

# **Universität Stuttgart**

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung Prof. Dr.-Ing. P. Kühn

58. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

## KOPPLUNG VON DQDB-REGIONALNETZEN MIT ATM-WEITVERKEHRSNETZEN: ARCHITEKTUR, STEUERSTRATEGIEN UND LEISTUNGSVERHALTEN

von

Wolfgang Schödl

1994

© 1995 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung

Druck: Sprint-Druck GmbH, Stuttgart

ISBN 3-922403-68-9



# **University of Stuttgart**

Institute of Communications Switching and Data Technics Prof. Dr.-Ing. P. Kühn

58 th Report on Studies in Congestion Theory

INTERCONNECTION OF DQDB METROPOLITAN
AREA NETWORKS WITH ATM WIDE AREA
NETWORKS: ARCHITECTURE, CONTROL, AND
PERFORMANCE

by

Wolfgang Schödl

1994

#### Summary

In the public area there is an increasing demand for broadband communication networks coming from both, service users and service providers. To meet this demand, two novel types of networks are going to be realized and introduced in the near future:

The first one, the so-called Metropolitan Area Network (MAN), stems from the area of data communications. This network type will be mainly used to interconnect Local Area Networks (LANs) over large distances so that LAN services will be extended to a larger geographical area. MANs based on the DQDB-standard will provide for early broadband data communication services in the public area.

The second novel network type is the Broadband Integrated Services Digital Network (B-ISDN). It is designed for use as a wide area network and intended to integrate the wide variety of all existing and future communication services. The CCITT has decided to use the Asynchronous Transfer Mode (ATM), which is defined in a set of recommendations, as a basis for the B-ISDN. Network components based on ATM are currently tested in numerous pilot projects and are going to be introduced in the networks operated by several companies and authorities.

Both network types are well-suited for broadband data communication as they provide for a high bandwidth on demand. Since networks of both types will exist in parallel in the medium-term and in order to increase their acceptance, adequate solutions for interconnecting MANs and B-ISDN have to be developed.

The main goal of this work was to investigate the interconnection of DQDB-based MANs with a B-ISDN based on ATM, focusing on the following aspects: architecture, control, and performance.

**Chapter 1** provides an introductory overview of the current developments in the fields of data communication and public wide area networks.

Chapter 2 introduces first basic technical principles to provide some background information for the subsequent discussions. The main emphasis of this chapter is dedicated to MANs based on the DQDB-standard and the B-ISDN based on ATM. For both network types an overview of their architecture and the communication protocols they use is given. Furthermore, the communication services are described which are supported by these network types. For a DQDB-based MAN a performance evaluation is carried out to show its basic behaviour resulting from its topology and its distributed queuing Media Access Control (MAC) protocol. This marginal aspect is important to take into account, e.g., the connection point of an interworking unit to the MAN.

Chapter 3 deals with the interconnection of high speed communication networks using different protocol architectures. Various types of interconnection architectures are presented and the necessary functions of an interworking unit are discussed which depend strongly on the characteristics of the networks to be interconnected. The chapter closes with a classification of interworking units according to the protocol layer used for the network interconnection.

Chapter 4 concentrates on the interconnection of a DQDB-based MAN with a B-ISDN based on ATM. By taking the communication services that are standardized for both network types as a starting point, various interconnection concepts are discussed. For these interconnection concepts protocol models are derived including the necessary interworking functionality. Out of the large number of functions which have been identified, the main attention is dedicated to bandwidth allocation mechanisms used to support connectionless data communication between both network types. The kind of mechanism focused on in this work allocates bandwidth on the communication path between the interworking unit and the appropriate Connectionless Server (CLS) which performs mainly routing of connectionless data packets within the connection-oriented ATM environment.

Bandwidth allocation mechanisms available from the literature are described and compared with a bandwidth allocation mechanism developed in the scope of this work. That part of the mechanism located in the interworking unit is based on an estimation of the bandwidth requirements of the traffic stream from the MAN to the B-ISDN. The chapter is completed by general results for the developed bandwidth allocation mechanism coming from a performance evaluation of its traffic model by simulation.

Chapter 5 is dedicated to the detailed performance analysis of the bandwidth allocation mechanism presented in Chapter 4. After introducing the analysis techniques from the area of traffic theory, which provide the basis for the performance analysis, a model of the bandwidth allocation mechanism is developed for traffic simulation. Due to the structure of the packet arrival process and the desired range of packet loss probabilities, traditional simulation methods can only be used with restrictions. To overcome the limitations of traffic simulation a queuing analysis is developed for which a queuing model is derived from the simulation model.

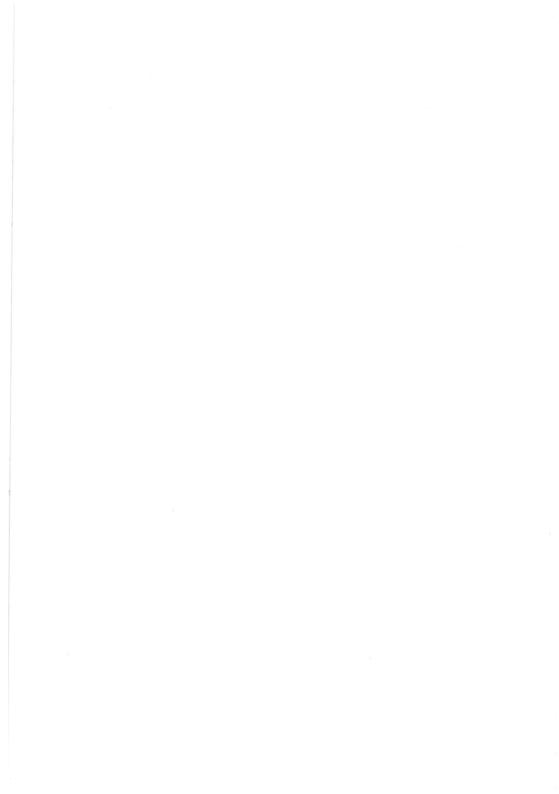
The queuing analysis is based on a fluid-flow approximation, which allows to retain the structure of the packet arrival process of the traffic stream from the MAN to the B-ISDN and to take into account the feedback delay of bandwidth requests exchanged between the interworking unit and the appropriate CLS.

The main results of the performance evaluation, which concludes Chapter 5, are summarized in **Chapter 6** as follows:

Employing a bandwidth allocation mechanism, which operates dynamically, much bandwidth can be saved compared to the establishment of permanent connections using peak bitrate allocation. This applies especially for connectionless data traffic with its bursty characteristic.

The comparison of different bandwidth allocation strategies shows a trade-off between the buffer capacity and the allocated bitrate. The buffer of the interworking unit should have enough capacity to buffer at least data bursts which are short compared to the feedback delay of bandwidth requests. To cope with longer data bursts, a strategy which allocates a small amount of bitrate permanently in combination with requesting additional bitrate if required seems to be a good compromise.

In addition to the summary of the study's results, Chapter 6 gives an outlook to further possible applications of the bandwidth allocation mechanism and proposes extensions to the functionality of the interworking unit.



