschnitten wurde deutlich, dass keine Dienstklassifizierung existiert, die die Ansprüchen eines reinen IP-Netzes gerecht wird. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein Klassifikationsschema entwickelt, das sich zwar an den bestehenden Klasseneinteilungen orientiert, jedoch die spezifischen Anforderungen IP-basierter Multiservice Access-Netze einbezieht. Hauptaugenmerk beim Entwurf der Service Klassen war die Zuordnung der Anwendungen zum benötigten Quality of Service. Durch die unterschiedlichen Übertragungsverhalten der einzelnen Dienste werden jeweils andere Ansprüche an das Netz gestellt. Dabei sollte jede Applikation nur das QoS Level erhalten, das es für eine einwandfreie Funktion benötigt. Damit soll die Komplexität des Netzes sowie die damit verbundenen Leistungsreserven und Kosten begrenzt werden. Für die Wahl eines bestimmten Quality of Service ist die Kenntnis des Zeitbezuges und des Verbindungstyps der Anwendung elementar. Der Zeitbezug legt fest, ob eine zeitkontinuierliche Übertragung der Daten gegeben ist. Es wird unterschieden zwischen:

- zeitkontinuierlich und delaysensitiv (Echtzeit)
- zeitkontinuierlich und delaytolerant
- nicht zeitkontinuierlich

⁴⁶Da ATM mit Zellen fixer Länge arbeitet, können Einflussgrößen wie CDV, PCR usw. nicht ohne weiteres in eine IP-Umgebung mit variabler Paketlänge übernommen werden.

Zeitkontinuierliche Dienste werden getrennt in interaktive Echtzeit-Anwendungen und nichtinteraktive Applikationen, wobei erstere durch engere Grenzwerte für die Verzögerung der Datagramme und der Delay Varianz gekennzeichnet sind.

Die in Kapitel 3.6.1 beschriebene Unterscheidung zwischen verbindungsorientierter und verbindungsloser Datenübertragung wird durch den Parameter Verbindungstyp charakterisiert. Die verbindungsorientierte Kommunikation ermöglicht eine ständige Kontrolle über die QoS Parameter während des Datentransports und wird hier als Unicast gekennzeichnet. Die verbindungslose und unidirektionale Kommunikation weist dagegen keinen Rückkanal zur Überwachung des Quality of Service auf. Dieser Verbindungstyp wird im Service-Klassen-Modell für IP-basierte Multiservice Access-Netze mit Multicast bezeichnet.

Die Bitrate ist in IP-Netzen kein Unterscheidungskriterium. Es wird davon ausgegangen, dass alle Dienste mit variabler Bitrate arbeiten. Die wenigen Dienste mit konstanter Bitrate werden den Applikationen mit variabler Bitrate zugeordnet (als Spezialfall mit Variabilität=0). Die Tabelle 3.3 zeigt die Service Klassen für ein IP-basiertes Access-Netz.

Parameter	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
Zeitbezug	zeitkontinuierlich und delaysensitiv (Echtzeit)		zeitkontinuierlich	nicht zeitkontinuierlich
Verbindung	Unicast	Multicast	Multicast	Unicast/Multicast
Beispiele	Sprachübertragung	Conferencing	Abrufdienste (MoD, VoD)/ Verteildienste (Multimedia-Rundfunk)	verbindungsorientierte Datenübertragung (Frame Relay)/verbindungslose Datenübertragung (LAN-Kopplung)

Tabelle 3.3: Service Klassen für ein IP-basiertes Access-Netz

Applikationen der Klasse A und B sind gekennzeichnet durch einen zeitkontinuierlichen Datenstrom und eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Delay und Delay Varianz. In diese Klasse lassen sich alle interaktiven Echtzeit-Anwendungen einordnen. Eine Unterscheidung erfolgt hinsichtlich des Verbindungstyps. Telefonie-Dienste erfolgen über einen P2P-Link, in dem die QoS-Parameter überwacht werden können. Konferenzanwendun-

gen besitzen eine MP2MP⁴⁷ Struktur, in der eine Kontrolle der Dienstgüte aufgrund des unidirektionalen Charakters nicht möglich ist. Beide Klassen benötigen daher verschiedene QoS Mechanismen, die an die jeweiligen Anforderungen angepasst sind (z.B. Klasse A: IntServ, Klasse B: DiffServ, siehe Kapitel 5.2).

Der Klasse C sind Applikationen zugeordnet, die einen zeitkontinuierlichen Datenstrom erzeugen, aber durch den fehlenden Interaktionskanal eine relativ hohe Unempfindlichkeit gegenüber Verzögerungen bzw. Varianzen in der Verzögerung aufweisen. Jitter kann am Empfänger durch einen Puffer ausgeglichen werden. Solche Anwendungen sind ausnahmslos Multicast-Verbindungen (z.B. Abruf- und Verteildienste). Die Klassen C und D im Service Klassen Modell nach ITU-T I.362 sind hier zu einer einzigen Klasse D zusammengefasst worden, da sie in Hinblick auf Quality of Service Anforderungen keine Differenzen besitzen. Anwendungen der Klasse D sind nicht zeitkontinuierlich und delay-tolerant. Hierzu zählen Applikationen wie Frame Relay (verbindungsorientiert) oder die LAN-Kopplung (verbindungslos).

Die vier Klassen stellen unterschiedliche Anforderungen an das Netz. Für die Klassen A-C muss das Netz eine Mindestbitrate (MPR) garantieren können. Das Kommunikationsnetz darf für die Klassen A und B eine maximale Übertragungsverzögerung (PTD) und Varianz (PDV) nicht überschreiten. Anwendungen der Klasse D stellen keine Anforderungen an die Dienstgüte (Best Effort).

Im Folgenden beziehen sich Kennzeichnungen für die Service-Klassen A-D auf das hier beschriebene Modell.

3.6.5 Anwendungen für das IP-basierte Access-Netz

Dieses Kapitel enthält einen Überblick über die Dienste und Anwendungen für ein IP-basierte Access-Netz und die Klassifizierung der Applikationen entsprechend den Service-Klassen. Ein Teil der vorgestellten Applikationen benötigt nicht zwingend einen Breitbandzugang. Diese Aufstellung soll lediglich ein Spektrum möglicher Dienste wiedergeben.

3.6.5.1 Dienste der Klasse A

Anwendungen in der Klasse A beschränken sich auf interaktive P2P-Verbindungen. Dazu zählen die Kopplung von TK-Anlagen und die Sprach- bzw. kombinierte Sprach-

⁴⁷Eine MP2MP-Konfiguration lässt sich auf mehrere P2MP-Verbindungen zurückführen.

/Bildübertragung über IP (VoIP/XoIP) als Ersatz für die Telefoniedienste des PSTN.

3.6.5.2 Dienste der Klasse B

Der Klasse B lassen sich interaktive P2MP Applikationen wie Audio- und Videokonferenzen, interaktive Spiele, TeleTeaching u.a. zuordnen. Die Nachfrage nach Audio- und Videokonferenzen verzeichnet in den letzten Monaten einen enormen Zuwachs, da sie einen wirtschaftlichen Vorteil (Zeitgewinn, geringere Kosten) gegenüber konventionellen Konferenzen (Kosten für Unterbringung und Anreise) besitzen. Die Möglichkeiten der Video-Konferenz-Lösungen reichen von einfachen Meetings über die gemeinsame Projektbearbeitung (inklusive der gemeinsamen Bearbeitung von Dokumenten) bis hin zu medizinischen Eingriffen.

TeleLearning/TeleTeaching ist ein Begriff für das verteilte Lernen/Lehren über große Entfernungen. Die Charakteristik ähnelt der von Konferenzlösungen. Interaktive Multiplayer-Spiele besitzen bezüglich der Delay höhere Anforderungen (< 50 ms) gegenüber Konferenzlösungen. Es existieren auch serverbasierte Varianten von Multiplayer-Spielen. Diese sind der Klasse A zuzurechnen, da eine bidirektionale Kommunikation zwischen Server und Teilnehmer stattfindet.

3.6.5.3 Dienste der Klasse C

In den Bereich der Abruf- und Verteildienste fallen Anwendungen wie Music on Demand (MoD), Video on Demand (VoD) sowie der Ersatz des herkömmlichen Rundfunks (Radio, Fernsehen) durch Streaming Audio/Video. Insbesondere die Anwendungen, die Musik, Filme, Nachrichten und sportliche oder kulturelle Ereignisse auf Anforderung verfügbar machen, erlauben die nutzerindividuelle Befriedigung der Bedürfnisse.

3.6.5.4 Dienste der Klasse D

Die breitbandigen IP-basierten Access-Netze ermöglichen neben den klassischen schmalbandigen Internet-Anwendungen (z.B. E-Mail) die Verwendung einer Reihe weiterer Dienste. Dazu zählen die Anbindung entfernter LANs (LAN-Kopplung) über VPNs, der Zugang zu bandbreitenintensiven Internet-Anwendungen (z.B. häufiger Download großer Dateien von FTP-Servern) oder das Web-Hosting.

Mit dem wachsenden Trend zur Dezentralisierung⁴⁸ gewinnt eine weitere Applikation an

⁴⁸Dezentralisierte Geschäftsstellen verringern die Sicherheitsrisiken, da eine Zentralisierung von Funk-

Bedeutung: TeleWorking. Laut einer Studie der International Telework Association and Council waren in den USA im Jahr 2001 rund 23,6 Mio. Tele-Arbeiter beschäftigt. Diese Zahl soll jährlich um 10 % wachsen, begünstigt durch eine neue Gesetzgebung in den USA und den Schritt zur Dezentralisierung. TeleWorking beinhaltet neben dem Fern-Zugriff auf Informationen aus dem Intranet eines Unternehmens auch die Sprachkommunikation mit weiteren TeleWorkern oder Angestellten. Dieser Anwendungsbereich ist in der Klasse A angesiedelt.

3.6.5.5 Einordnung der Anwendungen

Die Tabelle 3.4 zeigt eine Übersicht der in Kapitel 3.6.5 vorgestellten Anwendungen und ihrer Parameter. [DHR96, LMC⁺00]

Für eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit einer Access-Technologie bzw. ihrer Eignung für die Anbindung eines Haushaltes oder SOHO-Filiale sind die QoS-Parameter *MPR*, *PTD*, *PDV* der Dienste heranzuziehen. Die Minimum Packet Rate (MPR) gibt die Bitrate an, die das Access-Netz mindestens zur Verfügung stellen muss, um den Dienst übertragen zu können. Mit den Größen Packet Transfer Delay (PTD) und Packet Delay Variation (PDV) werden die maximal erlaubte Verzögerung für die Übertragung der Pakete und der Varianz der Delay angegeben.

Neben der Einschätzung für einen Nutzer ist eine Betrachtung für eine Mehr-Nutzer-Umgebung vorteilhaft. In einem Haushalt können neben ein oder mehreren Videoströme gleichzeitig andere Anwendungen das Access-Netz beanspruchen, so dass die Bandbreite des Zugangs-Netzes entsprechend hoch dimensioniert werden sollte (siehe Kapitel 4.1.2).

tionen eine Konzentrierung von Fehlerquellen bedeutet. Eine Dezentralisierung kann zudem Kostenvorteile und angenehmere Arbeitsbedingungen für die Angestellten bedeuten.

Dienst	Klasse	QoS-Parameter und Richtwerte		
		MPR Mbit/s	PTD ms	PDV ms
Remote Control/ Fernwirktechnik	A	< 0,064	< 50	< 1
TK-Anlagen-Kopplung	A	2,048	< 150	< 1
VoIP (Telefonie)	A	0,006-0,032	< 150	< 1
XoIP (Bild-Telefonie)	A	0,144-1,920	< 150	< 1
Interaktive Spiele	B	< 1	< 50	< 1
TeleTeaching	B	< 2	< 150	< 1
Videokonferenzen	B	0,256-2,048	< 150	< 1
TV-Ersatz (MPEG2/HDTV)	C	6/20	< 1 000	< 250
MoD	C	< 384	< 10 000	< 1 000
VoD	C	2-8	< 10 000	< 1 000
ASP	D	> 10	–	–
Internetzugang (HTTP, FTP usw.)	D	< 2	–	–
LAN-Kopplung/VPN	D	> 10	–	–
TeleWorking	D	> 2	–	–
Web Hosting	D	> 10	–	–

Tabelle 3.4: Einordnung der Anwendungen in das Service Modell für IP-basierte Kommunikationsnetze

Kapitel 4

Evaluierung der Zugangstechniken

4.1 Einführung

Dieses Kapitel soll eine Übersicht zu heute verfügbaren und zukünftigen Access-Netzen liefern. Insbesondere deren Eignung als Übertragungsmedium für IP-basierte Multiservice Anwendungen soll betrachtet werden. Eine Abschätzung der Marktdurchdringung bis zum Jahr 2010 ergänzt die Darstellung der jeweiligen Technologien.

Eine Evaluierung der Zugangstechniken hat unter Berücksichtigung des betreffenden Einsatzgebietes zu erfolgen. Es wird kein Access-Netz geben, das alle Szenarien und Situationen bei der Nutzung von Breitbandangeboten bedienen kann. So hat z.B. ein mobiler Anwender meist kein Zugriff auf Festnetze und ist daher auf leistungsfähige, drahtlose Übertragungsmöglichkeiten angewiesen. Stationäre Nutzer profitieren von einem funk-basierten Zugang dagegen nur, wenn keine Möglichkeit zur Vernetzung und dem damit verbundenen Verlegen von Kabeln besteht oder dies aus anderweitigen Gründen abgelehnt wird.

Für viele Menschen wird mobile Kommunikation immer wichtiger. Mittlerweile existieren in Deutschland und anderen Ländern Europas mehr Mobilfunk- als Festnetzanschlüsse. Die damit verbundenen hohen Zuwachsraten sollen in den nächsten Jahren anhalten. Mobilfunkgeräte sind heute in der Lage einfache Informationsdienste im Internet zu nutzen. Durch Einführung von Techniken wie GPRS und UMTS erhalten mobile Terminals die Fähigkeit multimediale Datendienste in hoher Qualität zu transportieren. Es muss jedoch beachtet werden, dass das zur Verfügung stehende Funkspektrum limitiert ist und Kapazitätssteigerungen der mobilen Infrastrukturnur in begrenzten Umfang möglich sind. Festnetze werden immer über wesentlich mehr Bandbreite verfügen können als Mobilfunknetze.

Die Nutzer von Online-Angeboten verbringen den Großteil der Zeit in der Nähe eines Festnetzanschlusses (z.B. im Büro oder zu Hause). Aus diesen Gründen werden weiter-

hin fast alle Breitband-Inhalte in Festnetzen vorgehalten. Diese Arbeit fokussiert daher den Bereich der Access-Netze für stationäre Anwender. Aufgrund der Komplexität und des Umfangs des Themas¹ wird hier auf Zugangs-Netze für mobile Teilnehmer nicht näher eingegangen.

Im Backbone-Bereich wird als Übertragungsmedium fast ausschließlich Glasfaser verwendet. Im Zugangsbereich herrscht dagegen eine große Vielfalt an Übertragungstechniken und -medien. Diese Heterogenität wird begründet aus der historischen Entwicklung und dem ursprünglichen Verwendungszweck einer Technologie sowie durch die unterschiedlichen räumlichen Charakteristika (z.B. Ballungsräume und ländliche Gebiete).

4.1.1 Technik der heutigen Access-Netze

Das öffentliche Fernsprechnet (Public Switched Telephone Network) war bis vor wenigen Jahren das einzige Access-Netz für private Haushalte, das einen Zugang zum Internet ermöglichte. Es dominiert daher noch heute den Markt der Zugangssysteme. Eine Studie^{2,3} des Marktforschungsunternehmens NetValue von August 2001 zeigt, dass 92 % (53 % POTS und 39 % ISDN) der deutschen Haushalte über einen schmalbandigen Access in das Internet gelangen.

Das PSTN ist ein System verbindungs- und leitungsorientierter Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Leitungsorientierte Systeme sind durch geringe Verzögerungen und fehlende Bandweitenengpässe gekennzeichnet, da jeder Verbindung ein dedizierter Sprachkanal zur Verfügung steht. Aufgrund der ursprünglichen, einseitigen Ausrichtung auf die Sprachübermittlung und der daraus resultierenden Inflexibilität ist es jedoch nicht möglich andere Verkehrstypen effizient zu transportieren.

Paketorientierte Netze ermöglichen es, die Bandbreite eines Mediums effektiver auszunutzen. Die Konvergenz von Sprach- und Datenkommunikation (VoIP) führt zu einer weiteren Steigerung der Wirtschaftlichkeit. In den letzten Jahren erfolgte daher ein Wandel vom leitungsvermittelnden Sprachnetz zum paketvermittelnden Sprach-/ Datennetz. Der simultane Transport von isochronen (Sprache, Video) und asynchronen Inhalten in paketvermittelnden Netzen erfordert eine Priorisierung der synchronen Daten (Quality of

¹Hierzu zählen eigene Access Technologien, Merkmale des Mobile IP und die Besonderheiten bei der Realisierung eines QoS in mobilen Netzen.

²BLEICH, HOLGER: *Zahl der Surfer mit Breitbandanschluss wächst schnell*. heise online.
<http://www.heise.de/newsticker/data/hob-19.09.01-000/>

³ DELBROUCK, DIRK : *Studie: Immer mehr Breitbandanschlüsse*. ZDNet Deutschland News
<http://news.zdnet.de/story/0,,t101-s2095595,00.html>

Service, siehe Kapitel 5) bei der Übertragung.

Mit maximalen Bitraten von 56 kbit/s (POTS) bzw. 128 kbit/s (ISDN mit Kanalbündelung) und der starren leitungsvermittelnden Technik ist das Schmalband-PSTN nicht den Anforderungen eines konvergierenden⁴ Multiservice Access-Netzes gewachsen.

4.1.2 Abschätzung des Bandbreitenbedarfs in zukünftigen Access-Netzen

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Access-Technologien bedarf es einer Einschätzung der zu erwartenden Bandbreiten, die von zukünftigen Online-Angeboten benötigt werden. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Studien zur zukünftigen Nutzung von multimedialen Diensten und der Parameter dieser Angebote (siehe Kapitel 3.6.5) können die folgenden Aussagen zum Bandbreitenbedarf getroffen werden: Für die Betrachtung wird von einem fiktiven zukünftigen privaten Haushalt ausgegangen. Der Haushalt verfügt über 3 HDTV-Fernsehgeräte. Ein MPEG2-kodierter HDTV-Stream benötigt 20 Mbit/s Bandbreite. Die weitere Ausstattung umfasst 2 Radios (digitaler Mehrkanalton: jeweils 384 kbit/s), eine Spielkonsole sowie zwei PCs. Unter der Annahme, dass in der Zukunft Software (Application Service Providing – ASP) oder Inhalte (Online-Spiele) im Netz vorgehalten werden, ist ein Durchsatz von mehr als 10 Mbit/s pro Gerät als realistisch einzustufen. Weitere Geräte und Anlagen (z.B. Telefon, Fernwirktechnik) beanspruchen das Zugangs-Netz (\ll 1 Mbit/s) nur wenig. Für die Übertragung eines umfassenden Dienstespektrums werden demzufolge pro Haushalt 100 Mbit/s benötigt, die durch das Access-Netz zur Verfügung gestellt werden müssen.

Im Bereich der SOHO dient ein Betrieb mit 10 angeschlossenen PCs als Referenz. Die Wiedergabe von multimedialen Inhalten spielt hier eine untergeordnete Rolle. ASP-Dienste (> 10 Mbit/s), das Anbieten eigener Inhalte (> 10 Mbit/s im Up- und Downstream) und Videokonferenzen (2 Mbit/s) bedingen ein Access-Netz, welches eine minimale Summen-Bandbreite (Up- und Downstream) von 100 Mbit/s aufweist.

Der Bedarf eines Haushaltes oder Teilnehmers muss sich am „worst case“ Szenario⁵ orientieren, da eine Technik nicht angenommen wird, wenn sie eine Einschränkung gegenüber existierenden Technologien bedeuten würde.

Die Bereitstellung von qualitativ hochwertigen multimedialen Diensten mit seinen großen Datenmengen erfordert die Aufrüstung der bestehenden Access-Netze. Nur FTTH-

⁴Die Konvergenz bezieht sich sowohl auf das Übertragungsmedium als auch die Dienstintegration.

⁵D.h., alle aufgezählten Geräte sind gleichzeitig in Betrieb.

Zugangsnetze (siehe Kapitel 4.4.3) können die genannten Anforderungen erfüllen. FTTH stellt das einzige Access-System dar, das Bandbreiten oberhalb 100 Mbit/s an eine Vielzahl von Teilnehmern liefern kann. Das Medium Glasfaser lässt sich zudem bis in den Terabit-Bereich skalieren.

Da die Access-Netze den größten Kostenfaktor in Kommunikationsnetzen darstellen und die Nachfrage nach Breitbandangeboten nicht völlig bestimmt ist, ist der flächendeckende Einsatz von Glasfasern bis zum Teilnehmer (FTTH) innerhalb eines Zeitraumes bis 2010 unwahrscheinlich. Die nächsten Jahre werden durch den schrittweisen Ausbau der Glasfaser-Netze geprägt sein. Diese Migration vom schmalbandigen PSTN-Anschluss zum breitbandigen Access per FTTH kann anhand von drei Migrationsphasen beschrieben werden. [BS01, Gil01]

4.2 Migration vom PSTN-Anschluss zum Breitbandzugang: 1. Phase

Die erste Migrationsphase ist durch den Einsatz existierender physikalischer Übertragungsmedien unter Verwendung neuer Übertragungstechnologien gekennzeichnet. So kann z.B. durch DSL die Bandbreite der Teilnehmeranschlussleitung des PSTN auf bis zu 52 Mbit/s gesteigert werden. Die Leistungsfähigkeit der Techniken wird stark durch die Parameter der verwendeten Medien und ihren ursprünglichen Einsatzzweck beeinflusst. [Gil01]

4.2.1 Digital Subscriber Line Technologien (xDSL)

Digital Subscriber Line (Digitale Teilnehmeranschlussleitung) ist eine Oberbegriff für Übertragungstechnologien, bei denen die Verbindung zwischen Vermittlungsstelle und Teilnehmer komplett digitalisiert ist⁶. Durch Nutzung der zweiadrigen Kupfer-Teilnehmeranschlussleitung (Cu-TAL) des PSTN kann das Verlegen neuer Anschlüsse für einen Breitbandzugang vermieden werden.

In den herkömmlichen POTS-Netzen wird aufgrund dessen ursprünglicher Ausrichtung auf die Sprachübermittlung nur ein Frequenzbereich bis 3,4 kHz genutzt. Somit lassen sich maximal 56 kbit/s per Modem übertragen. Die Digitalisierung der TAL ging einher mit

⁶Strenggenommen ist deswegen bereits ISDN zu den DSL-Techniken zu zählen.

der Erweiterung des Frequenzspektrums. Euro-ISDN (4B3T-Kodierung) nutzt Frequenzen bis 120 kHz und ermöglicht so eine Datenrate von 128 kbit/s bei Gebrauch beider Basiskanäle. DSL arbeitet in weit höheren Frequenzbändern (z.B. ADSL bis 1104 kHz) und erreicht so eine drastische Steigerung der Kapazität einer Teilnehmeranschlussleitung durch vielfach höhere Übertragungsraten.

Da POTS/ISDN und DSL je nach Standard in verschiedenen Frequenzbereichen arbeiten, ist die Koexistenz auf einer TAL möglich. Der Bereich zwischen 0 und 3,4 kHz – beziehungsweise 120 kHz bei ISDN – wird dann für den normalen Telefonbetrieb freigehalten. Ein POTS- bzw. ISDN-Splitter sorgt als Filter für die Trennung zwischen dem Sprachband und dem Bereich für die Datenübertragung. An Splitter werden eine Reihe weiterer Anforderungen gestellt. Einerseits müssen sie Geräte auf der POTS/ ISDN Seite vor hohen Energiepegeln der höheren Frequenzbänder schützen, in denen die DSL-Signale übertragen werden. Andererseits ist eine Absicherung der DSL-Seite gegenüber Transienten nötig, die bei der Signalisierung (Wähltöne, Klingeln usw.) entstehen. Zudem können beim Wechsel zwischen Betriebsmodi eines Telefons (ein- und ausgehängt) starke Impedanzschwankungen auftreten, die nicht auf die DSL-Seite rückwirken dürfen. [Coo01]

Die Kupferdoppelader weist eine Variabilität der Übertragungscharakteristika auf und stellt somit einen nicht idealen Übertragungskanal dar. Die schmalbandige Sprachübermittlung wird dadurch kaum beeinflusst. Die hohen Frequenzanteile der DSL-Signale unterliegen einer stärkeren Dämpfung. Zudem treten Interferenzen durch Nebensprecheffekte⁷ zwischen den einzelnen Adern eines Kabelbündels auf. Durch die Dämpfung und das Übersprechverhalten werden die Reichweite und die Anzahl möglicher DSL-Anschlüsse an einem Kabelstrang bei einer gegebenen Bandbreite entsprechend dem Shannon-Theorem⁸ begrenzt. Mit intelligenten Kodierverfahren und einer Fehlerkorrektur kann das Verhalten teilweise kompensiert werden. Zudem besitzt jede TAL eine andere Länge. Daher ist unter Umständen ein Messvorgang erforderlich, um die maximale Datenrate, die die Leitung unterstützt, bestimmen zu können.

Generell sind die realisierbaren Entfernungen bzw. die maximalen Leitungslängen zwischen Vermittlungsstelle und dem Anschluss beim Anwender umso kürzer, je höher die

⁷Die elektromagnetische Abstrahlung der ungeschirmten Doppeladern wird in benachbarte TAL eingekoppelt und überlagert sich mit deren Nutzsignal.

⁸DSL ist wie jedes andere Übertragungssystem an das Shannon-Theorem gebunden, welches die maximale Übermittlungskapazität einer Leitung für eine gegebene spektrale Bandbreite und Signal-Rausch-Verhältnis angibt.

Bitrate auf der Strecke ist. Um garantierte Aussagen zur DSL-Tauglichkeit einer Kupferdoppelader treffen zu können, wird der „worst case“⁹ einer durch Übersprechen gestörten Umgebung angenommen. Für diese Annahme kann bei gegebener Übertragungsbandbreite die korrespondierende maximale Länge der Leitung bestimmt werden. Bei steigendem Bandbreitenbedarf verringert sich mit der Reichweite die Zahl der Teilnehmer, die mit DSL versorgt werden können. Ein flächendeckendes Leitungsnetz wie das Telefonnetz lässt sich aus diesem Grund nicht ohne weiteres auf DSL umrüsten. Die Nutzung der DSL-Technologie ist in nur etwa 80 % der deutschen Cu-TAL möglich. [BS01, EBKY00] Mit der regulatorischen Entscheidung einiger Länder (inklusive Deutschland) zur Entbündelung der Teilnehmeranschlussleitung wird ein weiteres Problem aufgeworfen. Durch die Entbündelung können Fremdanbieter auf den Leitungen der Monopolisten DSL-Zugänge anbieten. Ist die spektrale Kompatibilität zwischen den verschiedenen Techniken nicht gegeben, können durch Übersprechen Interferenzen in benachbarten Adern verursacht werden. Bisher konnte die ungestörte Übertragung bei alleiniger Nutzung durch einen Anbieter leicht sichergestellt werden. Mit dem Aufkommen von entbündelten Zugängen sind nun Absprachen zwischen den Diensteanbietern erforderlich, die die spektrale „Verschmutzung“ verhindern und damit den sicheren Betrieb verschiedener Übertragungssysteme in den selben Frequenzbereichen gewährleisten. Sind die Leitungen nicht erdverlegt, sind zudem die Vorgaben von Rundfunk, Amateurfunk und kommerzielle Funkdiensten zu beachten. [EBKY00]

DSL besitzt gegenüber anderen Breitbandzugangstechniken einen großen Vorteil. Da jede einzelne Kupferdoppelader eine Punkt-zu-Punkt Verbindung zwischen Anwender und einem Access Multiplexer darstellt, steht die angegebene Bandbreite eines DSL-Anschlusses dem Teilnehmer dediziert zur Verfügung. Ein Service Provider kann somit die Performance und einen sicheren Zugang garantieren. Bei anderen Technologien wie CATV, PLC oder WLAN (siehe folgende Kapitel) müssen sich mehrere Nutzer die angezeigte Bandbreite teilen.

In der Vermittlungsstelle wird der DSL-Verkehr verschiedener Teilnehmer in einem so

⁹Hier besteht jedoch ein Interpretationsspielraum. Der „worst case“ kann einerseits bedeuten, dass alle Cu-TAL im Kabelbündel zur Übertragung verschiedener xDSL-Techniken eingesetzt werden. Dieser eher unwahrscheinliche Fall führt zu den geringsten Leitungslängen bei gegebener Bitrate. Um Teilnehmer mit längeren Leitungswegen erreichen zu können, wird stattdessen von einigen Betreibern die Stärke des Übersprechens festgelegt (=„worst case“) und somit die Anzahl von DSL-TAL im Kabelbündel begrenzt. In diesem Fall können bei Erreichen einer bestimmten Teilnehmerzahl keine weiteren Anschlüsse mehr angeschaltet werden.

genannten DSL Access Multiplexer (DSLAM) zusammengefasst und zum Provider oder einem anderweitigem Datennetz weitergeleitet. Im Gegensatz zum ebenfalls digitalen ISDN, handelt es sich bei DSL nicht um ein „public switched telephone network“, sondern bietet „always on“ Funktionalität, d.h. der Kontakt zwischen Anwender und DSL-Multiplexer ist als permanente Punkt-zu-Punkt Verbindung ausgelegt.

Mit xDSL entstand ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von DSL-Techniken, die für verschiedene Einsatzgebiete optimiert sind und sich hinsichtlich ihrer Parameter wie z.B. Bandbreite, maximalen Leitungslänge zur Vermittlungsstelle usw. unterscheiden. Ein weiteres Merkmal ist das Verhältnis der Bandbreite im Up- und Downstream. Asymmetrische DSL-Techniken (z.B. ADSL) sind prädestiniert für den Internetzugang und Anwendungen wie Video-on-Demand, bei der hohe Downloadraten erwünscht, geringe Upload-Geschwindigkeiten jedoch akzeptiert werden. Die symmetrischen Varianten (SDSL, HDSL usw.) sind für Applikationen konzipiert, die eine hohe Geschwindigkeit in beiden Richtungen benötigen (z.B. LAN-Kopplung). Eine Übersicht über die Parameter der xDSL-Varianten gibt die Tabelle 4.1. Die Spalte *Bandbreite* gibt die maximal vorgesehene Datenrate wieder. Im Feld *Reichweite* kann der Bereich¹⁰ der maximalen Leitungslänge entnommen werden. Beide Werte sind für eine gegebene Teilnehmeranschlussleitung abhängig von der Dämpfung und der Anzahl anderer Breitbandanschlüsse im selben Kabelstrang. Nur über Messungen an der TAL kann die maximale Datenrate für einen Anschluss bestimmt werden. Für einen Vergleich der Leistungsfähigkeit von DSL-Systemen bietet sich das *Summenbandbreite-/Längenprodukt* bezogen auf eine Doppelader an.

Ein Teil der in der Tabelle 4.1 aufgeführten xDSL-Technologien (IDSL, MDSL) ist proprietär, da sie nur durch einzelne Hersteller entwickelt und unterstützt werden. ISDN DSL (IDSL) ist ein von Ascend eingeführtes System, um den Datenverkehr von den digitalen Vermittlungen fern zu halten. Im Vergleich zu anderen DSL-Varianten fällt die geringe Bitraten von 144 kbit/s¹¹ (symmetrisch) auf. Dafür ist die maximale Leitungslänge zwischen Nutzer und DSL-Gegenstelle mit 8 km sehr hoch. Durch den Einsatz von ISDN Leitungsgeneratoren lässt sie sich auf 30 km steigern. Analoge Geräte (POTS) werden von IDSL nicht unterstützt, da die Signale nicht durch das PSTN geleitet werden. IDSL Kunden können wegen der Verwendung des gleichen Leitungscodes (2B1Q)¹² ihre ISDN

¹⁰Minimum: maximale Datenrate – Maximum: minimale Datenrate bei Systemen mit variabler Bandbreite

¹¹IDSL benutzt den 16 kbit/s D-Kanal ebenfalls zur Datenübertragung und erzielt somit gegenüber ISDN eine höhere Bitrate.

¹²2B1Q ist ein in den USA vorherrschender ISDN-Leitungscode. In Deutschland wird stattdessen der

Technologie	Bitraten (max.)		Reich- weite km	Bandbr.-/ Läng.prđ. Mbit/s × km	Frequenz- bereich kHz	POTS/ISDN Koexistenz
	upstr. Mbit/s	downstr. Mbit/s				
ADSL	0,64	6,144	1,8 – 5,5	12,2112	1 104	√ / √
G.Lite	0,512	1,5			500	√ / –
HDSL (ETSI)	2,048	2,048	2 – 4	8,192	196 (1 CuDA) 292 (2 CuDA) 485 (3 CuDA)	– / –
HDSL2 (ANSI)	1,544	1,544	2,8	8,6464	260	– / –
IDSL	0,144	0,144	8	2,304		– / √
MDSL	0,2	2				√ / √
SDSL (ETSI)	2,32	2,32	3 – 4,5	13,92	387	√ / √
VDSL (asym.)	6,4	52	0,3 – 1,5	17,52	12 000	√ / √
VDSL (sym.)	26	26		15,6		

Tabelle 4.1: Übersicht der xDSL-Technologien

Geräte weiter betreiben. Medium Bitrate Digital Subscriber Line (MDSL) bezeichnet eine von ADSL abstammende Technik, die mit geringeren Leitungsgeschwindigkeiten arbeitet, um die Kosten und Komplexität der ADSL-Geräte zu verringern. MDSL zielt auf die gleichen Anwendungsgebiete wie ADSL, ist jedoch nicht standardisiert.

High Bit Rate DSL (HDSL) ist ein symmetrisches Verfahren und stellt damit in beiden Übertragungsrichtungen die selbe Geschwindigkeit zur Verfügung. HDSL wurde konzipiert, um kostengünstig T1 oder E1 Verbindungen (1,544 respektive 2,048 Mbit/s) über existierende TP-Verkabelung zu ermöglichen. Diese Technik wird daher vor allem von Netzbetreibern oder Providern eingesetzt, um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, die Vernetzung von Telefonanlagen oder die Kopplung von lokalen Datennetzen an ein WAN zu realisieren. 1992 wurde HDSL vom ANSI verabschiedet. Der Standard sieht eine Übertragungsrate von 1,544 Mbit/s unter Einsatz von 2 Doppeladern vor. Die europäische Variante des HDSL (ETSI TS 101 135¹³) wurde 1993 vom European Telecommunications Standards Institute (ETSI) beschlossen. Die Datenrate wurde gegenüber ANSI HDSL

4B3T Code eingesetzt.

¹³ETSI TS 101 135 V1.4.1: *Transmission and Multiplexing (TM); High bitrate Digital Subscriber Line (HDSL) transmission system on metallic local lines; HDSL core specification and applications for 2 048 kbit/s based access digital sections.*

auf 2,048 MBit/s (E1) erhöht. Sie lässt sich zudem auf bis zu 3 Doppeladern verteilen, um die Reichweite auf bis zu 4 km zu erhöhen. HDSL passt sich automatisch an den Übertragungskanal an.

HDSL2 ist eine Weiterentwicklung des ANSI HDSL. Die Normung erfolgte 1998. HDSL2 weist ebenfalls eine Bitrate von 1,544 Mbit/s auf, benötigt jedoch nur ein Kabelpaar bei gleichzeitig verringerter Reichweite. Das Einsatzgebiet gleicht dem von HDSL. Der gleichzeitige Einsatz verschiedener Übertragungsverfahren, die teilweise in den selben Frequenzbereichen arbeiten, führt in einem Kabelbündel mitunter zu Störungen. Im Standard HDSL2 wurden daher zwei Verfahren festgeschrieben, um die spektrale Kompatibilität von HDSL2 zu anderen DSL-Varianten zu gewährleisten. Mittels Overlapped PAM Transmission with Interlocking Spectra (OPTIS) kann die Sendeleistung in den betroffenen Frequenzbereichen selektiv abgesenkt werden. Über das Power-cut-back-Verfahren kann auf Leitungen mit einem sehr hohen Signal-/Rauschabstand die Sendeleistung auf dem ganzen Sendespektrum automatisch verringert werden, wodurch die Abstrahlung und damit die Störung benachbarter TAL minimiert wird.

Um DSL zu einem raschen Markterfolg werden zu lassen, wurde durch die Universal ADSL Working Group (UAWG)¹⁴, einer Gruppe aus Firmen aus dem Bereich der Telekommunikation und der Informationsverarbeitung, ein Standard erarbeitet, der geringe Installations- und Gerätekosten sowie die Unterstützung aller wichtigen Unternehmen versprach. Ursprünglich unter dem Namen Universal ADSL (U-ADSL, auch UDSL) firmierend, ist der Standard nun als G.Lite bekannt. Inzwischen liegt G.Lite bei der ITU-T als Entwurf G.992.2 („Splitterless Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers“) vor. Die Verabschiedung als Standard steht noch aus. Bei G.Lite handelt es sich im Wesentlichen um eine reduzierte Version des ADSL. G.Lite verzichtet auf Splitter und ermöglicht daher neben einer einfachen und schnellen Installation preiswerte DSL-Modems. Der Frequenzbereich wurde einerseits beschränkt und ermöglicht nur eine Übertragungsgeschwindigkeit von 0,512/1,5 Mbit/s im Up-/Downstream. Andererseits liegt die untere Grenzfrequenz bei 30 kHz und verhindert so eine Koexistenz mit ISDN. Aufgrund der Dominanz von ISDN kann davon ausgegangen werden, dass G.Lite in Deutschland keine große Marktbedeutung erlangen wird. [G.995.1]

Bis Ende 2001 sind über 2 Millionen ADSL- und SDSL-Anschlüsse durch die DT AG und ihre Mitbewerber bereitgestellt worden. Mittelfristig ist mit einem nahezu flächendeckenden Angebot zu rechnen. Zusammen mit CATV wird DSL die größte Marktbedeutung bei

¹⁴Der UAWG gehören Branchengrößen wie Microsoft, Intel und die Deutsche Telekom AG an.

breitbandigen Zugangsnetzen erlangen. Gartner/Dataquest¹⁵ geht von jährlichen Steigerungsraten um durchschnittlich 90 % zwischen 2000 bis 2004 auf dem DSL-Markt aus. In einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wird von 2000 bis 2010 eine Compound Annual Growth Rate (CAGR) von 52,2 % erwartet. Die prognostizierte Zahl der Anschlüsse soll im Jahr 2010 bei 20 000 000 liegen. [BS01, Dör02]

Die 3 für den europäischen Raum wichtigsten DSL-Varianten werden im Folgenden dargestellt.

4.2.1.1 Asymmetric DSL (ADSL)

Bei Betrachtung bandbreitenintensiver Anwendungen fällt auf, dass sie im wesentlichen asymmetrische Verbindungen herstellen. So empfängt beispielsweise ein Anwender einen Film oder Multimediainhalte aus dem Internet. Demgegenüber werden nur geringe Datenmengen für die Anforderung solcher Inhalte, zur Navigation oder Steuerungsinformationen übermittelt. Daher werden statt relativ teurer symmetrischer Breitbandverbindungen asymmetrische eingesetzt, weil die verfügbare Bandbreite effektiver ausgenutzt wird. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) ist ein solches asymmetrisches Übertragungssystem. Die geplante Einsatzumgebung und die damit verbundenen Anforderungen führten bei der Konzeption zu einem Asymmetrieverhältnis von ungefähr 10:1 (Down- zu Upstream). ADSL wird i.A. durch seine hohe Verbreitung mit DSL gleichgesetzt.

Ein weiterer Vorteil asymmetrischer Verfahren liegt in der höheren erzielbaren Bandbreite. Bei der simultanen Übertragung symmetrische Signale über mehrere benachbarte Leitungen, wird durch Signaleinkopplungen aufgrund von Übersprechen die Übertragungsgeschwindigkeit und die Signalreichweite deutlich begrenzt. Bei der asymmetrischen Übertragung kann dieser Effekt deutlich reduziert werden, wodurch sich höhere Datenrate erreichen lassen.

Demgegenüber existieren Dienste wie Videoconferencing und LAN-Kopplung, für die eine asymmetrische Übermittlung nicht in Frage kommt. Symmetrische Übertragungsverfahren wie SDSL (optimiert für hohe Datenraten bei mittlerer Leitungslänge, siehe Kapitel 4.2.1.2) und IDSL (optimiert für hohe Leitungslänge) sind die hierfür geeigneteren Systeme.

¹⁵<http://www.tomshardware.de/news/news-20020129.html#1652>

ADSL Standards

ADSL wurde 1995 vom ANSI als Standard T1.413 (Issue 1) verabschiedet. Für den Downstream sind 4 Kanäle à 1,544 MBit/s vorgesehen. Die POTS-Funktionalität ist am ADSL-Anschluss durch einen Splitter weiterhin gegeben. 1996 folgte die europäische Variante ETSI ADSL (ETSI [TS 101 388]). Im Downstream stehen hier 3 Servicekanäle à 2,048 MBit/s zur Verfügung. Ursprünglich war ebenfalls nur eine POTS-Koexistenz vorgesehen, die Integration von ISDN wurde später in den Standard aufgenommen. 1998 wurde durch das ANSI die T1.413¹⁶ (Issue 2) Spezifikation vorgestellt. Die International Telecommunications Union veröffentlichte schließlich 1999 die weltweit gültigen Empfehlungen G.992.1 (ADSL mit POTS/ISDN) [G.992.1] und G.992.2 (G.Lite, splitterloses ADSL).

ADSL im Detail

Der Hauptvorteil von xDSL gegenüber anderen Übertragungsverfahren ist die Nutzung der vorhandenen Teilnehmeranschlussleitung. Damit für den Parallelbetrieb alter POTS- oder ISDN-Geräte keine zusätzliche Doppelader zum Anwender gelegt werden muss, sind Mechanismen nötig, die Leitung zwischen den Diensten zu teilen. ADSL erreicht dies durch die Trennung der Frequenzspektren. Während ISDN im Bereich zwischen 0 und 120 kHz (POTS 0 bis 3,4 kHz) arbeitet, ist für den ADSL Upstream das Frequenzband zwischen 138¹⁷ und 276 kHz vorgesehen. Die Grenzfrequenzen des ADSL Downstream sind 276 bzw. 1104 kHz (siehe Abbildung 4.1). Die Zuordnung der Signale von POTS/ISDN und ADSL erfolgt durch einen Splitter.

Für ADSL sind zwei Modulationsverfahren verfügbar. Carrierless Amplitude/Phase Modulation (CAP) ist ein Ein-Träger-System, bei dem das Trägersignal unterdrückt wird. Die beiden Frequenzbänder (up-,downstream) werden getrennt moduliert. Demgegenüber ist Discrete Multitone Modulation (DMT) ein Multi-Träger-Verfahren. DMT unterteilt das ADSL-Spektrum in 256 jeweils 4 kHz breite Kanäle (Trägerabstand: 4,3125 kHz, siehe Abbildung 4.1). Für den Uplink sind 32 und für den Downlink 190 Kanäle vorgesehen. Die restlichen Kanäle sind reserviert oder dienen der Synchronisierung des Abtastzeitpunktes im Empfänger. Jeder Kanal wird unter Berücksichtigung der aktuellen Parame-

¹⁶ANSI T1.413 - ISSUE 2: *Draft Proposed Revision of ANSI T1.413-1995 – Interface Between Networks and Customer Installation – Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface.*

¹⁷Die ITU-T Empfehlung G.992.1 sieht neben der Kombination ISDN/ADSL die Variante POTS und ADSL vor. Der nutzbare Frequenzbereich im Upstream liegt hierbei zwischen 25,875 kHz und 276 kHz.

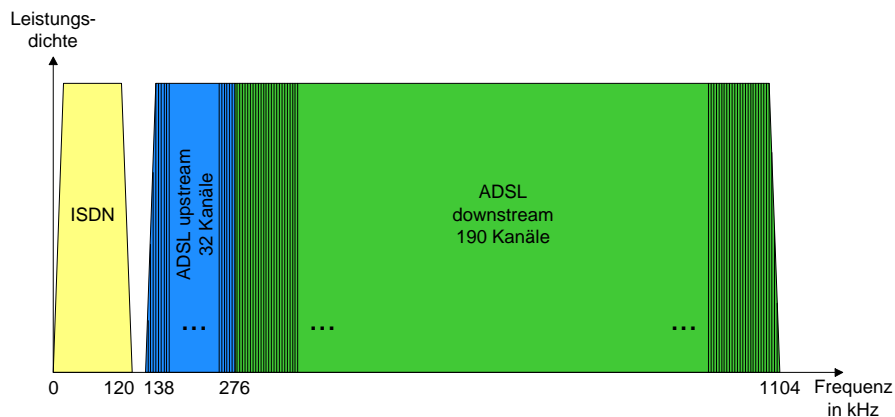


Abbildung 4.1: ADSL-Spektrum (ADSL over ISDN)

ter des Übertragungskanal mittels Quadrature Amplitude Modulation (QAM) moduliert. Treten durch Dämpfung oder Übersprechen Störungen des Signals in einem bestimmten Kanal auf, wird dessen Bitrate¹⁸ bzw. der Redundanzanteil an die Stärke der Störung angepasst. Bei der Überschreitung eines definierten Schwellwertes für das Störmaß, kann der Kanal aus der Datenübertragung ausgenommen und auf einen Reservekanal ausgewichen werden. Jeder Kanal wird auf diese Weise hinsichtlich maximaler Bandbreite bei geringer Fehlerwahrscheinlichkeit optimal moduliert. Die Kanalverzerrung fällt aufgrund der geringen Kanalbreite im Vergleich zur CAP wesentlich weniger komplex aus. Durch die Discrete Multitone Modulation können somit höhere Leistungen und Flexibilität bei vertretbarem technischem Aufwand erzielt sowie die Stabilität bei Zustandsänderungen auf der Leitung gesteigert werden. DMT ist durch das ANSI als Standardmodulationsverfahren für ADSL festgelegt worden.

Das ADSL-Referenzmodell nach [G.992.1] ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Bereich des Access-Netzes befindet sich zwischen Core-Netz und dem Netzabschluss (NT) des Network Service Providers und wird durch die Schnittstellen V-C und U-R begrenzt. Hier ist der Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM) angesiedelt, der den Verkehr der einzelnen Teilnehmer bündelt und ihn mit den Backbone-Leitungen der Provider verbindet. Die Verwirklichung der ADSL-Übertragung obliegt der ADSL Transceiver Unit – Central Office (ATU-C), die normalerweise als Steckkartenlösung im DSLAM realisiert sind. Dessen Gegenstück ADSL Transceiver Unit – Remote Office (ATU-R) ist die Be-

¹⁸Ein Kanal kann bis zu 15 Bits pro Symbol bei einer Symbolrate von 4000 Baud übertragen. Bei 190 Kanälen im Downstream liegt die maximale Bandbreite somit bei 11,4 Mbit/s.

zeichnung für das ADSL-Modem auf der Teilnehmerseite. Die Splitter trennen auf der Seite des ATU-R die POTS- und DSL-Signale auf, während sie auf der Seite des ATU-C kombiniert werden. Service-Module (SM) charakterisieren die zur Verfügung gestellten Bearer Channels¹⁹ zu je 2,048 Mbit/s.

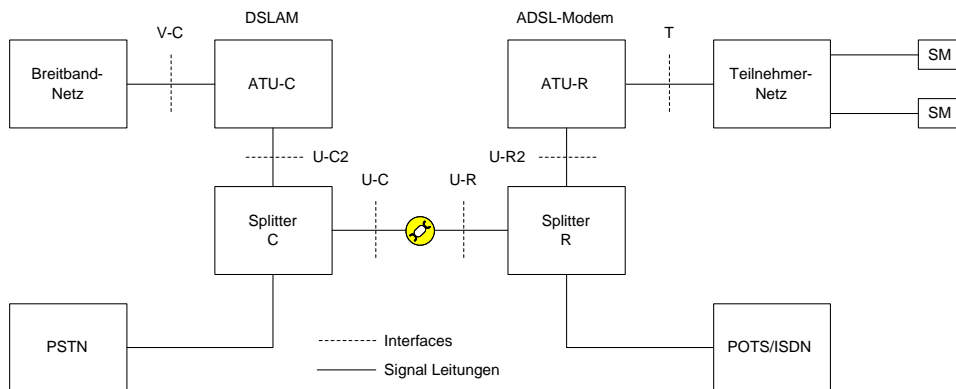


Abbildung 4.2: ADSL-Referenzmodell (nach [G.992.1])

ADSL wurde mit der Maßgabe entwickelt, komprimierte Videostreams über das Zugangsnetz des PSTN zu übertragen. Die Unempfindlichkeit solcher Videodaten gegenüber Latenz ermöglichte eine Forward Error Correction (FEC) auf der Physical Layer mit Hilfe eines Interleaving-Algorithmus, um die Auswirkungen der in metallenen Access-Netzen üblichen impulsförmigen Störungen auf die Integrität des Datenstroms zu verringern. Hierfür werden die ursprünglich hintereinander liegenden Bytes eines Paketes auf mehrere ADSL Frames verteilt, um nicht durch burstartig auftretende Fehler ein komplettes Datenpaket zu verlieren. Interleaving erhöht die Transmission Delay jedoch in nicht unerheblichen Maße. Die Verzögerung ist proportional der Interleaving-Tiefe. Eine (virtuell) fehlerfreie Übertragung bedingt eine hohe Interleaving-Tiefe und damit hohe Latenz. Geringe Antwortzeiten können nur durch eine Reduktion der Interleaving-Tiefe erreicht werden und sind gleichbedeutend mit dem stärkerem Auftreten von Burstfehlern. Die typische Round-trip Delay lässt sich für der ITU-T G.992.1 entsprechende ADSL-Systeme mit 44 ms im Interleaved-Modus und 5 ms mit abgeschalteten Interleaving angeben. In Hinblick auf dem in dieser Arbeit betrachteten Einsatzgebiet – einem IP-basierten Multiservice Network – ist es unumgänglich mehrere Stufen der Interleaving-Tiefe zu implementieren, um den Anforderungen verschiedener Dienste gerecht zu werden. Der ITU-T

¹⁹Durch ein ADSL-System transparent übertragener Nutzerdatenstrom mit einer spezifischen Datenrate.

Standard G.992.1 sieht zwei Interleaving-Modi beim Datentransfer über eine ADSL-Verbindung vor: den „Fast Path“ und den „Interleaved Path“. Ersterer verzichtet zugunsten einer geringen Antwortzeit auf eine Fehlerkorrektur durch Interleaving. G.992.1 unterstützt allerdings keine dynamische Bandbreitenzuweisung zwischen beiden Modi, was dazu führt, dass die Leitungskapazität zwischen Diensten mit unterschiedlichen Latenzanforderungen nur eingeschränkt aufgeteilt werden kann. Um dieses Problem zu umgehen, könnte der gesamte Verkehr über den „Fast Path“ transferiert werden. Eine fehlerfreie Übertragung kann bei Bedarf mit Hilfe höherer Schichten (z.B. durch TCP Retransmission) sichergestellt werden. Ein weiterer Grund für den ausschließlichen Einsatz des Non-Interleaving-Modus wird bei der Interaktion zwischen dem TCP Windowing-Mechanismus und dem Latenz-Bandbreite-Produkt der Kommunikationsverbindung ersichtlich. Bei steigender Verzögerung auf dem Link – entsprechend einer größeren Interleave-Tiefe – kann eine Verringerung des Durchsatzes bei der Datenübertragung beobachtet werden. [EBKY00]

In die Betrachtung zur simultanen Übertragung von Datenströmen mit verschiedenen Dienstgüteanforderungen muss der DSL Access Multiplexer einbezogen werden. Dieser ist für die Zuweisung der Ressourcen entsprechend des benötigten Quality of Service verantwortlich. Aktuelle Implementierungen greifen nur auf einfache Zugangskontrollregeln zurück, um Ressourcen zu allokalieren. Für den Mischbetrieb von Realtime- und Best-Effort-Anwendungen sind jedoch ausgefeiltere Mechanismen nötig. Dazu gehören mehrere Traffic Queues entsprechend der Anzahl der Verkehrsklassen sowie eine Lösung zur Congestion Avoidance (z.B. Traffic Shaping, Early Packet Discard, siehe Kapitel 5.4.2) und zum Congestion Management (z.B. Weighted Fair Queueing, Priority Queueing, siehe Kapitel 5.4.1). Diese Funktionen stellen eine Kernkomponente für die zuverlässige Übertragung IP-basierter Multiservice Dienste dar und müssen daher bei der Entwicklung zukünftiger Generationen von DSLAMs entsprechend berücksichtigt werden.

Im Kapitel A.5 wird am Beispiel von T-DSL, dem mit 2 Mio. Teilnehmern (Ende 2001) in Deutschland verbreitesten Breitband-Zugang eine ADSL-Lösung näher vorgestellt.

Protokollwelt von ADSL

ATM besitzt in heutigen Breitband-Access-Netzen eine sehr große Bedeutung. Die Ursache hierfür ist in der Tatsache begründet, dass bei der Entwicklung von ADSL²⁰, LMDS oder Satellitenzugangssystemen der Asynchronous Transfer Mode der einzige Weg war,

²⁰Der ANSI Standard T1.413 wurde schon 1995 verabschiedet.

um Dienstgütern mit Hilfe der Steuerung des Verkehrsflusses oder Quality of Service Mechanismen garantieren zu können. Mittlerweile ist IP weltweit so stark verbreitet, dass andere Übertragungsprotokolle nur eine untergeordnete Rolle spielen. Mit der Entwicklung von erweiterten QoS Techniken für IP findet nun eine langsame Verdrängung von ATM statt. Mittels Multiprotocol Label Switching (MPLS) (siehe Kapitel 5.3) gelingt die Integration von IP und ATM Fähigkeiten sowie die Kombination der Vorteile beider Technologien. [EBKY00]

Für den Aufbau und die Unterhaltung einer Ende-zu-Ende Verbindung zwischen dem Nutzer und dem Service Provider wird wie bei den Wählzugängen des PSTN das Point-to-Point Protocol (PPP) genutzt. Es gibt verschiedene Ansätze die PPP Funktionalität in Breitband-Access-Netzen zu implementieren. Der vom DSL Forum²¹ bevorzugte Ansatz ist die IETF Empfehlung PPP over ATM (PPPoA, [Cis01b, RFC2364]). Eine zugesicherte Dienstgüte für ein transparent übertragenen Datenstrom wird im ATM-Modell immer an einen Virtual Circuit (VC) gebunden. Das bedeutet, dass in einem einzigen ATM VC nicht mehrere PPP Sessions mit unterschiedlichen QoS Anforderungen zusammengefasst werden können. In einer ATM Systemumgebung, die nur die Einrichtung von Permanent Virtual Circuits (PVCs) unterstützt, kann ein IP-basiertes Multiservice nicht umgesetzt werden. Jede neue Applikation, deren Dienstgütebedarf von den bestehenden abweicht, bedeutet einen Eingriff von außen über das Management-System mit dem entsprechenden Zeitbedarf. Das Problem lässt sich durch den Einsatz von Switched Virtual Circuits (SVCs) lösen. Die PPPoA Empfehlung sieht die Verwendung von Signalisierungsprotokollen vor, die bei der Einrichtung einer PPP-Verbindung automatisch einen SVC mit den richtigen QoS-Parametern aufbauen.

Die IETF Empfehlung PPP over Ethernet (PPPoE, [Cis01c, RFC2516]) sieht dagegen die Übertragung der PPP-Daten über ein verbindungsloses Broadcast-Medium vor: dem Ethernet. PPPoE ermöglicht die Einrichtung mehrerer simultaner PPP-Verbindungen und die automatische Suche nach Access-Servern vor.

Auf dem Weg zu einem durchgängigen gerouteten IP Netz, einschliesslich des DSLAM und der Geräte auf der Teilnehmerseite (CPE) ist es sinnvoll, IP Funktionalität in den DSLAM zu integrieren. Insbesondere die Einbringung von Multicast-Fähigkeiten verspricht enorme Vorteile, denn dessen Standort ist ideal für die Vervielfachung bei der Verteilung von Multicast-Inhalten. [EBKY00]

Mit der Einführung von IPv6 wird ein session-basierter Teilnehmerzugang via PPP nicht

²¹Das DSL Forum stellt ein Konsortium aus über 330 Firmen dar, die den Ausbau der DSL Techniken fördern. <http://www.dslforum.org>

mehr benötigt, da eine Authentifizierung auf der IP-Ebene gegeben ist. Die IP Tunnel in den Core-Netzen können ebenfalls durch die IPv6 Sicherheitsfunktionen ersetzt werden. Die Implementierung eines mittels IP realisierten Quality of Service (z.B. via RSVP) ermöglicht es, IP direkt über eine Anpassungsschicht auf dem ADSL-Link zu übertragen. Der Einsatz von ATM ist in diesem Konzept nicht vorgesehen. Der Wegfall der genannten Protokolle führt zu einer Verringerung des Overheads und damit der Bearbeitungskosten. [EBKY00]

Asymmetric DSL weist keine Funktionalität zur Unterstützung eines Quality of Service auf. Delaysensitive Applikationen können zur Verringerung der Übertragungsverzögerung über den ADSL „Fast Path“ auf Kosten der Fehlerkorrektur transportiert werden. Die Zusicherung eines QoS gelingt nur durch höhere Schichten (ATM, IP over PPPoA oder IP over PPPoE over ATM).

4.2.1.2 Symmetric DSL (SDSL)

Das Anforderungs- bzw. Nutzungsprofil unterscheidet sich zwischen privaten Nutzern und dem gewerblichen Bereich²². Hier herrschen Anwendungen wie die Kopplung entfernter LANs, die Vernetzung von TK-Anlagen (als Ersatz von T1- oder E1-Leitungen), Videokonferenzen oder die gemeinsame Projektbearbeitung durch verteilte Teams vor. Allen ist gemein, dass sie eine symmetrische Anbindung an das Fernnetz erfordern. Mit Symmetric DSL (SDSL) existiert eine Access-Technik, die gleiche Kapazitäten im Up- und Downstream zur Verfügung stellt.

SDSL ist eine Weiterentwicklung des ETSI HDSL und wurde 1999 als Standard ETSI [TS 101 524] verabschiedet. Symmetric DSL ist wie HDSL ein Verfahren für Vollduplex-Übertragungen mit symmetrischen Übertragungsgeschwindigkeiten. Die Übertragungsrate wird bei SDSL durch Bitratenadaption an die Übertragungskapazität bzw. Leitungsqualität der TAL angepasst. Im Gegensatz zu HDSL arbeitet SDSL mit variablen Datenraten zwischen 144 kbit/s und 2,3 Mbit/s (in 64 kbit/s Schritten) auf Basis einer Kupferdoppelader. Die maximale Reichweite beträgt 4,5 km und übertrifft damit HDSL-Einpaarsysteme. Zur Erhöhung der Reichweite ist eine trelliscodierte PAM-Modulation als Leitungscodierung vorgesehen. SDSL ist spektral kompatibel zu anderen Übertragungstechniken einschließlich E1, ISDN, HDSL und ADSL. Die ITU-T erarbeitete bis Februar

²²Die Betrachtung bezieht nur den Bereich der kleineren Unternehmen (SOHO) ein, da größere Unternehmen meist direkt mittels Glasfasertechnik an den Backbone-Netzen angeschlossen sind, die für den SOHO Bereich jedoch unerschwinglich sind.

2001 den Standard G.shdsl (G.991.2), der die Spezifikationen des ANSI HDSL und des ETSI HDSL/SDSL kombiniert.

SDSL ermöglicht die simultane Nutzung mit bestehenden POTS und ISDN Equipment. Die Verfahrensweise unterscheidet sich jedoch erheblich von ADSL. Die POTS/ ISDN Signale werden nicht durch einen Splitter vom Breitbandanschluss getrennt, sondern werden innerhalb des SDSL-Frequenzspektrums als Bestandteil der DSL-Rahmenstruktur (Inband-Übermittlung) übertragen. Somit steht an jedem SDSL-Netzabschluss gleichzeitig 3 POTS- bzw. ein ISDN-Basisanschluss zur Verfügung. Ein Multiplexer fasst die Signale des Datenanschlusses und der S_0 Schnittstelle zusammen. Der SDSL-Transceiver überträgt dann einen einzigen Datenstrom mit 2,32 MBit/s. QoS Funktionalität ist in SDSL nicht integriert. Nur durch höhere Schichten (ATM oder IP/PPP/ATM) findet eine Quality of Service Unterstützung statt. [TS 101 524]

4.2.1.3 Very High Bit Rate DSL (VDSL)

Mit den bisher verfügbaren DSL-Technologien ist das Übertragungsverhältnis zwischen Down- und Upstream festgelegt. Durch die Tatsache, dass Anwendungen im Business-Bereich i.A. symmetrische Zugangssysteme erfordern, während für private Haushalte ein asymmetrisches Access Netz besser geeignet ist, werden verschiedene Technologien benötigt, um alle Einsatzgebiete abzudecken. Very High Bit Rate DSL (VDSL) kann dagegen sowohl in einem asymmetrischen als auch symmetrischen Modus betrieben werden und ist somit für die Anbindung von SOHO und privaten Teilnehmern gleichermaßen geeignet.

Very High Bit Rate DSL wurde speziell für den Einsatz in hybriden Glasfaser/Kupferkabelnetzen entwickelt (siehe Kapitel 4.3.1). Durch den Einsatz von LWL im Local Loop kann die effektive Länge der Cu-TAL verringert und somit eine Steigerung der Datenrate erreicht werden. Wegen der Flexibilität im Verhältnis Up-/Downstream ist VDSL für alle bereits in Kapitel 4.2.1.1 und 4.2.1.2 genannten Anwendungsbereiche geeignet. Aufgrund der hohen Kapazität kann es für die Übertragung von hochauflösendem Fernsehen (HDTV) eingesetzt werden.

VDSL Standards

Verschiedene Standardisierungsgremien (ANSI, ETSI und ITU-T) und Foren (ADSL-Forum, ATM-Forum, DAVIC^{23,24}, FSAN-Initiative²⁵, VDSL Alliance, VDSL Coalition) arbeiten an der Spezifikation von VDSL. Innerhalb des American National Standards Institute (ANSI) beschäftigt sich die Arbeitsgruppe T1E1.4 mit der Standardisierung von VDSL. Durch das ETSI wurde Oktober 1999 eine technische Spezifikation für VDSL-Systeme (TS 101 270-1) veröffentlicht. Sie stützt sich weitestgehend auf die ITU-T Empfehlung G.993.1. Die Arbeit an dieser Empfehlung ist noch nicht abgeschlossen²⁶. Die endgültige Fassung soll im Laufe des Jahres 2002 verabschiedet werden. Während der Duplexmodus und das Frequenzspektrum schon festgelegt sind, konnte bei der Wahl des Modulationsverfahrens²⁷ bisher kein Konsens erzielt werden. Februar 2001 folgte die Normierung der VDSL-Transceiver (TS 101 270-2) durch das ETSI. Hierin wird die schon beim Asymmetric Digital Subscriber Line eingesetzte DMT-Modulation verwendet. [G.993.1, TS 101 270-1, TS 101 270-2]

Da die Standardisierung von VDSL noch nicht abgeschlossen ist und sich in den Spezifikationen der einzelnen Gremien noch Unterschiede in maßgeblichen Punkten befinden, sind die folgenden Angaben als vorläufig zu betrachten. Aufgrund der Maßgeblichkeit der ETSI und ITU-T im europäischen Raum erfolgt im Weiteren eine Konzentration auf die Arbeit dieser Gremien im Bereich VDSL.

VDSL Details

Very High Bit Rate DSL nach ITU-T G.993.1 nutzt ebenfalls die existierende Infrastruktur des PSTN. Im Gegensatz zu den anderen DSL-Techniken arbeitet VDSL in wesentlich höheren Frequenzbereichen. Während ADSL eine obere Grenzfrequenz von 1,104 MHz aufweist, liegt diese bei 12 MHz in VDSL-Systemen. Die Übertragungsraten bewegen sich zwischen 13,5 Mbit/s und 52 Mbit/s im Downstream bzw. zwischen 1,6 Mbit/s und 6,4 Mbit/s im Upstream (siehe Tabelle 4.2). Die Reichweite von VDSL wird in drei Bereiche eingeteilt: den Long Range zwischen 1 000 und 1 500 m, den Mid Range zwischen

²³Das Digital Audio Visual Council (DAVIC) hat sich die Definition von Schnittstellen und Protokollen für audiovisuelle Anwendungen und Dienste zum Ziel gesetzt.

²⁴Siehe Kapitel A.6

²⁵Konsortium aus verschiedenen Telekommunikationsdienstleistern und -ausrüstern. Ziel der Initiative ist eine allgemeingültige Spezifikation für ein Full-Service Access Netz.

²⁶Sie wird bei der ITU-T als „prepublished“ gekennzeichnet.

²⁷Die ITU-T hat sich darauf festgelegt, dass nur ein Modulationsverfahren zum Einsatz kommen soll.

300 und 500 m und den Short Range unterhalb von 300 m. G.993.1 sieht die Übertra-

Übertragung	Bitraten		Reichweite
	upstream Mbit/s	downstream Mbit/s	
asymmetrisch	52	6,4	0,3
asymmetrisch	26	3,4	1
asymmetrisch	13,5	1,6	1,5
symmetrisch	26	26	0,3
symmetrisch	13	13	1
symmetrisch	6,5	6,5	1,5

Tabelle 4.2: VDSL-Bitraten (nach [Rau99])

gung von ATM und SDH (Synchrone Digitale Hierarchie) Datenströmen vor (siehe Abschnitt „VDSL Konvergenz-Schicht“ auf Seite 79). Um den Übergang zu diesen Netzstrukturen zu erleichtern, werden die tatsächlichen VDSL Datenraten an Vielfache von SDH VC-12 (2,3 Mbit/s ($1 \times \text{VC-12}$), 13,8 Mbit/s ($6 \times \text{VC-12}$), 27,6 Mbit/s ($12 \times \text{VC-12}$) und 55,2 Mbit/s ($24 \times \text{VC-12}$)) oder den entsprechenden ATM Kategorien (2,16, 12,96, 25,92 und 51,84 Mbit/s) angepasst.

Weiterhin ist zu beachten, dass die angegebenen Zahlen Netto-Werte, d.h. die Nutzdatenrate, darstellen. Die tatsächliche Brutto-Übertragungsbandbreite hat der Systemanbieter so zu wählen, dass zusätzlich zur Payload Raum für Overhead in Form einer Forward Error Correction, dem Maintenance Kanal usw. vorhanden ist. Die dargestellten Bitraten und Reichweitenanforderungen sind noch nicht endgültig festgelegt. [G.993.1, TS 101 270-1]

Das generische VDSL-Referenzmodell wird in Abbildung 4.3 dargestellt. Der wesentliche Unterschied zu anderen DSL-Techniken liegt in der optischen Zuführung (Fiber Feed) zwischen Ortsvermittlungsstelle und einem Kabelverzweiger. Die Transmission Unit auf der Teilnehmerseite wird hier als VTU-R bezeichnet. Deren Gegenstelle wird wegen der optischen Anbindung mit VTU-O charakterisiert. OLT und ONU werden im Kapitel 4.4.1.1 ausführlich dargestellt. VDSL und POTS/ISDN werden in verschiedenen Frequenzbereichen betrieben. Durch den Einsatz von Splittern können Breit- und Schmalband-Geräte simultan betrieben werden.

Um einen Duplexbetrieb zu ermöglichen wird in G.993.1 kompatiblen Transceivern das

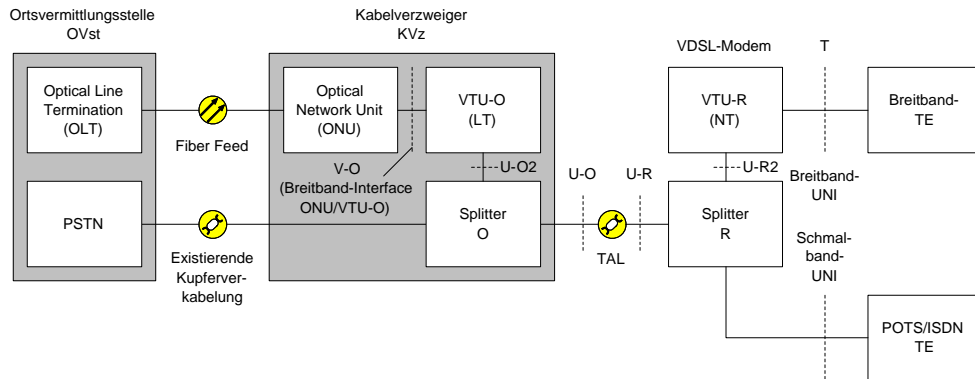


Abbildung 4.3: VDSL-Referenzmodell (nach [G.993.1], [SSWR96a])

Frequency Division Duplexing (FDD) eingesetzt. In der ITU-T Empfehlung wird das VDSL-Spektrum in 4 Bänder zwischen 138 kHz und 12 MHz aufgeteilt (siehe Abbildung 4.4). Die Frequenzbereiche werden mit DS1 (erstes Downstream-Band), US1, DS2 und US2 (zweites Upstream-Band) bezeichnet. Die Trennfrequenzen f_0 bis f_5 werden in der Tabelle 4.3 spezifiziert. Der Bereich zwischen 25 kHz (f_0) und 138 kHz (f_1) kann optional genutzt werden. Dies wird in der Signalisierungsphase nach G.994.1 ausgehandelt. Die Frequenzbereiche unterhalb von 25 kHz (f_0) und oberhalb von 12 MHz (f_5) sind in der Empfehlung G.993.1 nicht spezifiziert. [G.993.1, TS 101 270-1, TS 101 270-2]

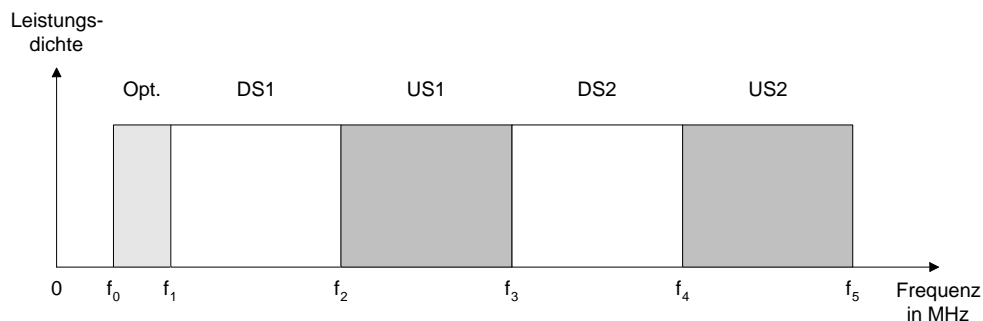


Abbildung 4.4: VDSL-Spektrum (nach [G.993.1])

Für Europa und Nord Amerika wurden verschiedene Frequenzuteilungen (siehe Tabelle 4.3) verabschiedet. Das ANSI legte für sein Einflussgebiet den Bandplan A (Plan 998)²⁸ fest. In Europa werden die Frequenzen des Bandplan B (Plan 997) verwendet.

²⁸In früheren Veröffentlichungen wird die Frequenzuteilung als Plan 998 bezeichnet.

Wenn es regionale Gegebenheiten erfordern, kann optional Plan A verwendet werden. Eine Sonderrolle nimmt Plan C ein. Er ist für die ausschließliche Nutzung in Schweden vorgesehen. [G.993.1, TS 101 270-1]

Frequenz	Bandplan A	Bandplan B	Bandplan C
	MHz	MHz	MHz
f_0	0,025	0,025	0,025
f_1	0,138	0,138	0,138
f_2	3,75	3	2,5
f_3	5,2	5,1	3,75
f_4	8,5	7,05	variabel
f_5	12	12	12

Tabelle 4.3: VDSL Frequenzpläne (nach [G.993.1])

Durch G.993.1 wird die Implementierung einer Funktion zur Leistungsdichteverringering im Bereich bis 1,104 MHz und auf Amateurfunkfrequenzen vorgeschrieben. Sie dient der spektralen Kompatibilität zu anderen Übertragungstechniken (POTS/ISDN bzw. xDSL) sowie der Reduktion von Interferenzen im Funkverkehr. Ob diese Funktion zum Einsatz kommt, wird während der Signalisierung nach G.994.1 bestimmt.

Bei der Wahl des Duplex-Modus (Zeitgleichlage mit Echo Cancellation, Zeitgetrenntlage bzw. Frequenzgetrenntlage) und des Modulationsverfahrens sind viele Einflußgrößen zu berücksichtigen. Insbesondere die spektrale Kompatibilität nimmt hier eine wichtige Rolle ein, da Übersprecheffekte die Hauptbegrenzungsfaktoren für hochbitratige DSL-Systeme darstellen. Während das Frequency Division Multiplexing als Duplex-Verfahren bestätigt ist, bestehen für die Modulation mehrere Möglichkeiten: CAP (Carrierless Amplitude/Phase), DMT (Discrete Multitone), DWMT (Discrete Wavelet Multitone) und SLC (Simple Line Code). In der Empfehlung G.993.1 wird das Modulationsverfahren noch nicht spezifiziert. Die ETSI hat bereits ein Multicarrier-Verfahren für die VDSL-Modulation festgelegt. Die einzelnen Tones haben wie bei ADSL einen Abstand von 4,3125 kHz. Bis zu 4096 solcher Kanäle stehen für die Übertragung von Daten zur Verfügung. [G.993.1, Rau99, TS 101 270-2]

Das VDSL Referenzmodell erlaubt die Verwendung von bis zu 4 unabhängigen Datenpfaden (2 Up, 2 Down). Jeder Datenpfad kann wie bei ADSL als „slow-channel“ mit hoher Delay (Interleaving-Mode) und einer geringeren angenommenen Bitfehlerrate sowie als

"fast-channel" mit einer entsprechend höheren BER konfiguriert werden. Dieses Konzept stimmt weitgehend mit dem Dual Latency beim ADSL (siehe Abschnitt „ADSL im Detail“ auf Seite 68) überein. Die exakten Anforderungen an die Verzögerung sind Bestandteil des Normungsprozesses. [G.993.1]

VDSL Konvergenz-Schicht

VDSL sieht den direkten Transport von ATM- und SDH-Strukturen mittels einer Transport Protocol Specific – Transmission Convergence Layer (TPS-TC) vor. Der Standard wurde jedoch so flexibel ausgelegt, dass er ebenso zukünftige paketbasierte Übertragungsdienste übermitteln kann. Im Annex G der Empfehlung G.993.1 wird zu diesem Zweck eine ATM-spezifische Transmission Convergence Sublayer (ATM-TC) beschrieben. Darin werden die notwendigen Prozeduren und Funktionen²⁹ erläutert, um ATM vom ONU zum Teilnehmer zu übertragen. Die Zuordnung der in den ATM-Strom eingebetteten Nutzdaten zum „Fast“ oder „Slow Channel“ geschieht mit Hilfe verschiedener Virtual Paths und/oder Virtual Channels.

G.993.1 Annex H stellt ein Modell für den paketbasierten Datentransport (PTM – Packet Transfer Mode) dar. Jedes zur Übertragung vorgesehene Paket wird von einer PTM-Entity verarbeitet und entsprechend seinen Delay-Anforderungen an die Schnittstelle (γ -Interface) des „Fast“ oder „Slow Channel“ weitergereicht. Die korrespondierende TPS-TC (PTM-TC) empfängt das Paket und übergibt es der Physical Media Specific-Transmission Convergence Sublayer (PMS-TC), wo es in einen HDLC ähnlichen Frame eingekapselt und über den VDSL-Link verschickt wird. Die VDSL Management Entity (VME) stellt u.a. Monitoring-Funktionen bereit, mit der die Einhaltung von QoS-Garantien sichergestellt werden kann.

IP-Pakete können somit auf unterschiedliche Weise über VDSL-Verbindungen transportiert werden. Neben der vom ADSL-Forum und der IETF entwickelten Methode IP over PPP over ATM ist die native IP-Übertragung mittels der PTM TC Sublayer möglich. [G.993.1, TS 101 270-1]

Very High Bit Rate DSL besitzt keine Funktionalität, um ein zugesichertes QoS zu unterstützen. Lediglich die Übertragungsverzögerung kann für delaysensitive Dienste durch die Wahl des „Fast Channel“ auf Kosten der Fehlerkorrektur und einer damit verbundenen höheren Wahrscheinlichkeit für Paketverluste verringert werden. Quality of Service Support kann somit nur durch höhere Schichten via ATM oder nativen IPv6 erbracht wer-

²⁹Die Spezifikation beruht auf der ITU-T Empfehlung I.432.

den.

VDSL als Brücke zwischen PON und Teilnehmer

Voraussetzung für den Einsatz der VDSL-Technologie ist ein aus Glasfaser- und Kupferleitungen bestehendes Hybridnetz. Nur der Transport der Daten über Lichtwellenleiter bis zu einem der Vermittlungsstelle vorgelagerten Auskopplungspunkt garantiert die hohen Übertragungsraten. Für eine FTTCab (Fiber to the Cabinet) Realisierung (siehe Kapitel 4.3.1 und Abbildung 4.5) wird in Deutschland als Abschluß für die optische Zuführung der Kabelverzweiger (KVz) – ein bereits vorhandener Installationspunkt für den Teilnehmeranschluß – verwendet. Nur der Verzweigungskabelbereich zwischen KVz und Teilnehmer wird mit der Cu-TAL überbrückt. Ein Kabelverzweiger versorgt typischerweise 10 bis 50 Teilnehmer. Das hohe Potential dieser Technologie in Bezug auf die Zahl der erreichbaren Haushalte wird bei folgenden Kenndaten deutscher Telefonnetze deutlich:

mittlere Verzweigungskabellänge: ≤ 300 m

90 % aller Verzweigungsleitungen ≤ 500 m

Besonders in Ländern, in denen CATV-Netze keine große Bedeutung (z.B. Frankreich, GB oder Italien) erlangt haben, wird VDSL auf dem Weg zum flächendeckenden Glasfaser-Netz eine große Rolle spielen. [SSWR96a, WSS96]

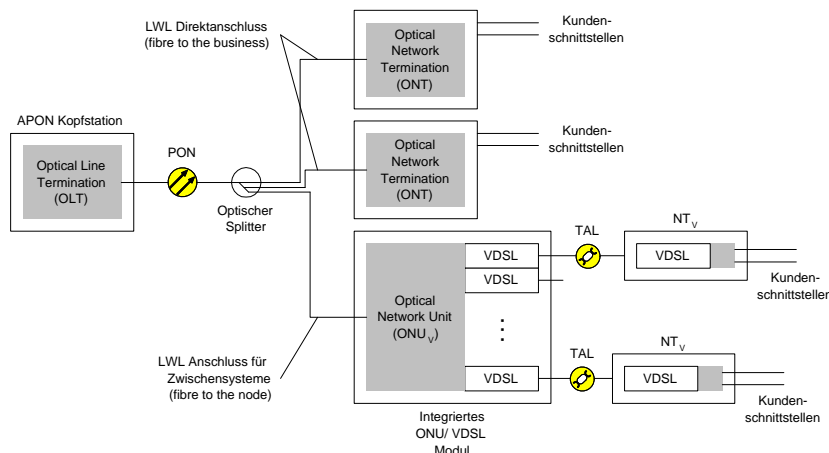


Abbildung 4.5: Kundenanschluss über PON und VDSL (nach [EBKY00])

4.2.2 Community Antenna Television (CATV)

Community Antenna Television (CATV) bezeichnet das Breitbandkabel-Netz, das für die unidirektionale Übertragung bzw. Verteilung von Broadcastdiensten wie Rundfunk- oder Fernsehprogrammen konzipiert wurde. Um das Kabelverteilnetz für den Teilnehmeranschluss (Local Loop) nutzbar zu machen, werden die Netze sukzessive mit einem Rückkanal für den bidirektionalen Betrieb ausgestattet. Durch den hohen Verbreitungsgrad von über 86 % aller Haushalte in Deutschland besitzt CATV im privaten Umfeld ein ähnlich hohes Potenzial wie xDSL. In der Industrie sowie in anderen Ländern Europas ist die Verbreitung von CATV jedoch eingeschränkt. Ein Ausbau in diesen Gebieten mit Kabelverteilnetzen ist aus finanziellen Erwägungen nicht zu erwarten. [BS01]

4.2.2.1 CATV Standards

Für die Standardisierung des Datentransports über koaxiale Breitbandkabelnetze zeichnen sich verschiedene Institutionen verantwortlich. Die IEEE 802.14 Working Group beschäftigte sich mit der Formulierung eines MAC-Protokolls für eine Zugriffskontrolle auf das Übertragungsmedium und die Erkennung und Auflösung von Kollisionen. CableLabs, der Forschungs- und Entwicklungszweig der Vereinigung amerikanischer Kabelgesellschaften (MCNS³⁰), hat an der Definition eines weltweit gültigen Kabelmodemstandards gearbeitet und im März 1999 die Version 1.1 der „Data Over Cable Service Interface Specification“ (DOCSIS) vorgestellt. DOCSIS diente als Grundlage für die ITU-T-Empfehlung J.112. Weitere Informationen zum Standardisierungsprozess können dem Kapitel 4.3.2.1 entnommen werden. [TZM97]

4.2.2.2 Datenübertragung in CATV-Netzen

Die seit 1984 aufgebauten Breitbandkabel-Netze (BK-Netze) werden in mehrere Netzebenen unterteilt. Die Netzebenen 1 und 2 dienen der Übertragung der Signale vom Produktionsstandort zum Headend (Kopfstation) über Glasfaser oder Satellit. Die Headend-Station bildet einen zentralen Punkt – die Kopfstelle in einem Kabelverteilnetz. CATV-Netze sind ausgehend vom Headend als Inselnetze ausgelegt. Der Transport der Broadcast-Daten zwischen der Kopfstation und einem Übergabepunkt (ÜP) ist in der Ebene 3 angesiedelt. Die Übertragung vom ÜP auf öffentlichem Grund bis hin zum Hausübergabepunkt (HÜP) auf privatem Grund erfolgt in der Netzebene 4. Diese Arbeit konzentriert

³⁰Multimedia Cable Network System

sich nur auf die Netzebenen 3 und 4.

Die BK-Netze wurden für die unidirektionale Übertragung von Broadcastdiensten wie Rundfunk- oder Fernsehprogrammen konzipiert. Aus dieser Zielsetzung heraus entstanden baumförmige Verteilnetze. Die Kopfstation (Headend-Controller) stellt hierbei die Wurzel des Baumes dar. Über unidirektionale Verstärkerelemente³¹ wird das Broadcast-Signal zu den angeschlossenen Haushalten weiter geführt (siehe Abbildung 4.14). Ein Headend-Controller bedient maximal 10 000 Nutzer. Für die Nutzung als Breitbandanschluss für interaktive Dienste wurde in den letzten Jahren mit dem Ausbau der Netze für den bidirektionalen Betrieb begonnen.

Durch die baumförmige Netzstruktur weisen die eingesetzten Koaxialkabel ein „Shared Medium“ Charakter – ähnlich dem Ethernet – auf. Für einen reinen Broadcast-Dienst bzw. für ihre originäre Aufgabe als Verteilnetz für TV- und Radioprogramme stellt das keine Einschränkung dar. Bei der Übertragung von interaktiven Applikationen bzw. von Anwendungen auf Abruf („on demand“) müssen sich dagegen alle an einem Strang angeschlossenen Nutzer die Bandbreite des Mediums teilen.