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen 5					
1	Einl	eitung			10
-	1.1		wärtige S	ituation	10
	1.2	Übersi	cht über d	lie Arbeit	12
2	Нос	hgesch	windigke	its-Kommunikationsnetze	14
	2.1	Grund	lagen		14
		2.1.1	Dienste		14
		2.1.2		n	
		2.1.3	Übermitt	lungsverfahren	16
		2.1.4		erenzmodell	
	2.2	Netze		chzugriff	
		2.2.1	Merkma	le und Begriffe	20
		2.2.2	DQDB.		22
			2.2.2.1	Standardisierung	22
			2.2.2.2	Netzkomponenten	24
			2.2.2.3	Bitübertragungsschicht	
			2.2.2.4	DQDB-Schicht	27
		2.2.3	Leistung	sfähigkeit des DQ-Protokolls	
		2.2.4	Erweiter	ungsvorschläge	35
			2.2.4.1	"Bandwidth Balancing"-Mechanismus	35
			2.2.4.2	Mehrfachausnutzung von Zeitschlitzen	
	2.3	Breitb	and-ISDN	1	
		2.3.1		rungen und Konzepte	
			2.3.1.1	Breitbanddienste	
			2312	Grundlegende Charakteristika	

		2.3.2	Architektur des I	Breitband-ISDN	38
			2.3.2.1 Archite	kturmodell	38
				configuration	
		2.3.3			
				12.14	
				1.*-1.	
				npassungsschicht	
		2.3.4		g	
				ungsannahme	
			2.3.4.2 Quellflu	ßkontrolle	47
			2.3.4.3 Zellverl	ustkontrolle	48
	2.4	Evolu	tion zum B-ISDN		49
		2.4.1	Merkmale		49
		2.4.2	Unterstützung ver	bindungsloser Dienste im B-ISDN	50
			2.4.2.1 Verbind	ungsarten und -management	50
			2.4.2.2 CL-Serv	er	51
3	Net	zkoppl	ınσ		
	3.1			***************************************	52
	3.2			***************************************	
	3.3			en	
		3.3.1		inheiten	
		3.3.2		•••••	
		3.3.3		ept	
		3.3.4			
		3.3.5			
	3.4	Klassi		ppeleinheiten	
		3.4.1			
		3.4.2			
		3.4.3			
		3.4.4		6	
1	Moto	vlr om m lu			
8	4.1		ng DQDB / B-ISD		65
	4.1	Kopple	klungen in der Star	dardisierung 6	55
	4.2				
	+.∫	4.3.1		orientierte Dienste 6	
		4.3.1		ung	
		7.3.4	AAL-DICHSIKIASSE	A - Isochrone Dienste DODB	18

		4.3.3		gsmöglichkeiten für Dienste der AAL-Dienstklasse B	
		4.3.4		enstklasse C - Verbindungsorientierter Datendienst DQDB	
	4.4	Koppli	ung für ve	erbindungslose Dienste	72
		4.4.1		lmodelle und -dateneinheiten	
		4.4.2	Kopplun	gsmöglichkeiten	74
		4.4.3	Anschlu	Bort der Netzkoppeleinheit am DQDB-Subnetz	77
	4.5	Bitrate	nzuteilun	g bei verbindungsloser Datenübermittlung	81
		4.5.1	Bitratenr	reservierungsverfahren	82
			4.5.1.1	"Bandwidth Advertising"-Verfahren	82
			4.5.1.2	Schnelle Reservierungsprotokolle	83
			4.5.1.3	"Bandwidth Tracking"-Verfahren	85
			4.5.1.4	VBC-Verfahren	
		4.5.2	Vorschla	ag für ein Bitratenreservierungsverfahren	86
			4.5.2.1	Funktionsweise	
			4.5.2.2	Funktionales Modell der Netzkoppeleinheit	88
		4.5.3	Ermittlu	ng des Bitratenbedarfs	89
			4.5.3.1	Verkehrsmessung	
			4.5.3.2	Berechnungsverfahren	
			4 5 2 2	Verzögerte Bitratenfreigabe	94
			4.5.3.3	verzogene Bitratenneigabe	
5	Svet	emana			96
5	Syst	temana	lyse und	-verhalten	96
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund	lyse und	-verhalten	<b>96</b>
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1	lyse und lagen Stochast	-verhalten ischer Punktprozeß	96 96 97
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1 5.1.2	lyse und lagen Stochast Modellie	-verhalten ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen	96 96 97 97
5	Syst 5.1	Grund 5.1.1	lyse und lagen Stochast Modellie Modelle	-verhalten ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme	96 96 97 97
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1 5.1.2	lyse und lagen Stochast Modellie Modelle 5.1.3.1	-verhalten ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß	96 96 97 97 99
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3	lyse und lagen Stochast Modellie Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2	-verhalten  ischer Punktprozeß  erung von Verkehrsströmen  für Datenverkehrsströme  Poisson-Prozeß  Modell für eine sporadische Quelle	96 97 97 99 99
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3	lyse und lagen Stochast Modellie Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr	-verhalten ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden	96 97 97 99 99
5	<b>Syst</b> 5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3	lyse und lagen Stochast Modellie 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1	-verhalten  ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden Verkehrssimulation	96 97 97 99 99 100 102
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4	lyse und lagen Stochast Modellie 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1 5.1.4.2	-verhalten  ischer Punktprozeß  erung von Verkehrsströmen  für Datenverkehrsströme  Poisson-Prozeß  Modell für eine sporadische Quelle  smodelle und Analysemethoden  Verkehrssimulation  UAS-Modell	96 97 97 99 99 100 102 104
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model	lyse und lagen Stochast Modellie 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1 5.1.4.2 lierung de	-verhalten  ischer Punktprozeß  erung von Verkehrsströmen  für Datenverkehrsströme  Poisson-Prozeß  Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden  Verkehrssimulation  UAS-Modell er Netzkoppeleinheit	96 97 97 99 99 100 102 104 107
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model 5.2.1	lyse und lagen Stochast Modellie 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr 5.1.4.1 5.1.4.2 dierung de	-verhalten  ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden Verkehrssimulation UAS-Modell er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen	96 96 97 97 99 100 102 104 107
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model 5.2.1 Verke	lyse und lagen Stochast Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1 5.1.4.2 lierung de Modellie hrstheore	-verhalten  ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden Verkehrssimulation UAS-Modell er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen tische Analyse	96 97 97 99 100 102 104 107 109
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model 5.2.1 Verke 5.3.1	lyse und lagen Stochast Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr 5.1.4.1 5.1.4.2 lierung de Modellie hrstheore	-verhalten  ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden Verkehrssimulation UAS-Modell er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen tische Analyse ches Modell der Netzkoppeleinheit	96 97 97 99 99 100 102 104 107 109 111
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model 5.2.1 Verke 5.3.1 5.3.2	lyse und lagen Stochast Modellie Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1 5.1.4.2 dierung de Modellie hrstheorei Analytis Zustand	-verhalten  ischer Punktprozeß  erung von Verkehrsströmen  für Datenverkehrsströme  Poisson-Prozeß  Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden  Verkehrssimulation  UAS-Modell  er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen  tische Analyse  ches Modell der Netzkoppeleinheit sprozeß	96 97 97 99 99 100 102 104 107 111 111 113
5	5.1	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3  5.1.4  Model 5.2.1 Verke 5.3.1 5.3.2 5.3.3	lyse und lagen Stochast Modelle 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr 5.1.4.1 5.1.4.2 dierung de Modellie hrstheore Analytis Zustand Fluid-Fl	-verhalten  ischer Punktprozeß erung von Verkehrsströmen für Datenverkehrsströme Poisson-Prozeß Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden Verkehrssimulation UAS-Modell er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen tische Analyse ches Modell der Netzkoppeleinheit sprozeß ow-Approximation	96 97 97 99 99 100 102 104 107 109 111 111 113
5	<ul><li>5.1</li><li>5.2</li><li>5.3</li></ul>	Grund 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 Model 5.2.1 Verke 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4	lyse und lagen Stochast Modellie 5.1.3.1 5.1.3.2 Verkehr: 5.1.4.1 5.1.4.2 lierung de Modellie hrstheore: Analytis Zustand Fluid-Fl Berechn	-verhalten  ischer Punktprozeß  erung von Verkehrsströmen  für Datenverkehrsströme  Poisson-Prozeß  Modell für eine sporadische Quelle smodelle und Analysemethoden  Verkehrssimulation  UAS-Modell  er Netzkoppeleinheit erung der Ablehnung von Bitratenanforderungen  tische Analyse  ches Modell der Netzkoppeleinheit sprozeß	96 97 97 99 100 102 104 107 111 111 113 114 115