Koaxialkabel ist das bessere physikalische Medium für hochfrequente Übertragungen gegenüber der Cu-TAL in xDSL-Systemen. Durch die Schirmung besitzt es wesentlich gleichförmigere Übertragungscharakteristika. BK-Netze arbeiten daher mit höheren Frequenzen und können so wesentlich mehr Daten übertragen.

Das deutsche CATV-Netz wurde ursprünglich für den Betrieb bis 300 MHz ausgelegt. Später wurde es auf 450 MHz erweitert. Diese Frequenzbereiche sind fast vollständig durch analoge Inhalte belegt. Mit der Digitalisierung des Programmangebots und der Erweiterung des Frequenzspektrums auf 862 MHz stehen für den Transport interaktiver Applikationen erheblich mehr Bandbreite zur Verfügung. Die volle Kapazität des Übertragungsmediums lässt sich aufgrund gesetzlicher Bestimmungen von den Kabelnetzbetreibern nicht für interaktive Dienste nutzen, da bestimmte Programme eingespeist werden müssen („must carry“). [BS01]

Die ITU-T Empfehlung J.112 sieht für den Upstream den Bereich zwischen 5 und 65 MHz vor. Das erste Band zwischen 5 und 10 MHz ist für die Netzwerküberwachung und das Netzwerkmanagement reserviert. Der zweite Bereich bis 65 MHz kann sowohl als Upstream-Kanal als auch für interaktive Dienste (Up- und Downstream) genutzt werden. Der obere Frequenzbereich von 88 bis 862 MHz³² kann nur für den Downstream genutzt

³¹Typische BK-Netze können Ausdehnungen bis zu 80 km aufweisen. Aufgrund der hohen Dämpfung bei den genutzten Frequenzen, muss das Signal daher verstärkt bzw. regeneriert werden.

³²In einem Kanalaraster zu je 8 MHz.

werden. Somit lassen sich im Upstream bis zu 12,352 Mbit/s (bei 16QAM Modulation) und auf dem Downlink bis zu 30 Mbits/s pro 8 MHz Kanal übermitteln. [J.112, TZM97] In unidirektionalen CATV-Netzen kann der Interaktionskanal über das PSTN geführt werden. Die ETSI veröffentlichte hierfür den Standard ETS 300 801³³ Die Bandbreite im Upstream ist in diesem Fall dediziert und auf maximal 128 kbit/s (ISDN Kanalbündelung) beschränkt. [EG 202 306]

4.2.2.3 Einsatzgebiete

Interaktive Applikationen zeichnen sich durch einen bidirektionalen Datenverkehr aus. Die Übertragung solcher Inhalte ist in Broadcast-Netzen nicht ohne weiteres möglich. Folgende Punkte müssen für den bidirektionalen Datenaustausch beachtet werden:

- CATV-Netze weisen eine asymmetrische Netzstruktur auf. Die Datenrate ist im Upstream geringer als im Downstream.
- Aufgrund der ursprünglichen Ausrichtung als Verteilnetz für Fernseh- und Radioprogramme sind im Downstream nur Broadcast-Übertragungen möglich³⁴. Der Datentransport im Uplink wird über den Headend-Controller abgewickelt. Zwei Stationen in einem Netz können deswegen nicht direkt miteinander kommunizieren. Der Nachrichtenaustausch zwischen Nodes eines Netz findet stattdessen immer über den Headend-Controller statt. Auftretende Kollisionen auf dem Upstream-Kanal werden durch die beteiligten Stationen nicht erkannt. Daher wird ein Zugriffsprotokoll eingesetzt, das dem Headend-Controller erlaubt, Kollisionen zu registrieren und aufzulösen.
- Da jedweder Datenverkehr den Headend-Controller passiert, muss dieser entsprechend der auftretenden Last skalieren können. Eine Überlastung des Headend-Controllers bzw. der Upstream-Kanäle durch hohes Verkehrsaufkommen führt zu steigenden Antwortzeiten bis hin zu inakzeptabler Dienstqualität bei interaktiven Applikationen.

Durch diese Eigenschaften eignen sich CATV-Netze eher für die Übertragung von Anwendungen mit asymmetrischem Verhalten (FTP, Web) von außerhalb des Netzes liegenden Quellen. Der Austausch von Daten innerhalb des Netzes bzw. von symmetrischen

³³ETSI ETS 300 801: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel through Public Switched Telecommunications Network (PSTN)/ Integrated Services Digital Networks (ISDN)*.

³⁴Der Headend-Controller besitzt das alleinige Recht für den Zugriff auf den Downlink.

Diensten und solchen, die garantierte Zugriffszeiten auf dem Upstream-Kanal benötigen, ist mit CATV-Netzen nur bedingt möglich. [TZM97]

Aufgrund dieser Einschätzung kann davon ausgegangen werden, dass CATV mittel- bis langfristig neben dem Internetzugang mit „always on“ Funktionalität vor allem im Bereich breitbandiger interaktiven Verteildienste, wie z.B. VoD, MoD, Pay-per-View, Tele-learning usw. einen hohen Marktanteil erreichen wird. Das klassische Broadcasting von TV-Programmen wird auch zukünftig ein zentraler Dienst der CATV-Netze bleiben. Das Angebot zusätzlicher Anwendungen wird weiterhin die Bedürfnisse privater Haushalte widerspiegeln, da die Erschließung der gewerblichen Teilnehmer mit CATV im Angesicht der anderen Technologien (xDSL, WLL, FTTH) als wirtschaftlich nicht vertretbar angesehen werden kann. [BS01]

CATV-Netz mit einer rein koaxialen Ausprägung sind heute kaum mehr anzutreffen. In Anbetracht der geringen individuellen Bandbreite bei bis zu 10 000 Teilnehmern pro Headend-Controller und der genannten Probleme in Bezug auf die Lastverteilung werden heute nur Hybrid Fiber/Coax Systeme installiert (siehe Kapitel 4.3.2).

4.2.3 Powerline Communications (PLC)

Powerline Communications (PLC) ist eine Übertragungstechnologie, bei der die praktisch ubiquitären Niederspannungsnetze der Stromversorger als breitbandige Alternative für den Local Loop bei der Sprach- und Datenübertragung genutzt werden.

4.2.3.1 PLC-Standardisierung

Anders als bei den bisher aufgeführten Access-Techniken, existiert für Powerline Communications bislang kein Standard. Eine entsprechende Norm der CENELEC³⁵ (European Committee for Electrotechnical Standardisation) befindet sich in der Entwurfsphase. Ein Teil der Anbieter³⁶ sichert schon die Kompatibilität zu dieser Norm zu. Alle in Deutschland vertriebenen Lösungen sind jedoch kompatibel zur NB30 (Nutzungsbestimmung 30, siehe Kapitel 4.2.3.2) der RegTP, in der Grenzwerte für das elektromagnetische

³⁵Bisher existiert nur eine Norm für die Schmalbandübertragung über Energieverteilnetze. Die CENELEC-Norm EN 50065-1 regelt zum Schutz vor Störungen und zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit die Kommunikation über Stromnetze im Frequenzbereich von 3 bis 148,5 kHz.

³⁶LÜSCHER, BEAT: *Standards – the key to a global market*.

Emissionsverhalten festgelegt sind.

Das bedeutet, dass alle bisher vertriebenen Lösungen proprietäre (Insel-)Systeme sind. In verschiedenen Industrieforen werden daher Spezifikationen erarbeitet, die die Interoperabilität der Geräte mehrerer Hersteller sicherstellen soll. Das PLCForum³⁷ ist eine Zusammenschluss vorrangig europäischer Anbieter, die eine einheitliche Norm anstreben. Im amerikanischen Raum hat sich die HomePlug Alliance als Normungsgremium für Powerline-Lösungen etabliert. Die im Sommer 2001 verabschiedete HomePlug 1.0 Specification^{38,39} definiert eine OFDM-basierte Physical Layer (verschiedene Modulationsverfahren möglich: BPSK, QPSK oder QAM) und eine CSMA/CA MAC-Layer. Das Multiträgerverfahren erlaubt eine dynamische Anpassung der einzelnen Tones⁴⁰ an die Kanalcharakteristik. Es sind Datenraten von bis 14 Mbit/s vorgesehen. Zusätzlich werden QoS-Algorithmen beschrieben, die die gleichzeitige Übertragung von Best-Effort Daten und multiplen VoIP-Strömen hoher Qualität erlauben. Da es sich bei PLC um ein geteiltes Medium handelt, wurden Funktionen zur Sicherung der Daten und deren Vertraulichkeit implementiert.

Die folgenden Angaben sind von den Systemanbietern veröffentlichte Werte und dienen der Orientierung. Im Zuge einer Standardisierung können sich diese ändern.

Mit dem PALAS^{41,42} (Powerline as an Alternative Local Access Project) Projekt der IST wird an einem integrierten Ansatz zur Standardisierung gearbeitet, der technische, ökonomische und organisatorische Aspekte umfasst.

4.2.3.2 Einflussgrößen und Parameter von PLC-Systemen

Topologie

Powerline Access-Lösungen weisen eine kombinierte Stern-/Baumstruktur auf. Von jedem Leitungsstrang zweigen mehrere Hausanschlüsse ab. Da die einzelnen Stränge innerhalb der Ortsnetzstation galvanisch verbunden sind, greifen alle Teilnehmer in der durch die Transformationsstation und den Nutzern gebildeten Zelle auf den selben Leitungsbus zu. PLC-Systeme sind somit wie CATV-Netze ein „Shared Medium“. Das be-

³⁷<http://www.plcforum.com>

³⁸<http://www.homeplug.org/news/press062601.html>

³⁹<http://www.homeplug.org/faq/index.html>

⁴⁰Einzelne Träger/Frequenzbereiche in Multiträgersystemen

⁴¹http://dbs.cordis.lu/fep/cgi/srchidadb?ACTION=D&CALLER=PROJ_IST&QF_EP_RPG=

IST-1999-11379

⁴²<http://palas.regiocom.net/>

deutet, dass alle an der Ortsnetzstation angeschlossenen Haushalte sich die zur Verfügung stehende Datenübertragungsrate teilen. Zudem ist aufgrund dieser Eigenschaften eine Verschlüsselung des Datenverkehrs und eine gegenseitige Authentisierung der Teilnehmer unumgänglich⁴³.

Powerline Communications wird in den Outdoor- oder Access-Bereich sowie in den Indoor-Bereich gegliedert. Das Outdoor-System erstreckt sich über den öffentlichen Teil des elektrischen Niederspannungsnetzes von der Ortsnetzstation bis zum Hausanschluss. Das Indoor-System ermöglicht die Kommunikation vom Hausverteiler bis zu jeder Steckdose. Ein Outdoor-Master in der Transformationsstation verbindet die PLC-Umgebung mit einem Telekommunikationsnetz und steuert das Outdoor-System. Über den Outdoor Access-Point wird das Outdoor- mit dem Indoor-System verbunden. Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit dem Access-Bereich.

Der Powerline Übertragungskanal

Die Niederspannungsnetze wurden für den Transport von 50 Hz Wechselstrom konzipiert. Sie weisen weder eine Abschirmung noch eine Verdrillung auf und besitzen somit kein ideales Hochfrequenzverhalten. Diese Materialeigenschaften führen zu einer sehr hohen Dämpfung bei steigender Frequenz und Kabellänge (Tiefpasscharakteristik des Kabels). Der für die Übertragung von Daten nutzbare Frequenzbereich wird mit zunehmender Entfernung zwischen Einspeise-Knoten und Teilnehmer immer geringer.

Das Übertragungsmedium – die Energieversorgungsleitungen – ist nicht terminiert und daher nicht angepasst abgeschlossen. Signale werden an offenen oder fehlangepassten Leitungsenden reflektiert und überlagern sich mit dem Originalsignal. Hierdurch entsteht ein Kanal mit stark frequenzselektivem Übertragungsverhalten. Weitere Störungen werden durch Mehrwegeausbreitung und Mehrfachechos in den zahlreichen Abzweigen und Stichleitungen hervorgerufen.

Neben den Eigenschaften des Übertragungskanals beeinflussen das überall vorhandene Rauschen sowie angeschlossene Verbraucher das Datensignal. Die dadurch verursachten Störungen sind je nach Quelle schmal- oder breitbandig und können periodisch oder aperiodisch auftreten. Die Schaltnetzteile elektronischer Geräte (PC, Fernseher, Halogenlampen) als induktive Lasten erzeugen beim Ein- oder Ausschalten Spannungsspitzen.

⁴³Das Ascom Powerline System (siehe Tabelle 4.4) verwendet VLANs auf Basis des IEEE 802.1q Standards zur benutzerspezifischen Trennung aller Datenpakete. Zusätzlich werden die Daten über den Stromchiffrierer RC4 verschlüsselt, um die Sicherheit der Daten zu gewährleisten.

zen (Spikes) mit einem Spannungshub von bis zu 30 V, die das Übertragungssignal für einige Millisekunden überdecken und damit auslöschen. Ebenso können Motoren mit abgenutzten Kohlebürsten breitbandige Störungen hervorrufen, die 20 bis 30 dB über dem Hintergrundrauschen liegen. Das Anfahren großer Lasten (z.B. Aufzüge) führt zu Spannungseinbrüchen (Surges), die einen ähnlichen Effekt erzeugen wie Spikes. Somit kann festgestellt werden, dass der für Powerline Communications verwendete Übertragungskanal stark zeitvariant ist. Das Übertragungsverhalten des Niederspannungsnetzes ähnelt aufgrund dieser Eigenschaften einer Funkstrecke.

Die fehlende Abschirmung der Stromleitungen bewirkt eine hohe Antennenwirkung. Energieverteilnetze emittieren aus diesem Grund elektromagnetische Felder bei Beaufschlagung mit hochfrequenten Signalen. In den von PLC genutzten Frequenzbereichen (3 kHz bis 30 MHz) sind zahlreiche Funkdienste aktiv. Um den Anforderungen der Koexistenz mit anderen (Funk-)Diensten gerecht zu werden bzw. einen elektromagnetisch verträglichen Betrieb zu ermöglichen muss daher die Abstrahlung durch Verringerung der Sendeleistung reduziert und der Nutzfrequenzbereich eingeschränkt werden. Die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP⁴⁴), hat in der Nationalen Nutzungsbestimmung 30 (NB30) Grenzwerte für die Signalpegel festgelegt, um die Funktionssicherheit der bei diesen Frequenzen arbeitenden Dienste von Funkamateuren und Sicherheitsorganen zu erhalten. Ferner sind laut NB30 die Frequenzbereiche auszunehmen, in denen sicherheitsrelevante Funkdienste (Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienste, Militär) betrieben werden. Daraus resultieren die Vorschläge für die Frequenzzuweisung in Abbildung 4.6. [AZ01, ZD00]

Spektrum und Systemübertragungsgeschwindigkeit

Für den Outdoor-Bereich sind 3 Frequenzbänder in den Bereichen 1,6-3,5 MHz, 3,8-5,8 MHz und 7,4-9,4 MHz für eine Standardisierung vorgeschlagen worden. Dies entspricht einer Nutzbandbreite von 5,9 MHz. Inhouse-Systeme können 5 Bänder zwischen 10,5 und 24 MHz nutzen. Aufgrund des hohen Störniveaus wird bei der Modulierung ein so genannter Chimney Approach („Kamine“) verwendet (siehe Abbildung 4.6). Der Systementwickler Ascom⁴⁵ gibt für sein PLC System Reichweiten von typischerweise 150 bis 250 m bei der Mittenfrequenz 2,4 MHz (Frequenzbereich 1,4-3,4 MHz sowie 100 bis 200 m bei einer Frequenz von 8,4 MHz (7,4-9,4 MHz) an. Die Systemreichweite kann

⁴⁴<http://www.regtp.de>

⁴⁵<http://www.ascom.com/nl/plcsolutions>

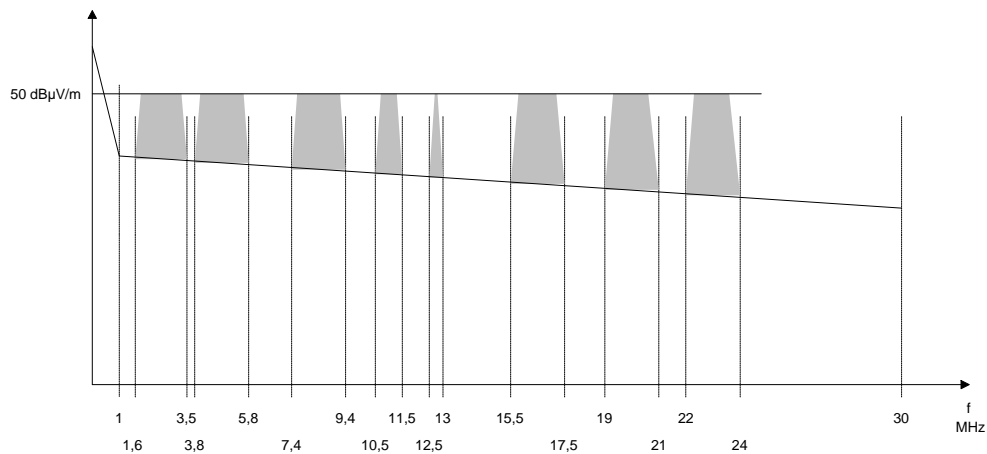


Abbildung 4.6: Vorschläge für die PLC-Frequenzzuweisung (nach [Ton00])

durch Repeater erweitert werden. [Ton00]

Eine Übersicht aller derzeit in Deutschland auf dem Markt befindlichen PLC-Systeme kann der Tabelle 4.4 entnommen werden. Die maximale Übertragungsgeschwindigkeit der Lösungen liegt zwischen 2 und 4 Mbit/s. Da es sich beim Niederspannungsnetz um ein „Shared Medium“ handelt, müssen sich alle PLC-Nutzer innerhalb des Versorgungsbereichs eines Transformators die Übertragungskapazitäten des Systems teilen. In Europa⁴⁶ sind an einer Ortsnetzstation durchschnittlich 150⁴⁷-200 Haushalte angeschlossen. Nach einer Kalkulation der EVU's befinden sich typischerweise max. 15-25 PLC-Nutzer an einem Versorgungsstrang, so dass schlimmstenfalls nur 80 kbit/s pro Teilnehmer zur Verfügung stehen. Längerfristig werden durch die Anbieter Kapazitäten auf dem Medium in Höhe von 10-20 Mbit/s erwartet. Im Vergleich zu xDSL und CATV wird die Übertragungskapazität pro Anschluss jedoch weiterhin geringer ausfallen. [AZ01, BS01, Ton00]

In einer Untersuchung der Karlsruher Universität ist die theoretische Kanalkapazität der Niederspannungsnetze bestimmt worden. Für die Versuchsanordnung war ein Sendespektrum zwischen 0,5 und 20 MHz vorgesehen. Die Sendeleistungsdichte ist auf $5 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{Hz}$, entsprechend einer Sendeleistung von $0,975 \text{ V}^2$ begrenzt worden. Zu-

⁴⁶In Amerika herrschen oft Kleinsttrafos vor, die nur einzelne oder sehr wenige Haushalte versorgen. Durch die daraus resultierenden geringen Nutzerzahlen pro Verteiler spielt PLC in Amerika keine Rolle, da die Errichtung einer PLC-Infrastruktur nicht rentabel ist.

⁴⁷Fragen und Antworten zu RWE PowerNet.

http://www.powerline.de/relaunch/service/service_faq.htm#pn

sätzlich wurde ein Realisierungsverlust von 6 dB berücksichtigt. Es ließen sich Kanal-kapazitäten zwischen 207 Mbit/s (Referenzkanal 1 (gut), ca. 100 m Leitungslänge) und 20,5 Mbit/s (Referenzkanal 3 (schlecht), ca. 330 m Leitungslänge) erreichen. Eine Abschätzung der Datenraten bei einem realisierbaren Übertragungsverfahren ergab für eine 16QAM-Modulation Übertragungsgeschwindigkeiten zwischen 72,2 Mbit/s (Referenzkanal 1) und 7 Mbit/s (Referenzkanal 3).

In einer weiteren Versuchsanordnung ist das Sendespektrum auf die Bereiche 1,6-3,5 MHz, 4,2-5,8 MHz und 7,4-9,4 MHz (Nutzbandbreite 5,5 MHz, Sendeleistungsdichte $5 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{Hz}$, Sendeleistung $0,26 \text{ V}^2$, Realisierungsverlust 6 dB) begrenzt worden. Hier bewegten sich die theoretischen Kapazitätswerte zwischen 76,2 Mbit/s (Referenzkanal 1) und 12,5 Mbit/s (Referenzkanal 3). [ZD00]

Entwickler	Ascom ⁴⁸	Online ⁴⁹	PPC ⁵⁰
Anbieter	EnBW, RWE, Pfalzwerke	Avacon	MVV
benutzte Frequenzbänder	derzeit ca. 1,4–3,4; 3,8–5,8; 9,8–11,8 MHz	aus 2–15 MHz max. 4 Slots zu 500 kHz	derzeit 1,5–8; 8–12; 12–20 MHz
Frequenzen verschiebbar	ja	ja	ja
Modulationsverfahren	GMSK	OFDM-QAM32	DSSS
maximale Datenrate	4,2 Mbit/s	2 Mbit/s	2 Mbit/s
Repeater möglich	ja (Store & Forward)	ja (vollduplex)	ja (Store & Forward)
Verschlüsselung	RC4, 128 Bit	Blowfish, 128 Bit	fester Code bei DSSS, zusätzlich IPSec-ähnlich auf MAC-Layer, Länge: k. A.
Schlüsselmanagement	Diffie/Hellman	RSA	k. A.
Bandbreitenmanagement (QoS)	ja	ja	ja
Telefonie	ja (VoIP)	ja (separater Kanal)	ja

Tabelle 4.4: Übersicht der PLC-Systeme (nach [AZ01])

⁴⁸<http://www.ascom.de>

⁴⁹<http://www.online.de>

⁵⁰<http://www.ppc-ag.de>

4.2.3.3 Einsatzgebiete

Die Domäne der Powerline Communication liegt in der Steuerung und Regelung (Fernwirktechnik) von Systemen in der Gebäudetechnik (Heizung- und Lüftungssysteme etc.), beim Monitoring und der Funktionsüberwachung von elektrischen Anlagen. Das Fernauslesen von Zählerständen war eines der ersten Anwendungen der PLC-Technologie. Mit der Entwicklung zum Breitbandanschluss empfiehlt sich PLC als Internetzugang mit Always-on-Funktionalität. Die PLC-Anbieter versuchen Powerline Communication als Zugang zum PSTN zu etablieren und haben daher die Sprachübermittlung integriert. Über die Quality of Service Funktionalität von Powerline Communication kann hier keine Aussage getroffen werden, da die Standardisierung noch aussteht. Das von Ascom⁵¹ entwickelte PLC-System greift zur Sicherung einer bestimmten Dienstgüte auf Funktionen höherer Protokollschichten zurück. [AZ01]

Es kann aufgrund der bisher genannten Eigenschaften festgestellt werden, dass sich PLC-Systeme im derzeitigen Entwicklungsstand nicht zur Übertragung hochbitratiger isochroner Dienste eignen.

4.2.3.4 Marktchancen

Die Zukunft der PLC-Technik ist ungewiss. Nur 3 Anbieter sind zur Zeit aktiv in diesem Bereich tätig. Ein Zugang besteht in Essen und Mülheim/Ruhr durch RWE⁵², in Mannheim durch MVV⁵³ und Ellwangen durch EnBW⁵⁴. Andere Hersteller und EVUs (z.B. Nortel, Siemens, das Berliner Energieversorgungsunternehmen BeWAG und Oneline⁵⁵) haben sich bereits mangels Perspektive aus dem Markt zurückgezogen. Begründet werden diese Entscheidungen mit der durch den Gesetzgeber vorgegebenen Regelungen für die Emission elektromagnetischer Strahlungen. Insbesondere die niedrigen Grenzwerte der NB30 und die beabsichtigte Sperrung weiterer Frequenzen würden einen ökonomisch nicht zu rechtfertigenden Entwicklungsaufwand bedeuten.

⁵¹<http://www.ascom.com/ni/plcsolutions>

⁵²ŽIVADINOVIĆ, DUŠAN: *Internet aus der Steckdose nun auch im Fachhandel*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/dz-13.09.01-001/>

⁵³KURI, JÜRGEN: *Internet per Stromnetz in Mannheim*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/jk-25.09.01-002/>

⁵⁴WILDE, MICHAEL: *Neuer Powerline-Anlauf*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/mw-23.03.02-002/>

⁵⁵ŽIVADINOVIĆ, DUŠAN: *E.ON stoppt Powerline-Entwicklung*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/dz-01.12.01-002/>

RWE sieht bis Ende 2002 eine Steigerung der Datenrate auf 10 Mbit/s vor. Ein deutschlandweiter Ausbau⁵⁶ wird jedoch auf dichtbesiedelte Gebiete beschränkt bleiben. In ländlichen Gebieten sind die Leitungslängen so hoch, dass sie nicht unter Einhaltung der NB30 versorgt werden können. [AZ01]

Bis Ende 2001 nutzten 2 000 Haushalte den breitbandigen Zugang zum Internet über Powerline Communications. Langfristig wird für PLC ein Marktanteil von 12-15 % beim Breitband-Internet-Access erwartet. Im Bereich energienaher Dienste und weiteren Telemetrieapplikationen sollen die Nutzerzahlen höher liegen. Bei anderen Applikationen wie hochbitratiges Videostreaming wird PLC aufgrund der beschränkten Systemkapazität kein hoher Stellenwert eingeräumt. Bis zum Jahr 2010 wird in Deutschland ein Wachstum (CAGR (2002-2010): 63,7 %) auf rund 5 000 000 Haushalte prognostiziert. [BS01, Dör02]

4.2.4 Wireless Local Loop (WLL)

Für die Anbindung des Kunden über die letzte Meile sind neben leitungsgebundenen Verfahren mittels Cu-TAL, Koax, Lichtwellenleitern oder Energieversorgungsleitungen auch Funklösungen in Betrieb. Diese werden i.A. als Wireless Local Loop (WLL) bezeichnet. WLL-Strecken sind skalierbar von der einfachen ISDN-Verbindung bis hin zu Breitbandanwendungen mit 155 Mbit/s. Sie finden vor allem in spärlich besiedelten Gebieten und bei Providern Verwendung, die keine eigenen Access-Netze besitzen, da kostenintensive Tiefbauarbeiten vermieden werden können. Nach Errichtung einer Basisstation können neue Kunden relativ schnell in das Zugangsnetz eines Providers eingebunden werden. Im Gegensatz zu Wireless Local Area Networks zielen WLL-Systeme nur auf die Verbindung zwischen stationären Nutzern und dem Kommunikationsnetzwerk (Fixed Wireless Access). Im Vergleich zu den ebenfalls breitbandigen Satellitenverbindungen (Kapitel 4.2.5) ist die Flächenabdeckung einer WLL-Basisstation wesentlich geringer (Radius 5 km). Die gleichen Funkspektren können öfter verwendet werden.

4.2.4.1 Systeme und Normen

Die ersten WLL-Systeme wurden für die Verteilung von analogen Broadcast-Signalen entwickelt. Multi Channel Multi Point Distribution System (MMDS) ist ein Vertreter solcher Anlagen. Später entstanden digitale Systeme wie Multipoint Video Distribution System

⁵⁶ Fragen und Antworten zu RWE PowerNet.

http://www.powerline.de/relaunch/service/service_faq.htm#pn

(MVDS) oder Local Multipoint Distribution System (LMDS), die neben der Übertragung von Broadcast- und Multicast-Signalen für Breitband-Datenverbindungen genutzt werden konnten.

Ein Hindernis bei der Verbreitung von WLL-Lösungen war das Fehlen von Standards, die den interoperablen Betrieb von Geräten verschiedener Hersteller ermöglichen. Durch die IEEE wurde daher das Wireless Metropolitan Area Network (WMAN⁵⁷) im Standard IEEE 802.16 festgeschrieben und im Dezember 2001 verabschiedet⁵⁸. IEEE 802.16 verspricht eine Luftschnittstelle mit vielen Möglichkeiten für eine Herstellerdifferenzierung bei den Basisstationen und den Teilnehmerstationen ohne die Interoperabilität zu gefährden. In Europa werden Breitband-WLLs gegenwärtig innerhalb des ETSI BRAN (Broadband Radio Access Networks) Projektes als High Performance Radio Access (HIPERACCESS) standardisiert. HIPERACCESS ermöglicht einen drahtlosen Zugang über IP und ATM mit 25 Mbit/s Zugang für private Nutzer und den SOHO-Bereich.

4.2.4.2 Parameter der Datenübertragung mittels WLL

Bei Wireless Local Loop Systemen muss zwischen zwei Arten der Kommunikationsverbindung unterschieden werden. Point-to-Point (P2P) Lösungen sehen für jeden Empfänger eine Basisstation vor. Wegen der größeren Zahl der benötigten Sender ist dieser Ansatz zwar teurer, jeder Empfänger kann jedoch die gesamte Bandbreite der Funkverbindung nutzen. In Point-to-Multipoint (P2MP) Anlagen versorgt eine Basisstation alle aktiven Teilnehmer innerhalb einer Funkzelle. Ein Empfänger muss sich die verfügbare Bandbreite mit allen anderen Teilnehmern in der gleichen Funkzelle teilen, solange der Sender nicht mit mehreren Kanälen auf verschiedenen Frequenzbändern arbeitet.

Für Richtfunklösungen, die mit hohen Bitraten arbeiten, muss eine direkte Sichtverbindung ohne Störungen durch andere Gebäude, Bäume usw. gegeben sein. Der Einfluss solcher Hindernisse auf die Ausbreitung der Funkwellen kann mit Hilfe von Fresnel-Zonen (siehe Abbildung 4.7) beschrieben werden. Darunter sind Raumbereiche um die direkte Sichtlinie zwischen den Funkstationen zu verstehen, in denen Hindernisse die Funksignale beeinflussen. Je nach WLL-System werden Frequenzen bis 60 GHz genutzt.

Der Funkkanal lässt sich anders als leitungsgebundene Übertragungskanäle nur statis-

⁵⁷<http://www.wirelessman.org>

⁵⁸AHLERS, ERNST: *Internet per Funk statt Kabel*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/ea-07.12.01-000/>

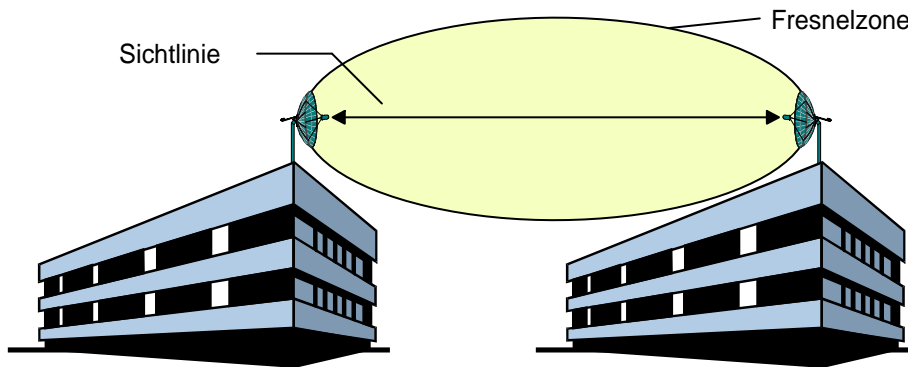


Abbildung 4.7: Darstellung einer Richtfunkverbindung

tisch beschreiben. Verschiedene Effekte beeinflussen die Empfangsqualität der Signale. Neben der Dämpfung sind hier vor allem Mehrwegeausbreitung und Gleichkanalstörungen zu berücksichtigen.

Jedes Signal unterliegt der durch atmosphärische Einflüsse⁵⁹ bedingten Freiraumdämpfung. Bei der Verwendung von Frequenzbändern oberhalb 10 GHz darf die mit der Entfernung exponentiell steigende Dämpfung nicht vernachlässigt werden. Bestimmte Wittersituationen können eine WLL-Verbindung beeinträchtigen oder sogar ganz unterbinden. Die Mehrwegeausbreitung ist auf den Umstand zurückzuführen, dass das gesendete Signal den Empfänger nicht nur auf dem direkten Weg (Sichtlinie) erreicht. Reflexionen und Beugungseffekte an Hindernissen führen zu einer Überlagerung der Signalkomponenten mehrerer indirekter Signalwege am Empfänger. Die Signalkomponenten weisen unterschiedliche Laufzeiten und Dämpfungen auf, so dass es zu einer Verbreiterung der Impulse kommt. Die dadurch hervorgerufenen Überlappung aufeinanderfolgender Impulse nennt man Intersymbolinterferenzen (ISI), die sich im Frequenzspektrum als frequenzselektives Fading äußern.

Gleichkanalstörungen sind ein Problem zellularer Funksysteme. Den einzelnen Zellen werden nach einem Muster Sendefrequenzen zugeordnet, die sich entsprechend einem so genannten Reuse-Faktor regelmäßig wiederholen. Diese Vorgehensweise führt zu Gleichkanalstörungen, da die Stationen auch die gedämpften Signale der entfernter liegenden Zellen gleicher Frequenz empfangen. Eine Erhöhung des Reuse-Faktors verrin-

⁵⁹Dämpfungskomponenten entstehen durch Resonanzeffekte auf molekularer Ebene mit den in der Luft enthaltenen Gasen oder Niederschlägen. Starker Regen kann bei Frequenzen über 30 GHz Dämpfungswerte von mehr als 10 dB/km verursachen.

gert die Gleichkanalstörungen. Sie bedeutet jedoch eine Erhöhung der Zahl der benötigten Trägerfrequenzen. [DHR96]

4.2.4.3 Details des WMAN-Standards IEEE 802.16

WMAN dient als Übertragungsmedium zwischen Provider und Kunden, wobei der typische Nutzer im SOHO-Bereich zu finden ist. Wireless Metropolitan Area Networks sind ausschließlich für den stationären Betrieb konzipiert worden und somit ausgerichtet auf den Bedarf nach breitbandigen Zugängen für Gebäude. IEEE 802.16 ist in vielen Fällen die günstigere Lösung gegenüber kabelgebundenen Alternativen. Der Standard IEEE 802.16 umfasst die Luftschnittstelle, einschließlich der Medium Access Control Schicht (MAC) und der Physical Layer (PHY), breitbandiger Point-to-Multipoint Zugangssysteme. Die MAC-Ebene ist darauf ausgerichtet, mehrere für einen bestimmten Einsatzzweck oder Frequenzbereich optimierte Physical Layer Spezifikationen zu unterstützen. Die MAC-Layer wurde so flexibel ausgelegt, dass sie jede stationäre Broadband Wireless Access (BWA) Technologie unabhängig vom Funkspektrum und Marktbedingungen unterstützt. Die im Standard festgehaltene Spezifikation der Bitübertragungsschicht ist allgemein anwendbar auf Systeme, die im Bereich des Standards IEEE 802.16 zwischen 10 und 66 GHz arbeiten. Im Addendum IEEE 802.16a⁶⁰ werden lizenzierte Frequenzbänder zwischen 2 und 11 GHz und in der Ergänzung IEEE 802.16b⁶¹ lizenzfreie Frequenzbänder zwischen 5 und 6 GHz berücksichtigt. Die Erweiterungen IEEE 802.16a und 802.16b unterstützen zudem die Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Modulation und das Automatic Repeat Request (ARQ) Verfahren für eine gesicherte Datenübertragung, bei dem der Empfänger Fehler erkennt und um Übertragungswiederholung ersucht. Über den 802.16b Mesh Mode wird optional eine Subscriber-to-Subscriber Kommunikation ermöglicht. [MESW01]

WMAN-Übertragungsparameter

In der Nomenklatur des Standards bezeichnet BS die Basisstation. Sie verbindet die Subscriber Stations (SS) mit den öffentlichen Fernnetzen. Die Subscriber- oder Teilneh-

⁶⁰„Amendment Project IEEE P802.16a Media Access Control Modifications and Additional Physical Layer for 2-11 GHz“

⁶¹„Amendment Project IEEE P802.16b Media Access Control Modifications and Additional Physical Layer for License-Exempt Frequencies – Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network (WirelessHUMAN)“

mer-Station ist typischerweise für die Versorgung eines Gebäudes (Büro- oder Wohnhaus) zuständig. Jedwede Kommunikation wird im Unterschied zu einem LAN über die Basisstation gesteuert. Es können gleichzeitig mehrere Applikationen mit verschiedenen Quality of Service Level übermittelt werden.

WMAN arbeitet mit Breitbandkanälen mit Kanalbreiten von 20, 25 oder 28 MHz und erreicht so hohe Transferraten (siehe Tabelle 4.5) sowohl im Down- als auch im Uplink. Aufgrund der 3 möglichen Kanalbreiten können die Gerätehersteller flexibel auf nationale spektrale Bestimmungen reagieren. IEEE 802.16 definiert Datenraten zwischen 32 und 134,4 Mbit/s.

Die Physical Layer passt sich dynamisch den aktuellen Bedingungen der Luftschnittstelle mittels so genannter Burst Profiles an. Die Burst Profiles definieren die Modulation (QPSK, QAM16 oder QAM64) und die FEC für eine Anzahl von Datenpaketen. Durch diese Technik wird in Echtzeit der beste Kompromiss aus Kapazität und gesicherter Übertragung bestimmt. Auf dem Downlink wird ein spezifischer Burst durch IDs an eine SS gebunden. Zum Senden von Daten wird der Subscriber Station durch die BS ein Zeitschlitz variabler Länge zugewiesen. Für den Duplex-Betrieb stehen zwei Verfahren zur Verfügung: Time-Division Duplex (TDD) und Frequency-Division Duplex (FDD). Im TDD-Mode teilen sich Downlink und Uplink den gleichen HF-Kanal. Aus Kostengründen wird auf gleichzeitiges Senden und Empfangen verzichtet. TDD ermöglicht eine dynamische Asymmetrie zwischen Up- und Downstream. Der FDD-Modus verwendet für den Downlink und Uplink getrennte Frequenzbereiche und ist damit auf eine statische Asymmetrie festgelegt. Um kostengünstige Geräte zu ermöglichen, werden beim Frequency-Division Duplex im Halbduplex kommunizierende SSs unterstützt.

Kanalbreite MHz	Symbolrate MSymbole/s	Bitrate QPSK Mbit/s	Bitrate 16-QAM Mbit/s	Bitrate 64-QAM Mbit/s
20	16	32	64	96
25	20	40	80	120
28	22,4	44,8	89,6	134,4

Tabelle 4.5: Bitraten in WMAN-Systemen

In der MAC Schicht wird die Verbindung zum Netzwerk hergestellt. Die IEEE 802.16 MAC wurde für den Einsatz in einem Point-to-Multipoint Metropolitan Area Network konzipiert. Insbesondere wurde die MAC auf den Einsatz bei der drahtlosen Kommunikation

zugeschnitten, da die effiziente Nutzung des Frequenzspektrums ein Hauptmerkmal dieser MAC ist. Der Informationsssaustausch verläuft verbindungsorientiert. Die IEEE 802.16 MAC arbeitet protokollunabhängig und kann somit IPv4, IPv6, ATM, Ethernet oder andere Datagramme transportieren. Die Funktionen zur Sicherung der Daten gegen unberechtigten Zugriff sind ebenfalls in der MAC-Schicht angesiedelt. Sie beherrscht die Identifikationsüberprüfung (Authentication) mittels X.509 Zertifikaten/RSA Public Key System und Verschlüsselung der Daten durch einen 56-bit DES (CBC Mode) Schlüssel.

Die MAC beherrscht sowohl die Kommunikation im contentionless und contention-based Modus. Im contentionless Mode dürfen Stationen nur in ihnen nach Aufforderung zugeordneten Zeitschlitzten Daten übermitteln, womit die Stabilität des Informationsaustauschs erhöht wird. Bei der contention-based Signalübertragung können alle Stationen unabhängig senden, um die Effizienz der Kommunikation zu erhöhen. Infolgedessen können in dieser Betriebsart Kollisionen auftreten, die durch die Basisstation über das truncated exponential backoff Verfahren aufgelöst werden. [MESW01]

Unterstützung von Dienstgütemerkmalen

Die Medium Access Control Ebene unterstützt hunderte von Nutzern pro Kanal mit hoher Bandbreite im up- und downstream sowie die simultane Übertragung von zeitkontinuierlichem und Verkehr mit Burstcharakter. Diesen vielfältigen Quality of Service Anforderungen wird mit einer flexiblen QoS Integration Rechnung getragen. Die im Kern auf der DOCSIS⁶² (siehe Kapitel 4.3.2.1 und 4.3.2.2) Spezifikation beruhende WMAN MAC unterstützt 4 Serviceklassen (CBR, rt-VBR, nrt-VBR und BE), die innerhalb der Klassen feiner unterteilt werden können. Der Wireless Metropolitan Area Network Standard sieht für die genannten Service Klassen 4 Dienstkategorien zur Übertragung vor:

- Unsolicited Grant Services (UGS) für Constant Bit Rate (CBR) oder CBR-ähnliche Datenströme, z.B. T1/E1 Kopplung
- Real-time Polling Services (rtPS) für Echtzeit VBR (rt-VBR) Daten wie die Übertragung von MPEG Video
- Non-real-time Polling Services (nrtPS) für Nicht-Echtzeit Informationsströme, mit besserem als Best-Effort Service (z.B. bandbreitenintensive Datenübertragung)
- Best Effort (BE) für Best-Effort Traffic

⁶²Data Over Cable Service Interface Specification

Der Unsolicited Grant Service sieht keine explizite Bandbreitenanforderung durch die SS vor. Contention requests dürfen innerhalb des UGS nicht benutzt werden. Es ist zudem keine Möglichkeit vorgesehen, Unicast Anforderungen zu erzeugen. Über den sogenannten Grant Management (GM) sub-header kann anhand des Slip Indicator Feldes bestimmt werden, ob ein Überhang im Sendepuffer durch Taktversatz hervorgerufen wurde. Das Poll-me Bit zeigt an, dass das Terminal abgefragt (polled) werden muss. In dem für rt-VBR Flows vorgesehenen Real-time Polling Services ist die Benutzung von contention requests verboten. Die Terminals werden oft genug abgefragt, um die Delay Anforderungen des Datenstroms zu erfüllen. Bandbreite wird durch BW request messages angefordert. Der Grant Management sub-header kann dazu benutzt werden, eine neue Anforderung für einen Zeitschlitz huckepack an jede übertragene Protocol Data Unit anzuhängen. Der Non-real-time Polling Services arbeitet wie der rtPS, nur das Polling der Stationen wird weniger häufig durchgeführt. Contention requests sind hier erlaubt. Neuer Bedarf nach Zeitschlitzten kann über die aktuelle PDU angemeldet werden. Der Best-Effort Service ist für allgemeine Daten wie z.B. HTTP, E-Mails usw. geplant. Es gibt keinerlei Zusagen bezüglich eines Quality of Service. Contention Requests sind erlaubt. Zeitschlitzanforderungen können wie in den anderen Serviceklassen huckepack an jede übertragene PDU angehängt werden und müssen so nicht durch weitere Datagramme im contention-based Modus verschickt werden.