	5.4.1	Strategie	en zur Anforderung von Bitrate	118
			Einfluß des Verkehrsangebots	
			Einfluß der Puffergröße	
			Einfluß von Quellparametern	
			Netzeinflüsse	
6			und Ausblick	128
	6.1 Zusar	nmenfassu	ng	128
	6.2 Ausb	lick		131
Anhang A Berechnung der mittleren Warteschlangenlänge 132				
Lit	Literaturverzeichnis 1.			134

## Abkürzungen

AAL ATM Adaptation Layer

ACF Access Control Field

ATD Asynchronous Time Division
ATM Asynchronous Transfer Mode

B-ISDN Broadband Integrated Services Digital Network

BOM Begin of Message

BWB Bandwidth Balancing
CAC Call Acceptance Control

CBDS Connectionless Broadband Data Service

CCITT Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique

CL Connectionless

CLNAP Connectionless Network Access Protocol

CLP Cell Loss Priority

CLSF Connectionless Service Function

COCF Connection-Oriented Convergence Function

COM Continuation of Message

CRMA Cyclic Reservation Multiple Access

CS Convergence Sublayer

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

DH DM-PDU Header
DM Derived MAC

DO Distributed Queueing

DODB Distributed Queue Dual Bus

DT DM-PDU Trailer
EOM End of Message

EWMA Exponentially Weighted Moving Average

FDDI Fiber Distributed Data Interface

FFOL FDDI Follow on LAN

FRP/DT Fast Reservation Protocol / Delayed Transmission
FRP/IT Fast Reservation Protocol / Immediate Transmission

G General

GFC Generic Flow Control

HCS Header Check Sequence

HEC Header Error Control

HSLAN High Speed LAN

ICF Isochronous Convergence Function

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IM Initial MAC

ISDN Integrated Services Digital Network

ISO International Organization for Standardization

LAN Local Area Network

LAP D Link Access Procedure D-Channel

LFC Local Function Capabilities

LLC Logical Link Control

M Markoff'sche (negativ-exponentielle) Verteilung

MAC Media Access Control

MAN Metropolitan Area Network

MCF MAC Convergence Function

MID Multiplexing Identifier
NNI Network Node Interface

NT Network Termination

OSI Open System Interconnection

PA Pre-Arbitrated

PBX Private Branch Exchange (Nebenstellenanlage)

PCI Protocol Control Information

PDU Protocol Data Unit

PM Physical Medium Sublayer PSR Previous Segment Received

PT Payload Type

PTI Payload Type Identifier
OA Oueued Arbitrated

QA Queued Arbitrated QOS Quality of Service

QPSX Queued Packet and Synchronous Switch Exchange

RSVD Reserved

SAP Service Access Point

SAR Segmentation and Reassembly SDH Synchronous Digital Hierarchy

SDU Service Data Unit

SH Segment Header

SLT Slot Type

SMDS Switched Multi-Megabit Data Service

Sequence Number SN

Sequence Number Protection SNP

SP Segment Priority

Single Segment Message SSM

Synchronous Time Division STD

Terminal Adaptor TA

Transmission Convergence TC Terminal Equipment

TE

Uniform Arrival and Service UAS

User Network Interface UNI

Variable Bandwidth Connection VBC

Virtual Channel Identifier VCI

VPI Virtual Path Identifier Wide Area Network WAN

# Formelzeichen

Die typische Verwendung einiger Formelzeichen soll am Beispiel des Ankunftsabstandes dargestellt werden:

t	Variable für die Zeit	
$T_A$	Zufallsvariable (ZV) für den Ankunftsabstand	
$F_A(t)$	Verteilungsfunktion	
$f_A(t)$	Verteilungsdichtefunktion	
$E[T_A]$	Mittelwert oder erstes gewöhnliches Moment	
$E[T_A^2]$	zweites gewöhnliches Moment	
$VAR[T_A]$	Varianz	
$c_A$	Variationskoeffizient	
A	Verkehrsangebot	
$a_k$	Faktor	
B	Burstiness-Faktor	
$B_{dyn}$	Dynamischer Anteil der anzufordernden Bitrate	
$B_H$	Summe der Bitratenanforderungen der Hintergrundquellen	
$B_K^{'}$	Aktuelle anzufordernde Bitrate	
$B_{M,i}$	i-ter Meßwert der Bitrate des ankommenden Verkehrsstromes	
$B_{max}$	Maximal verfügbare Bitrate auf einem Übertragungsabschnitt	
$B_{S,i}$	i-ter Schätzwert für den Bitratenbedarf	
$B_{stat}$	Statischer Anteil der anzufordernden Bitrate	
$E[N_P]$	Mittlere Anzahl von Ankünften pro Aktivitätsphase bei der sporadischen	
	Quelle	
E[S]	Mittlere Pausendauer bei der sporadischen Quelle	
F(x)	Matrix der Verteilungsfunktionen	
N	Anzahl der Verkehrsquellen	
$n_K$	Anzahl bereits belegter Bedieneinheiten	
$n_{\mathrm{max}}$	Maximale Anzahl verfügbarer Bedieneinheiten	
$n_R$	Anzahl verfügbarer Bedieneinheiten	

$p_i$	Stationäre Zustandswahrscheinlichkeit
$p_{neg}$	Ablehnungswahrscheinlichkeit einer Bitratenanforderung
$p_x$	Zustandswahrscheinlichkeit des M/G/n-Verlustsystems
$p_{v}$	Paketverlustwahrscheinlichkeit
Q	Matrix der Übergangsraten
$q_{i,j}$	Übergangsrate für Übergang von Zustand $i$ nach $j$
R	Matrix der Flußdifferenzen
$r_i$	Flußdifferenz beim UAS-Modell
S	Maximale Füllhöhe der Pufferspeichers beim UAS-Modell
$T_P$	Minimaler Paketankunftsabstand bei der sporadischen Quelle
$T_W$	Paketwartezeit
x	Füllhöhe des Pufferspeichers beim UAS-Modell
$z_k$	Eigenwert
α	Rate für das Verlassen des aktiven Zustands bei der sporadischen Quelle
β	Rate für das Verlassen des Pausenzustands bei der sporadischen Quelle
$\delta(x-x_0)$	Dirac-Funktion
$\Phi_k$	Eigenvektor
$\left\{\Phi_{k}\right\}_{i}$	i-te Komponente des Eigenvektors
γ	Gewichtungsfaktor beim EWMA-Verfahren
$\lambda_P$	Paketankunftsrate im aktiven Zustand bei der sporadischen Quelle
$\overline{\lambda_P}$	Mittlere Paketankunftsrate
$\overline{\lambda_V}$	Mittlere Paketverlustrate
$\mu_j$	Paketbedienrate
$\frac{1}{\mu_P}$	Mittlere zugeteilte Paketbedienrate
$\tau_{\mathrm{H},j}$	Mittlere Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung

# Kapitel 1

## **Einleitung**

## 1.1 Gegenwärtige Situation

Im letzten Jahrzehnt sind enorme Fortschritte auf den Gebieten der Mikroelektronik und der optischen Kommunikationstechnik erzielt worden. Bedingt auch durch diese Fortschritte wächst die Nachfrage von Netzbenutzern und -betreibern nach den Leistungen von Hochgeschwindigkeitsnetzen, wie beispielsweise höchster Übertragungskapazität und intelligenten Leistungsmerkmalen. Dabei lassen sich im Bereich der öffentlichen Kommunikationsnetze im wesentlichen zwei neuartige Netzkonzepte erkennen:

Das erste Netzkonzept stammt aus dem Gebiet der Datenkommunikation. In innerbetrieblichen Bereichen wie Forschung, Entwicklung, Verwaltung und Fertigung existiert gegenwärtig eine große Anzahl Lokaler Netze (Local Area Networks, LANs), die vorwiegend zur Datenkommunikation zwischen Rechnern bzw. zwischen Rechnern und Endgeräten eingesetzt werden. Lokale Netze arbeiten typischerweise mit einer Übertragungsrate von einigen Mbit/s und sind für begrenzte räumliche Ausdehnungen (Campus, Fabrikgelände, Verwaltungsgebäude usw.) optimiert. Um zumindest im lokalen Bereich die Forderung nach höheren Übertragungsraten, speziell zur Kopplung von herkömmlichen Lokalen Netzen, zu befriedigen, wurden Lokale Hochgeschwindigkeitsnetze (High Speed Local Area Networks, HSLANs) entwickelt, die eine Übertragungsrate von 100 Mbit/s und mehr bereitstellen. Der Wunsch, Lokale Netze einer Firma miteinander zu verbinden, ist jedoch nicht nur auf die Lokalen Netze innerhalb eines Firmengeländes beschränkt, da oft verschiedene Zentren einer Firma über eine Stadt oder über eine ganze Region verteilt sind. Für diese größeren geographischen Ausdehnungen wurden regionale Hochgeschwindigkeitsnetze (Metropolitan Area Networks, MANs) entwickelt, die zur Zeit in mehreren

Pilotversuchen erprobt werden. Diese auch als Nahverkehrsnetze bezeichneten MANs werden meist nicht von nur einer sondern von mehreren privaten Organisationen genutzt und stehen dann unter öffentlicher Verwaltung.

Das zweite Netzkonzept stellt eine Weiterentwicklung der bereits existierenden öffentlichen Weitverkehrsnetze dar. Im Bereich der öffentlichen Weitverkehrsnetze existieren gegenwärtig noch vollkommen eigenständige Netze zur Übermittlung von Sprache, Daten und Text. Die vollständige Digitalisierung des ursprünglich mit analoger Technik arbeitenden Telefonnetzes ermöglichte eine Integration der bisher getrennten Dienste der dienstspezifischen Netze in ein universelles Kommunikationsnetz. Damit entstand zunächst das diensteintegrierende Digitalnetz (Integrated Services Digital Network, ISDN), das zur Zeit flächendeckend eingeführt wird. Das auch als Schmalband-ISDN (S-ISDN) bezeichnete Netz stellt dem Benutzer eine für alle Dienste einheitliche Benutzer-/Netzschnittstelle zur Verfügung. Beim Basisanschluß umfaßt diese Schnittstelle zwei 64 kbit/s-Nutzkanäle und einen 16 kbit/s-Kanal, der vorwiegend zum Austausch von Signalisierinformationen benutzt wird. Dem Teilnehmer kann bei Bedarf auch eine höherratige Schnittstelle bis 2 Mbit/s zur Verfügung gestellt werden. Neue Kommunikationsdienste, wie z.B. für interaktive Bewegtbildkommunikation, erfordern jedoch Übertragungsraten im ganzen Netz bis zu 150 Mbit/s. Ferner kann die benötigte Bitrate während einer Kommunikationsbeziehung in einem weiten Bereich schwanken. Mit dem im Schmalband-ISDN verwendeten Prinzip der Durchschaltevermittlung kann die geforderte Flexibilität nicht effizient realisiert werden. Daher wurde von CCITT für das künftige Breitband-ISDN (B-ISDN) eine neue Technik, der Asynchrone Transfer Modus (ATM), festgelegt. Die Information wird dabei in Paketen fester Länge unter Verwendung der asynchronen Zeitmultiplextechnik übermittelt, welche die größtmögliche Flexibilität hinsichtlich eines zeitlich veränderlichen Bitratenbedarfs bietet. An der wiederum für alle Dienste nutzbaren, standardisierten Benutzer-/Netzschnittstelle werden dann maximale Übertragungsraten im Bereich von 150 Mbit/s bzw. 600 Mbit/s zur Verfügung stehen.

Um die Akzeptanz des B-ISDN auf der Basis von ATM zu verbessern, müssen neue Anwendungen gefunden werden, welche die angekündigten Fähigkeiten des B-ISDN unterstreichen. Eine erste Anwendung auf breiter Basis ergibt sich wieder aus dem Wunsch nach schneller Datenkommunikation zwischen Lokalen Netzen über große Entfernungen. Diese Aufgabe wird zwar kurzfristig von den MANs übernommen, diese sollen aber nach und nach über das B-ISDN vernetzt oder durch das B-ISDN ersetzt werden. Geeignete Kopplungsmöglichkeiten zwischen MANs und dem künftigen B-ISDN müssen daher entwickelt und bereitgestellt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden einige Probleme identifiziert und untersucht, die bei der Kopplung von regionalen Hochgeschwindigkeitsnetzen mit dem Breitband-ISDN vor allem durch die unterschiedlichen Übermittlungsprinzipien der Netze entstehen.

## 1.2 Übersicht über die Arbeit

Nach der einführenden Darstellung der gegenwärtigen Situation im Bereich der Hochgeschwindigkeits-Datenkommunikation, aus der sich die Motivation zu dieser Arbeit ergibt, folgt nun zur besseren Orientierung eine Kurzbeschreibung der einzelnen Kapitelinhalte.

Im Kapitel 2 werden zunächst als Grundlage für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel die in dieser Arbeit verwendeten Fachbegriffe erläutert. Anschließend werden, als Schwerpunkt dieses Kapitels, die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetze, das Regionalnetz DQDB (Distributed Queue Dual Bus) und das künftige für den Weitverkehrsbereich geplante B-ISDN vorgestellt.

Gegenstand des Kapitels 3 ist die Kopplung von Kommunikationsnetzen mit unterschiedlichen Protokollarchitekturen. Dazu werden verschiedene Kopplungsarten vorgestellt und die Aufgaben einer Netzkoppeleinheit, die sich aus den Netzmerkmalen der zu koppelnden Netze ergeben, erläutert. Eine Klassifikation von Netzkoppeleinheiten beschließt dieses Kapitel. Dabei werden die typischen Eigenschaften jeder Klasse hervorgehoben.

Im Kapitel 4 wird der spezielle Fall der Kopplung des Regionalnetzes DQDB mit dem künftigen B-ISDN auf der Basis von ATM untersucht. Ausgehend von den Diensten, welche die Netze bereitstellen, werden die Kopplungsmöglichkeiten diskutiert und Protokollmodelle, aus denen die zur Kopplung notwendige Funktionalität hervorgeht, entwickelt. Aus der Vielzahl durchzuführender Funktionen wird besonders detailliert auf die Bandbreitenzuteilung bei der verbindungslosen Datenkommunikation zwischen beiden Netzen eingegangen. Dazu wird auf verschiedene Vorschläge für Bitratenreservierungsverfahren eingegangen und die Funktionsweise des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens erläutert. Einige Ergebnisse aus einer Verkehrssimulation, welche die Funktionsweise des Verfahrens betreffen, werden am Ende des Kapitels vorgestellt.

Das Kapitel 5 ist der analytischen Untersuchung des vorgestellten Bitratenreservierungsverfahrens gewidmet. Dazu werden zuerst die benötigten Hilfsmittel aus den Gebieten der Verkehrssimulation und Nachrichtenverkehrstheorie zusammengestellt. Anschließend werden ein Simulationsmodell und ein analytisches Modell der Netzkoppeleinheit, das mit dem vorgeschlagenen Verfahren zur Bitratenreservierung arbeitet, erstellt. Auf der Grundlage des analytischen Modells wird eine verkehrstheoretische Analyse mit Hilfe der Fluid-Flow-

Approximation vorgestellt, die zur Berechnung charakteristischer Systemgrößen verwendet wird. Den Abschluß des Kapitels bilden einige Fallstudien, anhand derer die Leistungsfähigkeit des Verfahrens diskutiert wird. Insbesondere werden verschiedene Reservierungsstrategien miteinander verglichen. Ferner werden aus den Ergebnissen Empfehlungen zur Dimensionierung einiger Systemgrößen abgeleitet. In der Untersuchung werden die mit Hilfe der approximativen Analyse berechneten Ergebnisse mit den simulativ gewonnenen Ergebnissen verifiziert.