Die Protokollunabhängigkeit wird über verschiedene Konvergenzschichten realisiert. Die ATM Convergence Sublayer unterstützt VP (Virtual Path) switched connections und VC (Virtual Channel) switched connections sowie End-to-End Signalisierung dynamisch kreierter Verbindungen (SVCs und soft PVCs). ATM Header Suppression steht ebenso wie voller Quality of Service Support zur Verfügung. Die Packet Convergence Sublayer bietet Unterstützung für Ethernet, IPv4 und IPv6. Die Unterdrückung des Payload Header ist in einer allgemeinen und einer IP-spezifischen Variante vorhanden. Die Packet Convergence Sublayer verfügt über eine volle QoS Unterstützung. Die Integration zusätzlicher Protokolle wie PPP und MPLS ist für die Zukunft geplant.

Die Anforderung eines Upstream-Slots (BW Request) gelten immer für eine Verbindung. Die Zuteilung durch die BS (BW Grant) kann für eine Connection (GPC) oder eine Subscriber Station (GPSS) gelten. Ersteres ist für Teilnehmerstationen mit wenigen aktiven Verbindungen geeignet. Im GPSS-Modus kann die SS Bandbreite selbständig zwischen den eigenen Verbindungen entsprechend den Dienstgüten-Anforderungen und Verkehrsverträgen umverteilen. Dies erlaubt eine schnellere Reaktion auf QoS Bedürfnisse. Der GPSS Modus wird verwendet, wenn eine SS mehrere Verbindungen zu verwalten hat.

[MESW01]

Wireless Local Loop Zugangsnetze nach IEEE 802.16 eignen sich aufgrund der direkten IP-Unterstützung und der Integration von Quality of Service Funktionen gut für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netz. Es muss jedoch beachtet werden, dass die hohe Bandbreite von bis zu 134,4 Mbit/s auf mehrere Nutzer verteilt wird. Die individuelle Datenrate für jeden Teilnehmer kann sich soweit verringern, dass einzelne hochbitratige Dienste (z.B. HDTV) nicht mehr angeboten werden können.

4.2.4.4 ETSI Broadband Radio Access Networks (BRAN)

Das European Telecommunications Standards Institute fasst unter dem Projektnamen Broadband Radio Access Networks (BRAN)⁶³ verschiedene Technologien und Einsatzgebiete für den drahtlosen Breitband-Zugang zusammen. BRAN beinhaltet Systeme für den fixen und mobilen drahtlosen Access und deckt Reichweiten zwischen 50 m und 5 km sowie Bandbreiten zwischen 25 Mbit/s und 155 Mbit/s ab. Die BRAN Architektur ist in der Abbildung 4.8 dargestellt. [TR 101 173]

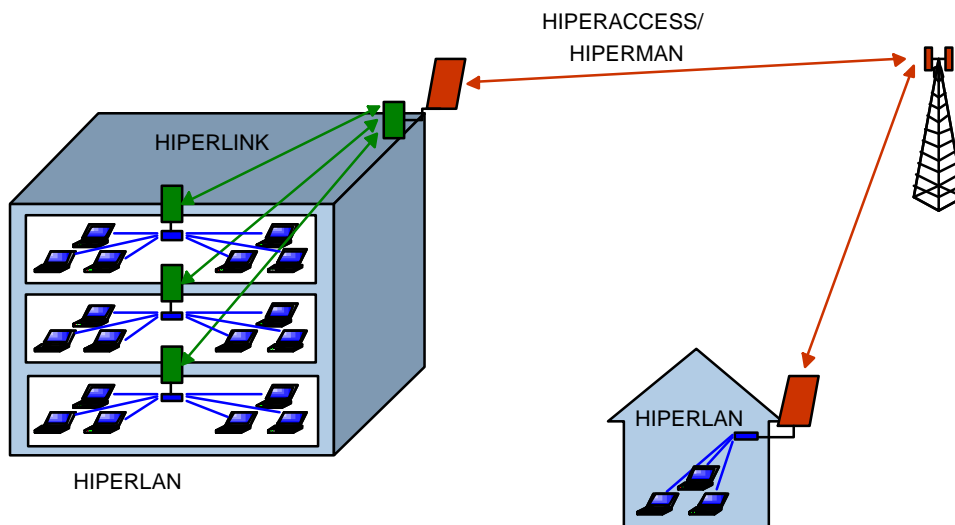


Abbildung 4.8: ETSI Broadband Radio Access Networks

HIPERLAN/2 (High Performance Radio Local Area Network 2) dient als mobiles, breitbandiges Access Network mit geringer Reichweite (≤ 50 m). Haupteinsatzgebiet ist die

⁶³<http://portal.etsi.org/bran/Summary.asp>

Indoor/Campus-Kommunikation. HIPERLAN/2 arbeitet im lizenzfreien 5 GHz Band und überträgt bis zu 54 Mbit/s auf der PHY. Der Transport von Echtzeit-Anwendungen wird durch Quality of Service Funktionen ermöglicht. Ethernet, IEEE 1394, IP und ATM werden durch eigene Convergence Layer unterstützt.

Die HIPERACCESS⁶⁴-Spezifikation definiert ein fixes Breitband-Access-System für Entfernungen bis 5 km. HIPERACCESS wurde als Point-to-Multipoint System ausgelegt und überträgt bis 25 Mbit/s. Das HIPERACCESS Spektrum liegt im Bereich zwischen 40,5-43,5 GHz. HIPERACCESS sieht den Transport von ATM, IP, Videoströmen und anderen Breitbanddiensten vor und integriert die Unterstützung von POTS und ISDN. Die hierfür nötige QoS Funktionalität ist vorhanden. Die Hauptzielgruppe für HIPERACCESS-Anlagen sind private Nutzer und kleinere Unternehmen. Die Arbeitsgruppen ETSI BRAN und IEEE SA (verantwortlich für die Empfehlung IEEE 802.16) arbeiten eng zusammen, um die Standards für fixe, drahtlose Breitbandzugangsnetze zu harmonisieren und die Interoperabilität zu gewährleisten. [TR 101 177]

HIPERMAN (High Performance Radio Metropolitan Area Network) bedient das gleiche Einsatzspektrum wie HIPERACCESS. Das verwendete Spektrum liegt zwischen 2 und 11 GHz. Die Luftschnittstelle ist optimiert für P2MP Konfigurationen, erlaubt jedoch auch den Einsatz von MP2MP Systemen. Die HIPERMAN-Spezifikation sieht die Verwendung der IEEE 802.16 MAC vor.

HIPERLINK (High Performance Radio LINK) ist als statische Point-to-Point Verbindung zwischen HIPERLAN and HIPERACCESS-Anlagen konzipiert worden. Die Datenrate beträgt maximal 155 Mbit/s bei einer Reichweite von 150 m. HIPERLINK Systeme arbeiten bei 17 GHz (lizenzfrei). Die Arbeit an der Standardisierung hat noch nicht begonnen. [TR 101 177]

4.2.4.5 Ausblick

Der breite Einsatz der WLL-Systeme wird neben dem begrenzten Frequenzspektrum und anderen funkspezifischen Störeinflüssen (Funkschatten, Mehrwegeausbreitung usw.) vor allem durch hohe Gerätekosten verhindert. Der rasche Preisverfall des WLL-Equipments wird jedoch die Position der Funklösungen gegenüber den Kabelnetzen verbessern, da in Kabelnetzen 80 % der Kosten auf die Installation und nur 20 % auf die Geräteausstattung entfallen, während sich die Relation in Funknetzen entgegengesetzt verhält. [Car01]
Aufgrund der Beschränkung der Ressource „Frequenz“ liegt die Anzahl Teilnehmer, die

⁶⁴High Performance Radio ACCESS network

per WLL mit einem Breitband-Zugang versorgt werden können, unter der von kabelgebundenen Access-Netzen. WLL kann daher nur als komplementäre Anschlusstechnologie angesehen werden. Dessen Vorteile liegen in der kurzen Zeit für den Aufbau einer Infrastruktur sowie der wirtschaftlich vertretbaren Erreichbarkeit von Nutzern in mittel bis schwach besiedelten Räumen. Studien gehen davon aus, dass bis 2010 über 5 000 000⁶⁵ Teilnehmer per WLL angeschlossen sind. Es wird eine Compound Annual Growth Rate von 76,9 % zwischen 2001 und 2010 prognostiziert. [BS01]

Aktuelle Meldungen zeigen jedoch, dass die Marktbedingungen noch nicht optimal sind. Trotz der Vorteile, die sich aus der Nutzung von Wireless Local Loop ergeben, schrumpft^{66,67} nach anfänglichen Erfolgen die Zahl der Anbieter. Nach Landtel, Callino und Firstmark ziehen sich auch Kommunikationsriesen wie Arcor mit ArcTel und British Telecom aus dem Markt zurück.

4.2.5 Satellitenübertragung

Die Datenübertragung mittels Satelliten ist besonders geeignet für strukturschwache Regionen⁶⁸ bzw. gering besiedelte Gebiete, bei der ein Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur mit Breitband-Zugängen über leitungsgebundene Netze aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht möglich ist. Der Internet-Access ist via Satellit flächendeckend verfügbar. Der Teilnehmer benötigt nur eine Parabolantenne mit digital-tauglichem LNB und einem Receiver, der die Daten aus dem Satellitensignal aufbereitet. [FF00]

⁶⁵In der Studie wurden nur „klassische“ Point-to-Point und Point-to-Multipoint-WLL-Anschlussnetze berücksichtigt.

⁶⁶VAHLIDIEK, AXEL: *Kein Wireless Local Loop mehr von Arcor*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/axv-12.11.01-000/>

⁶⁷KURI, JÜRGEN: *Aus für „letzte Meile“ per Funk von British Telecom*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/jk-10.01.02-001/>

⁶⁸In einigen Regionen stellen Satelliten die einzige Möglichkeit zur Fernkommunikation dar.

4.2.5.1 Standards

Für den Datentransport über Satellitensysteme sind die folgenden ETSI Standards relevant: EN 300 421⁶⁹, EN 301 192⁷⁰, EN 301 790⁷¹, ETS 300 802⁷² und TR 101 202⁷³. Hierin werden die Parameter für den Transport der Daten innerhalb eines Digital Video Broadcasting (DVB) Streams (siehe Kapitel 4.2.5.3) spezifiziert und Interaktionskanäle für das Broadcastmedium Satellitenübertragung definiert.

4.2.5.2 Satellitensysteme

Satelliten werden hinsichtlich ihres Orbits klassifiziert. Bei den klassischen Systemen wird zwischen Geostationary Earth Orbit (GEO), Highly Inclined Elliptical Orbit (HEO), Medium Earth Orbit (MEO) und Low Earth Orbit (LEO) unterschieden. Daneben existieren Pläne für Kommunikationsplattformen auf Basis von Ballons oder Flugzeugen in grosser Höhe (HAP). Eine Übersicht der Systeme ist in der Tabelle 4.6 dargestellt. Sie können anhand ihrer *Höhe*, dem *Zeitraum*, in dem die Kommunikation mit einem Satelliten innerhalb eines ausgewählten Gebietes möglich ist, der *minimalen Anzahl an Satelliten* für eine weltweite Verfügbarkeit⁷⁴ und der Signallaufzeit (*Delay*) charakterisiert werden. [BWZ00, FF00]

Die meisten der Kommunikationssatelliten sind geostationär, d.h. sie kreisen über einem fixen Punkt auf der Erde. Hier liegt ihr Hauptvorteil, da die Antennen auf dem Boden nicht nachgeführt werden müssen. Geostationäre Satelliten bewegen sich in einer Umlaufbahn in etwa 36 000 km Höhe über dem Äquator. Das bedeutet jedoch, dass die Empfangsfeldstärke gering und deshalb mit hohen Sendeleistungen gearbeitet wird. Zudem sind die Laufzeiten der Signale zu hoch für die interaktive Kommunikation mit isochronen Inhalten.

LEO Satelliten bewegen sich in einem viel niedrigeren Orbit von ca. 1 000 km. Dies

⁶⁹ETSI EN 300 421: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*

⁷⁰ETSI EN 301 192: *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB specification for data broadcasting*

⁷¹ETSI EN 301 790: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*

⁷²ETSI ETS 300 802: *Digital Video Broadcasting (DVB); Network-independent protocols for DVB interactive services*

⁷³ETSI TR 101 202: *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for Data Broadcasting*

⁷⁴Die benötigte Anzahl der Satelliten ist reziprok zu deren Abdeckungsgebiet. Dies bewegt sich zwischen einem Drittel der Erdoberfläche und einem Gebiet von nur wenigen 100 km Durchmesser (spot beam).

Satelliten-system	Höhe km	Zeitraum h	Min. Zahl Satelliten	Delay ms
GEO	35 786	24	3	280
HEO	1 000 – 40 000	12 – 24	5 – 12	200 – 300
MEO	10 000 – 20 000	6 – 12	10 – 15	80 – 120
LEO	< 1 000	1,5	> 48	20 – 60
HAP	15 – 30	24	nach Bedarf	< 1

Tabelle 4.6: Übersicht der Satellitensysteme (nach [AD00, BWZ00])

bedeutet wesentlich geringere Latenzzeiten (≈ 20 ms) und reduzierte Sendeleistungen, was die Konstruktion von Antennen für die bidirektionale Kommunikation erleichtert und somit neben hohen Download- auch hohe Uploadraten ermöglicht. Aufgrund ihrer geringen Höhe ist die ausgeleuchtete Fläche ebenfalls kleiner. Es sind wesentlich mehr Satelliten (50-300) nötig, um die Erde komplett abzudecken (siehe Abbildung 4.9).

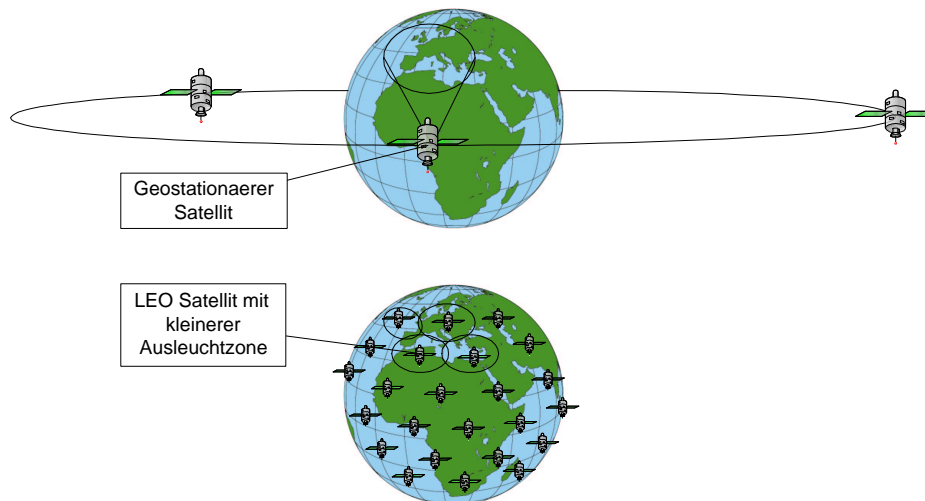


Abbildung 4.9: Ausleuchtzonen von GEO/LEO Satelliten

Ein weiterer Nachteil von LEO Satelliten ist ihre Relativbewegung⁷⁵ zur Erde. Es ist da-

⁷⁵Von einem Fixpunkt auf der Erde aus gesehen, wandern LEO-Satelliten von Horizont zu Horizont.

mit nicht möglich, sie auf bestimmte Punkte der Erde zu konzentrieren. Sie stellen Gebieten wie der Wüste und dem Ozean die gleichen Kapazitäten zur Verfügung wie in Ballungsräumen. Bei der Planung und Konstruktion der Satelliten muss die Kapazität an den Bedarf der Ballungsräume angepasst werden. Dies bedeutet wiederum, dass LEO Satelliten überdimensioniert und teuer sind. [AD00, FF00]

Einen weiteren alternativen Ansatz stellen die High Altitude Platforms (HAP) dar. HAPs sind an Ballons befestigte Relaisstationen in der Stratosphäre, die wesentlich günstiger als Satelliten aus 15-21 km Höhe die flächendeckende Funkversorgung übernehmen können. HAPs sind geostationär und können daher direkt über den Ballungszentren positioniert werden. Sie erlauben zudem Breitbandkommunikation über einfachere Antennenkonstruktionen und bewegen sich bei den Latenzzeiten an der Grenze des störungsfreien Übertragung isochroner Inhalte. [ADGM02, FF00]

Low Earth Orbit (LEO) Satelliten und High Altitude Platform Stations stellen einen gangbaren Weg dar, die Latenzzeiten zu verringern. Jedoch konnte bisher nicht gezeigt werden, ob sie kommerziell als Alternative vertretbar sind. In den vergangenen Jahren sind kommerzielle Projekte zur Übertragung von Sprache und anderen Diensten über LEO-Satelliten gestartet und wegen mangelnder Nachfrage finanziell gescheitert (z.B. Iridium).

4.2.5.3 Datenübertragung

Für die Datenübertragung via Satellit wird auf das Layer-2 Protokoll Digital Video Broadcasting (DVB) zurückgegriffen. Das Broadcastsignal des Satelliten besteht aus einem Multiplex mehrerer Programmkanäle. Innerhalb des DVB Multiplex können ein oder mehrere MPEG-kodierte Videoströme durch Datagramme anderer Netzwerkprotokolle mit Hilfe der Multi Protocol Encapsulation (MPE) ersetzt werden. MPE wurde für den Transport von IP-Paketen (inkl. Unicast-, Multicast- und Broadcast-Übertragung) optimiert, kann jedoch durch LLC/SNAP Encapsulation weitere Protokolle übermitteln. Der Interaktionskanal wird über andere Medien, wie z.B. PSTN realisiert (siehe Abbildung 4.10 und 4.11).

Die Datenrate des Signals ist abhängig vom verwendeten Modulationsschema und der Transponderbandbreite. Bei Satelliten, die für die Ausstrahlung von TV-Broadcast-Signalen verwendet werden, bewegt sich die Transponderbandbreite im Bereich von 26-54 MHz (-3 dB Bandbreite). Die Übertragungsgeschwindigkeit nach dem MPEG2 MUX erreicht Werte zwischen 32,8 und 68 Mbit/s (QPSK-Modulation). Reine Kommunikations-

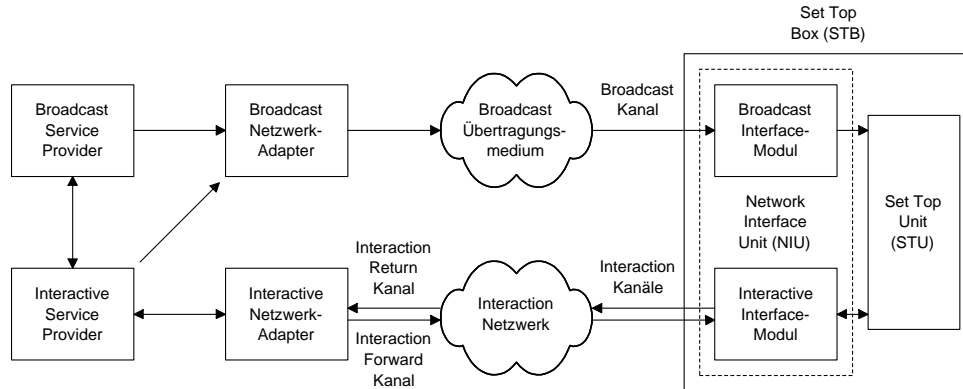


Abbildung 4.10: DVB-Referenzmodell für interaktive Systeme (nach [ETS 300 802])

satelliten verwenden 72 MHz Transponder, die mit großen Bodenstationen Bitraten bis 155 Mbit/s ermöglichen. Zukünftige Satelliten mit kleinen Öffnungswinkeln⁷⁶ sollen mit üblichen Empfangsantennen (\varnothing 90 cm) Geschwindigkeiten bis 100 Mbit/s zulassen. Diese Satelliten werden rückkanalfähig sein bei einer Datenrate im Upstream von 384 kbit/s. [BWZ00, EN 300 421, FF00, TR 101 202]

Der DVB-Datenstrom wird durch ein Zeitmultiplex in Kanäle aufgeteilt. Mittels Program Identifiers (PID) werden die Datenpakete der Kanäle den einzelnen Diensten zugeordnet. Infolge des Broadcast-Charakters des Satelliten-Downlinks können alle angeschlossenen Endgeräte alle Datenpakete empfangen. Ein Receiver filtert die für ihn bestimmten Datagramme mittels einer von der Bodenstation vorangestellten MAC-Adresse heraus. Da die Daten öffentlich zugänglich sind, ist deren Verschlüsselung unabdingbar. Die ETSI hat hierfür 3 Sicherheitsebenen definiert. In der DVB-Layer können die Daten via DVB Common Scrambling (nur Downlink) und User Scrambling (Up- und Downstream) geschützt werden. Eine Verschlüsselung der Daten kann nur in den höheren Schichten erfolgen (z.B. mit IPsec). [EN 301 790]

Neben der Nutzung des DVB-Protokolls besteht die Möglichkeit ATM als Link-Layer einzusetzen und darüber IP zu transportieren (IP over ATM). In einem Versuch (Downstream: ATM over Satellite mit 8 Mbit/s, Upstream: ISDN mit 64 kbit/s) der British Telecom wurde der Einfluss der Satellitenverbindung auf CBR und VBR Parameter geprüft. Als Ergebnis der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die Cell Delay Variation (CDV) mit 0,1 ms gering ausfällt. Satelliten sind somit für den Transport von CBR-Diensten ge-

⁷⁶Entsprechend einer geringen Abdeckungsfläche

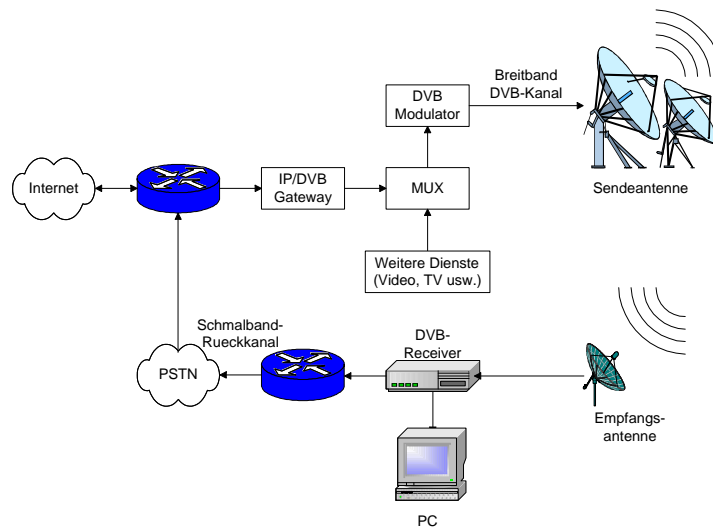


Abbildung 4.11: IP-Übertragung via Satellit im DVB-Datenstrom (nach [FF00])

eignet, wenn die Laufzeit von 240-280 ms (GEO) toleriert werden kann. ATM VCs wurden für die Separation von Netzwerk-Management- und Nutzer-Verkehr (inkl. der Umsetzung eines End-to-End QoS) genutzt. [BWZ00, FF00]

4.2.5.4 Anwendungsbereiche

Aufgrund der Ausrichtung auf Broadcast-Dienste und einer typischen Latenz von 280 ms sind GEO-Satelliten für einige Anwendungen weniger geeignet. Dazu gehören interaktive Spiele und Applikationen sowie die Sprachübertragung mit ungenügender Echo Cancellation. Der Datenaustausch über Standard-TCP-Stacks wird pro TCP-Session durch dessen Windowing Mechanismus und der hohen Hop-Delay auf Werte um 1 Mbit/s begrenzt. Mit Hilfe des UDP-Protokolls⁷⁷ oder eines an die Satellitenübertragung angepassten TCP-Layer kann der Durchsatz erhöht werden. Die genannten Anwendungen werden vor allem durch die hohe Propagation Delay beeinträchtigt. Mit dem Einsatz von LEO Satelliten oder High Altitude Platforms kann die Latenz auf Werte unter 20 ms reduziert werden. Dienstgüten können nur mit Hilfe höherer Protokollschichten garantiert werden, da die DVB-MAC keine QoS-Funktionalität aufweist. [FF00]

Die Domäne der Satellitenübertragung liegt beim Transport von Broadcast/Multicast-Diensten (Video, Audio oder Daten wie z.B. Video-on-Demand) oder asymmetrischem

⁷⁷Die Sicherung der Datenintegrität muss dann in höheren Schichten erfolgen.

Internet-Access (Rückverbindung über PSTN oder Zweiwege-Satellitenlink). [EBKY00]

4.2.5.5 Zukunftsaussichten

Ein Hauptvorteil des Breitband-Access über Satellit ist der flächendeckende Verfügbarkeit mit gleicher Dienstqualität über grosse Gebiete. Nach der Inbetriebnahme eines Satelliten-Transponders können Teilnehmer sehr schnell mit einem Zugang zu multimedialen Anwendungen versorgt werden. Satelliten können jedoch aufgrund diverser Einschränkungen die Infrastruktur terrestrischer Systeme nicht substituieren, sondern nur ergänzen. [EBKY00]

Das Interesse an satellitengestützten Übertragungsmöglichkeiten als wirtschaftlich interessante und kurzfristig verfügbare Alternative zu drahtgebundenen Übertragungswegen ist auch im Jahr 2001 gleichbleibend hoch gewesen. Ende 2001 konnte in Deutschland mit Einführung von rückkanalfähigen Systemen (Zweiwege-Satellitensysteme) für interaktive Anwendungen ein Zuwachs der Teilnehmerzahlen verzeichnet werden. [Dör02]

Zwischen 2003-2007 wird die nächste Generation von Satelliten ihren Betrieb aufnehmen. Sie werden aufgrund von integrierten Switching-Funktionen, Ressourcen-Management und geringerer Öffnungswinkel⁷⁸ weiter auf den Breitband-Access zielen. [FF00]

Andere Studien begrenzen die zukünftige Entwicklung von Zugangssystemen auf der Basis von GEO-Satelliten auf Nischenmärkte wie z.B. abgelegene Orte oder kurzfristige Anschlussrealisierungen. Satelliten könnten trotz ubiquitären Access nicht alle Teilnehmer mit Breitband-Anschlüssen versorgen, da die benötigten Kapazitätssteigerungen nicht realisierbar wären. Die Gesamtkapazität aller aktiven sowie der bis zum Jahre 2005 in Betrieb gehenden GEO-Satelliten mit Bezug zum Gebiet der EU ist heute schon weitgehend verplant. Innerhalb terrestrisch gut versorgter Gebiete Deutschlands wird deshalb für den klassischen IP-Unicast-Verkehr ein Marktanteil von nur 5 % der Breitband-Zugänge prognostiziert. In weniger gut erschlossenen Regionen kann der Marktanteil auf bis zu 10 % steigen. Im Bereich des IP-Multicasting sollen Satelliten aufgrund ihrer speziellen Vorzüge Marktanteile zwischen 30 und 50 % einnehmen. Die CAGR (2000-2010) wird auf 113,9 % bzw. auf 2 000 000 Anschlüsse im Jahr 2010 geschätzt.

Aufbau und Betrieb von LEO-Satellitensystemen bedingen enorm hohe Investitionsaufwendungen. Ein Erfolg von LEO-System wird deshalb nach dem Scheitern des Iridium-Projektes skeptisch gesehen.[BS01]

⁷⁸Somit können weniger Nutzer mit einer höheren Bandbreite versorgt werden.

4.3 2. Migrationsphase

In der 2. Migrationsphase erfolgt der Einsatz von Hybrid-Architekturen, um die Nachteile (z.B. Limitierung der Reichweite) der herkömmlichen Übertragungsmedien zu kompensieren. Hierzu werden optische Leiter vom Core-Netzwerk bis in das Access-Netz und somit näher an den Teilnehmer herangeführt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die Steigerung der Kapazität trotz weiterer Nutzung der bisherigen Übertragungswege. [Gil01]

4.3.1 Hybrid Fiber/Twisted Pair (HFTP)

In Hybrid Fiber/Twisted Pair Systemen wird die Zuführung (TAL-Bündelkabel) zwischen Ortsvermittlungsstelle und einem Verzweigungspunkt durch optische Medien ersetzt. Die Line Termination (LT) der kupferbasierten Netze wird in Richtung des Teilnehmers verlagert (siehe Abbildung 4.12).⁷⁹ Die Verbindung zwischen Kabelverzweiger und dem NT auf der Kundenseite wird weiterhin über Kupferdoppeladern realisiert. Daraus ergeben sich die folgenden Vorteile: Die Leitungswege der Cu-TAL werden verkürzt. Die übertragenen Signale unterliegen somit einer geringeren Dämpfung, womit eine Steigerung der Bandbreite ermöglicht wird. In herkömmlichen xDSL-Systemen wird wegen Übersprechereffekten nur eine beschränkte Anzahl von DSL-Nutzern pro Kabelstrang zugelassen (siehe Kapitel 4.2.1). Die Beschränkung wird aufgrund des Austausches des Hauptverzweigungskabels (OVSt–KVz) auf die Bündelkabel zwischen KVz und NT verlagert. Da diese weniger Teilnehmer versorgen, kann in HFTP-Netzen die Zahl der per DSL erreichbaren Haushalte erhöht werden.

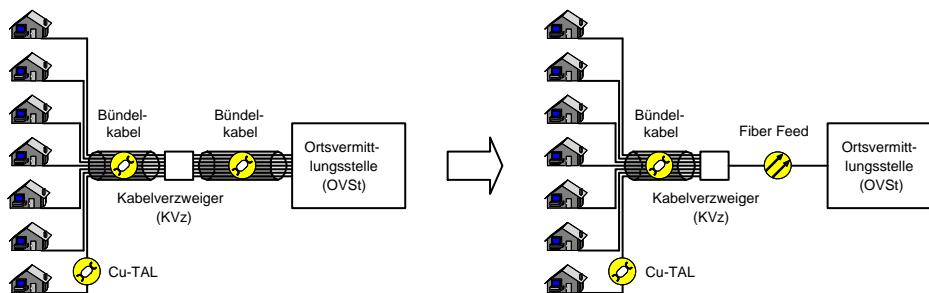


Abbildung 4.12: Hybrid Architektur Glasfaser – Kupfer-TAL

⁷⁹In ADSL-Systemen befindet sich der LT in der Ortsvermittlungsstelle (OVSt)

4.3.1.1 FTTx Topologien

Die HFTP-Systemarchitektur setzt sich aus den Referenzmodellen der optischen Zuführung (z.B. PON, siehe Abbildung 4.17 und Kapitel 4.4.1) und einer kupferbasierten Übertragungstechnologie (i.A. VDSL, siehe Abbildung 4.3 und Kapitel 4.2.1.3) zusammen. Es werden mehrere Fiber to the x Topologien unterschieden, die anhand des Standortes des ONUs charakterisiert werden (siehe Abbildung 4.13). Fiber to the Exchange (*FTTEx*) bezeichnet eine Infrastruktur, bei der die optische Zuführung in der Vermittlungsstelle⁸⁰ (Local Exchange) endet. Breitbandzugänge können via ADSL⁸¹/SDSL⁸² (in einem Radius von 5,5/4,5 km) oder VDSL⁸³ (1,5 km) geschaltet werden. Der ONU der Fiber to the Cabinet (*FTTCab*) Variante befindet sich in einem KVz. Die Entfernung zum Kunden beträgt weniger als 1,5 km. VDSL wird als Brücke zwischen Fiber Feed und CPE eingesetzt. Fiber to the Curb⁸⁴/Building⁸⁵ (*FTTC/B*) kennzeichnet eine Version, bei der der ONU weniger als 0,3 km vom Teilnehmer entfernt platziert wird. VDSL dient als Übertragungstechnik auf der Cu-TAL. Ein ONU konzentriert den Verkehr von ≈ 10 (*FTTC/B*), < 100 (*FTTCab*) oder ≈ 1000 (*FTTEx*) xDSL-Anschlüssen. Fiber to the Home (*FTTH*, siehe Kapitel 4.4.3) zählt nicht zu den hybriden Netzen, da es sich um ein rein optisches Netz handelt. [VGVG00]

4.3.1.2 Technologien für die optische Zuführung

Die Verbindung zwischen OLT und ONU erfolgt i.A. mittels Passive Optical Networks (siehe Kapitel 4.4.1 und Abbildung 4.5). Die FSAN-Initiative sieht in FTTx-Strukturen den Einsatz von ATM PONs (siehe Kapitel 4.4.1.2) vor.

Neben PONs (siehe Kapitel 4.4.1) lassen sich SONET/SDH-Strukturen (OC3/STM1 mit 155,52 Mbit/s und OC12/STM4 mit 622,08 Mbit/s) für den Fiber Feed nutzen. Die Vorteile dieser Technologie liegen in deren ausgereifter Technik und in der langjährigen Erfahrung, die Service Provider mit SONET/SDH in Backbone-Netzen sammeln konnten.

Der einfachste Weg zur Realisierung einer optischen Zuführung mittels SONET/SDH besteht in einer Stern-Topologie, in der jeder ONU über eine P2P-Link mit dem OLT

⁸⁰Um Kosten zu sparen, wird das System so weit wie möglich zentralisiert. Die Switching-Funktionalität des OLT wird daher aus den Local Exchanges in übergeordnete Vermittlungsstellen verschoben.

⁸¹Siehe Kapitel 4.2.1.1

⁸²Siehe Kapitel 4.2.1.2

⁸³Siehe Kapitel 4.2.1.3

⁸⁴Curb bezeichnet den Bordstein einer Strasse. Der ONU befindet sich vor dem Haus.

⁸⁵Im Falle von FTTB wird der Fiber Feed bis in den Keller eines Hauses geführt.

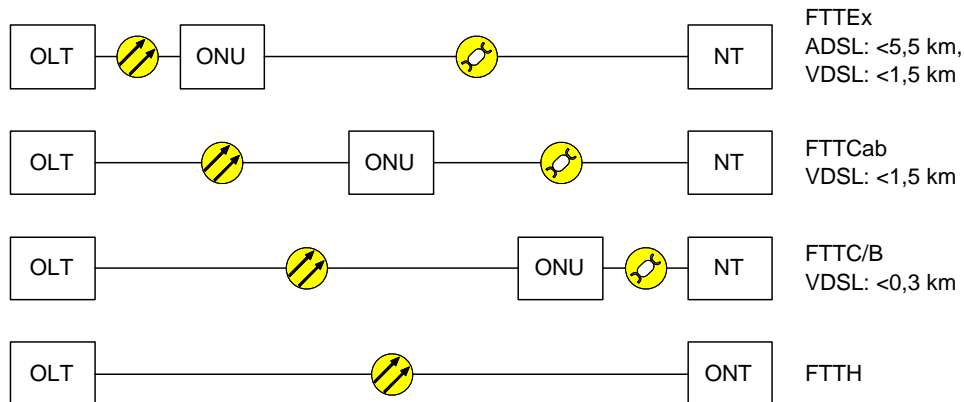


Abbildung 4.13: Fiber to the x Topologien

verbunden ist. Diese Lösung ist gegenüber einem PON aufgrund der höheren Anzahl von Schnittstellen im Access Node⁸⁶ (AN) nur unter höheren Kosten zu verwirklichen. Eine weitere Alternative ist ein ringförmige Struktur, in der die ONUs und der AN über Add/Drop Multiplexer mit dem Ring verbunden sind. Durch diesen Ansatz kann die Anzahl der Interfaces im Access Node verringert werden. Der größte Nachteil von SONET/SDH im Access-Bereich ist der ineffiziente Umgang mit Bandbreite. Die Bitrate wird fest eingestellt auf Werte, die sich an der zu erwartenden Peak-Datenrate orientieren. [CB00, VGVG00]

Hinsichtlich der Eignung für ein IP-basiertes Access-Network und des Dienstangebotes gelten die über VDSL getroffenen Aussagen. Da es sich bei Hybrid Fiber/Twisted Pair um keine „eigenständige“ Übertragungstechnologie handelt, sondern um die Kombination einer optischen Zuführung mit einer xDSL-Technik, können die in Kapitel 4.2.1 aufgeführten Prognosen für die zu erwartende Anzahl der per HFTP angeschlossenen Haushalte herangezogen werden.

4.3.2 Hybrid Fiber/Coax (HFC)

Die CATV-Netze wurden durch den Austausch der kaskadierten unidirektionalen Signalverstärker durch bidirektionale Varianten vom reinen Verteilnetz analoger Rundfunkprogramme zum rückkanalfähigen Access-Netz erweitert (siehe Kapitel 4.2.2). Auf-

⁸⁶Bezeichnung für die OLT-Funktionalität im FSAN-Referenzmodell

grund des Broadcast-Charakters des Mediums und der hohen Anzahlen angeschlossener Haushalte pro Kopfstation ist die individuelle Bandbreite für jeden Nutzer sehr gering. Zudem erhöhen sich die Antwortzeiten des Netzes unter hoher Last, so dass sich das CATV-Systeme nur bedingt als Access-Lösung für interaktive IP-basierte Dienste eignen. Der Ausbau mit optischen Medien vom Headend-Controller bis zum letzten Verstärker bzw. bis zum Netzwerk-Segment der „last mile“ ermöglicht neben der Bidirektionalität des Netzes eine enorme Steigerung der Bandbreite. Die Verwendung von optischen Medien in der Zuführung verbessert gleichzeitig die Signalqualität, da der größte Teil der Störungen (Rauschkomponenten und nichtlineare Verzerrungen) von den im Fiber Feed nicht benötigten Koax-Signalverstärkern verursacht wird. [BWC⁺99, Way99]

Die Grenze zwischen der optischen Zuführung und dem koax-basierten Teil des Zugangsnetzes wird durch so genannte Fiber Nodes markiert, die die Signale beider Teilnetze umsetzen (siehe Abbildung 4.14). Ein Fiber Node bedient typischerweise 100-500 (in größeren Netzsegmenten bis 2000) Haushalte. [TZM97]

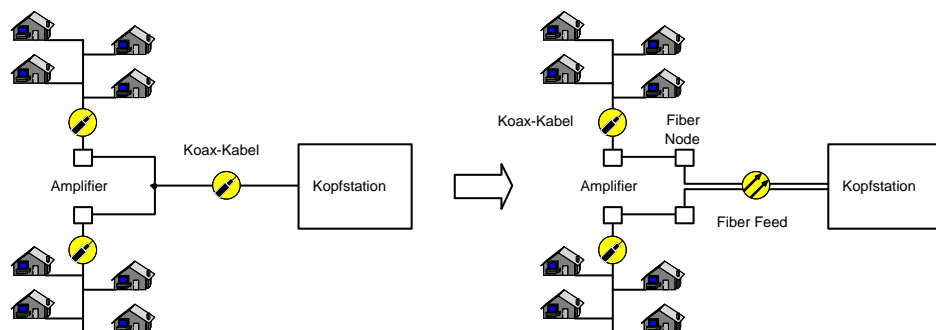


Abbildung 4.14: Hybrid Architektur Glasfaser – Koax

Durch Einführung einer HFC-Infrastruktur wird die Funktionalität des Headend-Controllers – die Steuerung des Upstream-Kanals – in die Fiber Nodes verlagert. Die CATV-Baumstruktur wird damit in kleinere Segmente zerteilt. Die Anzahl der Nutzer, die von einem gemeinsamen Headend-Controller bedient werden, verringert sich. Da die Bandbreite nur zwischen den an einem Fiber-Node angeschlossenen Haushalten geteilt wird, steht pro Teilnehmer mehr Übertragungskapazität zur Verfügung. Bei steigenden Bedarf nach Diensten mit hohen Bitraten kann die Anzahl der von einem Knoten bedienten Kunden durch die Installation zusätzlicher Knotenpunkte weiter reduziert und damit die Bandbreite für jeden Nutzer weiter gesteigert werden.