Im Kapitel 6 werden schließlich die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefaßt und ein Ausblick auf mögliche weitere Anwendungen des Bitratenreservierungsverfahrens und auf Erweiterungen der vorgestellten Netzkoppeleinheit gegeben.

# Kapitel 2

# Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetze

In diesem Kapitel wird eine Einführung in das Gebiet der Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetze gegeben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kommunikationsnetze, dem MAN DQDB und dem B-ISDN, dem zukünftigen Breitbandnetz auf der Basis von ATM. Zunächst werden einige Grundbegriffe erläutert, die in den folgenden Kapiteln verwendet werden.

## 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Dienste

Die Definition des Dienstbegriffs [96] umfaßt die Gesamtheit der zur Abwicklung einer bestimmten Kommunikationsform (Sprach-, Bild-, Text-, Datenkommunikation) erforderlichen Funktionen und Protokolle. Ein Dienst wird mit Hilfe der Dienstmerkmale (Attribute) charakterisiert, die in technische, betriebliche und benutzungsrechtliche Merkmale untergliedert sind.

Technische Merkmale, die Dienstgüte betreffend, sind z.B. die Paketverlustwahrscheinlichkeit, die maximale Übermittlungsverzögerung der Nachrichten oder der erlaubte Bereich des Verbindungsaufbauverzuges. Aus diesen und weiteren Dienstmerkmalen werden die Anforderungen an das Kommunikationsnetz abgeleitet.

Die zur Erfüllung der Dienstmerkmale notwendigen Funktionen und Protokolle lassen sich entsprechend der Struktur der sieben Schichten des Basisreferenzmodells für offene Kommunikationssysteme (siehe Abschnitt 2.1.4) einteilen. Abhängig vom Umfang der Merkmalsfestlegung wird eine weitere Untergliederung in Übermittlungs- und Teledienste vorgenommen.

Die Übermittlungsdienste (Bearer Services) sind auf eine Nachrichtenübermittlung zwischen den Benutzer-/Netzschnittstellen beschränkt. Die Übermittlung der Information erfolgt kode- und anwendungsunabhängig.

Zusätzlich zu den Festlegungen für einen Übermittlungsdienst schließt die Definition eines Teledienstes (Teleservice) die Kommunikationsfunktionen der Teilnehmerendeinrichtungen mit ein. Beispiele für diese Dienste, die die direkte Benutzer-Benutzer-Kommunikation ermöglichen, sind Fernsprechen, Telefax oder Bildschirmtext.

#### 2.1.2 Netzarten

In der heutigen Zeit existiert eine Vielzahl getrennter Kommunikationsnetze für die verschiedensten Dienste. Die Struktur dieser Netze ist meist eine Kombination unterschiedlicher Topologien, die einer übergeordneten hierarchischen Netzstruktur unterliegen. Anhand der verschiedenen existierenden Netztypen werden nachfolgend Anwendungen für elementare Netztopologien beschrieben.

Im lokalen Bereich existieren für die Kommunikation zwei aus verschiedenen Anwendungsfällen entstandene Netztypen: Lokale Rechnernetze (LANs) und Nebenstellenanlagen (PBXs). Die sogenannten Lokalen Rechnernetze weisen meist eine bus- oder ringförmige Topologie auf; die Vermittlungsfunktionen werden i.allg. in verteilter Weise realisiert. Sie werden z.B. zur Vernetzung von Arbeitsplatzrechnern oder von Fertigungseinrichtungen eingesetzt. Dieser Netztyp ist also auf die Übermittlung von digitalisierten Daten spezialisiert. Für die Sprachkommunikation im lokalen Bereich wird ein weiterer Netztyp, die sogenannte Nebenstellenanlage, verwendet. Durch die Zentralisierung der Vermittlungsfunktionen für die angeschlossenen Teilnehmer ist dieser Netztyp oft sternförmig aufgebaut.

Weitverkehrsnetze für die verschiedenen Kommunikationsformen, wie beispeilsweise öffentliche Fernsprech- oder Datennetze, werden in einzelne hierarchische Netzebenen unterteilt. Die oberste Netzebene, wie z.B. die Ebene der Zentralvermittlungsstellen des öffentlichen Fernsprechnetzes in Deutschland, ist ein typischer Anwendungsfall für eine vollständig maschenförmige Vernetzung.

## 2.1.3 Übermittlungsverfahren

Die Nachrichtenübermittlung kann prinzipiell in zwei Bereiche unterteilt werden: die Übertragung und die Vermittlung der Information.

Als Medien für die physikalische Übertragung der Signale werden verdrillte Zweidrahtleitungen, Koaxialkabel und Glasfasern verwendet. Bei Lokalen Rechnernetzen (siehe Abschnitt 2.2) wird dabei das Übertragungsmedium gemeinsam von allen angeschlossenen Stationen genützt. Um den Zugriff der Stationen auf den Übertragungskanal zu steuern, werden verteilt arbeitende Medienzugriffsverfahren eingesetzt. Andere Übertragungstechniken hingegen, die vor allem im Bereich der Weitverkehrsnetze eingesetzt werden, verwenden zentralgesteuerte Multiplexverfahren, damit ein Übertragungsmedium von mehreren Kommunikationsbeziehungen gleichzeitig benutzt werden kann.

Bei den Kanalmultiplexverfahren wird dazu jeder Kommunikationsbeziehung ein (physikalischer) Übertragungskanal konstanter Bandbreite zur exklusiven Nutzung zugewiesen. Dieser Übertragungskanal wird beim Raummultiplex durch die Zuteilung einer Leitung aus einem Leitungsbündel garantiert. Beim Frequenzmultiplex wird ein Übertragungskanal durch eine Frequenzlage auf einer Multiplexleitung repräsentiert. Das synchrone Zeitmultiplex (STD) basiert auf der Unterteilung zyklisch wiederkehrender Pulsrahmen auf dem Medium. Diese Pulsrahmen werden nun weiter in Zeitlagen bzw. Zeitschlitze konstanter Dauer unterteilt. Ein Übertragungskanal entspricht bei diesem Verfahren einer bestimmten Zeitlage innerhalb des Pulsrahmens.

Bei den Nachrichten- oder Adreßmultiplexverfahren wird die Information in Nachrichtenblöcken übertragen. Zur Kennzeichnung einer Kommunikationsbeziehung ist im Kopf eines Nachrichtenblockes die Adresse des Empfängers oder eine Nummer zur Identifikation eines (virtuellen) Übertragungskanals enthalten. Die Nachrichtenblöcke werden also nicht aufgrund ihrer Position in einem periodischen Rahmen den Übertragungskanälen zugeordnet, sondern sie können asynchron, d.h. entsprechend dem tatsächlichen Bedarf übertragen werden. Beim asynchronen Zeitmultiplex (ATD) ist der Datenstrom auf dem Medium in Blöcke konstanter Länge, sogenannte Zellen, unterteilt. Im Gegensatz dazu sind beim Paketmultiplex Blöcke variabler Länge, Pakete, zugelassen. Für die bei beiden Verfahren notwendige Synchronisation kann z.B. kodierte Information in den Zellköpfen bzw. Paketbegrenzungsfeldern verwendet werden.

Die Verfahren zur Nachrichtenvermittlung basieren auf den beiden Grundprinzipien Durchschalte- und Speichervermittlung, die jeweils eng mit den beschriebenen Multiplexverfahren verknüpft sind.

Bei der Durchschaltevermittlung stehen einer Verbindung einer oder mehrere Kanäle zur exklusiven Nutzung zur Verfügung (Kanalmultiplex), unabhängig davon, ob Nutzinformation übertragen wird. Die Reservierung der Kanäle zwischen Sender und Empfänger erfolgt beim Verbindungsaufbau. Nach der Datentransferphase werden die reservierten Kanäle beim Verbindungsabbau wieder freigegeben.

Bei der Teilstrecken- oder Speichervermittlung werden Nachrichtenblöcke (Adreßmultiplex) abschnittsweise vom Sender zum Empfänger übertragen. Ist der Übertragungsabschnitt zum nächsten Netzknoten belegt, muß der Nachrichtenblock zwischengespeichert werden. Die Vermittlung erfolgt durch die Auswertung von Informationen im Kopf des Nachrichtenblockes. Enthält ein Nachrichtenblock eine Nachricht als Ganzes, so wird diese Variante als Sendungsvermittlung bezeichnet. Ein häufiger verwendetes Prinzip ist die Paketvermittlung, wobei längere Nachrichten in kleinere Einheiten (Pakete) aufgeteilt werden. Dabei wird zwischen verbindungsloser und verbindungsorientierter Kommunikation unterschieden. Die individuelle Übermittlung jedes Paketes einer Kommunikationsbeziehung durch das Netz wird als verbindungslose Kommunikation (Datagramm-Prinzip) bezeichnet. Jeder Vermittlungsknoten wertet dabei die vollständige Zielinformation im Kopf jedes Paketes für die Wegesuche aus. Im Gegensatz dazu werden bei der verbindungsorientierten Kommunikation die Pakete einer Kommunikationsbeziehung mit Hilfe einer virtuellen Verbindung zum Ziel übermittelt. Nach der Wegesuche in der Verbindungsaufbauphase ist die Zuordnung der aufeinanderfolgenden Übertragungsabschnitte in den an der Verbindung beteiligten Vermittlungsknoten in einer Tabelle festgelegt. Den Paketen wird auf den einzelnen Verbindungsabschnitten die jeweilige Verbindungsidentifikation aus der Tabelle zugeordnet, d.h. die vollständige Zieladresse muß nicht mehr mitgeführt werden.

Die sogenannten hybriden Vermittlungsverfahren [77, 67] stellen eine Kombination der Durchschalte- und Paketvermittlung dar. Sie basieren auf dem oben beschriebenen synchronen Zeitmultiplexverfahren. Ein Zeitschlitz kann dabei entweder dem durchschaltevermittelten oder dem paketvermittelten Verkehr zugeordnet werden. Die Zuordnung ist entweder statisch oder wird mit Hilfe geeigneter Verfahren dynamisch verändert.

### 2.1.4 Basisreferenzmodell

Mit Hilfe des von der International Organization for Standardization (ISO) definierten Basisreferenzmodells (auch OSI-Referenzmodell genannt) zur Verbindung offener Systeme (Open Systems Interconnection, OSI) [91] kann die Vielzahl verschiedener Aufgaben in einem Kommunikationssystem systematisch gegliedert werden. Das dort standardisierte Mo-

dell ist in sieben Schichten unterteilt, wobei jede Schicht jeweils unabhängig von den angrenzenden Schichten definiert ist. Jede Schicht erbringt Dienste, d.h. Operationen auf die zur Kommunikation benötigten Objekte, die von der darüberliegenden Schicht genutzt werden können. Dazu werden Dienstelemente (Dienstprimitive) an den Dienstzugangspunkten (Service Access Points, SAPs) einer Schicht ausgetauscht. Die Funktionalität eines Dienstes wird dabei von Funktionsblöcken (Instanzen) erbracht.

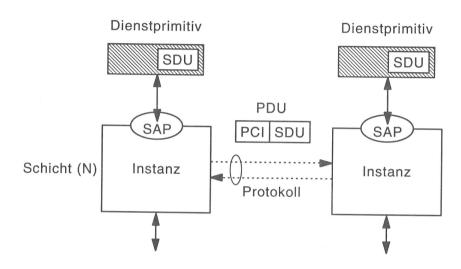


Bild 2.1: Begriffe des Schichtungsprinzips

Die Kommunikation zwischen zwei Instanzen derselben Schicht in verschiedenen Stationen geschieht durch den Austausch von Protokolldateneinheiten (Protocol Data Units, PDUs), gesteuert über ein Protokoll (siehe Bild 2.1). Neben Protokollsteuerinformationen (Protocol Control Information, PCI) enthält eine PDU als Nutzinformation für die betrachtete Schicht sogenannte Dienstdateneinheiten (Service Data Units, SDUs).

Aufgrund des Umfanges der Funktionen einzelner Schichten wurden diese im Verlauf der Standardisierung in weitere Teilschichten, wie in Bild 2.2 dargestellt, unterteilt.

Die Aufgaben der Schichten 5 bis 7 sind am jeweiligen Anwendungsprozeß orientiert, wobei die Verarbeitungsschicht die Schnittstelle zum Anwendungsprozeß bereitstellt. Sie beinhaltet z.B. Funktionen zur Verbindungssteuerung. Funktionen zur Darstellung der Information, wie beispielsweise die Kodierung und Interpretation der Daten, sind in Schicht 6 enthalten. Die Synchronisation von Sende- und Empfangsprozeß ist die prinzipielle Aufgabe der Kommunikationssteuerungsschicht.

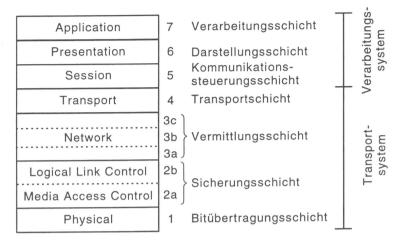


Bild 2.2: OSI-Referenzmodell

Das Verarbeitungssystem (Schichten 5 bis 7) nutzt die Dienste der Instanzen der Transportschicht, die einen netzunabhängigen Datentransport zwischen Sender und Empfänger ermöglicht. Durch verschiedene Protokollmechanismen wird die Einhaltung einer geforderten Dienstqualität gewährleistet.

Die Vermittlungsschicht ist aufgeteilt in drei Teilschichten, wobei die Netzübergangsschicht, die oberste Teilschicht, unabhängig vom Teilnetz vor allem Funktionen zur Verkehrslenkung wahrnimmt. Die unterste Teilschicht steuert den Zugang zum jeweiligen Teilnetz. Eventuell notwendige Anpassungsfunktionen zwischen den beiden Teilschichten werden in der dazwischenliegenden Konvergenzschicht durchgeführt. Allgemein sind die Instanzen der Verarbeitungsschicht für die Ankopplung der Anwendung an das Kommunikations-Subsystem zuständig.

Die Sicherungsschicht ist, speziell zur Einordnung von LANs und MANs in das Basisreferenzmodell, in zwei Teilschichten unterteilt. Die obere Teilschicht (Logical Link Control, LLC) hat die ursprüngliche Aufgabe der Sicherungsschicht übernommen, die Nachrichtenübertragung auf den einzelnen Übertragungsabschnitten zu sichern. Die untere Teilschicht steuert, abhängig von der verwendeten Technologie, den Zugriff der angeschlossenen Stationen auf das gemeinsame Medium (Media Access Control, MAC). Durch die Unterteilung der Schicht 2 werden die technologiespezifischen Teile der Lokalen Netze von den übergeordneten Schichten entkoppelt.

In der Bitübertragungsschicht werden die mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften des Mediums definiert. Ferner sind Funktionen zur bitweisen Übertragung der Dienstdateneinheiten der Schicht 2 über einen ungesicherten Nachrichtenkanal in dieser Schicht festgelegt.

Die Standards für Lokale Netze umfassen zum einen die technologieabhängigen Schichten 1 und 2a des Basisreferenzmodells. Entkoppelt von der Technologie des Lokalen Netzes wird für die Schicht 2b einheitlich ein Standard [92] verwendet, der drei Dienstklassen für die höheren Schichten bereitstellt: einen verbindungslosen Dienst (LLC Typ 1), einen verbindungsorientierten Dienst (LLC Typ 2) und einen verbindungslosen Dienst mit Quittierungen (LLC Typ 3).