4.3.2.1 HFC Standards

Verschiedene Gremien haben an der Definition von Standards für den Transport von Daten über koaxiale Breitbandkabelnetze mitgewirkt. Übereinstimmungen zwischen den Spezifikationen der Institutionen bestehen nur teilweise. Hier soll ein Überblick zur Normungstätigkeit gegeben und die Unterschiede herausgestellt werden. [TZM97]

Die ETSI hat bereits frühzeitig an der Spezifikation des Digital Video Broadcasting (DVB) gearbeitet. Mittlerweile existieren eine Vielzahl HFC-relevanter ETSI-Standards. Die Datenübertragung in der Physical Layer wird durch EN 300 429⁸⁷ geregelt. Die höheren Schichten werden in einen network-dependent (EN 300 800⁸⁸, EN 300 803⁸⁹, TR 101 196⁹⁰) und einen network-independent (ETS 300 802⁹¹, TR 101 194⁹²) Part aufgeteilt. Neben dem Broadcasting von Audio- und Videodaten ermöglicht DVB den Transport generischer Daten. Der Standard EN 301 192⁹³ definiert deren Übertragung inklusive der Wiederholung in regelmäßigen oder unregelmäßigen Zeitabständen durch 4 Applikationsmodelle (Data Piping, Data Streaming, Multiprotocol Encapsulation und Data Carousel). Weitere ETSI-Normen spezifizieren die Schnittstellen zu anderen Kommunikationsnetzen.^{94,95,96} [TR 101 200]

Die MCNS⁹⁷ verabschiedete die Spezifikation für „Data Over Cable Service Interface Specifications“ DOCSIS (Version 1.1) im März 1999. Sie beinhaltet Funktionen zur Um-

⁸⁷ETSI EN 300 429: *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB framing structure, channel coding and modulation for cable systems.*

⁸⁸ETSI EN 300 800: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV).*

⁸⁹ETSI EN 300 803: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV).*

⁹⁰ETSI TR 101 196: *Digital Video Broadcasting (DVB); Guidelines for use of DVB return channel on Hybrid Fiber Coaxial (HFC) networks; Network-dependent layers for interactive services.*

⁹¹ETSI ETS 300 802: *Digital Video Broadcasting (DVB); Network-independent protocols for DVB interactive services.*

⁹²ETSI TR 101 194: *Digital Video Broadcasting (DVB); Guidelines for implementation and usage of the specification of network independent protocols for DVB interactive services.*

⁹³ETSI EN 301 192: *Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for data broadcasting.*

⁹⁴ETSI EN 300 815: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interfaces to Asynchronous Transfer Mode (ATM) networks.*

⁹⁵ETSI ETS 300 813: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interfaces to Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) networks.*

⁹⁶ETSI ETS 300 814: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interfaces to Synchronous Digital Hierarchy (SDH) networks.*

⁹⁷<http://www.cablemodem.com>

setzung eines QoS, um den Transport delay-intoleranter Dienste im HFC-Netz zu realisieren. Zur Verringerung des Overheads im Up- und Downstream ist der Einsatz der Payload Header Suppression vorgesehen. Im Januar 2002 erfolgte die Verabschiedung⁹⁸ der DOCSIS 2.0 Spezifikation. Auf der Grundlage von DOCSIS 1.0 und 1.1 wurde die Upstream-Geschwindigkeit verdreifacht, so dass ein symmetrischer Betrieb mit 30 Mbit/s möglich ist. HFC-Netze eignen sich aufgrund dessen für Videokonferenzen und Peer-to-Peer Applikationen. DOCSIS 2.0 sieht S-CDMA (Synchronous Code Division Multiple Access) und A-TDMA (Advanced Frequency Fragile Time Division Multiple Access) als Modulationstechniken vor. Trotz der gestiegenen Bandbreite im Upstream bleibt DOCSIS 2.0 abwärtskompatibel zu DOCSIS 1.0 und 1.1 sowie dem daraus abgeleiteten ITU-T J.112⁹⁹.

Die EuroDOCSIS Spezifikation beruht auf dem DOCSIS 1.0/1.1 Standard. Sie verbindet die in Europa gültige PHY nach DVB/ITU-T J.83 Annex A mit der DOCSIS MAC. [Cis00] Der Entwurf der Spezifikation der IEEE 802.14 Arbeitsgruppe¹⁰⁰ definiert sowohl die Bitübertragungsschicht im ISO/OSI Referenzmodell als auch ein MAC-Protokoll für die Zugriffskontrolle auf das Medium und die Erkennung und Auflösung von Kollisionen. IEEE 802.14 unterstützt konstante und variable Bitraten (CBR, VBR) und kann verbindungslos (CL) und verbindungsorientiert (CO) arbeiten. Im bidirektionalen Kommunikationsbetrieb sind P2P- und P2MP-Verbindungen sowie Broadcasting möglich. Bei der Konzipierung wurde auf die Kompatibilität zu bestehenden IEEE 802.x Standards, Normen im Videobereich, zu ATM und zu analogen und digitalen Fernsehübertragungen mit HDTV geachtet. Die IEEE 802.14 Working Group hat ihre Arbeit im März 2000 eingestellt.

Das Digital Audio Visual Council (DAVIC¹⁰¹) erarbeitet Definitionen von Schnittstellen und Protokollen für audiovisuelle Anwendungen und Dienste. Die Standardisierungsbemühungen des DAVIC im Bereich des Datentransports über Breitbandkabelnetze konzentrieren sich auf die Physical Layer und MAC im ISO/OSI Referenzmodell. Die Arbeiten der DAVIC sind mit in die Standardisierung der ETSI für eine bidirektionale Kommunikation in CATV-Netzen eingeflossen. Sie werden daher oft als DVB/DAVIC Spezifikationen bezeichnet.

Im Bereich der Physical Layer hängen die Spezifikationen wie folgt voneinander ab.

⁹⁸SCHWARTZ, MIKE: *CableLabs® Completes DOCSIS™ 2.0 Specs, Enabling More Advanced Modems*.
http://www.cablelabs.com/news_room/PR/02_pr_docsis_2dot0_011602.html

⁹⁹ITU-T RECOMMENDATION J.112: *Transmission systems for interactive cable television services*.

¹⁰⁰<http://www.walkingdog.com/catv/index.htm>

¹⁰¹<http://www.davic.org>

Grundlage für die ITU-T Empfehlung J.83¹⁰² Annex A (European networks) ist der europäische DVB-Standard EN 300 429 der ETSI. Die PHY-Definition der MCNS DOCSIS bildete die Basis für ITU-T J.83 Annex B. Die PHY der IEEE 802.14 Norm entspricht ITU-T J.83 Annex A und B. Das Digital Audio Video Council (DAVIC¹⁰³) hat eine eigenständige Spezifikation für die Physical Layer entwickelt. Die Unterschiede in den Spezifikationen der genannten Gremien bestehen u.a. im Bereich Scrambling/Descrambling (Generator-Polynom), in der Fehlerkorrektur mittels Reed-Solomon-Code (Länge und Generator-Polynom), der Tiefe des Interleavers, der Symbolrate, der Signal-Impulsform, der Anzahl der Stufen der QAM, dem Frame Format¹⁰⁴ und beim Einsatz eines Trellis-Codes. Einen Überblick dieser Details liefert [Way99].

Weitere Unterschiede zwischen den Standards betreffen die Media Access Control. Im Abschnitt „Media Access Control in HFC-Netzen“ auf Seite 117 werden die MAC-Protokolle der IEEE 802.14 und MCNS DOCSIS näher erläutert.

4.3.2.2 Datenübertragung in HFC-Netzen

Die Umstrukturierung des CATV-Netzes zu einem Full-Service-Network bedeutet neben der Erhöhung der Übertragungsbandbreite von 450 auf 862 MHz, der Ausstattung mit bidirektionalen Komponenten auch einen Umbau zu einer Sternstruktur mit kleineren Netzclustern. Die Anbindung dieser Cluster muss aufgrund der hohen Verkehrsbündelung mit optischen Medien erfolgen.

Werden die Fiber Nodes (elektro-optische Konverter/Multiplexer, siehe Abbildung 4.14) der LWL-Zuführung und/oder Verstärker durch Switches ersetzt, kann netzinterner Verkehr ohne den Headend-Controller vermittelt werden. Dieser kann entsprechend kleiner dimensioniert werden. Werden die Leitungen zwischen Headend-Controller und Switch als Punkt-zu-Punkt-Verbindung realisiert, kann das Kollisionsmanagement in die Switches verlagert werden, die dann die Wurzeln mehrerer kleiner Segmente darstellen. Mit der Verkleinerung der Contention Domain¹⁰⁵ sinkt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kollisionen. Infolgedessen kann die durchschnittliche Antwortzeit verringert

¹⁰²ITU-T RECOMMENDATION J.83: *Digital multi-programme systems for television, sound and data services for cable distribution*.

¹⁰³<http://www.davic.org>

¹⁰⁴Während IEEE 802.14 nur auf die Übertragung von ATM- und Ethernet PDU optimiert wurde, sieht DVB/DAVIC und DOCSIS zusätzlich den Transport von MPEG2 Strömen vor. Im DVB/DAVIC und DOCSIS Frame Format werden ATM PDUs nicht direkt, sondern im MPEG2 Datenstrom übertragen.

¹⁰⁵Entspricht der Collision Domain in Ethernet-Netzen; siehe Abschnitt „Media Access Control in HFC-Netzen“ auf Seite 117.

werden. [SSWR96b]

Beim Ausbau der alten CATV-Broadcastnetze werden von einigen Anbietern¹⁰⁶ der Netzebene 4 – insbesondere als Teil von Wohnungssanierungen – die ursprünglichen, baumförmigen Netze zu einer Vollsternstruktur umgerüstet (siehe Abbildung 4.15). Im Gegensatz zur Baumstruktur ist dann jeder Haushalt direkt mit dem im Keller befindlichen Hausverstärker verbunden. Jedem Teilnehmer steht in dieser Variante die Bandbreite des Mediums dediziert zur Verfügung. Eine flächendeckende Restrukturierung der BK-Netze zu sternförmigen Access-Systemen ist jedoch unwahrscheinlich. Neben den hohen Kosten für deren Installation sind in den meisten Fällen Umbaumaßnahmen direkt in den Wohnungen der Teilnehmer nötig.

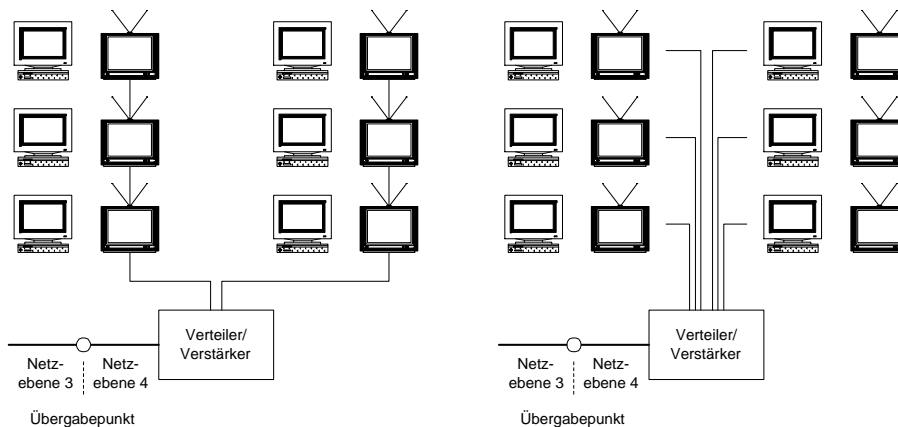


Abbildung 4.15: Baum- und Vollsternstruktur in Breitbandkabelnetzen

Im europäischen Raum findet die Datenübertragung auf dem Downlink vorwiegend im Frequenzbereich¹⁰⁷ zwischen 450 und 862 MHz und im Uplink zwischen 5 und 65 MHz statt (siehe Abbildung 4.16). Im Return Channel (Upstream) können Daten mit 1,544 oder 3,088 Mbit/s versandt werden. Im Downstream erreichen HFC-Systeme bis zu 38,1 Mbit/s pro Kanal (7,92 MHz Bandbreite, 6,89 MBaud/s, 64QAM Modulation) bzw. 52 Mbit/s (256QAM) im MPEG2 Transport Layer, in dem übergeordnete Protokolle (ATM, IP) mittels einer Konvergenz-Schicht übertragen werden können. [EN 300 429, ETS 300 800, GSS99, J.112, J.112A, SSWR96b]

¹⁰⁶ Voraussetzungen für den Anschluss an das Telecolumbus CATV-Angebot Infocity.

<http://www.telecolumbus.de/dienste/internetplus.php3>

¹⁰⁷ Die unteren Frequenzen sind mit analogen und digitalen Fernseh- und Radioprogrammen belegt.

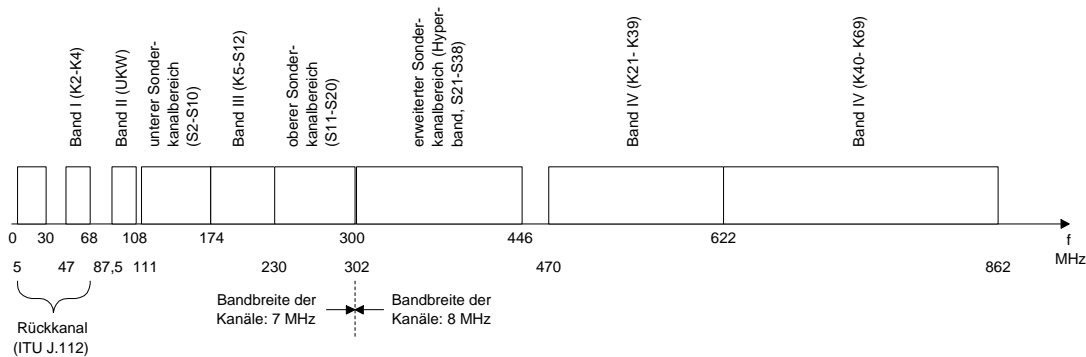


Abbildung 4.16: Frequenzspektrum in BK-Netzen (nach [BM02], [Vog98])

Die DAVIC¹⁰⁸, DOCSIS und IEEE 802.14 Spezifikationen erreichen aufgrund anderer Kanalaraster, Modulationsverfahren usw. abweichende Übertragungsraten im Up- und Downstream (siehe Tabelle 4.7). [Cis99, EG 202 306]

Der Broadcast-Kanal transportiert einen kontinuierlichen Strom von Paketen/Zellen. Die angeschlossenen Stationen empfangen den 8 MHz Kanal, der die kodierten Informationen enthält und erkennen anhand einer mitgesendeten Adresse die für sie bestimmten Daten. Der Upstream-Kanal wird in einzelne Time-Slots aufgeteilt, die über ein MAC-Protokoll (siehe Abschnitt „Media Access Control in HFC-Netzen“ auf Seite 117) den Stationen zugewiesen werden, die Daten verschicken wollen. Diese Vorgehensweise besitzt zwei wichtige Auswirkungen auf die Leistung des Netzes. Einerseits kann so ein effizientes, statistisches Multiplexing der Kapazität über alle aktiven Teilnehmer realisiert werden, so dass ein einzelner Nutzer kurzzeitig sehr hohe Bandbreiten abrufen kann. Auf der anderen Seite kann zu Zeiten hoher Aktivität vieler Haushalte die mittlere Datenrate auf ein Maß sinken, in dem die Dienstgüten für ein Full-Service-Network nicht garantiert werden können. Bei der Dimensionierung des Netzes muss darauf geachtet werden, dass die Nutzung des Mediums nur bedingt vorhersehbar ist. [EBKY00]

Durch den Broadcast-Charakter des HFC-Netzes sind gegenüber P2P-Links (z.B. xDSL) verstärkte Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Prinzipiell kann jeder Teilnehmer den gesamten Verkehr des eigenen Netzsegmentes mitschneiden. Sensible Informationen bedürfen daher einer verschlüsselten Übertragung. IEEE 802.14 und DOCSIS sehen eine Verschlüsselung des Datenverkehrs mit einem 56 Bit DES Schlüssel vor. [EBKY00]

¹⁰⁸DAVIC PART 08: *Lower layer protocols and physical interfaces*.

Parameter	DVB/DAVIC	MCNS DOCSIS 1.x	EuroDOCSIS	IEEE 802.14
Physical Layer	ETSI EN 300 429/ ITU-T J.83 Annex A, 8 MHz Kanalbandbreite, Upstream 5-65 MHz	ITU-T J.83 Annex B, 6 MHz Kanalbandbreite, Upstream 5-42 MHz	ETSI EN 300 429/ ITU-T J.83 Annex A, 8 MHz Kanalbandbreite, Upstream 5-65 MHz	ITU-T J.83 Annex A/B, 6/8 MHz Kanal- bandbreite, Upstream 5-42/65 MHz
Modulation stream	16/32/64/128/256QAM	64/256QAM	64/256QAM	16/32/64QAM bzw. 64/256QAM
Symbolrate stream	max. 6,92 MBaud	max. 5,36 MBaud		5,3/6,89 MBaud
Bitrate Downstream	64QAM: 38 Mbit/s, 256QAM: 52 Mbit/s	64QAM: 27 Mbit/s, 256QAM: 42 Mbit/s	64QAM: 38 Mbit/s, 256QAM: 52 Mbit/s	64QAM: 27 Mbit/s/ 64QAM: 38 Mbit/s, 256QAM: 52 Mbit/s
Bitrate, Modulation Upstream	1,544 Mbit/s oder 3,088 Mbit/s, DQPSK	max. 5,12 Mbit/s mit QPSK/ max 10,24 Mbit/s mit 16QAM	max. 5,12 Mbit/s mit QPSK/ max 10,24 Mbit/s mit 16QAM	
Basisprotokoll	ATM Zelltransport, IP über AAL5	natives IP	natives IP	ATM Zelltransport, IP über AAL5

Tabelle 4.7: Vergleich der HFC-Standards (nach [Cis00, Way99])

DVB/DAVIC, ITU-T J.83 und IEEE 802.14 sehen zur Datensicherung ein Convolutional Interleaving vor (zur Funktionsweise siehe Abschnitt „ADSL im Detail“ Seite 68). Die Interleavingtiefe unterscheidet sich zwischen den Standards. Die dadurch verursachte Latenz bewegt sich zwischen 0,4 und 8 ms. [J.112, Way99]

Die Round-Trip-Delay (RTD) nimmt in HFC-Netzen mit geringer Nutzerzahl Werte zwischen 0,8 und 2 ms¹⁰⁹ an. Mit einer höheren Anzahl aktiver Teilnehmer sinkt nicht nur der Durchsatz im System. Je größer die Menge der Stationen, die im contention-based Modus Bandbreite anfordern, um so mehr steigt die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen auf dem Medium, wodurch sich die Zugriffszeit vergrößert (für 50, 200, 500 bzw. 2000 aktive Stationen beträgt die Delay 7, 11, 23 respektive 123 ms¹⁰⁹). [GSS99]

Media Access Control in HFC-Netzen

In einem System, in dem mehrere Stationen auf das Übertragungsmedium zugreifen können, wird ein Media Access Control (MAC) Protokoll benötigt. Der Upstream in HFC-Netzen ist ein solches System. Der Zugriff auf das Medium kann zum einen zufällig erfolgen. Dieses Verfahren ist in der MCNS DOCSIS und der IEEE 802.14 Spezifikation für die Initialisierungsphase der Teilnehmerstation und für Bandbreiten-Anforderungen vorgesehen. Eine weitere Möglichkeit stellt der zentralisierte Zugriff über einen Controller dar, der die Verteilung der Bandbreite durch das Zuweisen von Time Slots übernimmt. Dieses Verfahren wird in MCNS- und IEEE 802.14-kompatiblen Netzen nach der Initialisierungsphase sowie der DAVIC-Spezifikation entsprechenden Netzen eingesetzt. [Way99]

MAC Protokolle mit zufälligem Zugriff auf das Medium besitzen gegenüber zentral gesteuerten (contentionless) Systemen ein Vorteil. Sie können eine grosse Anzahl von meist ruhenden Stationen effektiver handhaben. Herkömmliche MAC-Verfahren wie Slotted ALOHA, CSMA, CSMA/CD sind jedoch nicht für den Einsatz in HFC-Netzen geeignet, da es sich von konventionellen LANs in zwei Punkten vollkommen unterscheidet. Einerseits ist die Ausbreitung von HFC-Systemen mit bis zu 80 km weitaus größer, so dass durch die höheren Signallaufzeiten Kollisionen eventuell nicht erkannt werden. Weiterhin können bis zu mehrere hundert Nutzer gleichzeitig auf das Medium zugreifen. In HFC-Netzen finden daher die Verfahren P-Persistent with Binary Exponential Backoff (MCNS DOCSIS) und Ternary Tree Algorithm (IEEE 802.14) Verwendung. [Way99]

Die Betrachtung der MAC-Layer in HFC-Netzen konzentriert sich auf die Ansätze der

¹⁰⁹Inklusive Ausbreitungsverzögerung für ein Entfernungen bis 80 km, 30 Mbit/s Downstream, 3 Mbit/s Upstream, keine Angabe zur Interleaving-Tiefe

DOCSIS und IEEE 802.14. Beide teilen den Up- und Downstream mittels FDMA in mehrere Kanäle auf, die durch ein TDMA-Verfahren weiter in Minislots unterteilt werden. Im Downstream werden die Daten innerhalb des MPEG2 Transportstroms übertragen. Der Zugriff auf den Upstream wird durch den Headend-Controller gesteuert, da die Stationen den Uplink nicht abhören können. Die Zuweisung der Bandbreite/Minislots wird in einer Allocation Map beschrieben, die der Headend-Controller an die angeschlossenen Stationen im Downstream verteilt. Hosts können entsprechend dieser Map Daten senden. Die Upstream-Minislots lassen sich in Request-Slots und Daten-Slots für den Transport der Daten im Uplink untergliedern. Die Request-Slots werden von den Stationen genutzt, um im contention-based Modus Bandbreite anzufordern. Der Headend-Controller erhält diese Request und verschickt im Downstream Grants zur Nutzung von Daten-Slots im contention-less Modus. Stationen können Requests zusammen mit einem Datenpaket (Piggybacking Reservation) in einem Datenslot verschicken, um Requests im contention-based Modus zu vermeiden.

Die DOCSIS Spezifikation sieht weiterhin einen isochronen Zugang und periodisches Request Polling seitens des Headend-Controllers vor. Dienste mit CBR-Charakteristik erhalten die Möglichkeit, über den isochronen Access-Modus zyklisch Daten zu transportieren. Anwendungen mit VBR-Verkehr können Daten über den Request Polling Modus on-Demand versenden. Über den Immediate Access können Stationen in einem dafür reservierten Bereich unter Umgehung der Request/Grant Prozedur geringe Mengen an Daten verschicken.

Die DOCSIS MAC stimmt in vielen Punkten (Virtual Queues, Minislots im Upstream, Piggyback Requests u.a) mit der IEEE 802.14 überein. Zur Reduzierung der Komplexität bei der Implementation wurden jedoch in der DOCSIS einfachere Modelle zur Kollisionsauflösung integriert. DOCSIS überträgt im Gegensatz zu IEEE 802.14 natives IP. Die 802.14 Spezifikation setzt vollständig auf ATM. [Lin98, LYH00, TZM97]

Die MAC-Schicht regelt wie beschrieben den Zugriff der Stationen auf das gemeinsame Medium Upstream. In einem Multiservice-Netzwerk muss sie daher QoS-Funktionalität beinhalten.

Realisierung eines QoS

Die MAC der IEEE 802.14 Spezifikation besitzt keine eigene QoS-Funktionalität und greift zur Realisierung eines Quality of Service auf die Funktionen des ATM-Protokolls zurück. [GSS99]

In der DOCSIS werden zur Unterstützung eines Quality of Service 5 verschiedene Dienste spezifiziert: Unsolicited Grant Service (UGS), Unsolicited Grant Service with Activity Detection (UGS-AD), Real-Time Polling Service (rtPS), Non-Real-Time Polling Service (nrtPS) und Best Effort Service (BE). Der UGS gewährleistet eine minimale Latenz für delay-sensitive Applikationen und ist zur Unterstützung von CBR-ähnlichen Anwendungen (z.B. VoIP ohne VAD, Circuit Emulation) gedacht. Es kommt der isochrone Access zum Einsatz. Der UGS-AD erfüllt die gleichen Anforderungen wie der UGS. Die Activity Detection schaltet bei Inaktivität in den rtPS-Modus, um Bandbreite im Upstream zu sparen. Der UGS-AD Service ist gut geeignet für VoIP Dienste mit eingeschalteter VAD. Der Real-Time Polling Service ermöglicht den Transport von Anwendungen mit geringer Latenz mit verminderten Bandbreitenanforderungen gegenüber UGS. Mit Hilfe des nrtPS erhalten nicht echtzeitfähige Anwendungen (z.B. FTP mit hoher Bandbreite) die Möglichkeit, Daten unter hoher Netzlast zu verschicken. Die rtPS und nrtPS Ströme werden beide periodisch gepollt. Während der nrtPS Flow unter hoher Netzlast nur einige Mal gepollt wird, erfolgt das Polling für den rtPS unabhängig von der Netzauslastung. Für BE Anwendungen müssen Stationen auf normale Reservierungen oder den Immediate Access zurückgreifen, um Bandbreite anzufordern. Der BE Service ist für einfache Anwendungen in nicht ausgelasteten Netzen vorgesehen. [Cis98b, LYH00, Sum99]

Ein weiteres QoS-Merkmal stellen die Virtual Queues dar. Zusammen mit einer 48 Bit MAC Adresse wird den Stationen während der Registrierung ein oder mehrere Identifikationsnummern von den Headend-Controllern zugewiesen. Diese ID (DOCSIS: 14 Bit SID, IEEE 802.14: 14 Bit LID & 6 Bit Local Queue (LQ)) dient als Virtual Queue für einen Flow einer Station. Der Headend-Controller betrachtet die einzelnen Virtual Queues anstatt die Stationen und kann so mehreren Anwendungen auf einem Host verschiedene Prioritäten zuweisen.

Die ACTS Projekte ATHOC (ATM applications over Hybrid Optical fiber Coax) und AROMA (Advanced Resource Management in Service Integrated and Multilayered HFC Access Networks) haben die Entwicklung eines Modells zum Ziel, mit dem in Multiservice HFC-Netzen für native ATM- und IP-Applikationen Dienstgüten garantiert werden können. Hierfür wurde eine DiffServ-Architektur in die MAC-Layer implementiert. Die Access Network Termination beinhaltet in dieser Architektur einen Priority Queueing Algorithmus mit 4 Stufen (Delay-Sensitive Applications, VBR QoS Sensitive, Guaranteed-Rate Applications, Best Effort Traffic), um Grants an die Daten mit der höchsten Priorität zu verteilen (siehe Kapitel 5.4.1.4). [BWC⁺99, JWL00, LCWO00, PL00, WSK⁺00]

4.3.2.3 Marktprognosen

In vielen europäischen Ländern (u.a. Deutschland) wurden HFC-Netze erprobt und befinden sich mittlerweile im kommerziellen Einsatz. Bidirektional und breitbandig ausgebaut CATV-Netze sind bezüglich Verbreitungsgebiet, Kapazität und realisierbarem Dienstportfolio vergleichbar mit xDSL. Zwischen diesen beiden Technologien wird der intensivste Wettbewerb erwartet. Ende 2001 konnte in mehr als 30 Städten der Internetzugang über aufgerüstete Kabelfernsehtetze genutzt werden. Von den 750 000 Haushalten, die an breitbandige HFC-Netze angeschlossen sind, nutzten Ende 2001 etwa 30 000 diese Technik. Bis zum Jahr 2010 werden 18 000 000 Teilnehmer prognostiziert (CAGR 2000-2010: 74,2 %). [BS01, Car01, Dör02]

4.4 3. Migrationsphase

Die 3. Migrationsphase sieht den weitverbreiteten Einsatz neuer (optischer) Übertragungsmedien vor. Die technische Entwicklung ist in der 3. Phase nicht mehr abhängig von den begrenzten Fähigkeiten und Möglichkeiten der installierten Medien. Diesem Vorteil stehen hohe Kosten für die Installation eines komplett optischen Netzes für den Breitband-Access entgegen. [Gil01]

4.4.1 Passive Optical Networks (PON)

Aus der Notwendigkeit für eine optische Zuführung für die VDSL-Datenübertragung aufgrund dessen geringer Reichweite hat sich das Passive Optical Network Konzept entwickelt. Es wurde eine kostengünstige und generische Lösung angestrebt, die für jede FTTx Topologie verwendet werden kann. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist eine sternförmige Struktur passiver¹¹⁰ optischer Medien. Mehrere Zweige teilen sich den selben Fiber Feed und die Line Termination (LT) Punkte in der Mitte des Sterns.

¹¹⁰Passive optische Netze verzichten auf teure aktive Netzkomponenten, z.B. optische Switches. Stattdessen wird das Signal optisch gesplittet. Es entsteht ein Broadcast-Medium.

4.4.1.1 PON-Systemarchitektur

Die Schnittstelle zu den Service Nodes¹¹¹ (SN) im Backbone-Netz wird durch die Optical Line Termination¹¹² (OLT) realisiert. Im AN wird der Verkehr des Access-Netzes konzentriert. Das an den OLT angeschlossene passive optische Netz wird als Optical Distribution Network (ODN) bezeichnet (siehe Abbildung 4.17). Ein OLT kann die Verbindung vom Core-Netz auf mehrere ODN umsetzen. Das Ende der optischen Zuführung (Optical Distribution Network) wird durch Optical Network Units (ONU) markiert. Die ONUs beinhalten das Interface für den Fiber Feed (ONT) und mehrere xDSL LT sowie Multiplex-Funktionalität. Jedes ODN kann durch optisches Splitting mittels Optical Branching Device (OBD) mehrere ONUs bedienen. In einem vollkommen optischen Netz (FTTH) wird der ONU als Optical Network Termination (ONT) betitelt, da er die Network Termination (NT) Funktionalität beinhaltet (siehe Abbildung 4.13). In hybriden Netzen wird der NT über metallene Leiter an den ONU angeschlossen. [ETS 300 681, FSAN, G.983.1, G.983.1 A1, Gil01]

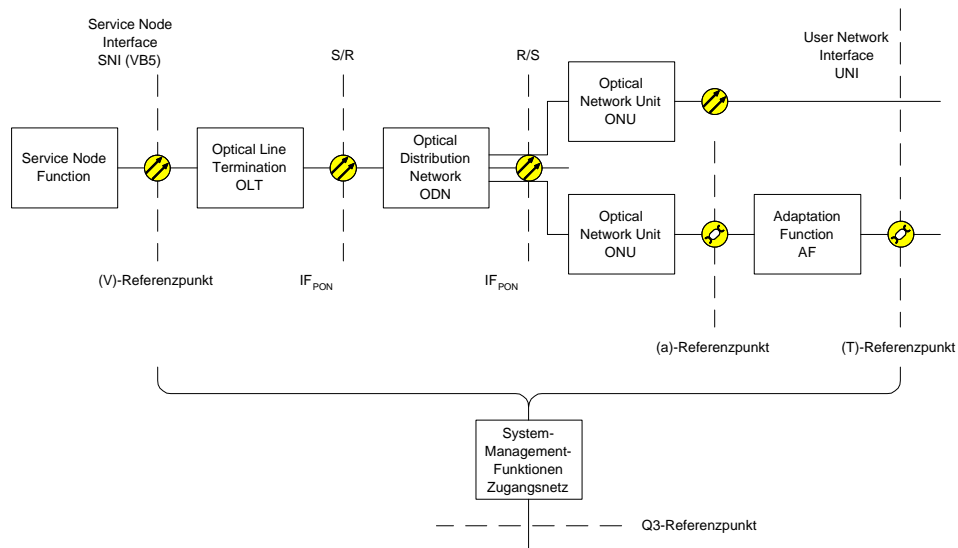


Abbildung 4.17: FSAN-Referenzmodell des Optical Access Networks (nach [G.983.1])

Der Kern eines Access Node ist ein ATM Cross Connect, der den Verkehr der verschiedenen ONUs zusammenfasst und an die Service Nodes weiterleitet. Die Verbindung

¹¹¹Der Internet Access und PSTN-Dienste sind typische Service Node Funktionen.

¹¹²Wird auch als Access-Node (AN) gekennzeichnet.

zu den Service Nodes wird durch SONET/SDH Schnittstellen realisiert (OC3/STM1 mit 155,52 Mbit/s, OC12/STM4 mit 622,08 Mbit/s oder OC48/STM16 mit 2,5 Gbit/s). PONs sind wie HFC-Netze ein "Shared Medium". Passive Optical Networks benötigen daher ein MAC-Protokoll, um den simultanen Zugriff mehrere Stationen auf das Übertragungsmedium zu steuern und eine kollisionsfreie Übertragung sicherzustellen (siehe Abschnitt „Media Access Control in HFC-Netzen“ auf Seite 117). In PONs wird eine MAC mit einem zentralisierten Zugriff über einen Controller verwendet (Upstream: TDMA, Downstream: TDM). Die Zuteilung von Slots für die Datenübertragung im Upstream (Allocation Map) erfolgt durch den OLT über so genannte PLOAM Zellen (Physical Layer Operations, Administration, and Maintenance), die in den Downstream eingeflochten werden (siehe Abbildung 4.18). Die Wahl des richtigen Vergabe-Algorithmus' (statistisches Multiplexing, auf Service Level Agreement beruhend oder Umsetzung von Verkehrsprioritäten und QoS) für die Allocation Map ist abhängig von der Einsatzumgebung und den angebotenen Services. Im Downstream werden die Frames an alle angeschlossenen ONUs gesendet (Broadcast).

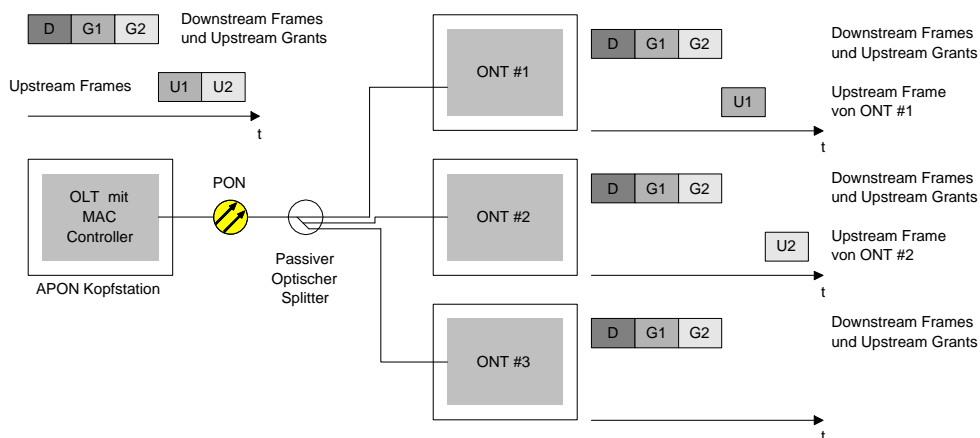


Abbildung 4.18: Media Access Control in Passive Optical Networks zur Steuerung des Upstream Access (nach [EBKY00])

4.4.1.2 ATM PON (APON)

ATM PONs bilden die Grundlage für die FTTx Netze der FSAN Initiative. Sie sind sowohl für rein optische Access-Netze (FTTH) als auch für hybride Zugangsnetze (FTTB/C/Cab) gedacht. Der Hauptvorteil des FSAN-Ansatzes gegenüber bestehenden optischen P2P

Netzen ist die Reduzierung der Schnittstellenkosten pro Teilnehmer, da ein APON LT mehrere NT (ONU/ONT) bedient. ATM wurde durch die FSAN als Layer 2 Protokoll ausgewählt, da es vielfältige Quality of Service Funktionen für den Transport von Echtzeit-Anwendungen (Circuit Emulation) besitzt. Die Übertragung frame- und zellbasierter Anwendungen ist möglich. APONs bilden die Grundlage für die ITU-T G.983.1 Empfehlung. Diese umfasst die Spezifikationen des Übertragungsmediums, den Bitraten, des Frame Formats und der Bandbreitenzuteilung im P2MP-Betrieb. [G.983.1, G.983.1 A1]

FSAN APON ist für den Betrieb von maximal 64 ONTs (max. Splitting-Faktor: 32) an einem LT spezifiziert. Die Systemreichweite liegt bei bis zu 20 km. Die tatsächlich erreichbaren Werte für den Splitting-Faktor und die Reichweite ist vom Signalverlust im PON abhängig. ATM Passive Optical Networks verwenden eine angepasste Framing-Struktur, um ATM Zellen mit minimalem Overhead zu transportieren. Das Frame-Format unterscheidet sich zwischen Up- und Downlink, um die Daten mehrerer ONUs zusammenführen zu können. APONs besitzen volle OAM Funktionalität und unterstützen den VB5.2 Standard (siehe Kapitel 3.5). Über das in VB5.2 definierte Protokoll B-BCC (Broadband Bearer Channel Control) können zwischen Service Node (SN) und Access Node (AN) SVCs on-Demand etabliert oder abgebaut werden. [CB00, G.983.1, G.983.1 A1, Gil01], APONs arbeiten mit Bitraten von 622,08 Mbit/s bzw. 155,52 Mbit/s (Downstream/Upstream) oder symmetrisch mit 155,52 Mbit/s. Durch den zusätzlichen asymmetrischen Modus können APONs asymmetrische Dienste wesentlich effizienter transportieren als SDH/SONET. APONs eignen sich für die Verbreitung von Verteildiensten. Durch die hohe Downlinkgeschwindigkeit von 622,08 Mbit/s können viele Streams (z.B. Video) gleichzeitig durch das Access-Netz übertragen werden. [EBKY00, FSAN, VGVG00, G.983.1, G.983.1 A1]

4.4.1.3 Ethernet PON (EPON)

Ethernet Passive Optical Networks verbinden die low-cost Ethernet-Technologie mit einer kostengünstigen Glasfaser-Infrastruktur. EPONs sind im Gegensatz zu APONs auf den Transport von IP-Paketen optimiert und kommt somit der steigenden Verbreitung von IP-basiertem Traffic entgegen. ATM war zur Zeit der Spezifikation der APONs die einzige Technologie, mit der ein End-to-End QoS realisiert werden konnte. Aufgrund der bis heute hohen Kosten konnte sich ATM jedoch nur in Metro- und Weitverkehrsnetzen etablieren. In lokalen Netzen hat sich Ethernet gegenüber ATM durchgesetzt. Über das 10 Gbit/s Ethernet (10GE) wird der Versuch unternommen, ATM im MAN und WAN zu

verdrängen (Übersicht der Ethernet-Varianten: siehe Kapitel A.7).

Einer der Nachteile der IP over ATM Übertragung ist die Tatsache, dass eine fehlerhafte/verworfenen Zelle das ganze IP-Paket ungültig macht. Die restlichen, zum betreffenden IP-Paket gehörenden Zellen werden trotzdem übermittelt und belegen so unnötig Übertragungskapazität. Weiterhin ist der Transport von IP-Datagrammen variabler Länge über ATM gegenüber frame-basierten Layer-2 Techniken nicht sehr effizient. In EPONs werden die IP-Pakete in Ethernet-Frames eingekapselt. Quality of Service Funktionalität erhalten Ethernets durch die Implementation der IEEE 802.1Q und 802.1D Spezifikationen. [KP02, Tol01]

IEEE 802.1Q erweitert den Ethernet Frame um 4 Octets. Diese Erweiterung dient dem VLAN-Tagging¹¹³ und der Prioritätszuweisung nach IEEE 802.1D¹¹⁴ (*user_priorities*) für Daten, die über das Ethernet übertragen werden. IEEE 802.1D benutzt 3 Bits des IEEE 802.1Q Tags, um 8 Verkehrstypen zu unterscheiden (siehe Tabelle 4.8), die in einem Ethernet-Frame übertragen werden. IEEE 802.1D weist einer vorgegebenen Zahl von Queues an einem Gerät die entsprechenden Traffic Types zu. Es wird nicht festgelegt, welcher Queueing-Algorithmus zu verwenden ist. [Fin02]

Die MAC-Layer des EPON arbeitet nach einem TDM/TDMA Verfahren (Downstream/Upstream, siehe Kapitel 4.4.1.1). Jeder Zeitschlitz kann mehrere Ethernet-Frames aufnehmen. Der Splitting-Faktor ist ebenfalls auf 32 begrenzt.

Die Standardisierung wird durch die IEEE 802.3ah¹¹⁵ Arbeitsgruppe unter der Bezeichnung Ethernet in the First Mile (EFM) vorangetrieben. IEEE 802.3ah konzentriert sich auf den Anschluss von privaten Haushalten und gewerblichen Nutzern an das Internet über das Ethernet-Protokoll. Die Standardisierung erfolgt in 4 Bereichen: Ethernet over Copper (Ethernet over VDSL), Ethernet over P2P fiber (1000Base-X), Ethernet over P2MP fiber (EPON) und eine gemeinsame OAM Definition. Der Abschluss der Spezifikation wird für 2003 erwartet. [KP02, Tol01]

4.4.1.4 SuperPON

Die SuperPON-Architektur ist eine Weiterentwicklung der ATM Passive Optical Networks, die in den ACTS Projekten PLANET¹¹⁶ (Photonic Local Access Network) und

¹¹³Mehrere Subnetze/physikalische LANs können zu einem logischen Virtual LAN zusammengefasst werden.

¹¹⁴Früher als IEEE 802.1p spezifiziert.