## 2.2 Netze mit Vielfachzugriff

### 2.2.1 Merkmale und Begriffe

Gegenwärtig lassen sich vier Generationen lokaler Netze unterscheiden, die durch den technologischen Fortschritt sowie die Migration von dienstspezifischen Netzen zu einem einheitlichen Netz geprägt sind.

Die erste Generation umfaßt die ursprünglichen LANs, deren Konzepte zu Beginn der siebziger Jahre entwickelt wurden, um die Kommunikation zwischen Rechnern zu verbessern. Bekannte Vertreter dieser Generation wie CSMA/CD (Ethernet), Token Bus und Token Ring wurden von verschiedenen Gremien standardisiert [81, 83, 84, 93, 94, 95, 66] und sind auf dem Markt erhältlich. Zur Verkabelung dieser Lokalen Netze werden meist Koaxialkabel verwendet, welche gute Übertragungseigenschaften bei den gewählten Bitraten (4 bis 16 Mbit/s) besitzen. In der Bitübertragungsschicht wird, je nach Standard, die Basis- oder Breitbandübertragungstechnik festgelegt. Bei der Basisbandübertragung werden die digitalisierten Signale nach der Leitungskodierung direkt über das Medium übertragen. Bei der Breitbandtechnik werden die digitalisierten Signale vor der Übertragung auf dem Medium durch Modulation mit einer Trägerfrequenz in einen anderen Frequenzbereich transformiert. Neben der Topologie unterscheiden sich die oben genannten LANs vor allem durch die verwendeten dezentralen Medienzugriffsverfahren: Konkurrenzverfahren (CSMA/CD) und Zuteilungsverfahren bei Token Bus und Token Ring. Bei den Konkurrenzverfahren versucht jede Station mit einem Sendewunsch, sofort den Kanal zu belegen. Aufgrund der Signallaufzeiten können Kollisionen auf dem Übertragungskanal

entstehen, die durch Protokollfunktionen aufgelöst werden müssen. Bei den Zuteilungsverfahren wird eine explizite Sendeberechtigung (Token) von Station zu Station weitergereicht.

Besonders der technologische Fortschritt hat die Entwicklung der zweiten Generation von LANs geprägt [154]. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Generation sind:

- Verwendung optischer Übertragungssysteme
- Übertragungsrate 100 Mbit/s und mehr
- Versorgung eines regionalen Gebietes (Durchmesser ca. 100 km)

Durch diese Eigenschaften lassen sich diese Hochgeschwindigkeitsnetze (High Speed Local Area Networks, HSLANs) vielseitig einsetzen, als Backbone-System zur Vernetzung von meist entfernten Großrechnern bzw. LANs untereinander, als Frontend-System zur Verbindung von Workstations mit zentralen Ressourcen und als Backend-System zur Verbindung von Zentraleinheiten und Massenspeichern bzw. von Höchstleistungskomponenten innerhalb eines Rechenzentrums. Werden zusätzlich in diesem Netz verschiedene Dienstklassen mit Hilfe hybrider Vermittlungsverfahren integriert, werden diese Netze als regionale Netze oder Nahverkehrsnetze (Metropolitan Area Networks, MANs) [116, 117] bezeichnet. Bedingt durch hohe Übertragungsraten und längere Übertragungsmedien sind die herkömmlichen Medienzugriffsverfahren der LANs in ihrer ursprünglichen Form nicht mehr geeignet [106]. Die Systeme FASNET [110], EXPRESSNET [147] und LION [112] verwenden daher als Kanalzuteilungsverfahren einen zyklischen Mechanismus mit einer impliziten Sendeberechtigung. Ein Medienzugriffsverfahren mit einzelnen Sendeberechtigungen (Credits) pro Paket wird im System ORWELL [1, 54, 102] angewendet. Die bekanntesten international standardisierten Vertreter dieser zweiten Generation sind FDDI (Fiber Distributed Data Interface) und DQDB (Distributed Queue Dual Bus). Die erste Version FDDI-I ist ein reines Paketvermittlungsnetz mit einem zeitgesteuerten Token-Mechanismus als Medienzugriffsverfahren. Dieses HSLAN wird inzwischen von mehreren Herstellern angeboten. Die zusätzliche Integration von durchschaltevermitteltem Verkehr ist in der zweiten Version FDDI-II vorgesehen, die jedoch bis heute nicht als Produkt verfügbar ist. Eine Übersicht über FDDI ist in [133, 134, 135] enthalten. Das MAN DQDB hingegen wird gegenwärtig in zahlreichen Pilotprojekten [3, 51, 63, 128] im Hinblick auf die Evolution zum zukünftigen B-ISDN z.T. auch als öffentliches Netz eingesetzt. Als Medienzugriffsprotokoll wird ein verteilter Reservierungsmechanismus verwendet. Eine genaue Beschreibung des gesamten DQDB Standards [86] folgt in Abschnitt 2.2.2.

Mittlerweile wird eine dritte Generation Lokaler Netze entwickelt, die zur Vernetzung von Supercomputern in regionalen Gebieten mit Übertragungsgeschwindigkeiten im Bereich einiger Gbit/s eingesetzt werden sollen. Ferner sollen die Vertreter dieser Generation kompatibel zum zukünftigen B-ISDN sein und damit die Kopplung dieser Netze vereinfachen. Ebenso wird der Einsatz als schnelles Verbindungsnetz für LANs und HSLANs (speziell FDDI) geplant. Eine Arbeitsgruppe des Standardisierungsgremiums ANSI bereitet zur Zeit einen Standardisierungsvorschlag (FDDI Follow-On LAN, FFOL) [57] für diese Generation von Netzen vor. Einer der zur Standardisierung eingereichten Vorschläge ist CRMA-I [121, 122], für den auch ein Prototyp [161] implementiert wurde.

Die vierte Generation Lokaler Netze soll auf rein optischen Vermittlungstechniken basieren und als wesentliche Eigenschaft Übertragungsgeschwindigkeiten im Bereich mehrerer Gbit/s bereitstellen. Diese Netze befinden sich noch am Anfang ihrer Entwicklung.

### 2.2.2 DQDB

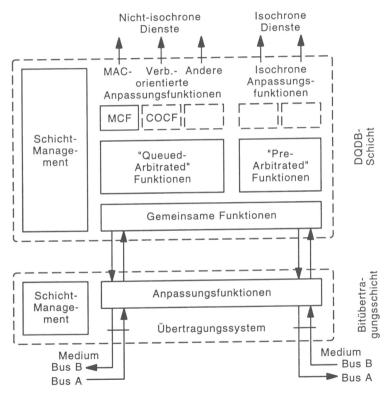
Im Rahmen dieser Arbeit wurde das MAN DQDB aufgrund der Gemeinsamkeiten mit dem zukünftigen B-ISDN auf der Basis der ATM-Technik als Beispiel zur Untersuchung der Möglichkeiten der Kopplung dieser Netztypen gewählt. Dieser Abschnitt beschreibt zunächst den zeitlichen Verlauf und den Umfang der Standardisierung, bevor auf die im endgültigen Standard festgelegten Topologien, Funktionen und Dienste eingegangen wird.

#### 2.2.2.1 Standardisierung

Der Vorläufer aller Standardisierungsvorschläge ist das an der Universität von Westaustralien entwickelte System QPSX [20, 21, 123, 124], das als erstes System ein Medienzugriffsprotokoll nach dem Prinzip der verteilten Warteschlange (siehe Abschnitt 2.2.2.4) verwendet. Vom ersten Entwurf [87] bis zum verabschiedeten Standard [86] wurden insgesamt 16 Entwürfe veröffentlicht. Die in den Entwürfen dokumentierten Änderungen betreffen vor allem das Medienzugriffsprotokoll. Der ursprüngliche Mechanismus wurde entscheidend verändert [88] und erweitert [89], um seine Leistungsfähigkeit zu verbessern [138].