¹¹⁵<http://www.ieee802.org/3/efm>

¹¹⁶<http://www.intec.rug.ac.be/research/projects/horizon/projects/planet/planet.html>

Queue-Anzahl	Verkehrstypen						
1	BE ^a						
2	BE ^a			VO ^f			
3	BE ^a			CL ^d	VO ^f		
4	BK ^b	BE		CL ^d	VO ^f		
5	BK ^b	BE ^a		CL ^d	VI ^e	VO ^f	
6	BK ^b	BE ^a	EE ^c	CL ^d	VI ^e	VO ^f	
7	BK ^b	BE ^a	EE ^c	CL ^d	VI ^e	VO ^f	NC ^g
8	BK ^b	–	BE ^a	EE ^c	CL ^d	VI ^e	VO ^f NC ^g

^aBest Effort (000)^bBackground (001)^cExcellent Effort (011)^dControlled Load (100)^eVideo (101)^fVoice (110)^gNetwork Control (111)

Tabelle 4.8: IEEE 802.1D: Mapping der Verkehrstypen (nach [Fin02])

PELICAN (Pan European Lightwave Core and Access Networks) erarbeitet wurde. SuperPONs kombinieren höhere Splitting-Faktoren (bis 2048), eine höhere Reichweite (bis 100 km, davon 90 km Zuführung und 10 km Local Loop) und größere Bandbreiten (2488/311 Mbit/s Downlink/Uplink) miteinander. ATM kommt als Layer 2 Protokoll zum Einsatz. Der Zugriff auf das Medium wird wieder über TDM/TDMA gesteuert, da es sich als kostengünstigste Lösung herausstellte. Um die Bandbreite und Reichweite steigern zu können, sind die Dämpfung und Splitting-Verluste auszugleichen. Dazu werden in beiden Übertragungsrichtungen optische Verstärker (Erbium-Doped Fiber Amplifier) integriert. [VGVG00, VMVQ00]

Die hohe Reichweite ermöglicht eine Reduktion der Switching Nodes, mit der damit verbundenen Verringerung der Unterhaltungs- und Wartungskosten. 2048 mögliche Splits sind dagegen nur für umfangreiche FTTCab-Umgebungen relevant. Durch die Steigerung der Bandbreite können gegenüber APONs mehr ONUs bzw. mehr VDSL-Anschlüsse pro ONU realisiert werden. [VGVG00]

Die Integration von Wavelength Division Multiplexing (WDM) oder Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) in Passive Optical Networks erlaubt auf bestehenden Glasfaserleitungen eine weitere Steigerung der System-Bitraten. Das TDMA basierte Zugriffs-

verfahren wird hier durch ein Frequency Division Multiple Access ersetzt. Jedem ONU wird eine Wellenlänge zugeteilt, dem dann die gesamte Bandbreite dieser Wellenlänge zur Verfügung steht. In WDM PONs müssen jedoch die passiven optischen Splitter (TDM/TDMA basierter Zugriff auf das Medium) durch WDM-Router ersetzt (Wavelength Routing) werden. Das IST Projekt HARMONICS^{117,118} (Hybrid Access Reconfigurable Multi-wavelength Optical Networks for IP-based Communication Services) beinhaltet Forschungen im Bereich von WDM Passive Optical Networks.

4.4.2 IP Transport über optische Medien

Im Bereich aktueller optischer Access-Netze wird IP vorwiegend über ATM (als Layer 2 Protokoll) übertragen. Damit verbunden ist eine geringe Bandbreiteneffizienz, hervorgerufen durch die ATM Cell Tax (für ein 350 Byte IP-Paket beträgt der Overhead 19%). Zudem erhöht sich die Zahl der redundanten Funktionen (z.B. OAM) mit jeder an der Übertragung beteiligten Schicht. In Backbone-Netzen wird der IP/ATM Zellstrom über SDH/SONET-Layer übertragen. Der Overhead steigt in der IP/ATM/SDH/WDM-Konstellation auf 22 % (350 Byte IP-Paket). In Backbone-Netzen zeigt sich ein weiterer Nachteil der ATM-Übertragung, denn ATM skaliert durch SAR-Prozesse nicht bei Übertragungsraten von mehreren Gbit/s. [BM01, Wic99]

Zur Steigerung der Effizienz sind daher verschiedene Mechanismen entwickelt worden, um IP möglichst direkt über optische Medien zu transportieren. Hierzu zählen im Bereich der Backbone-Netze PPP over SONET/SDH (POS), Gigabit Ethernet (GbE), IP over WDM (IP/PPP/WDM) und herstellerspezifische Lösungen wie Dynamic Packet Transport (DPT, Cisco) oder Simple Data Link (SDL, Lucent). Mittels SDL kann der Overhead auf 3 % (350 Byte IP-Paket) reduziert werden. Eine weitere Implementierung sieht eine direkte MPLS-basierte IP-Übertragung mittels Lambda Labeling oder Multiprotocol Lambda Switching vor. [GDW00, Gil01, RFC2615, Wic99].

Einen weiteren Ansatz verfolgt das Projekt „A smart layer two protocol for IP over WDM“ im Arbeitskreis KomNet¹¹⁹. Hier werden die Nachteile bisheriger Lösungen durch ein auf die Anforderungen des IP over WDM Transports angepasstes Layer 2 Protokoll beseitigt.

¹¹⁷http://dbs.cordis.lu/fep-cgi/srchidadb?ACTION=D&CALLER=PROJ_IST&QF_EP_RPG=

IST-1999-11719

¹¹⁸<http://www.ist-harmonics.net/index.html>

¹¹⁹KomNet ist eine Forschungsplattform des Bundes, der Industrie, von Forschungsinstituten und Universitäten zur Entwicklung von realitätsnahen Breitband-Zugangstechniken und optischen Kommunikationsnetzen.

Das Protokoll ist auf die nötigen Funktionen eingeschränkt worden. Es unterstützt alle OAM Funktionen, die von der WDM-Schicht nicht zur Verfügung gestellt werden. [BM01] Bei den optischen Access-Technologien beschränkt sich die Auswahl der Layer 2 Protokolle auf ATM (APON) und Ethernet (EPON). EPONs erzielen eine Verringerung des Overheads um durchschnittlich 13 % gegenüber ATM-Netzen. [KP02]

Mechanismen wie IP over WDM oder die direkte MPLS-basierte IP-Übertragung versprechen eine weitere Steigerung der Effizienz und Kostenreduktionen durch Verringerung der Managementebenen. In der Literatur ließen sich jedoch keine Hinweise für die Anwendbarkeit oder den Einsatz in optischen P2MP Access-Netzen (PON) finden.

4.4.3 Fiber to the Home (FTTH)

Fiber to the Home¹²⁰ bezeichnet eine Access-Technik, bei der der Anschluss zum Teilnehmer durchgängig über optische Medien hergestellt wird. Es existieren verschiedene Technologien zur Realisierung eines FTTH-Zugangs. Point-to-Point Links mit aktiven Komponenten ermöglichen Verbindungen mit sehr hohen dedizierten Bandbreiten bei sehr hohem Kostenaufwand. Passive optische P2MP Netze sind günstiger zu realisieren. FTTH-Lösungen werden daher vorwiegend als Passive Optical Networks ausgeführt. Bezüglich der erreichbaren Bitraten und der Quality of Service Funktionalität wird auf die in Kapitel 4.4.1 dargestellten Merkmale verwiesen. [SSWR96b]

FTTH stellt aufgrund der beschriebenen Eigenschaften der PON-Technologie (hohe Bandbreite, QoS über ATM oder Ethernet) das optimale Medium für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netz dar. Es können alle existierenden und zukünftigen Dienste über FTTH-Zugangssysteme transportiert werden.

Fiber to the Home ist bereits an einigen Standorten verfügbar. Durch den Telefon- und Internetdienstleister HanseNet wird im Wirtschaftsraum Hamburg ein breitflächiger FTTH-Zugang für private Haushalte und Büros angeboten.¹²¹ Prognosen zur Marktdurchdringung für FTTH sind nur schwer zu treffen. Sie hängen ab, von der zukünftigen Kapazitätsnachfrage, die für die Errichtung einer durchgängigen Glasfaserinfrastruktur erforderlich ist. Die meisten Studien zeigen einen relevanten Marktanteil von FTTH-Zugängen im Privat/SOHO Bereich erst für einen Zeitraum nach 2010. [BS01]

¹²⁰Wird auch als Fiber to the Business für den Anschluss gewerblicher Teilnehmer dargestellt.

¹²¹BRORS, DIETER: *Hamburg: Flatrate mit 150-facher ISDN-Geschwindigkeit*. heise online.

<http://www.heise.de/newsticker/data/db-19.01.02-000/>

4.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde verschiedene Access-Technologien beschrieben und ihre Eignung für ein IP-basiertes Access-Netz wiedergegeben. Die Tabelle 4.9 fasst diese Merkmale zusammen.

Access-Technik	max. Bitrate		Zugriff	QoS-Unterstützung			Service Klassen
	US Mbit/s	DS Mbit/s		MPR	PTD	PDV	
ADSL	0,64	6,144	D	$-^{122}(\sqrt{\text{via ATM}})$			A-D ^{123,124}
SDSL	2,320	2,320	D	$-(\sqrt{\text{via ATM}})$			A-D ¹²³
VDSL (APON)	6,4	52	D	$-^{122}(\sqrt{\text{via ATM}})$			A-D ¹²⁴
	26	26					
PLC (Ascom)	4,2	4,2	S	$-(\sqrt{\text{via IP-QoS}})$			A-D ¹²³
WLL (IEEE 802.16)	134,4	134,4	S	$\sqrt{\text{, 4 Serviceklassen}}$			A-D ¹²⁵
Satellit (DVB, GEO, unidirektional)	0,128	68	S	$-^{126}(\sqrt{\text{via ATM}})$			C,D
HFC (DVB)	3,088	52	S	$-^{127}(\sqrt{\text{via ATM}})$			A-D ¹²⁸
HFC (DOCSIS 2.0)	30	42	S	$\sqrt{\text{, 5 Serviceklassen}}$			A-D ¹²⁵
HFC (EuroDOC-SIS)	10,24	52	S	$\sqrt{\text{, 5 Serviceklassen}}$			A-D ¹²⁵
FTTH (APON)	155,52	622,08	S	$-(\sqrt{\text{via ATM}})$			A-D
FTTH (EPON)	155,52	622,08	S	$\sqrt{\text{, IEEE 802.1Q/D}}$			A-D

Tabelle 4.9: Zusammenfassung: Evaluierung der Access-Technologien

Die angegebenen Übertragungsbandbreiten stellen in allen Fällen Netto-Werte dar, d.h. die nutzbare Kapazität des Mediums. Die Nutzbitrate für IP-Dienste verringert sich abhängig von der eingesetzten Layer 2 Technik (ATM, Ethernet). Der Parameter *Zugriff*

¹²²Beeinflussung der PTD durch Wahl der Interleaving-Tiefe.

¹²³Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Bandbreite.

¹²⁴Bei ausreichend niedriger Latenz (z.B. im Fast-Path).

¹²⁵Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Bandbreite mit wachsender Anzahl gleichzeitig aktiver Nutzer/Services mit gleicher Priorität.

¹²⁶PTD bei rund 300 ms, daher interaktive Echtzeit-Anwendungen nur bedingt möglich.

¹²⁷PTD abhängig von Anzahl simultaner Teilnehmer und verwendeter Interleavingtiefe.

¹²⁸Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Bandbreite und steigender Latenz mit wachsender Anzahl gleichzeitig aktiver Nutzer/Services.

kennzeichnet entweder ein Zugangsnetz mit dedizierter Datenrate (D) für den Teilnehmer oder Medien mit gemeinsamen Zugriff mehrerer Teilnehmer („Shared Medium“, S). Die Spalte *Service Klassen* zeigt die Eignung der Zugangstechniken für Anwendungen entsprechend dem Service Klassen Modell für IP-basierte Multiservice Access-Netze (siehe Kapitel 3.6.4).

Bei der Wahl der „optimalen“ Access-Technik ist neben der Eignung für die gewünschten Anwendungen hinsichtlich Bandbreite und QoS Merkmalen auch die Umgebung (z.B. Unterscheidung zwischen Ballungsräumen und ländlichen Gebieten z.B. in Bezug auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) zu berücksichtigen.

FTTH wird langfristig als leistungsfähigste Technologie angesehen. Nur über Teilnehmerschlüsse via Fiber to the Home lassen sich alle bestehenden und zukünftigen Dienste und Anwendungen abbilden.

Kapitel 5

Quality of Service Verfahren der höheren Schichten

5.1 Einführung

Die hier vorgestellten Protokolle und Mechanismen werden eingesetzt, wenn das Kommunikationsnetz keine Dienstgüten innerhalb der Physical oder Data Link Layer garantieren kann. Sie nutzen Verfahren in der IP-Ebene zur Klassifizierung von Daten, die bestimmte Dienstgüten benötigen und deren Priorisierung beim Transport in heterogenen Netzen. Davon ausgenommen sind QoS-unterstützende Protokolle wie ATM und MPLS (siehe Kapitel 5.3), die sich zwischen der technologie-spezifischen Schicht 2 und 3 (IP-Layer) des ISO/OSI Referenzmodells befinden.

Das in den Netzwerken vorherrschende Protokoll IPv4 ist als reiner Datagrammdienst konzipiert, d.h. IP übernimmt nur den Transport von Paketen. Es existieren keinerlei Flußkontrolle, Sicherheiten bezüglich Bandbreite und Verzögerung der Sprachpakete oder eine Fehlerkorrektur. Diese Aufgaben müssen höhere Protokollschichten oder zusätzliche Mechanismen übernehmen. IPv6 bietet mit Hilfe seiner integrierten QoS Mechanismen (Traffic Class, Flow Label) eine bessere Unterstützung von Dienstgüten. [RFC0791]

5.2 End-to-End QoS-Modelle

In den Anfangszeiten des Internet waren die Datenübertragung und der Fernzugriff (z.B. Telnet) die Hauptanwendungen. Diese Dienste weisen nur geringen Anforderungen an PTD oder PDV auf. Der Transport solcher Anwendungen kann durch den Best-Effort Service (BE) charakterisiert werden. Das BE-Modell besitzt nur ein Dienstmerkmal: das Übertragen von Daten. Anwendungen können Daten ohne Einschränkungen in Hinblick auf Uhrzeit, Dauer, Menge oder Zugriffskontrollen senden. Das Netz überträgt die Daten,

wenn möglich, ohne jegliche Zusicherung bezüglich Verlässlichkeit, maximale Verzögerungszeiten oder Bandbreite. [McD00]

Mit der Zeit wuchs das Internet und somit die Zahl der Nutzer, die einen immer größeren Bereich an Anwendungen nutzen wollten. Hier stößt der Best-Effort Service an seine Grenzen, da die Vielzahl möglicher Anwendungen unterschiedliche Anforderungen an das Netzwerk bei der Übertragung stellen. Zudem lassen sich die entstehenden Mengen von Paketen nicht mehr effizient übermitteln. Deshalb wurden Wege gesucht, um einerseits eine stark wachsenden Zahl von Nutzern und zu übertragende Daten zu bewältigen. Andererseits muss es innerhalb des Modells möglich sein, verschiedene Datentypen (z.B. Sprache und Daten im klassischen Sinn) oder Nutzer voneinander unterscheiden und bestimmte Daten/Nutzer priorisieren zu können. Daher wurden neue Ansätze entwickelt, die diese Gegebenheiten berücksichtigen. [Cis01a]

Die Fähigkeit eines Netzwerkes, die gewünschten Dienstmerkmale von einem System zum anderen zu liefern, wird als End-to-End QoS bezeichnet. Dessen Möglichkeiten werden durch Service-Modelle charakterisiert. Es existieren zwei Service-Modelle für ein End-to-End Quality of Service: Integrated Service und Differentiated Service. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Abwärtskompatibilität zu bestehenden Netzen und ihrer Komplexität.

Zur Realisierung eines End-to-End Quality of Service bedarf es einer Kommunikation zwischen den Endpunkten und allen beteiligten Netzwerkknoten, um die Anforderungen für einen Verkehrsstrom aushandeln zu können. Diese Form der Kommunikation wird als QoS Signalisierung bezeichnet. Jedes Netzwerkelement muss QoS Signalling beherrschen, um ein End-to-End QoS zu garantieren. Benötigte Prioritäten können durch zwei Techniken signalisiert werden. Eine In-Band Signalisierung kann durch das Traffic Class Feld im IPv6 Header realisiert werden (siehe Seite 38 und Kapitel 5.2.3). Out-of-Band Signalling verwirklicht ein garantiertes Quality of Service mit Hilfe zusätzlich übertragener Reservierungsnachrichten (IntServ/RSVP).

5.2.1 Integrated Services (IntServ)

Der Integrated Service (IntServ) setzt eine explizite Signalisierungsphase voraus, in der Netz- und Systemressourcen reserviert werden. Im IntServ-Modell fordert eine Anwendung ein spezielles Dienstmerkmal¹ im Netz an. Von der Anwendung wird erwartet, dass

¹Dienstmerkmale sind z.B die benötigte Bandbreite oder Anforderungen an die maximale Verzögerung eines Paketes.

es die Daten erst sendet, wenn es eine Bestätigung durch das Netzwerk erhalten hat und die Daten dem innerhalb der Signalisierungsphase angegebenen Profil entsprechen. Ist diese Bedingung erfüllt, führt das Netzwerk – aufbauend auf den Informationen der Anwendung und den vorhandenen Netzwerkressourcen – eine Zugangskontrolle durch. Dafür bestimmt jeder Routing-Knoten auf dem Weg zum Empfänger, ob er die gewünschten Parameter liefern kann. Werden alle Kriterien eingehalten, wird ein Kanal zwischen Sender und Empfänger etabliert. Das Netz verpflichtet sich, die QoS-Anforderungen solange zu erfüllen, wie der Verkehr innerhalb seiner Spezifikation verbleibt.

IntServ benötigt durch die Signalisierungsphase mehr Zeit und ist nicht abwärtskompatibel. Ein einziger Router, der keine IntServ-Funktionalität aufweist, verhindert das Zustandekommen einer Verkehrsvereinbarung. Zudem benötigt diese Methode in den Routern Speicherplatz für eine große Menge an Informationen. Für die Reservierung von Dienstgütemerkmalen in großen Backbone-Netzen ist der IntServ-Ansatz damit nicht geeignet. [Bra99, Hus00, RFC1633, RFC2208]

Die Integrated Services-Architektur stellt Dienstklassen zur Verfügung, die an die Anforderungen verschiedener Anwendungen angepasst wurden. IntServ lässt sich in Bezug auf eine maximale Verzögerung in 3 Klassen unterteilen (siehe Kapitel 5.2.2.1):

1. Guaranteed Service (ermöglicht Dienstvereinbarungen mit definierter maximaler Latenz \Rightarrow für zeitkritische und gegenüber Verzögerung empfindlich reagierende Applikationen)
2. Controlled Load Service (ermöglicht Dienstvereinbarungen mit mittlerer Verzögerung, d.h. Überschreitungen der vereinbarten maximalen Latenzzeit finden nicht häufiger statt als im unbelasteten Zustand \Rightarrow für adaptive Echtzeitanwendungen, die kurzzeitige Einschränkungen der Dienstgüte tolerieren)
3. Best-Effort Service mit weiterer Unterteilung (für adaptive und zeitunkritische Applikationen):
 - burst-artiger Verkehr (z.B. Web)
 - bulk-artiger Verkehr (Streaming, FTP)
 - asynchroner Verkehr (z.B. E-Mail)

Die ersten beiden Punkte benötigen eine Signalisierung und Zugangskontrolle in den Netzknoten, wie es z.B. durch RSVP (siehe Kapitel 5.2.2) bereitgestellt wird.

Vorteile der Integrated Services-Architektur sind die Unterteilung in mehrere Klassen, die für bestimmte Anwendungstypen optimiert sind sowie der integrierte Best-Effort Service. So können existierende Anwendungen ohne Veränderung weiter verwendet werden. Gegen IntServ spricht, dass End-to-End Merkmale nur nutzbar sind, wenn alle beteiligten Knoten das Service-Modell integrieren. [MEH00], [RFC1633]

5.2.2 Resource Reservation Protocol (RSVP)

Das Resource Reservation Protocol stellt eine Implementierung der IntServ-Architektur dar. Es ermöglicht die dynamische Einrichtung eines End-to-End QoS über ein heterogenes Netzwerk. RSVP ist das einzige Signalisierungsprotokoll, das Bandbreite zwischen zwei Endpunkten garantiert. RSVP-Nachrichten enthalten nur Signalisierungsinformationen, die die benötigte Dienstgüte beschreiben. So kann das Resource Reservation Protocol zwar ein spezielles QoS-Merkmal anfordern, die Umsetzung obliegt jedoch den jeweiligen Algorithmen in den Netzwerkknoten (siehe Kapitel 5.4).

Wenn eine Anwendung über das Resource Reservation Protocol ein bestimmtes QoS Level anfordert, passiert RSVP auf dem Weg von einem End-Host zum anderen alle Netzwerkknoten und versucht, eine bestimmte Bandbreite exklusiv für einen bestimmten Flow zu reservieren. Sind genügend Ressourcen vorhanden und besitzt die Anwendung das Recht, diese zu reservieren, werden die Pakete des Flows durch RSVP für die Algorithmen des Congestion Management und Congestion Avoidance als Pakete mit hoher Priorität gekennzeichnet (siehe Kapitel 5.4.1 und 5.4.2). Sind eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt, erhält die Anwendung eine Fehlermeldung zurück. Die durch RSVP garantierte Bandbreite kann durch eine Anwendung überschritten werden, wenn der Link nicht ausgelastet ist. Bei steigender Netzlast werden alle Pakete verworfen, die außerhalb des Bereiches liegen.

Das Resource Reservation Protocol besitzt keine eigenen Routingalgorithmen. RSVP-Nachrichten werden in TCP und UDP Paketen über das Internet Protocol übertragen. So kann RSVP bei Änderungen des Routing-Pfades die Reservierungen adaptiv an den neuen Pfad anpassen. RSVP arbeitet transparent auf Routern, die dieses Protokoll nicht unterstützen. [Bra99, MM98, RFC2205, Veg01]

5.2.2.1 RSVP Service Klassen

Das Resource Reservation Protocol unterscheidet zwischen zwei Dienstklassen, dem Controlled Load Service und dem Guaranteed Service, die durch die RSVP RESV Nach-

richten angefordert werden können. [RFC2205]

Controlled Load Service

Der Controlled Load Service ist vorrangig für heute verfügbare Applikationen bestimmt, die empfindlich auf überlastete Netze reagieren. Hierzu gehören z.B. die so genannten „adaptive real-time applications“. Diese arbeiten in unbelasteten Netzen gut. Bei steigender Netzbelastung verschlechtert sich jedoch deren Dienstqualität rapide. Solche Applikationen benötigen einen Service, der ein unbelastetes Netzwerk imitiert.

Jede Applikation, die mittels Best-Effort Service Daten austauscht, kann vom Controlled Load Service Gebrauch machen. Ein optimales Leistungsvermögen erreicht der Controlled Load Service jedoch nur mit Anwendungen, die ihre Verkehrsanforderungen charakterisieren können. Dazu gehören vor allem Dienste mit kontinuierlichem Datenaufkommen, wie der Transport digitalisierter Audio- und Videosignale. Der Controlled Load Service ist aber nicht für die Übertragung isochroner Inhalte geeignet, da keinerlei Information über die Übertragungsverzögerung vorhanden sind. Applikationen, die Anforderungen an eine definierte Ende-zu-Ende Delay stellen, müssen auf zusätzliche Protokolle (z.B. Real-Time Transport Protocol nach [RFC1889]) zurückgreifen, um diese Funktion zu erhalten.

Applikationen, die empfindlich auf ausgelastete Netze reagieren, können zu jeder Zeit Controlled Load Service anfordern. Sie können jedoch auch ihre eigene Dienstqualität überwachen und den Controlled Load Service vom Netz erst anfordern, wenn der Best-Effort Service keine akzeptable Leistung erbringt. Während die erste Strategie eine höhere Wahrscheinlichkeit besitzt, dass das erbrachte Qualitäts-Level sich über die gesamte Zeitspanne der aktiven Sitzung nicht ändert, besitzt die zweite mehr Flexibilität und Kostenersparnisse, wenn der Controlled Load Service Mehrkosten gegenüber dem Best-Effort Service verursacht.

Der Controlled Load Service ist absichtlich minimal gehalten. Es gibt keine optionalen Funktionen oder Leistungen in der Spezifikation, er bietet nur eine einzige Funktion. Die Implementation durch System- und Anwendungsentwickler gestaltet sich so wesentlich einfacher. Der Controlled Load Service ist zudem für einen großen Bereich von Implementationsmethoden geeignet, einschließlich zu integrierender Scheduling- und Zugangskontroll-Algorithmen, die eine Umsetzung erlauben, die sehr effizient im Umgang mit Netzressourcen ist. Es ist gleichermaßen zugänglich für extrem einfache Implementationen in Situationen, wo die maximale Auslastung der Netzwerkressourcen nicht

allein von Interesse sind.

Mit dem Controlled Load Service garantiert das Netz, dass die reservierten Flows ihr Ziel möglichst ungehindert vom Best-Effort-Verkehr erreichen. Hierfür wird einem Datenfluss ein Quality of Service zur Verfügung gestellt, ähnlich dem, das der selbe Flow in einem unbelasteten Netzwerk bekommen hätte. Durch eine Zugangskontrolle wird sichergestellt, dass der Flow diesen QoS-Level auch in einem überlasteten Netzelement erhält. [Bra99, Hus00, McD00, RFC2211]

Guaranteed Service

Mit dem Guaranteed Service garantiert das Netz minimale Interferenz mit Best-Effort-Verkehr sowie eine angegebene „worst case“ Verzögerung. Zudem werden die reservierten Flows isoliert übertragen. Aufgrund dieser Eigenschaften treten keine Queueing-Verluste² auf, vorausgesetzt alle Netzwerkelemente arbeiten fehlerfrei und es kommt während der Übermittlung eines Flows zu keinen Routing-Änderungen.

Guaranteed Service schafft absolute, mathematisch nachweisbare Grenzen bei den Ende-zu-Ende Queueing Delays. Dadurch können sowohl Bandbreite als auch Delay garantiert werden. Die Verzögerung bei der Übertragung eines Datagramms zwischen Sender und Empfänger besteht aus zwei Bestandteilen: einem fixen Anteil und der variablen Queueing Delay. Die erste Komponente ergibt sich aus den Laufzeiten der Strecke und durch Verzögerungen aktiver Elemente (z.B. Switching Delay). Sie ist abhängig vom Übertragungspfad, jedoch zeitlich konstant. Ihr Anteil an der gesamten Verzögerung wird nicht durch den Guaranteed Service festgestellt. Der Guaranteed Service bestimmt nur die Queueing Delay. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die garantierte Verzögerung sich auf den „worst case“ – also die maximale Queueing-Verzögerung bezieht, jedoch nicht auf die minimale oder durchschnittliche Delay der Datagramme. Bei der Berechnung der maximalen End-to-End Verzögerung, die ein Paket erfährt, ist daher die Latenz des Übertragungspfades zu bestimmen. Dieser Wert muss zu der durch den Guaranteed Service bestimmten maximalen Queueing-Delay addiert werden.

Mit Hilfe der PATH Messages des RSVP werden entlang des Übertragungsweges vom Sender zum Empfänger Informationen gesammelt. Dazu gehören die individuellen Queueing-Delays jedes Service Elementes (z.B. Router). Anhand dieser Parameter kann die maximale Verzögerung für ein auf diesem Pfad übermittelten Datagramm berechnet werden. Die maximale Queueing Delay leitet sich ab aus der Kumulierung aller Queueing

²Siehe Kapitel 3.2.

Verzögerungen in einer PATH Message auf dem Weg zum Empfänger.

Der Guaranteed Service eignet sich für robuste isochrone Inhalte und zeitkritische Echtzeit-Applikationen. Zu den robusten Anwendungen gehören Verteildienste (z.B. Multimedia-Broadcast) und Abrufdienste wie Videostreaming-Angebote. Hier fallen Verzögerungen nicht so stark ins Gewicht. Delay-Variationen können durch den Einsatz eines Pufferspeichers einfach ausgeglichen werden. Die Größe dieses Puffers richtet sich weitgehend nach der zeitvarianten Queueing Delay bzw. ihrem Maximalwert, der durch den Guaranteed Service vorgegeben wird. Realtime-Applikationen wird durch den Guaranteed Service Bandbreite und Maximalverzögerung zugesichert. [Hus00, Veg01, RFC2212]

5.2.2.2 Umsetzung der Serviceklassen

Die Beschreibung der Datenströme und ihrer Verkehrsparameter geschieht bei beiden Service Klassen mit Hilfe des Token Bucket Konzepts. Der Token Bucket Mechanismus ist eine abstrakte Beschreibung der mittleren Übertragungsgeschwindigkeit. Diese wird aus dem Quotienten der Größe der Bursts und einem bestimmten Zeitintervall bestimmt. Der Token Bucket besitzt einen integrierenden Charakter. Er wird entsprechend einer zugestandenen Bandbreite kontinuierlich mit Token gefüllt. Für jedes zu übertragende Paket wird gemäß seiner Größe eine bestimmte Anzahl an Token entnommen. Die Tiefe des Buckets entspricht der Burst Size. Sind nicht ausreichend Token für das Verschicken eines bestimmten Paketes im Token Bucket, wird es entweder verworfen oder gepuffert, bis genügend Token vorhanden sind. Ist dagegen die Kapazität des Eimers erschöpft, werden die überschüssigen Token verworfen und können somit nicht für zukünftig eintreffende Pakete genutzt werden.

Die maximale Queueing Delay, die durch den Guaranteed Service sichergestellt wird, ist eine Funktion der Burst Size des Token Buckets und der von einer Applikation angeforderten Bitrate. Beide Werte werden von der Anwendung bestimmt, so dass sie die zu erwartende Latenz selbst bestimmen kann. Ist die Verzögerung zu hoch, kann die Applikation über die Modifikation des eigenen Token Buckets (bzw. der Datenrate) die Queueing Delay den Erfordernissen anpassen. [Cis01a, McD00, RFC2216]

5.2.3 Differentiated Services (DiffServ)

Zur Umgehung des Skalierungsproblems der IntServ/RSVP Architektur, wurde das Differentiated Services Modell (DiffServ) entwickelt. Anstatt für jeden Datenstrom eine Si-

gnalisierung an allen Netzknoten entlang des Übertragungsweges durchzuführen, arbeitet DiffServ mit zusammengefassten (aggregierten) Datenströmen, die ähnliche Übertragungseigenschaften und Anforderungen an die Dienstgüte aufweisen. Die Router müssen nur Informationen weniger Aggregatflows speichern, anstatt viele verschiedene virtuelle Circuits oder Pfade zu handhaben.

Die Zuordnung der Pakete zu den kombinierten Flows wird durch eine In-Band-Signalisierung realisiert. Den IP-Paketen wird ihre Priorität über das Differentiated Services Feld zugewiesen, das auf das IPv4 Type of Service oder IPv6 Traffic Class Oktett abgebildet wird. Das DS Byte besteht aus dem 6 Bit Differentiated Services Codepoint (DSCP) und einem nicht spezifizierten 2 Bit Feld. Im Gegensatz zum IntServ-Modell garantiert DiffServ kein End-to-End QoS, da durch die fehlende Signalisierungsphase nicht sichergestellt werden kann, dass ein Router genügend freie Ressourcen besitzt. Das Verhalten der Netzknoten beim Weiterleiten von DiffServ-Traffic wird stattdessen über das Per Hop Behaviour (PHB) bestimmt.³ Über den DSCP wird den Paketen das jeweilige PHB zugeordnet.

Mit der DiffServ-Architektur lassen sich feiner unterteilte Dienstklassen bewerkstelligen, in der eine Anwendung eher eingeordnet werden kann. Die Administration der vielen Dienstklassen mit ihren verschiedenen QoS-Merkmalen ist im DiffServ-Modell komplexer. Es wird daher meist in Backbone-Netzen eingesetzt. Die Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der vorgestellten Service-Modelle und ihrer Parameter. [Bra99, Hus00, MEH00, RFC2474, RFC2475, Veg01]

Merkmal	Best-Effort Service	IntServ	DiffServ
QoS Unterstützung	nein	ja	ja
Anzahl Dienstklassen	1	3	> 6
Signalisierung	nicht erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich
Administrierbarkeit	einfach	mittel	komplex

Tabelle 5.1: Zusammenfassung: End-to-End QoS-Modelle

³PHB ist eine Beschreibung für das extern wahrnehmbare Verhalten eines DiffServ-Nodes beim Weiterleiten von Paketen mit der gleichen DSCP.

5.3 Multiprotocol Label Switching (MPLS)

In den Backbone-Netzen begrenzen die Router die Geschwindigkeit, da für jedes Paket eine Routing-Entscheidung anhand einer Routing-Tabelle und mehrerer Parameter getroffen wird. Die Entscheidung findet in der Network Layer des ISO/OSI Referenzmodells statt, so dass der Rechenaufwand für De-/Encapsulation, CRC-Berechnung (IPv4) usw. sehr hoch ist.

Das Layer 2 Protokoll ATM verringert die Rechenlast, da es die Routing-Entscheidung nicht pro Datagramm, sondern pro Verbindung trifft. Das Multiprotocol Label Switching (MPLS) verfolgt einen ähnlichen Ansatz für ein schnelleres Routen von Layer 3 Paketen (z.B. IP) durch das Internet. MPLS vergibt für einzelne Routen so genannte Labels. Alle Pakete, die auf einer Route transportiert werden, gehören einer Forward Equivalence Class (FEC) an und erhalten durch MPLS das selbe Label. Mit den MPLS Label Switched Paths (LSP) wird aus einer eigentlich verbindungslosen eine verbindungsorientierte IP-Übertragung. MPLS ist zwischen den Schichten 2 (Ethernet, ATM) und 3 angesiedelt. MPLS verlagert die Routing-Entscheidung auf eine niedrigere Ebene. Die Datagramme werden nicht geroutet, sondern geschwitcht. Die Wahl des Pfades erfolgt nicht mehr zeit- aufwändig anhand einer großen Routing-Tabelle, sondern über einen Label-Index.

Erhält ein Router ein Datenpaket ohne MPLS-Label, erfragt er vom nächstgelegenen Router ein Label für die Zieladresse. Dieses Label wird in den MPLS-Header eingetragen und dem Datagramm vorangestellt. Das Label wird anschließend in den Label-Index eingetragen und das Paket zum nächsten Knoten weitergeleitet. Alle weiteren Router entlang des Pfades können ihre Routing-Entscheidung⁴ anhand des Labels treffen, ohne die Layer 3 Daten zu berücksichtigen. MPLS verschiebt somit den Skalierungsaufwand von den Kernroutern auf Router am Rand des Netzes. Zum Austausch von Labeln und zur Bekanntgabe von Änderungen an den Routen dient das Label Distribution Protocol (LDP).

Ein weiterer Vorteil des Multiprotocol Label Switching ist in dessen Protokollunabhängigkeit zu finden. Die Umstellung des Internet Protocol auf Version 6 wird vor allem durch die Backbone-Router behindert. Beim Einsatz von MPLS können alle Router automatisch IPv6 routen.

Da für mehrere Pakete mit dem gleichen Ziel unterschiedliche Label vergeben werden können, kann MPLS eingesetzt werden, um ein End-to-End QoS zu realisieren. Die Datagramme können anhand ihres Labels auf verschiedene Routen mit jeweils anderen

⁴Genaugenommen findet nur eine Switching-Entscheidung statt.

Dienstgütemerkmalen verteilt werden. Nur der erste Router im Pfad muss die Priorität eines Datagramms erkennen und ein entsprechendes Label einsetzen. Die folgenden Knoten leiten die Pakete transparent weiter. Zur Unterscheidung der Verkehrsklassen dient das CoS-Feld eines MPLS-Headers (siehe Abbildung 5.1). Da das Feld nur eine Größe von 3 Bit aufweist, kann nur die IP Precedence des IPv4 darauf abgebildet werden. Um den DSCP zur Differenzierung der Datenströme zu verwenden, kann dieser in das Feld *Label* integriert werden. Wenn MPLS über ATM-Netze übertragen wer-

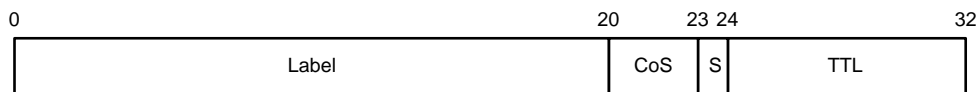


Abbildung 5.1: MPLS Label Format (nach [Veg01])

den, ersetzt das Label die VPI/VCI-Einträge im ATM-Header. MPLS kann in diesem Fall auf die QoS-Fähigkeiten des Asynchronous Transfer Mode zurückgreifen. Sonst werden zur Umsetzung eines Quality of Service die IP-basierten Mechanismen eingesetzt. [Gil01, Lei01a, RFC3031, RFC3036, Veg01]

Für den Transport großer Datenmengen wird IP/MPLS over WDM als optimales Netzwerkmodell angesehen. Mit der Erweiterung General MPLS (G-MPLS) werden die Labels nicht als Integer-Werte in den Bitstrom kodiert, sondern im Falle von WDM-Netzen (Wavelength Division Multiplex) wird jedem Label eine Wellenlänge⁵ zugewiesen. So lassen sich optische Netze optimal mit IP/MPLS Netzen koppeln. [MCG⁺02]

5.4 Algorithmen zur Umsetzung eines Quality of Service

In den nächsten Kapiteln wird ein Überblick über die QoS-Algorithmen gegeben, die für die Umsetzung von Dienstgütemerkmalen in den Netzknoten verantwortlich sind.

5.4.1 Congestion Management

Viele Internetverbindungen sind dadurch gekennzeichnet, dass die (Summen-) Übertragungskapazität der Eingangsports größer ist als die des ausgehenden Interfaces. Da-

⁵Dieses Konzept kann auch für andere Multiplex-Systeme wie TDM angewandt werden.

durch entstehen Überlastsituationen, d.h. es gehen mehr Datenpakete ein, als der Ausgangsport zu übertragen imstande ist.

Durch Stau (congestion) auf der Übertragungsstrecke werden Pakete verworfen und erreichen den Empfänger somit nicht mehr. Wegen der hohen Variabilität der Datenraten sind weder genaue Voraussagen noch allgemeingültige Statistiken möglich. Anhand der Verlustwahrscheinlichkeit kann dargelegt werden, dass sich ein überlastetes Netzwerk nicht durch einen Poisson-Prozess beschreiben lässt und somit im Falle eines Staus, Datenverkehr nicht bzw. schlecht vorhersagbar ist. Aus diesen Gründen ist es eine komplexe Aufgabe, ein Netzwerk effizient zu planen und Stausituationen zu verringern. [PF94]

Das Congestion Management verwaltet Stauungen durch Umsortierung der eingehenden Pakete anhand ihnen zugewiesener Prioritäten mittels Queueing-Algorithmen. Dabei werden im Falle einer Überlastung ein oder mehrere Puffer (Queues) erzeugt und die eingehenden Pakete entsprechend ihrer Priorität bzw. Klassifizierung in die Queues geschrieben (queueing). Nach einem festzulegenden Plan werden die Queues geleert (scheduling), in den Ausgangspuffer kopiert (dequeueing) und übertragen, wenn die Leitung wieder Pakete aufnehmen kann. Die Anzahl der Queues, die Klassifizierung und die Reihenfolge des Dequeueing-Prozesses werden durch Queueing-Algorithmen bestimmt. Es existieren verschiedene Queueing-Algorithmen, die für bestimmte Verkehrsfluss-Probleme optimiert sind.

Im folgenden werden einige der Mechanismen sowie ihre prinzipielle Eignung für die Übertragung von Echtzeit-Daten vorgestellt. Es ist zu beachten, dass alle hier vorgestellten Algorithmen nur in Stauungssituationen wirksam werden. Unter geringer Last werden alle Pakete in der Reihenfolge des Eingangs ohne Zwischenspeicherung versandt. Queueing-Algorithmen sind nicht miteinander kombinierbar, da einem Interface immer nur ein Mechanismus zugewiesen werden kann. [Cis01a, RFC2309]

5.4.1.1 First In First Out Queueing (FIFO)

FIFO-Queueing ist der einfachste Algorithmus, denn er besitzt keine Möglichkeiten zur Priorisierung oder Klassifizierung von Datenverkehr. Es existiert nur ein Puffer, d.h. alle Pakete werden gleich behandelt und in der selben Reihenfolge verschickt, wie sie eintreffen. FIFO-Queueing bietet somit nur Best-Effort Service. Eine Anwendung kann die gesamte Bandbreite aufbrauchen sowie burstartiger Verkehr Wartezeiten bei zeitkritischen Verbindungen hervorrufen. FIFO-Queueing ist für die gleichzeitige Übertragung von asynchronen und synchronen Daten nicht geeignet. In Abbildung 5.2 ist der

Queueing-Algorithmus schematisch dargestellt. [Cis01a, Hus00, McD00, Veg01]

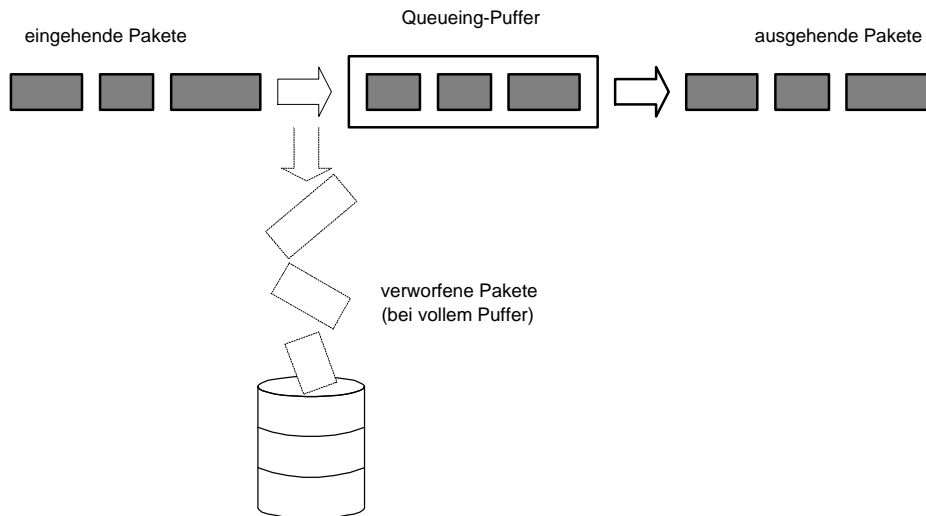


Abbildung 5.2: Funktionsweise des FIFO-Queueing (nach [Cis01a])

5.4.1.2 Weighted Fair Queueing (WFQ)

Fair Queueing ist eine Methode, die Bandbreite fair auf die einzelnen Datenpakete zu verteilen. WFQ gibt dazu identifiziertem Verkehr Gewicht (Priorität), um ihn zu klassifizieren und anhand einer solchen Bewertung zu bestimmen, wie viel Bandbreite einzelnen Verbindungen relativ zu anderen zusteht. Der Verkehr wird anhand von Flows⁶ klassifiziert. WFQ priorisiert interaktiven Verkehr⁷ (meist mit geringem Bandbreitebedarf), d.h. dieser wird als erstes dequeued, um Antwortzeiten zu verringern. Die restliche Bandbreite wird zwischen Verbindungen mit hohen Bandbreitenanforderungen entsprechend ihren Gewichten aufgeteilt. Damit überwindet es eine Einschränkung des FIFO-Queueing, welches Flows ohne Rücksicht auf deren Bandbreitenkonsum überträgt. Jedem Flow wird eine Queue zugeordnet. Neu eintreffende Pakete für Flows mit hohem Datenvolumen werden nach Erreichen einer bestimmten Schwelle verworfen, während Pakete für niedervolumige Flows immer noch gepuffert werden. Durch WFQ ist es möglich, Datenströmen mit hohen oder niedrigen Bitraten konstante Antwortzeiten zu liefern, ohne

⁶Flows sind charakterisiert durch die selbe Quell- und Zieladresse (IP- oder MAC-Adresse), verwendetem Protokoll, Quell- und Zielport, der Socket-Nummer und ihrem DiffServ Prioritäts-Wert.

⁷Im Allgemeinen handelt es sich um Request/Response Anwendungen, wie z.B. Telnet, WWW usw.

die Bandbreite stark erhöhen zu müssen. Außerdem passt es sich den wechselnden Netzwerkbedingungen an. Startet oder endet ein Flow, wird die jedem Paketstrom zugewiesene Bandbreite neu berechnet. Abbildung 5.3 zeigt das Prinzip des Weighted Fair Queueing.

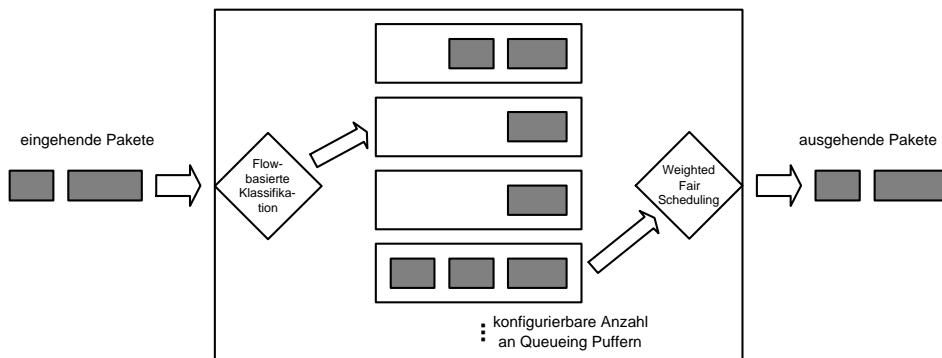


Abbildung 5.3: Funktionsweise des Weighted Fair Queueing (nach [Cis01a])

WFQ erkennt durch DiffServ priorisierte Pakete (DSCP, IP Precedence, Traffic Class). Solche Datagramme werden schneller aus dem Wartepuffer entnommen, um die Antwortzeiten gering zu halten. Mit steigender Priorität eines Flows wird somit im Falle eines Staus mehr Bandbreite für ihn freigehalten. Dazu teilt Weighted Fair Queueing jedem Flow ein Gewicht entsprechend der benutzten Bandbreite zu. Die Datenströme mit dem geringsten Gewicht werden als erste aus der Queue entnommen und übertragen. Der Queueing-Algorithmus teilt nun das Gewicht jedes Flows durch dessen Prioritätswert und verringert damit dessen Gewicht.

Prinzipiell ist WFQ geeignet, synchrone Daten zu übertragen, da es Flows mit hohen Bandbreitebedarf abwertet. Interaktiver Verkehr findet konstante Bedingungen (Bandbreite, Delay) vor. Durch die fehlende Konfigurationsmöglichkeit (abgesehen von der Zuweisung unterschiedlicher Prioritäten durch Differentiated Service) ist dagegen nicht die volle Kontrolle über einen Real-Time-Stream vorhanden. Im Extremfall könnte z.B. ein VoIP-Flow mehr Bandbreite benötigen als eine Reihe von interaktiven Flows (Telnet, Remote Control) und würde dann in einer Stausituation nicht zuerst dequeued und Pakete verlieren. [Cis01a, Hus00, McD00]

5.4.1.3 Class-Based Weighted Fair Queueing (CBWFQ)

Class-Based Weighted Fair Queueing ist ein proprietärer Queueing-Algorithmus von Cisco. Es erweitert die Möglichkeiten des WFQ um definierbare Verkehrsklassen mit bestimmbar Eigenschaften. Für jede erzeugte Klasse wird eine Queue reserviert. Pakete werden durch Übereinstimmung von Merkmalen den Klassen zugeteilt. Als Kriterien dienen verwendetes Protokoll, Eingangsinterface oder ACLs. Folgende Eigenschaften lassen sich einer Klasse zuweisen:

- Bandbreite (wird im Staufall garantiert)
- Gewicht (wird aus der Bandbreite bestimmt)
- Maximal akkumulierbare Anzahl an Paketen in der Queue
- Verhalten bei Erreichen des Paket-Limit (Tail Drop oder WRED, siehe Abschnitt 5.4.2)

Alle Pakete, die sich nicht einer definierten Klasse zuordnen lassen, werden in die default-class geschrieben, der wiederum Eigenschaften zugewiesen werden können.

Beim Class-Based Weighted Fair Queueing wird jedem Paket ein aus der zugewiesenen Bandbreite (einer Klasse) abgeleitetes Gewicht zugeteilt. Somit ist das Gewicht frei konfigurierbar. Ein Paket wird in die Warteschlange eingereiht, nachdem ihm sein Gewicht zugeordnet wurde. Die Gewichte sollen sicherstellen, dass die Warteschlange fair bedient wird.

CBWFQ bringt damit zwei Vorteile mit sich: Es erlaubt die Zuteilung von Bandbreite für eine bestimmte Klasse, die unter Last garantiert wird. Die verfügbare Bandbreite kann auf bis zu 64 Klassen aufgeteilt und im Gegensatz zu WFQ kontrolliert werden.

Durch die Fähigkeit, synchronen Daten eine eigene Klasse zuzuordnen und diesen die benötigte Bandbreite zuzuteilen, ist CBWFQ grundsätzlich als Queueing Algorithmus für Echtzeitanwendungen geeignet. Allerdings fehlt eine strikte Priorisierung gegenüber anderem Verkehr, um eine akzeptable Verzögerungszeit zu erzielen. [Cis01a, Veg01]

5.4.1.4 Priority Queueing (PQ)

Priority Queueing bietet dem Nutzer strikte Priorisierung. Dazu besitzt der Algorithmus Warteschlangen mit unterschiedlich hohen Prioritäten. In der Abbildung 5.4 ist PQ schematisch dargestellt.

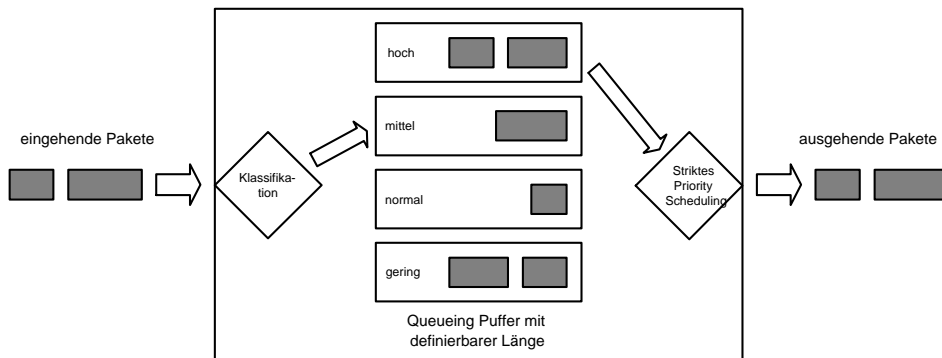


Abbildung 5.4: Funktionsweise des Priority Queueing (nach [Cis01a])

Die Warteschlange mit der höchsten Priorität wird immer zuerst bedient. Erst wenn die Queue leer ist, folgen die anderen Queues entsprechend ihrer Wertigkeit. Dadurch sind schnelle Antwortzeiten und garantierte Bandbreiten bedingt. PQ ist daher ideal für die Übertragung von Real-Time Diensten.

Ein Schwachpunkt dieses Konzepts ist die Tatsache, dass Pakete aus den Queues mit geringeren Prioritäten unter Umständen nie gesendet werden, wenn die Leitung mit Paketen höherer Priorität ausgelastet ist. Das lässt sich indes durch eine Limitierung der Bandbreite für einzelne Queues umgehen. Priority Queueing produziert extra Overhead und ist daher für schnelle Interfaces mit hohen Bitraten nur bedingt geeignet. Aus diesem und oben genannten Gründen ist der Einsatz von PQ vor allem für überlastete langsamere Verbindungen gedacht. [Cis01a, Hus00, McD00]

5.4.1.5 Custom Queueing (CQ)

Custom Queueing ist eine Realisierung eines Weighted Round Robin oder Class-Based Queueing Algorithmus von Cisco. CQ erlaubt das Anlegen von bis zu 16 Queues, die zirkular abgearbeitet werden. Einstellbar sind die maximal pro Warteschlange in einem Durchgang zu übertragenden Pakete und die Länge der Queue. Aus diesen Angaben leitet sich die Bandbreite einer Queue ab. So springt der Algorithmus von Warteschlange zu Warteschlange und leert sie. Der Vorgang dauert so lange an, bis entweder die vereinbarte Anzahl an Paketen erreicht oder die Queue leer ist. Dann spricht CQ die nächste Warteschlange an. In Überlastsituationen stellt Custom Queueing so sicher, dass jede Warteschlange nur den vereinbarten prozentualen Anteil der Bandbreite erhält. CQ ist

ein statischer Algorithmus, d.h. er passt sich nicht den wechselnden Netzwerkbedingungen an. In der Abbildung 5.5 wird die Funktionsweise des Custom Queueing dargestellt.

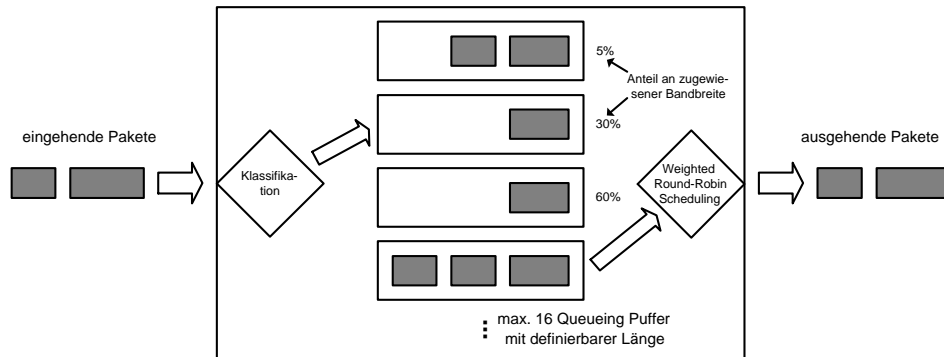


Abbildung 5.5: Funktionsweise des Custom Queueing (nach [Cis01a])

Aufgrund der aufgeführten Eigenschaften und der fehlenden Priorisierung ist Custom Queueing für die Übertragung von delaysensitiven Daten nicht geeignet. CQ gewährleistet zwar eine bestimmte Bandbreite, es ist dagegen nur schlecht möglich, Voraussagen über Verzögerungen zu treffen. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Es wird davon ausgegangen, dass mehrere Classes of Service (Custom Queues) definiert worden sind, die der Reihe nach abzuarbeiten sind. Sind alle Queues gefüllt, dauert es lange (je nach eingestelltem Queueelänge), bis eine der Warteschlangen an der Reihe ist. Diese kann nun ihre Pakete auf einen Schlag abschicken. Es wechseln sich also Perioden mit hoher und geringer Verzögerung ab. Solch starken Variationen beeinträchtigen die Qualität von Echtzeitanwendungen erheblich. [Cis01a, Hus00, Veg01]

In der Tabelle 5.2 sind alle Algorithmen des Congestion Management und deren Eigenschaften zusammengefasst.

5.4.2 Congestion Avoidance

Die vorangegangenen Kapitel beschreiben die Möglichkeiten zum Management von Stausituationen. In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie Überlastungen der Verbindung vermieden werden können. Dies beinhaltet die Überwachung der Netzlast sowie das gezielte Verwerfen von Paketen, um der Stauung entgegenzuwirken.

Merkmal	FIFO	WFQ	CBWFQ	PQ	CQ
QoS Unterstützung	nein	ja	ja	ja	ja
Konfiguration	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
Merkmal	keine Verkehrs-priorisierung	„faire“ Zuteilung der Bandbreite für Flows anhand ihrer Gewichte	ermöglicht garantierte Bandbreite für definierbare Verkehrsklassen	strikte Priorisierung der Queue mit der höheren Priorität	zirkuläre Abarbeitung der Queues

Tabelle 5.2: Zusammenfassung: Congestion Management (nach [Cis01a])

5.4.2.1 Verfahren der Congestion Avoidance

Das Standard Packet Discard Verfahren ist Tail Drop. Im Fall einer Überlastung werden alle Pakete verworfen, wenn die Queue gefüllt ist. Tail Drop arbeitet ohne Berücksichtigung von CoS, d.h. alle Pakete werden gleich behandelt (Best-Effort Service).

Daneben existiert mit Random Early Detection (RED) eine Methode, die es ermöglicht, bei Netzwerkstauungen zu agieren, anstatt zu reagieren. Grundlage von RED sind Transportprotokolle (z.B. TCP), die auf Zellverlust mit Herabsetzung der Bitrate reagieren. RED besitzt eine eigene Queue. Übersteigt deren Füllgrad eine bestimmte Schwelle, verwirft RED zufällig Pakete. Ein TCP-Sender verringert nun solange seine Bitrate (slow start), bis alle Pakete beim Empfänger ankommen. Die Stauung ist dann beseitigt. RED lässt sich als Integrierglied verdeutlichen. Es glättet die Spitzen, die durch den burst-artigen Charakter der asynchronen Datenübertragung entstehen und passt ihn der Form synchronen Verkehrs an. TCP eignet sich wegen seiner Fähigkeit, Übertragungen kurzzeitig stoppen sowie die Datenrate an die verfügbare Bandbreite anpassen zu können, gut für den Einsatz von Random Early Detection. Unidirektionale oder nicht quittierende Transportprotokolle (z.B. UDP) sind prinzipbedingt nicht für RED verwendbar.

RED verwirft Pakete bevor die Warteschlange gefüllt ist und vermeidet damit, viele Pakete auf einmal fallen zu lassen. Durch die zufällige Auswahl der zu verwerfenden Pakete verringert RED weiterhin die Chance einer Synchronisation der einzelnen Flows.

Wird Tail Drop benutzt, gehen Pakete mehrerer TCP-Verbindungen bei Überlastung verloren. Diese verringern alle daraufhin simultan ihre Datenrate. Die Verkehrsdichte nimmt schlagartig ab. Wegen der nun optimalen Bedingungen versuchen alle TCP-Sitzungen wiederum, gleichzeitig ihre Paketrage zu erhöhen. Die entstehende Wellenbewegung reduziert die Effektivität des Netzes unnötig. [Cis01a, Hus00, McD00, RFC2581, Veg01]

5.4.2.2 Weighted Random Early Detection (WRED)

Bei Weighted Random Early Detection handelt es sich um eine Cisco-Realisierung eines um DiffServ-Funktionalität erweiterten RED Verfahrens. Weighted Random Early Detection ergänzt RED um die Fähigkeit, den Datenverkehr zu klassifizieren, indem es die Prioritätswerte der DiffServ-Pakete auswertet. Droht ein Interface zu verstopfen, werden vorzugsweise Pakete niedriger Priorität verworfen. Je höher die Priorität eines Paketes ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, verschickt zu werden. Im Zusammenspiel mit RSVP (siehe Abschnitt 5.2.2) werden zuerst Pakete verworfen, die nicht zu einem RSVP-Flow gehören.

Weighted Random Early Detection wichtet die einzelnen Flows, wie in Kapitel 5.4.1.2 beschrieben. Pakete von Datenströmen mit einem hohen Gewicht (hoher Bitrate) werden zuerst verworfen. Flows mit einem hohen Datenaufkommen müssen daher eher ihre Geschwindigkeit herabsetzen als Flows, die nur wenig Verkehr erzeugen. Die Funktionsweise von WRED wird in Abbildung 5.6 dargestellt. [Cis01a]

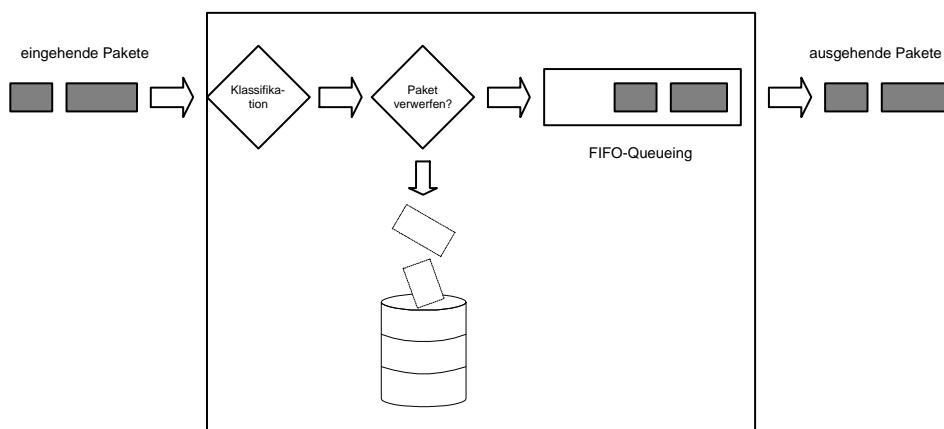


Abbildung 5.6: Funktionsweise des Weighted Random Early Detection (nach [Cis01a])

WRED vermeidet ebenso wie RED die Synchronisation einzelner Flows. Dieser Algo-

rithmus ist vor allem für Verbindungen gedacht, in der der größte Teil am Verkehrsaufkommen durch TCP/IP-Flows verursacht wird. Protokolle ohne Verkehrskontrolle oder Rückkanal (wie UDP) können nicht erkennen, dass Pakete verworfen wurden. Daraus resultiert, dass weder verworfene Pakete erneut gesendet werden, noch eine Verringerung des Verkehrsstaus eintritt. WRED lässt sich nicht mit CQ, PQ oder WFQ kombinieren. [Cis01a, Veg01]

5.4.3 Policing und Shaping

Policing und Shaping bezeichnet zwei Verfahren zur Regulierung des Verkehrs. Sie werden eingesetzt, um sicherzustellen, dass ein Flow oder ein Sender sich an einen vereinbarten Verkehrsvertrag hält. Die beiden Verfahren unterscheiden sich im Verhalten im Falle einer Überschreitung der Vereinbarungen. Ein Policer verwirft im Allgemeinen Pakete, wogegen ein Shaping-Algorithmus derartige Pakete mittels eines Puffers verzögert. Beide Mechanismen beruhen auf dem Token Bucket Modell (siehe Kapitel 5.2.2.2). [Cis01a, Hus00, McD00]

5.4.4 Evaluierung der Performance von End-to-End QoS Mechanismen

Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Algorithmen zur Umsetzung eines QoS ist für den Einsatz in Kommunikationsnetzen von großer Bedeutung. Die Wahl eines unpassenden Queueing-Algorithmus kann beim Transport über Netze mit hoher Auslastung zur Reduzierung von Dienstgütemerkmalen führen. Eine Betrachtung zur Leistung der in den Kapiteln 5.4.1-5.4.3 aufgeführten Algorithmen und Mechanismen in überlasteten Netzwerken anhand mathematischer Modelle und praktischen Versuchen ist u.a. in [Hus00, IKTO00, McD00] zu finden. Für die Überwachung der Einhaltung der QoS-Parameter ist das Monitoring der Verkehrsparameter nötig. Einen Überblick zu diesem Thema enthält [McD00].

Kapitel 6

Zusammenfassung

Eine Folge des Bedürfnisses nach breitbandigen, hochqualitativen Inhalten im Internet ist der gestiegene Anspruch an Kommunikationsnetze und der wachsende Bedarf nach Zugangsnetzen mit hohen Übertragungskapazitäten. Anhand verschiedener Studien konnte der Bedarf nach breitbandigen Anschluss-Netzen und Inhalten aufgezeigt werden. Herkömmliche Access-Netzwerke sind jedoch nicht in der Lage, Inhalte mit hoher Bandbreite zu transportieren. Zudem bedarf es heute verschiedener Zugangssysteme, um zu kommunizieren oder sich zu informieren.

Mit einer durchgängig IP-basierten Kommunikationsinfrastruktur bis zum Teilnehmer können traditionelle Strukturen mit ihren verschiedenen Zugangstechniken (PSTN für die Telefonie und den Internetzugang, CATV für das Fernsehen) durch ein Netz mit integrativem, universellen und diensteneutralen Charakter ersetzt werden. Der Teilnehmer erhält alle angebotenen Applikationen über ein Übertragungsmedium mit einer definierten Schnittstelle. Das Internet Protocol ermöglicht mit Hilfe seiner hohen Flexibilität die Integration aktueller und zukünftiger Kommunikationsdienste. Ziel der Entwicklung ist daher ein konvergierendes, IP-basiertes und breitbandiges Access-Netz.

Die Zugangs-Netze sind definiert als Verbindung zwischen Anwender und Service Provider, die mit Hilfe verschiedener Access-Technologien hergestellt wird. Die Strecke des Anschlussnetzes wird i.A. als Local Loop oder Letzte Meile bezeichnet.

Die aktuelle Internet Protocol Version 4 wird aufgrund einiger Beschränkungen den Anforderungen in einem durchgängig IP-basierten Multiservice-Kommunikationsnetz nicht mehr gerecht. Die neue Internet Protocol Version 6 stellt eine Evolution des IPv4 dar. Mit der Erweiterung des Adressraumes, der Vereinfachung des Headers, der verbesserten Skalierbarkeit beim Multicast-Routing und den integrierten Quality of Service Fähigkeiten kann IPv6 die Einschränkungen des IPv4 aufheben.

Offene Standards und Normen bilden die Grundlage für den interoperablen Betrieb von Geräten verschiedener Hersteller. In dieser Arbeit wurde daher besonderen Wert auf die

Standardisierung der Technologien gelegt. Die Spezifikationen der einzelnen Techniken, Protokolle und Mechanismen wurden ausführlich dargestellt.

Die angebotenen Dienste stellen aufgrund der unterschiedlichen Übertragungsverhalten jeweils andere Anforderungen an das Netz hinsichtlich der Übertragungsparameter. In Anbetracht dessen ist eine Klassifizierung der Applikationen anhand ihrer Übertragungscharakteristik unabdingbar. Zu diesem Zweck wurden unter anderem durch die IETF, ITU-T und das ATM-Forum Service Klassen definiert. Die auf ATM-Netze ausgerichteten Empfehlungen der ITU-T und des ATM-Forum lassen sich nicht ohne weiteres für ein IP-basiertes Multiservice Access-Netzwerk übernehmen. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein Klassifikationsschema entwickelt, das sich zwar an den bestehenden Klasseneinteilungen orientiert, jedoch die spezifischen Anforderungen IP-basierter Multiservice Access-Netze einbezieht. Hauptaugenmerk beim Entwurf der Service Klassen war die Zuordnung der Anwendungen zum benötigten Quality of Service.

In einer Abschätzung des Bandbreitenbedarfs in zukünftigen Access-Netzen wurde eine Bitrate von 100 Mbit/s pro Haushalt (für die Übertragung eines umfassenden Dienstespektrums) ermittelt, die durch das Access-Netz zur Verfügung gestellt werden müssen. FTTH stellt das einzige Access-System dar, das Bandbreiten oberhalb 100 Mbit/s an eine Vielzahl von Teilnehmern liefern kann. Jedoch ist der flächendeckende Einsatz von Glasfasern bis zum Teilnehmer (FTTH) innerhalb eines Zeitraumes bis 2010 unwahrscheinlich. Die nächsten Jahre werden durch eine Migration vom schmalbandigen Zugangsnetz zum Breitband-Access über optische Medien durch den schrittweisen Ausbau der Glasfaser-Netze geprägt sein.

Digital Subscriber Line (Digitale Teilnehmeranschlussleitung) ist eine Oberbegriff für Übertragungstechnologien, bei denen die Verbindung zwischen Vermittlungsstelle und Teilnehmer komplett digitalisiert ist. Durch die Nutzung der zweiadrigen Kupfer-TAL des PSTN ist das Marktpotential der DSL-Technik sehr hoch. DSL stellt die einzige Access-Technologie dar, bei der die angegebene Bandbreite dem Teilnehmer dediziert zur Verfügung steht. Die wichtigsten Vertreter der DSL-Technik sind Asymmetric DSL (ADSL) mit maximal 6,144 Mbit/s im Downstream und Very High Bit Rate DSL (VDSL) mit 52 Mbit/s maximaler Downloadrate. VDSL kann aufgrund seiner beschränkten Reichweite nur als Hybrid-Technik mit einer optischen Zuführung betrieben werden. Quality of Service Funktionen müssen durch höhere Schichten (z.B. ATM) erbracht werden.

Powerline Communications (PLC) ist eine Übertragungstechnologie, bei der die praktisch ubiquitären Niederspannungsnetze als Transportmedium dienen. Dieses hohe Potential kann PLC aufgrund geringer Übertragungsraten von max. 4,2 Mbit/s (Shared) und feh-

lender QoS Unterstützung (nur über höhere Layer) nicht umsetzen. Die Marktchancen der PLC-Technik bei den Breitbandanschlüssen werden nach vielen Ausstiegen von Anbietern eher gering eingeschätzt.

Wireless Local Loop (WLL) weist Bitraten von bis zu 134,4 Mbit/s (Shared) auf und bietet eine integrierte QoS-Unterstützung. Durch die knappen Frequenzressourcen kann WLL nur als komplementäre Anschlusstechnologie angesehen werden. Dessen Vorteile liegen in der kurzen Zeit für den Aufbau einer Infrastruktur sowie der wirtschaftlich vertretbaren Erreichbarkeit von Nutzern in mittel bis schwach besiedelten Räumen.

Der Breitband-Access über die Satellitenübertragung ist aufgrund der hohen Latenz für IP-basierte Multiservice Anwendungen nur bedingt geeignet. Den Nutzern stehen bis zu 68 Mbit/s (Shared) zur Verfügung. Um bestimmte Dienstgütemerkmale garantieren zu können, bedient man sich der QoS-Funktionen des ATM. Die Stärken der Satellitenübertragung liegen im Einsatz als Verteilnetz und beim Anschluss strukturschwacher Regionen.

Hybrid Fiber/Coax (HFC) bezeichnet eine Kombination aus optischer Zuführung und bidirektionalen BK-Netz. Durch den Einsatz von Fiber Nodes kann die Anzahl der Nutzer, die sich die selben Ressourcen teilen, verringert werden. HFC kann Daten mit bis zu 52 Mbit/s (Downstream, Shared) übertragen. Die Implementierung der QoS-Funktionen ist abhängig vom verwendeten Standard. HFC wird neben der DSL-Technik die größten Marktchancen eingeräumt.

Fiber to the Home (FTTH) ist ein Breitband-Anschluss, der durchgängig über Glasfaser geführt führt. Wenn für die Zuführung ein kostengünstiges Passive Optical Network zum Einsatz kommt, beträgt die maximale Bitrate im Downstream 622 Mbit/s (Shared). QoS-Funktionalität kann entweder über ATM oder Ethernet (IEEE 802.1D) integriert werden. Im Zeitraum bis 2010 werden für FTTH nur geringe Teilnehmerzahlen im privaten Bereich prognostiziert.

Die Dienstqualität nimmt bei Paketverlust (infolge mangelnder Bandbreite) sowie mit steigender Verzögerung des Signals und Variation der Delay (Jitter) rapide ab. Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten ist bei paralleler Übertragung von zeitkontinuierlichen und asynchronen, burst-artigen Daten eine Priorisierung der synchronen Daten (Audio, Video) gefordert. Mittels Quality of Service (QoS) kann eine bestimmte Dienstleistungsgüte zwischen Sender und Empfänger garantiert werden. Das Vorgehen kann anhand von End-to-End QoS-Modellen beschrieben werden. Integrated Services (IntServ) setzt eine explizite Signalisierungsphase (mit Hilfe des Resource Reservation Protocol) voraus, in der die Verkehrsparameter ausgehandelt werden. IntServ garantiert ei-

ne bestimmbare Bandbreite und maximale Queueing Delay. Da das Verfahren schlecht skaliert, ist es nur für lokale Netze oder VPNs geeignet. Differentiated Services (DiffServ) umgeht das Skalierungsproblem durch das Zusammenfassen von Datenströmen mit ähnlicher Verkehrscharakteristik (so genannte Aggregate). DiffServ arbeitet im Gegensatz zu IntServ mit einer In-Band-Signalisierung. Die Administration von DiffServ ist sehr komplex. Es wird vorwiegend in Backbone-Netzen eingesetzt.

Das Multiprotocol Label Switching (MPLS) kombiniert hohe Routing-Geschwindigkeit durch das Verlagern der Routing-Entscheidung in die Switching Ebene. Routen werden durch Label gekennzeichnet, die einen schnellen Zugriff auf die Routing-Informationen ermöglichen. Mit Hilfe der Label können zudem verschiedene Verkehrsklassen unterschiedlich geroutet werden, so dass sich bei entsprechenden Dienstgütemerkmalen der Routen eine QoS Funktionalität realisieren lässt.

Die Algorithmen zur Umsetzung eines QoS in den Netzknoten lassen sich in Congestion Management, Congestion Avoidance, Policing und Shaping Mechanismen gliedern. Die verschiedenen Algorithmen wurden erläutert und ihre Vor- und Nachteile herausgestellt.

Anhang A

Anhang

A.1 Adressentypen im IPv6

A.1.1 Unicast-Adressen

Mit einer Unicast-Adresse wird genau ein Interface eines Node (Router oder Endsystem) identifiziert. Ein an eine solche Adresse gerichtetes Paket, kann nur von einem einzigen – dem explizit adressierten – Interface empfangen werden. Mit Hilfe der Format-Präfixe können mehrere Unicast-Adresstypen differenziert werden, die sich in Struktur und der damit verbundenen Anzahl der Hierarchiestufen unterscheiden (siehe Abbildung A.1).

IPv4-kompatible IPv6-Adressen und IPv4-mapped IPv6-Adressen finden bei der Migration von IPv4 nach IPv6 Verwendung (siehe Kapitel 3.3.3). Daneben sind globale, Link-Local- und Site-Local- (firmen- oder filialenweite IP-Nummern) Adressen definiert.

Die Richtlinien für aggregierbare, globale Unicast Adressen sind in [RFC2374] beschrieben. Die Adresse wird unterteilt in einen globalen (öffentlichen) Teil, einen Standort-spezifischen Teil und einen Endsystem-Indikator. Der globale Teil wird aus dem Format-Präfix (FP), dem Top-Level Aggregation Identifier (TLA ID) und dem Next-Level Aggregation Identifier (NLA ID) gebildet. Diese Werte entsprechen der Netzwerk-Adresse in einer IPv4 Adresse und werden dazu genutzt, um IP-Pakete über das Internet zum angegebenen Standort weiterzuleiten. Die NLA Ebene erlaubt eine Unterteilung in weitere Hierarchieschichten. Der Site-Level Aggregation Identifier (SLA ID) dient der Beschreibung der Subnetz-Struktur innerhalb einer Lokation. Die letzten 64 Bit der IP-Adresse (Interface ID) werden aus der so genannten EUI-64 (Extended Unique Identifier) gewonnen. Die EUI-64 bezeichnet eine IEEE-Norm, mit der eine eindeutige 64-Bit-Zahl definiert wird, die aus der 48 Bit breiten MAC-Adresse einer Netzwerkkarte abgeleitet werden kann. Sie kann lokale oder globale Eindeutigkeit besitzen.

Link-Local-Adressen werden während der Autokonfiguration und in Router-losen Net-

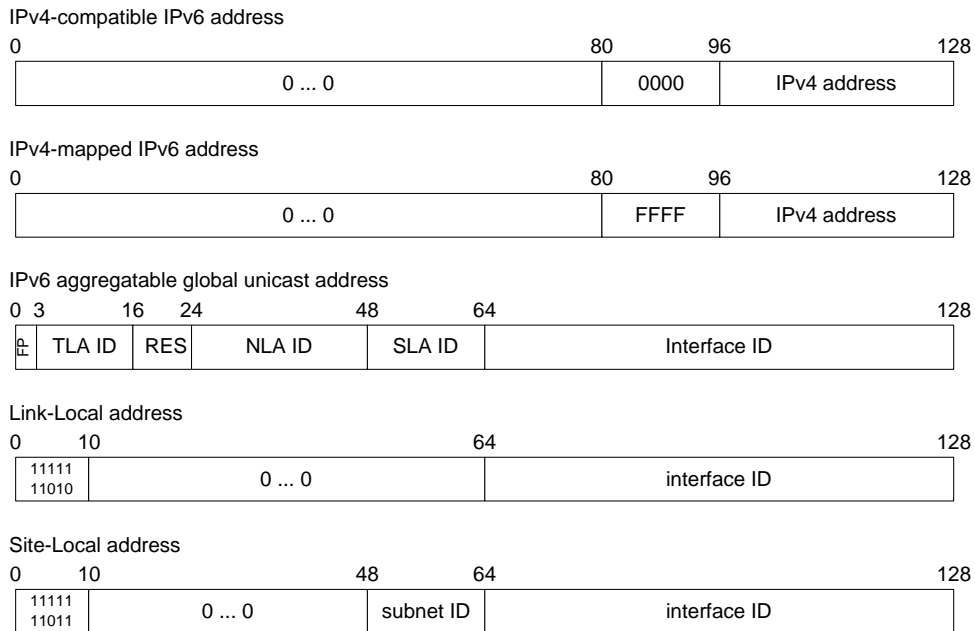


Abbildung A.1: Unicast-Adresstypen (nach [RFC2373])

zen eingesetzt. Sie besitzen nur in Subnetzen Gültigkeit. Router dürfen Pakete mit einer Link-Local-Quelladresse nicht weiterleiten. Die Adresse enthält neben einem Präfix nur die Interface ID. Site-Local-Adressen werden in Standorten verwendet, die nicht an das Internet angeschlossen sind. Wird die Lokation später angeschlossen, muss nur das Präfix einer Site-Local-Adresse durch ein globales Präfix (FP, TLA ID, NLA ID) ersetzt werden. Änderungen an der Subnetzkenung (SLA ID) und Interface ID sind nicht nötig. [Bra99, RFC1887, RFC2373]

A.1.2 Anycast-Adressen

Mit einer Anycast-Adresse wird eine Gruppe von Interfaces identifiziert, die zu verschiedenen Systemen (vor allem Zwischensystemen) gehören können. Ein an eine solche Adresse gerichtetes Paket wird an genau ein Interface dieser Gruppe weitergeleitet. In der Regel ist dies der Routing-Metrik nach nächstgelegene Interface. Anycast-Adressen werden dem Unicast-Adressraum entnommen, d.h. sie besitzen die gleichen Adressformate und sind daher von Unicast-Adressen syntaktisch nicht unterscheidbar. Eine Unicast-Adresse, die mehreren Interfaces zugewiesen wird, ist automatisch eine

Anycast-Adresse. Um die Anycast-Adresse als solche zu erkennen, müssen Knoten, denen diese zugewiesen wird, explizit konfiguriert werden. Anycast-Adressen lassen sich z.B. dazu nutzen, um Pakete bewusst innerhalb des Netzes eines bestimmten Providers zu übertragen oder um vom Sender den Pfad zu steuern, entlang dessen Traffic fließt. Die Hops lassen sich in den Optionen des IP Headers festlegen. [Bra99, RFC2373]

A.1.3 Multicast-Adressen

Die Gruppenkommunikation ist bis heute wenig flexibel. Jedes Paket muss vom Sender für jeden Empfänger extra verschickt werden. Greifen mehrere hundert Nutzer gleichzeitig auf bestimmte Daten eines Servers zu, werden diese hundertfach parallel übertragen, anstatt sie erst kurz vor Erreichen des Empfängers zu vervielfältigen. Das führt zu einer Konzentration eines riesigen Datenaufkommens an einer Stelle und erfordert die Anbindung des Servers mit sehr hoher Bandbreite.

Multicasting erlaubt eine effiziente Gruppenkommunikation im Internet. Ein Sender muss ein Paket nur einziges Mal an eine Multicast-Adresse absenden, damit es alle Mitglieder der Gruppe empfangen. Ein Host kann einer beliebigen Anzahl von Multicast-Gruppen angehören. Eine Multicast-Adresse (siehe Abbildung A.2) ist durch ein Flag-Feld, ein Scope-Feld und die Gruppen-ID gekennzeichnet. Das 4 Bit lange Scope-Feld bestimmt den Gültigkeitsbereich und damit die Reichweite einer Multicast-Datenübertragung. So sind relativ feine Abstufungen von „auf den Host beschränkt“ bis zu „unbeschränkte (weltweite) Ausstrahlung“ möglich (siehe Tabelle A.1).

Mit dem Flag-Feld wird zwischen transient und permanent („well-known“) zugewiesenen Multicast-Adressen unterschieden. Permanente Gruppen besitzen eine durch die Internet Assigned Numbering Association (IANA) registrierte Adresse. Transiente Gruppen sind durch nicht-permanente Adressen gekennzeichnet. Die Gruppen-ID identifiziert die Multicast-Gruppe innerhalb des Geltungsbereiches. Der Wert des Scope-Feldes ist bei permanent zugewiesenen Adressen im Gegensatz zu dem nicht permanent zugewiesener nicht von Belang. Transiente Multicast-Adressen besitzen nur innerhalb des gegebenen Gültigkeitsbereiches (Scope) eine Bedeutung. So haben zwei transiente Multicast-Gruppen mit gleicher ID an verschiedenen Standorten bei einem Scope-Wert von 5 keine Beziehung zueinander. [Bra99, RFC2373]

Durch die IETF wurden bereits einige Multicast-Adressen vordefiniert. Dazu zählen die Adressen für alle IPv6 Knoten einer Gruppe (All Nodes Address), die Gruppe aller IPv6 Router (All Routers Address) sowie weiterer Gruppen mit ihrem jeweiligen Scope.

Scope	Bedeutung
0	reserved
1	node-local scope
2	link-local scope
3	(unassigned)
4	(unassigned)
5	site-local scope
6	(unassigned)
7	(unassigned)
8	organization-local scope
9	(unassigned)
A	(unassigned)
B	(unassigned)
C	(unassigned)
D	(unassigned)
E	global scope
F	reserved

Tabelle A.1: Geltungsbereich einer Multicast-Adresse (nach [RFC2373])

[RFC2375]

Die IPv4 Broadcast-Nachrichten wurden in IPv6 durch Multicast-Messages ersetzt. Diese Funktionalität wird am Beispiel eines ARP Request erläutert. Das Address Resolution Protocol wird bei IPv4 benötigt, um die korrespondierende MAC-Adresse¹ zu einer IP herauszufinden. Bei IPv6 werden diese Informationen, soweit sie nicht aus der EUI-64 hervorgehen, über Neighbor-Solicitation-Pakete gewonnen. Hierfür wird eine Anfrage an

¹Die MAC-Adresse wird wiederum zum Versenden eines Datagramms auf der darunter liegenden Layer 2 (z.B. Ethernet) benötigt.

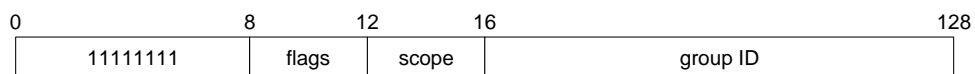


Abbildung A.2: Multicast-Adresse (nach [RFC2373])

eine bestimmte Multicast-Gruppe gesendet. Die Netzlast durch ARP-Anfragen wird so erheblich reduziert. Diese Verringerung mag unerheblich erscheinen, es existieren jedoch Netzwerke in denen der ARP-Verkehr signifikante Bandbreite belegt. Werden Netze mit sehr unterschiedlichen Übertragungsraten und Zahlen kommunizierender Systeme (z.B. ausgedehntes Gigabit-Ethernet und Wireless LAN) miteinander verbunden, kann durch Einsatz von IPv4 das WLAN mit ARP-Requests geflutet werden. Mit IPv6 stünde im WLAN die ganze Bandbreite zur Verfügung. [Lei01b]

A.2 IP Precedence

Die Verwendung der IP Precedence ermöglicht eine Zuordnung der IP-Pakete in 6 verschiedene Verkehrsklassen. Die Pakete werden über die 3 Precedence-Bits im Type of Service (ToS) Feld eines IPv4-Paketes unterschiedlich priorisiert. Der Aufbau des ToS-Feldes ist in Abbildung A.3 dargestellt. Die restlichen Bits im ToS-Feld werden gesetzt,

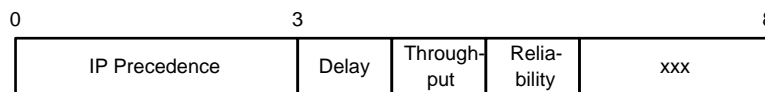


Abbildung A.3: Type of Service Feld im IPv4 Header (nach [RFC0791])

um höhere Anforderungen hinsichtlich Verzögerungen (delay), Bandbreite (throughput) und Zuverlässigkeit (reliability) anzuzeigen. Die letzten beiden Bits sind nicht definiert.

A.3 Mobile IP

Mobile IPv6 ermöglicht es einem Nutzer, sich mit einem mobilen Endgerät an einem beliebigen Punkt mit dessen IP Zugang zum Internet zu verschaffen und später im Büro/zu Hause mit seiner IP-Adresse weiterzuarbeiten. Die offensichtlich damit entstehenden Performance-Probleme² beim Routing umgeht IPv6 durch die Einführung einer ICMP-Umleitungsnachricht. Hiermit kann das Endgerät außerhalb des eigenen Subnetzes einem Agenten im heimischen Netz die IP-Adresse übermitteln, unter der das Endgerät momentan erreichbar ist. Der Agent leitet eingehende Verbindungen zum aktuel-

²Die gängigen Routing-Verfahren betrachten die Adressen aggregiert und würden in der Geschwindigkeit stark nachlassen, wenn jede IP anders weiterzuleiten wäre.

len Standpunkt des Nutzers weiter. Wegen des hohen Missbrauchspotentials wird diese Funktionalität durch eine zuverlässige Authentifizierung gesichert. [Bra99]

A.4 IPv6 Renumbering

Die IPv6 eigene Funktionalität des Renumbering gestattet es, Adressumstellungen im laufenden Betrieb vorzunehmen. Hiermit lässt sich eine deutliche Verkleinerung der Routing-Tabellen gegenüber IPv4 erreichen. Durch das Fehlen eines Renumbering-Algorithmus im alten Internet Protocol werden im Laufe der Zeit fragmentierte Adressbereiche³ erzeugt. Wie in Kapitel 3.3.2.1 bereits erwähnt, existieren große Adressblöcke, die durch ihren Eigner nur sehr eingeschränkt genutzt werden. Eine Aufteilung dieser Bereiche würde allerdings die Routing-Tabellen stark anschwellen lassen, weil der Adressblock nicht mehr als Aggregat durch eine Route zusammenfassbar wäre. Renumbering steigert somit die Routing-Effizienz und verringert die Kosten für Adressumstellungen. Meist sind IP-Adressen nur zeitlich beschränkt gültig. Nach Ablauf dieser Zeit wird sie vom Host verworfen. Mittels Router Solicitation fordert dann der Host eine neue IP an. Wenn der Router im Falle einer Adressumstellung derart konfiguriert wird, dass er neue Präfixe (TLA ID, NLA ID oder SLA ID) bekannt gibt, ergibt sich das Renumbering von selbst. Die Konfiguration der neuen Netzwerkadresse ist nur auf einem zentralen Router nötig. Durch Router Renumbering ([RFC2894]) propagiert dieser die neuen Einstellungen an alle weiteren Router in einem (weltweiten) Netz, die sich nun automatisch anpassen. Eine automatische Umnummerierung, bei der der IP-Bereich einer Organisation verschoben wird, ist so sehr einfach und schnell zu realisieren. [Lei01b]

A.5 T-DSL als Realisierungsbeispiel für einen ADSL-Zugang

Die Deutsche Telekom AG bietet Privatkunden unter dem Produktnamen T-DSL ein ADSL-Anschluss an. Um das kostenintensive Ausmessen jedes einzelnen DSL-Anschlusses zur Bestimmung der maximalen Bitrate zu umgehen, wurde die Nutzdatenrate im Downstream auf 768 kbit/s und im Upstream auf 128 kbit/s beschränkt. Zudem wird ein

³Solche Bereiche entstehen, wenn aus dem Adresspool ABC eines Providers, eine Untermenge B durch den Wechsel eines Kunden zu einem anderen Provider herausgelöst wird.

vertretbar schneller Ausbau der Backbone-Netze ermöglicht. Ein weiterer Nebeneffekt der Begrenzung ist die Erhöhung der maximalen Leitungslänge und die Verringerung von Interferenzen durch Übersprechen. Damit wird die Anzahl möglicher DSL-Anschlüsse an einem Kabelstrang erhöht. Ab Herbst 2002⁴ soll eine Variante mit 1,5 Mbit/s bzw. 192 kbit/s (Downstream/Upstream) das Angebot der DTAG im Privatkundenbereich ergänzen.

Die Systemkonfiguration auf der Kundenseite (CPE) kann der Abbildung A.4 entnommen werden. T-DSL verwendet den Standard ITU-T G.992.1 und benutzt daher einen Splitter (BBAE, Breitband Anschlusseinheit), um die Signale von POTS/ISDN bzw. DSL zu trennen. Der Netzabschluss ATU-R wird durch den NTBBA (Netzwerkterminationspunkt Breitbandangebot) realisiert. Die Abbildung A.5 zeigt die am Datentransport beteiligten

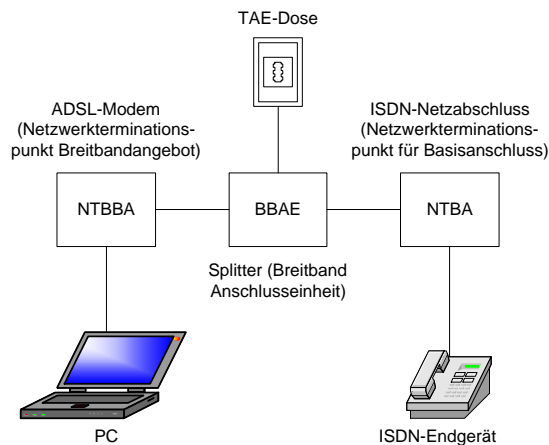


Abbildung A.4: T-DSL/ISDN Systemkonfiguration

Schichten. Hier wird deutlich, dass 4 Layer benötigt werden, um IP über ADSL zu übertragen. Der damit verbundene Overhead wird in Abbildung A.6 dargestellt. Um trotz dieses Sachverhaltes eine Nettobitrate von 768 kbit/s bzw. 128 kbit/s (Downstream/Upstream) zu erzielen, wird die ADSL-Verbindung mit 864 kbit/s respektive 160 kbit/s betrieben. Der Abbildung A.5 ist ebenfalls zu entnehmen, dass die Ethernet-Verbindung erst im Access Concentrator (AC) terminiert wird, denn der ATU-R besitzt nur Bridging-Funktionalität. Dieses Verfahren wurde gewählt, um die Komplexität des CPE möglichst gering und damit kostengünstig zu halten. Der AC dient auch der Authentifizierung der Nutzer. Dement-

⁴VAHLDIK, AXEL: *Weitere Details zu den neuen T-DSL-Angeboten*. heise online.
<http://www.heise.de/newsticker/data/axv-14.01.02-000/>

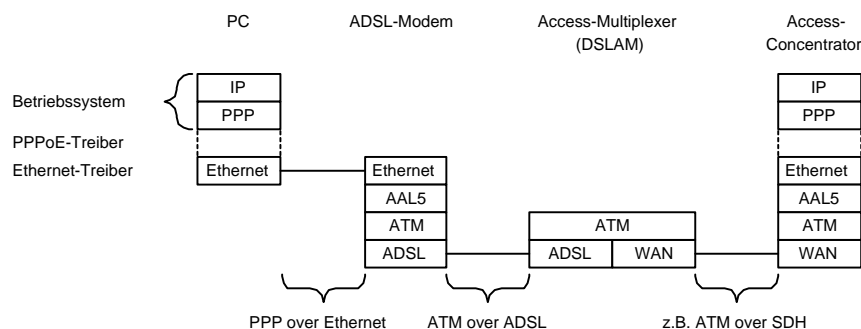


Abbildung A.5: T-DSL Schichtenmodell (nach [End02])

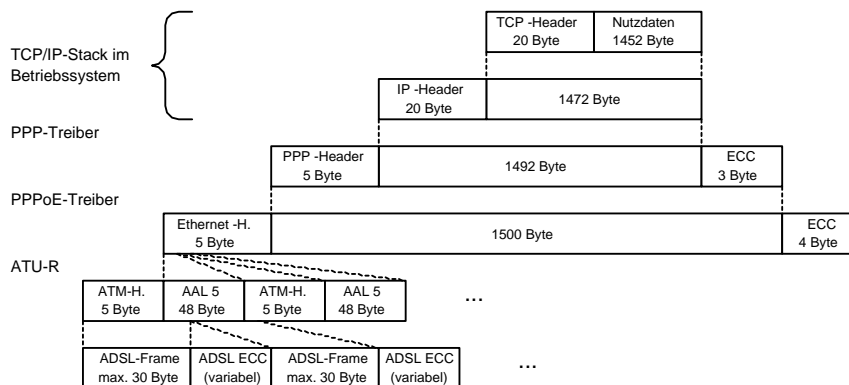


Abbildung A.6: Overhead im T-DSL Schichtenmodell (nach [End01])

sprechend endet der PPP-Link erst am Access Concentrator.

A.6 VDSL in der DAVIC Spezifikation

Die DAVIC Spezifikation^{5,6} definiert ein vollständiges P2MP VDSL-System für den Einsatz in FTTC-Architekturen. Im Standard werden 4 Schnittstellen beschrieben, die mit verschiedenen Übertragungsraten arbeiten (siehe Tabelle A.2).

Der Up- und Downstream werden unterschiedlich moduliert. Die Verbindung vom LT zum NT wird durch eine Carrierless Amplitude Modulation (CAP) realisiert. Im Uplink wird die

⁵DAVIC PART 04: *Delivery System Architecture and Interfaces.*

⁶DAVIC PART 08: *Lower layer protocols and physical interfaces.*

Typ	Bitraten	
	upstream Mbit/s	downstream Mbit/s
A	51,84	19,44
B	51,84	1,62
C	25,92	1,62
D	12,96	1,62

Tabelle A.2: VDSL-Bitraten der DAVIC Spezifikation (nach [EG 202 306])

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation verwendet. Als Übertragungsmedium können Twisted Pair (TP) oder Koax-Leitungen dienen. DAVIC-VDSL sieht ATM als Übertragungsprotokoll vor. In der Transmission Convergence (TC) Sublayer wird der Transport von ATM-Zellen beschrieben. [EG 202 306]

A.7 Übersicht der Ethernet-Varianten

Ethernet ist die am weitesten verbreitete Layer 2 Technik. Fast jedes Netzwerk im Heim- und Bürobetrieb basiert heute auf Ethernet. Es ist skalierbar zwischen 10 und 1000 Mbit/s (Medien siehe Tabelle A.3). Momentan befindet sich das 10 Gbit/s Ethernet (10GE) in der Standardisierungsphase. Somit kann mittels dieser Technologie eine skalierbare, für große Nutzerzahlen geeignete Lösung angeboten werden.

A.8 OPAL als Realisierungsbeispiel für Passive Optical Networks

Ein Realisierungsbeispiel für PONs ist das OPAL-System (Optische Anschlussleitung) der Deutschen Telekom AG. Erste Pilotprojekte wurden 1990 gestartet. Das Entwicklungsziel war die Serienproduktion von Passive Optical Networks zu Preisen vergleichbarer Kupfersysteme. In den nächsten Jahren wurde OPAL verstärkt im Osten Deutschlands verwendet, um nicht oder unterversorgte Stadtgebiete an das Telefonnetz anzuschließen. Ab 1995 wurde OPAL auch im Westteil in größeren Stückzahlen eingesetzt. Heute besitzen rund 2 Mio. Teilnehmer einen Zugang zum PSTN über die Optische An-

Ethernet	Bitrate Mbit/s	Segment- länge m	Medium
10Base2	10	185	Koax-Kabel (RG58)
10Base5	10	500	Koax-Kabel (RG8/ RG11)
10BaseT	10	100	Twisted-Pair (CAT3, 2 Aderpaare)
10BaseF	10	100	Multimode- oder Singlemode-Faser
100BaseTx	100	100	Twisted-Pair (CAT5, 2 Aderpaare)
100BaseT4	100	100	Twisted-Pair (CAT3, 4 Aderpaare)
100BaseFx	100	2000	Multimode-Glasfaser, Ø 50/62,5 µm, 1300 nm
1000Base-LX	1250	5000	Singlemode-Glasfaser, Ø 9 µm, 1300 nm
1000Base-LX	1250	550	Multimode-Glasfaser, Ø 50/62,5 µm, 1300 nm
1000Base-SX	1250	550	Multimode-Glasfaser, Ø 50 µm, 850 nm
1000Base-SX	1250	275	Multimode-Glasfaser, Ø 62,5 µm, 850 nm
1000Base-CX	1000	25	2 Twinax-Kabel
1000Base-TX	1000	100	Twisted-Pair (CAT5, CAT5e, 4 Aderpaare)

Tabelle A.3: Übersicht der Ethernet-Varianten

schlussleitung. Das OPAL-System ist ein kein einheitliches Netz. Die Technik wurde von verschiedenen Ausrüstern geliefert. Die einzelnen Realisierungen sind nicht kompatibel zueinander.⁷ Den größten Teil dieser Anschlüsse bilden FTTB und FTTC Realisierungen. OPAL wurde ausschließlich für POTS/ISDN Zugänge und E1-Standleitungen konzipiert. Dadurch wird momentan in vielen Gebieten Deutschlands der Breitband-Access via ADSL verhindert. In Pilotversuchen⁸ werden durch die Deutsche Telekom neue Übertragungstechniken zum Breitband-Internetzugang über die Optische Anschlussleitung getestet. Hierfür kommen neue Netzelemente in den Vermittlungsstellen und beim Kunden zum Einsatz. [Müh01]

⁷Zum Zeitpunkt des Aufbaus der OPAL-Netze existierten keine gültigen Standards. Erst 1995 wurde die FSAN-Initiative gegründet, um eine weltweit gültige Spezifikation für PONs zu erarbeiten.

⁸OPITZ, RUDOLF: *Telekom plant Tests für schnellen Internetzugang im Glasfasernetz*. heise online.
<http://www.heise.de/newsticker/data/rop-28.11.01-000/>

Literaturverzeichnis

- [AD00] AICHER, WOLFGANG UND CHRISTIAN DREWES: *Subscriber access: Is there a winning strategy?* IBC Home Networking 2000: Broadband Access to the Home (post-conference seminar), London, Februar 2000.
<http://www.lis.ei.tum.de/research/lm/papers/net00.pdf>
- [ADGM02] AVAGNINA, DAVIDE, FABIO DOVIS, ANDREA GHIGLIONE UND PAOLO MULLASSANO: *Wireless Networks Based on High-Altitude Platforms for the Provision of Integrated Navigation/Communication Services*. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 2, Seite 119-125, Februar 2002.
- [AZ01] AHLERS, ERNST UND PETER-MICHAEL ZIEGLER: *Netz aus der Dose – Internet-Zugang per Stromnetz wird praktikabel*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 13/2001, Seite 116 ff.
- [BCPR01] BORELLA, ANDREA, GIOVANNI CANCELLIERI, ELENA PAGANI UND GIAN PAOLO ROSSI: *Quality-of-Service Guarantees for Multicast Traffic in Heterogeneous Multi-service Networks*. MARSAN, MARCO AJMONE UND ANDREA BIANCO [MB01], Seite 97 ff.
- [BM01] BISCHOFF, MATHIAS UND MARTIN NATHANSEN: *A smart layer two protocol for IP over WDM*. Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, März 2001.
- [BM02] BLEICH, HOLGER UND URS MANSMANN: *Breitband überall – Schnelle Zugangstechniken im Vergleich*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 07/2002, Seite 142 ff.
- [Bra99] BRAUN, TORSTEN: *IPnG: Neue Internet-Dienste und virtuelle Netze: Protokolle, Programmierung und Internetworking*. dpunkt - Verlag für digitale Technologie, Heidelberg, 1999.
- [BS01] BÜLLINGEN, FRANZ UND PETER STAMM: *Entwicklungstrends im Telekommunikationssektor bis 2010*. Wissenschaftliches Institut für Kommunikations-

dienste GmbH, Bad Honnef, 2001. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

- [BWC⁺99] BOETTLE, D., S. WAHL, P. CHRIST, F. ORPHANOUDAKIS UND I. BORGES: *Multiservice hybrid fiber coax access systems providing quality of service*. TELECOM 99 Forum „Infrastructure Summit: Access Networks – Wireline Access“, 1999.
- [BWZ00] BEM, DANIEL J., TADEUSZ W. WIECKOWSKI UND RYSZARD J. ZIELINSKI: *Broadband Satellite Systems*. IEEE Communications Surveys & Tutorials 1Q00, Vol. 3, No. 1, 2000.
<http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/public/1q00issue/pdf/Zielinski.pdf>
- [Car01] CARTER, WES: *The access network – evolution from separate simple services to a fully flexible network*. Martel europe ltd, März 2001.
- [CB00] COOPER, IAN R. UND MICK A. BRAMHALL: *ATM Passive Optical Networks and Integrated VDSL*. IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 3, Seite 174-179, März 2000.
- [Cis98b] CISCO SYSTEMS INC.: *Quality of Service in Cable Data Networks*. 1998.
http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/rt/ub7200/tech/caqos_wp.pdf
- [Cis99] CISCO SYSTEMS INC.: *Multimedia Traffic Engineering for HFC Networks*. 1999.
http://www.cisco.com/warp/public/cc/so/cuso/sp/hfcn_wp.pdf
- [Cis00] CISCO SYSTEMS INC.: *Deploying European Data, Voice, and Video Services over Cable – A Discussion*. 2000.
http://www.cisco.com/warp/public/cc/so/cuso/sp/eurod_wi.pdf
- [Cis01a] CISCO SYSTEMS INC.: *Cisco IOS Quality of Service Solutions Configuration Guide*. 2001.
http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/software/ios122/122cgcr/fqos_c/qcfbook.pdf
- [Cis01b] CISCO SYSTEMS INC.: *PPPoA Baseline Architecture*. 2001.
http://www.cisco.com/warp/public/794/pppoa_arch.pdf

- [Cis01c] CISCO SYSTEMS INC.: *PPPoE Baseline Architecture for the Cisco UAC 6400*. 2001.
http://www.cisco.com/warp/public/794/pppoe_arch.pdf
- [Coo01] COOK, JOHN W.: *A splitter filter for use with VDSL at the cabinet*. BT Technology Journal, Vol. 19, No. 2, Seite 173 ff, April 2001.
<http://www.bt.com/bttj/vol19no2/cook/cook.pdf>
- [DHR96] DREWES, CHRISTIAN, RALPH HASHOLZNER UND INGOLF RUGE: *Breitbandige Teilnehmeranschlüsse über Funk*. telekom praxis, Vol. 73, No. 12, Seite 23 ff, Dezember 1996.
- [Dör02] DÖRR, HARALD: *Jahresbericht 2001*. Marktbeobachtungsdaten der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, 2002.
<http://www.regtp.de/imperia/md/content/aktuelles/jahresb2001.pdf>
- [EBKY00] ENRICO, MICHAEL, NIGEL BILLINGTON, JAMES KELLY UND GAVIN YOUNG: *Delivery of IP over broadband access technologies*. BT Technology Journal, Vol. 18, No. 3, Seite 58 ff, Juli 2000.
<http://www.bt.com/bttj/vol18no3/enrico/enrico.pdf>
- [End01] ENDRES, JOHANNES: *Alles Definitiv Schneller und Länger – ADSL optimal einrichten, beschleunigen und teilen*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 20/2001, Seite 210 f.
- [End02] ENDRES, JOHANNES: *Matroschka – Die Protokolle der U-R2-Schnittstelle*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 01/2002, Seite 84 f.
- [FF00] FITCH, MIKE UND ANDY FIDLER: *An overview of satellite access networks*. BT Technology Journal, Vol. 18, No. 3, Seite 94 ff, Juli 2000.
<http://www.bt.com/bttj/vol18no3/fitch/fitch.pdf>
- [Fin02] FINEBERG, VICTORIA: *A Practical Architecture for Implementing End-to-End QoS in an IP network*. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 1, Seite 122 ff, Januar 2002.
- [GDW00] GHANI, NASIR, SUDHIR DIXIT UND TI-SHIANG WANG: *On IP-over-WDM Integration*. IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 3, Seite 72-84, März 2000.

- [Gil01] GILLESPIE, ALEX: *Broadband access technology, interfaces, and management*. Artech House, Norwood, 2001.
- [Gon99] GONCALVES, MARCUS: *Voice over IP networks*. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [GSS99] GOLMIE, NADA, YVES SAINTILLAN UND DAVID H. SU: *A Review of Contention Resolution Algorithms for IEEE 802.14 Networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials 1Q99, 1999.
<http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/public/1q99issue/pdf/Golmie.pdf>
- [Hus00] HUSTON, GEOFF: *Internet Performance Survival Guide*. Wiley Computer Publishing, New York, 2000. QoS Strategies for Multiservice Networks.
- [IKTO00] IIDA, KATSUYOSHI, KENJI KAWAHARA, TETSUYA TAKINE UND YUJI OIE: *Performance Evaluation of the Architecture for End-to-End Quality-of-Service Provisioning*. IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 4, Seite 76-81, April 2000.
- [JWL00] JÄHNERT, JÜRGEN, STEFAN WAHL UND H. C. LELIGOU: *Provision of QoS for Legacy IP Applications in an ATM-over-HFC Network*. RAO, SATHYA UND KAARE INGAR SLETTA [RS00], Seite 230 ff.
- [KNH01] KNIGHT, R. R., STEVE E. NORREYS UND JUAN R. HARRISON: *Bearer-independent call control*. BT Technology Journal, Vol. 19, No. 2, Seite 77 ff, April 2001.
<http://www.bt.com/bttj/vol19no2/knight/knight.pdf>
- [KP02] KRAMER, GLEN UND GERRY PESAVENTO: *Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network*. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 2, Seite 66-73, Februar 2002.
- [Lau01] LAUFF, WERNER: *Fernsehen, Internet und mobile Kommunikation*. Beitrag auf dem BMBF Symposium – Zukunftsperspektiven der Mobilkommunikation, Mai 2001.
<http://www.dlr.de/IT/KT/Symposium/tagesordnung.html>
- [LCWO00] LELIGOU, HELEN-CATHERINE, BOZO CESAR, STEFAN WAHL UND THEOFANIS ORPHANOUDAKIS: *Implementation of access priorities in the medium arbi-*

- tration of HFC system*. Conference on High Performance and Switching (ATM 2000), Heidelberg, Juni 2000.
- [Lei01a] LEITNER, FELIX VON: *Wegbereitung – MPLS erleichtert das Routing im Internet*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 08/2001, Seite 260 ff.
- [Lei01b] LEITNER, FELIX VON: *Das nächste Netz – IPv6 wird zum Protokoll-Unterbau des Internet*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 16/2001, Seite 202 ff.
- [Lin98] LIN, YING-DAR: *On IEEE 802.14 Medium Access Control Protocol*. IEEE Communications Surveys & Tutorials 4Q98, Vol. 1, No. 1, 1998.
<http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/public/4q98issue/pdf/Lin.pdf>
- [LMC⁺00] LASON, ARTUR, ANTONIO MANZALINI, GIORGOS CHATZILIAS, LAMPROS RAPTIS, DIDIER COLLE, PIET DEMEESTER, MARIO PICKAVET UND MONIKA JAEGER: *Convergence of IP-based and Optical Transport Networks*. RAO, SATHYA UND KAARE INGAR SLETTA [RS00], Seite 174 ff.
- [LYH00] LIN, YING-DAR, WEI-MING YIN UND CHEN-YU HUANG: *An Investigation into HFC MAC Protocols: Mechanisms, Implementation, and Research Issues*. IEEE Communications Surveys & Tutorials 3Q00, 2000.
<http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/public/3q00issue/pdf/Yin.pdf>
- [MB01] MARSAN, MARCO AJMONE UND ANDREA BIANCO: *Quality of service in multiservice IP networks*. Springer, 2001. Proceedings of the International Workshop QoS-IP 2001, Rom, Italien, Januar 2001.
- [McD00] MCDYSAN, DAVID: *QoS & Traffic Management in IP & ATM Networks*. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [MCG⁺02] DE MAESSCHALCK, SOPHIE, DIDIER COLLE, ADELBERT GROEBBENS, CHRIS DEVELDER, ILSE LIEVENS, PAUL LAGASSE, MARIO PICKAVET, PIET DEMEESTER, FAUSTO SALUTA UND MARCO QUAGLIOTTI: *Intelligent Optical Networking for Multilayer Survivability*. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 1, Seite 42 ff, Januar 2002.
- [MEH00] MATHY, LAURENT, CHRISTOPHER EDWARDS UND DAVID HUTCHINSON: *The Internet: A Global Telecommunications Solution*. IEEE Network, Vol. 14, No. 4, July/August, 2000.

- [MM98] MINOLI, DANIEL UND EMMA MINOLI: *Delivering Voice over IP Networks*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- [MESW01] MARKS, ROGER, CARL EKLUND, KEN STANWOOD UND STANLEY WANG: *The 802.16 WirelessMAN MAC: It's Done, but What Is It?* IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access, 2001.
http://www.ieee802.org/16/docs/01/80216-01_58r1.pdf
- [Müh01] MÜHLBAUER, PETER: *Die Glasfaser in ihrem Lauf . . . hält DSL im Osten auf*. Telepolis Magazin für Netzkultur, 2001.
<http://www.telepolis.de/deutsch/inhalt/te/4885/1.html>
- [PF94] PAXSON, VERN UND SALLY FLOYD: *Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling*. ACM Computer Communication Review, 24(4): 257-268, October 1994.
- [PL00] PIKRAMMENOS, GIANNIS UND HELEN-CATHERINE LELIGOU: *Performance Evaluation of Diffserv Driven HFC System*. RAO, SATHYA UND KAARE INGAR SLETTA [RS00], Seite 83 ff.
- [PPF⁺00] GUY, PUJOLLE, HARRY PERROS, SERGE FDIDA, ULF KÖRNER UND IOANNIS STAVRAKAKIS: *Networking 2000: broadband communications, high performance networking, and performance of communication networks*. Springer, 2000. Proceedings of the IFIP-TC6-European Union international conference, Paris, Frankreich, Mai 2001.
- [Rau99] RAUSCHMAYER, DENNIS J.: *ADSL/VDSL Principles*. Macmillan Technical Publishing, Indianapolis, 1999.
- [RS00] RAO, SATHYA UND KAARE INGAR SLETTA: *Next generation networks: network services for the information society*. Springer, 2000. Proceedings of the 5th IFIP-TC6 international symposium, Bergen, Norwegen, Oktober 2001.
- [SB99] SANDTE, HENNING UND JENS BENNDORF: *Zweisprung – SDSL: Neue Highspeed-Technik fürs Wohnzimmer*. c't magazin für computertechnik, Ausgabe 19/1999, Seite 230 ff.
- [SL00] SZE, HO-PONG UND SOUNG C. LIEW: *Network-Driven Layered Multicast with IPv6*. GUY, PUJOLLE, HARRY PERROS, SERGE FDIDA, ULF KÖRNER UND IOANNIS STAVRAKAKIS [PPF⁺00], Seite 11 ff.

- [SSWR96a] SCHENK, M., D. SCHMÜCKING, A. WÖRNER UND I. RUGE: *VDSL (Very high bitrate Digital Subscriber Line) – die 3. Generation der digitalen Teilnehmeranschlußleitung*. telekom praxis, Vol. 73, No. 6, Juni 1996.
http://www.lis.ei.tum.de/research/lm/papers/telekom_praxis96a.pdf
- [SSWR96b] SCHENK, M., D. SCHMÜCKING, A. WÖRNER UND I. RUGE: *VDSL (Very high bit-rate Digital Subscriber Line) – A Bridge and Alternative to FTTH*. Proceedings of the European Conference on Networks and Optical Communication (NOC'97), Heidelberg, Juni 1996.
<http://www.lis.ei.tum.de/research/lm/papers/noc96.pdf>
- [Sum99] SUMNER, MARK: *DOCSIS 1.1 Overview*. CableLabs Präsentation, Mai 1999.
- [Tol01] TOLLEY, BRUCE: *Ethernet in the First Mile – Setting the Standard for Fast Broadband Access*. Cisco Systems Inc., 2001.
http://www.cisco.com/warp/public/cc/so/neso/efmsol/efm_wp.pdf
- [Ton00] TONELLI, MARCO: *Powerline Communications – Daten- und Mehrwertdienste über die Stromleitung*. Siemens/EnBW Präsentation, 2000.
- [TZM97] THÜRMANN, URS, M. ZITTERBART, UND T. MEUSER: *ATM-Switching in HFC-Verteilnetzen*. IEEE Newcomer-Workshop 1997.
<http://www.ibr.cs.tu-bs.de/users/thuerman/papers/hamburg-harburg-97.ps.gz>
- [Veg01] VEGESNA, SRINIVAS: *IP Quality of Service*. Cisco Press, Indianapolis, 2001.
The complete resource for understanding and deploying IP quality of service for Cisco networks.
- [VGVG00] VETTER, PETER, DANNY GODERIS, LUC VERPOOTEN UND ALAIN GRANGER: *Systems Aspects of APON/VDSL Deployment*. IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 5, Seite 66-72, Mai 2000.
- [VMVQ00] VAN DE VOORDE, I., C. M. MARTIN, J. VANDEWEGE UND X. Z. QIU: *The SuperPON Demonstrator: An Exploration of Possible Evolution Paths for Optical Access Networks*. IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 2, Seite 74-82, Februar 2000.

- [Vog98] VOGT, CHRISTIAN: *Datenkommunikation in BK-Netzen*. Beitrag zum DFN-Symposium „Fortgeschrittene Kommunikationstechniken“, 1998.
<http://www.rvs.uni-hannover.de/projekte/bk-netz/dfn-symp-bk.pdf>
- [Way99] WAY, WINSTON I.: *Broadband Hybrid Fiber/Coax Access System Technologies*. Academic Press, 1999.
- [WH00] WANG, BIN UND JENNIFER C. HOU: *Multicast Routing and Its QoS Extension: Problems, Algorithms, and Protocols*. IEEE Network, Vol. 14, No. 1, Seite 22-36, Januar/Februar 2000.
- [Wic99] WICKMAN, CARL: *Integration of IP over Optical Networks: Networking and Management*. EURESCOM Project P918 Deliverable 1, 1999.
- [WSK⁺00] WAHL, STEFAN, WOLFRAM SEIBOLD, ANDREAS KOPF, JUERGEN JAEHNERT UND HELEN-CATHERINE LELIGOU: *Architecture and Experiences of a Multi-Service HFC Network*. Conference on High Performance and Switching (ATM 2000), Heidelberg, Juni 2000.
- [WSS96] WÖRNER, A., M. SCHENK UND D. SCHMÜCKING: *Transmission Capacity and Hardware Requirements of VDSL Systems*. Proceedings of the International Conference on Communication Systems (ICCS '96), Singapore, November 1996.
<http://www.lis.ei.tum.de/research/lm/papers/iccs96a.pdf>
- [ZD00] ZIMMERMANN, MANFRED UND KLAUS DOSTERT: *Die Kapazität von Powerline Kanälen unter Berücksichtigung von Beschränkungen der Sendeleistung und der nutzbaren Frequenzbereiche*. Institut für Industrielle Informationstechnik, Universität Karlsruhe, 2000.
http://www-iiit.etec.uni-karlsruhe.de/~plc/literatur/paper_ursi99.pdf

RFC-Verzeichnis

- [RFC0791] POSTEL, J.: *Internet Protocol*. Request for Comments: 0791, STD: 5, September 1981.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc0791.txt>
- [RFC1112] DEERING, STEVE: *Host Extensions for IP Multicasting*. Request for Comments: 1112, August 1989 .
<http://www.ietf.org/rfc/rfc1112.txt>
- [RFC1633] BRADEN, ROBERT, DAVID CLARK UND SCOTT SHENKER: *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*. Request for Comments: 1633, Juni 1994.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt>
- [RFC1809] PARTRIDGE, CRAIG: *Using the Flow Label Field in IPv6*. Request for Comments: 1809, Juni 1995.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc1809.txt>
- [RFC1887] REKHTER, YAKOV UND TONY LI: *An Architecture for IPv6 Unicast Address Allocation*. Request for Comments: 1887, Dezember 1995.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc1887.txt>
- [RFC1889] SCHULZRINNE, HENNING, STEPHEN L. CASNER, RON FREDERICK UND VAN JACOBSON: *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*. Request for Comments: 1889, Januar 1996.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt>
- [RFC2113] KATZ, DAVE: *IP Router Alert Option*. Request for Comments: 2113, Februar 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2113.txt>
- [RFC2205] BRADEN, ROBERT, LIXIA ZHANG, STEVE BERSON, SHAI HERZOG UND SUGIH JAMIN: *Resource ReSerVation Protocol (RSVP)*. Request for Comments: 2205, September 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt>
- [RFC2208] MANKIN, ALLISON, FRED BAKER, BOB BRADEN, SCOTT BRADNER, MICHAEL O'DELL, ALLYN ROMANOW, ABEL WEINRIB UND LIXIA ZHANG: *Resource*

ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Applicability Statement – Some Guidelines on Deployment. Request for Comments: 2208, September 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2208.txt>

[RFC2211] WROCLAWSKI, JOHN: *Specification of the Controlled-Load Network Element Service*. Request for Comments: 2211, September 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2211.txt>

[RFC2212] SHENKER, SCOTT, CRAIG PARTRIDGE UND ROCH GUERIN: *Specification of Guaranteed Quality of Service*. Request for Comments: 2212, September 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2212.txt>

[RFC2216] SHENKER, SCOTT UND JOHN WROCLAWSKI: *Network Element Service Specification Template*. Request for Comments: 2216, September 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2216.txt>

[RFC2236] FENNER, WILLIAM C.: *Internet Group Management Protocol, Version 2*. Request for Comments: 2236, November 1997.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2216.txt>

[RFC2309] BRADEN, ROBERT, DAVID D. CLARK, JON CROWCROFT, BRUCE DAVIE, STEVE DEERING, DEBORAH ESTRIN, SALLY FLOYD, VAN JACOBSON, GREG MINSHALL, CRAIG PARTRIDGE, LARRY PETERSON, K. K. RAMAKRISHNAN, SCOTT SHENKER, JOHN WROCLAWSKI UND LIXIA ZHANG: *Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet*. Request for Comments: 2309, April 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2309.txt>

[RFC2364] GROSS, GEORGE, MANU KAYCEE, ARTHUR LIN, ANDREW MALIS UND JOHN STEPHENS: *PPP Over AAL5*. Request for Comments: 2364, Juli 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2364.txt>

[RFC2365] MEYER, DAVID: *Administratively Scoped IP Multicast*. Request for Comments: 2365, Juli 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2365.txt>

- [RFC2373] HINDEN, ROBERT M. UND STEPHEN E. DEERING: *IP Version 6 Addressing Architecture*. Request for Comments: 2373, Juli 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2373.txt>
- [RFC2374] HINDEN, ROBERT M., MIKE O'DELL UND STEPHEN E. DEERING: *An IPv6 Aggregatable Global Unicast Address Format*. Request for Comments: 2374, Juli 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2374.txt>
- [RFC2375] HINDEN, ROBERT M. UND STEPHEN E. DEERING: *IPv6 Multicast Address Assignments*. Request for Comments: 2375, Juli 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2375.txt>
- [RFC2402] KENT, STEPHEN UND RANDALL ATKINSON: *IP Authentication Header*. Request for Comments: 2402, November 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2402.txt>
- [RFC2406] KENT, STEPHEN UND RANDALL ATKINSON: *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*. Request for Comments: 2406, November 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2406.txt>
- [RFC2460] DEERING, STEPHEN E. UND ROBERT M. HINDEN: *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*. Request for Comments: 2460, Dezember 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2460.txt>
- [RFC2474] NICHOLS, KATHLEEN, STEVEN BLAKE, FRED BAKER UND DAVID L. BLACK: *Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*. Request for Comments: 2474, Dezember 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt>
- [RFC2475] BLAKE, STEVEN, DAVID L. BLACK, MARK A. CARLSON, ELWYN DAVIES, ZHENG WANG UND WALTER WEISS: *An Architecture for Differentiated Services*. Request for Comments: 2475, Dezember 1998.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt>
- [RFC2516] MAMAKOS, LOUIS, KURT LIDL, JEFF EVARTS, DAVID CARREL, DAN SIMONE UND ROSS WHEELER: *A Method for Transmitting PPP Over Ethernet (PPPoE)*. Request for Comments: 2516, Februar 1999.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2516.txt>

- [RFC2543] HANDLEY, MARK, HENNING SCHULZRINNE, EVE SCHOOLER UND JONATHAN ROSENBERG: *SIP: Session Initiation Protocol*. Request for Comments: 2543, März 1999.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2543.txt>
- [RFC2581] ALLMAN, MARK, VERN PAXSON UND W. RICHARD STEVENS: *TCP Congestion Control*. Request for Comments: 2581, April 1999.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2581.txt>
- [RFC2615] MALIS, ANDREW G. UND WILLIAM ALLEN SIMPSON: *PPP over SONET/SDH*. Request for Comments: 2615, Juni 1999.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2615.txt>
- [RFC2894] CRAWFORD, MATT: *Router Renumbering for IPv6*. Request for Comments: 2894, August 2000.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2894.txt>
- [RFC3000] REYNOLDS, JOYCE K., ROBERT BRADEN, SANDY GINOZA UND LORRIE SHIOTA: *Internet Official Protocol Standards*. Request for Comments: 3000, STD: 1, November 2001.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3000.txt>
- [RFC3031] ROSEN, ERIC C., ARUN VISWANATHAN UND ROSS CALLON: *Multiprotocol Label Switching Architecture*. Request for Comments: 3031, Januar 2001.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3031.txt>
- [RFC3036] ANDERSSON, LOA, PAUL DOOLAN, NANCY FELDMAN, ANDRE FREDETTE UND BOB THOMAS: *LDP Specification*. Request for Comments: 3036, Januar 2001.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3036.txt>

Verzeichnis der Standards und Empfehlungen

- [AF-TM-0056.00] ATM FORUM AF-TM-0056.00: *Traffic Management Specification*. Version 4.0, April 1996.
- [EG 202 306] ETSI EG 202 306: *Transmission and Multiplexing (TM); Access networks for residential customers*. ETSI Guide EG 202 306 V1.2.1, Mai 1998.
- [EN 300 421] ETSI EN 300 421: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*. European Standard (Telecommunications series) EN 300 421 V1.1.2, August 1997.
- [EN 300 429] ETSI EN 300 429: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems*. European Standard (Telecommunications series) EN 300 429 V1.2.1, April 1998.
- [EN 301 790] ETSI EN 301 790: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*. European Standard (Telecommunications series) EN 301 790 V1.2.2, Dezember 2000.
- [ETS 300 681] ETSI ETS 300 681: *Transmission and Multiplexing (TM); Optical Distribution Network (ODN) for Optical Access Network (OAN)*. European Telecommunication Standard ETS 300 681, Juni 1997.
- [ETS 300 800] ETSI ETS 300 800: *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV)*. European Telecommunication Standard ETS 300 800, Juli 1998.
- [ETS 300 802] ETSI ETS 300 802: *Digital Video Broadcasting (DVB); Network-independent protocols for DVB interactive services*. European Telecommunication Standard ETS 300 802, November 1997.
- [FSAN] FSAN CONSORTIUM: *Common Technical Specifications of ATM Subscriber System*. V3.021, Mai 2001.
- [G.983.1] ITU-T RECOMMENDATION G.983.1: *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*. Oktober 1998.

- [G.983.1 A1] ITU-T PREPUBLISHED RECOMMENDATION G.983.1 AMENDMENT 1: *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON) – Amendment 1*. November 2001.
- [G.992.1] ITU-T RECOMMENDATION G.992.1: *Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers*. Juni 1999.
- [G.993.1] ITU-T PREPUBLISHED RECOMMENDATION G.993.1: *Very-high-speed digital subscriber line foundation*. November 2001.
- [G.995.1] ITU-T RECOMMENDATION G.995.1: *Overview of digital subscriber line (DSL) Recommendations*. Februar 2001.
- [J.112] ITU-T RECOMMENDATION J.112: *Transmission systems for interactive cable television services*. März 1998.
- [J.112A] ITU-T PREPUBLISHED RECOMMENDATION J.112: *Annex A: Digital video broadcasting: DVB interaction channel for cable TV distribution systems*. März 2001.
- [TR 101 173] ETSI TR 101 173: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); Inventory of broadband radio technologies and techniques*. Technical Report ETSI TR 101 173 V1.1.1, Mai 1998.
- [TR 101 177] ETSI TR 101 177: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); Requirements and architectures for broadband fixed radio access networks (HIPE-RACCESS)*. Technical Report ETSI TR 101 177 V1.1.1, Mai 1998.
- [TR 101 200] ETSI TR 101 200: *Digital Video Broadcasting (DVB); A guideline for the use of DVB specifications and standards*. Technical Report ETSI TR 101 200 V1.1.1, September 1997.
- [TR 101 202] ETSI TR 101 202: *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for Data Broadcasting*. Technical Report ETSI TR 101 202 V1.1.1, Februar 1999.
- [TS 101 270-1] ETSI TS 101 270-1: *Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission systems on metallic access cables; Very high speed Digital Subscriber Line (VDSL); Part 1: Functional requirements*. Technical Specification ETSI TS 101 270-1 V1.2.1, Oktober 1999.

- [TS 101 270-2] ETSI TS 101 270-2: *Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission systems on metallic access cables; Very high speed Digital Subscriber Line (VDSL); Part 2: Transceiver specification*. Technical Specification ETSI TS 101 270-2 V1.1.1, Februar 2001.
- [TS 101 388] ETSI TS 101 388: *Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission systems on metallic access cables; Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) – European specific requirements [ITU-T G.992.1 modified]*. Technical Specification ETSI TS 101 388 V1.2.1, Oktober 2001.
- [TS 101 524] ETSI TS 101 524: *Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission system on metallic access cables; Symmetrical single pair high bitrate Digital Subscriber Line (SDSL)*. Technical Specification ETSI TS 101 524 V1.1.3, November 2001.