In der Terminologie des Standards definiert der Standard nur ein DQDB-Teilnetz. Ein MAN entsteht erst aus der Kopplung mehrerer dieser DQDB-Teilnetze. Für ein DQDB-Teilnetz wird im Standard ein Medienzugriffsprotokoll zur Verwendung auf zwei entgegengesetzt gerichteten busförmigen Übertragungssystemen festgelegt. Wie die Standards für LANs umfaßt der Standard die Bitübertragungsschicht (Schicht 1) und die als DQDB-

Schicht bezeichnete Teilschicht 2a der Sicherungsschicht. Ebenso ist die Spezifikation der DQDB-Schicht für die Unterstützung der Funktionen der Teilschicht 2b (LLC, [80]) ausgelegt. Funktionen zum Management der spezifizierten Schichten werden ebenfalls festgelegt. Außerhalb der Festlegungen werden Funktionen der DQDB-Schicht für die Integration weiterer Dienste vorgeschlagen (siehe Abschnitt 2.2.2.4). Zur Übersicht sind die im Standard festgelegten bzw. vorgeschlagenen Funktionsblöcke einer DQDB-Station in Bild 2.3 dargestellt.



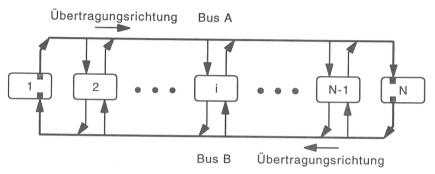
MCF: MAC Convergence Function

COCF: Connection-Oriented Convergence Function

Bild 2.3: Funktionaler Aufbau einer DQDB-Station

### 2.2.2.2 Netzkomponenten

Ein DQDB-Teilnetz basiert auf einem Paar unidirektionaler, entgegengesetzt gerichteter Busse, folgend mit Bus A und B bezeichnet, an die die einzelnen Stationen angeschlossen sind (Bild 2.4). Eine Station kann lesend und schreibend auf beide Busse zugreifen und somit mit einer anderen Station kommunizieren, indem sie ihre Nachrichten auf einem Bus sendet und die Nachrichten der anderen Station auf dem anderen Bus empfängt.



- Rahmengenerator
- Busabschluß

Bild 2.4: Offene Topologie eines DQDB-Teilnetzes

Die Lese- und Schreibfunktionen der Anschlußeinheit können in aktiver oder passiver Technik ausgeführt werden. Eine aktive Technik liest die Daten vom ankommenden Busabschnitt und sendet sie nach der Signalregenerierung auf dem abgehenden Busabschnitt wieder aus. Ein passives System dagegen kann prinzipiell keine Daten vom Bus löschen.

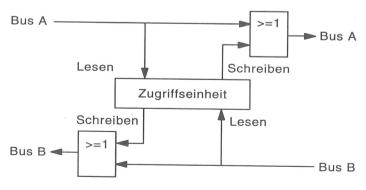
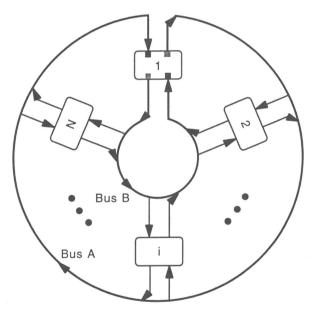


Bild 2.5: Anschlußeinheit einer DQDB-Station

Daten können lediglich vom Bus kopiert oder, nach Erlaubnis durch das Medienzugriffsprotokoll, in unbenutzte Zeitschlitze geschrieben werden. Bild 2.5 zeigt die Anschlußeinheit einer DQDB-Station, wobei die Ankopplung an die Busse durch die Symbole für eine logische Oder-Verknüpfung dargestellt ist.

In den meisten Realisierungen werden für den Aufbau eines DQDB-Teilnetzes jedoch Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken verwendet, da eine aktive Ankopplung der Stationen hinsichtlich der maximal möglichen Stationszahl einer passiven Ankopplung überlegen ist. Ferner erfolgt die Verkabelung der Stationen in der Regel in der Form eines Ringes (Bild 2.6), um nach Ausfall einer Übertragungsstrecke zwischen zwei Stationen eine schnelle Rekonfiguration des Systems zu gewährleisten.



- Rahmengenerator
- Busabschluß

Bild 2.6: Geschlossene Topologie eines DQDB-Teilnetzes

Zentrale Elemente sind die am Anfang des jeweiligen Busses angeschlossenen Rahmengeneratoren, deren Funktionen je nach Topologie von einer oder zwei Stationen wahrgenommen werden. Ein Rahmengenerator erzeugt synchrone Pulsrahmen, die die Basis für die hybride Vermittlung zur Integration verschiedener Verkehrsarten bilden. Die synchro-

nen Pulsrahmen werden hierzu, wie beim Zeitmultiplexverfahren, in Blöcke konstanter Länge, sogenannte Zeitschlitze, unterteilt. Das Datenformat auf einer Übertragungsstrecke ist beispielhaft in Bild 2.7 dargestellt. Die verschiedenen Zeitschlitzformate und die Felder innerhalb eines Zeitschlitzes sind an dieser Stelle nur zur besseren Übersicht dargestellt. Für die Bitübertragungsschicht sind sie ohne Bedeutung und werden daher erst im Abschnitt über die DQDB-Schicht beschrieben.

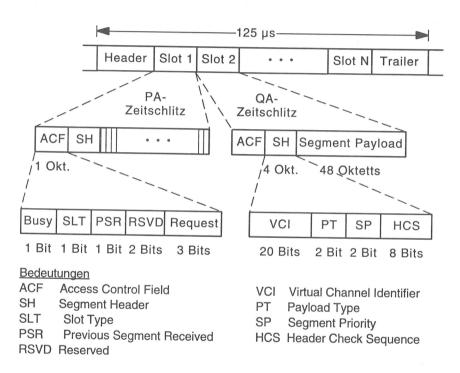


Bild 2.7: Datenformat auf einer Übertragungsstrecke

### 2.2.2.3 Bitübertragungsschicht

Die Realisierung der beiden Busse ist im Standard keineswegs festgelegt, vielmehr werden mehrere standardisierte Übertragungssysteme [5, 6, 25, 26, 10] vorgeschlagen, die bisher vor allem in öffentlichen Netzen verwendet werden. Diese Systeme bieten Übertragungsraten von 34,368 bis 155,520 Mbit/s. Je nach verwendetem System sind in der Bitübertragungsschicht Funktionen zur Anpassung an die von der DQDB-Schicht geforderten

Dienste notwendig. Am Dienstzugangspunkt zwischen Schicht 1 und 2a sind Dienstprimitive zum Austausch einzelner Oktetts (8 Bits) und zur Anzeige des Anfangs eines Zeitschlitzes festgelegt. Eine weitere wichtige Funktion, die in den Aufgabenbereich des Schichtmanagements fällt, ist die Isolierung der Station bei Fehlfunktionen durch einen sogenannten "Bypass"-Mechanismus.

#### 2.2.2.4 DODB-Schicht

Die DQDB-Schicht wird im Standard in verschiedene funktionale Einheiten unterteilt (siehe Bild 2.3). Im folgenden werden die Funktionen der einzelnen Einheiten näher beschrieben.

Die Einheit für die gemeinsamen Funktionen der DQDB-Schicht hat prinzipiell die Aufgabe, einzelne Zeitschlitze, abhängig vom im "Slot Type"-Feld angegebenen Typ, an die entsprechende Einheit weiterzuleiten. Umgekehrt werden Zeitschlitze entgegengenommen und Oktett für Oktett an die Bitübertragungsschicht übergeben. Die gemeinsamen Funktionen beinhalten auch die Steuerung zur Unterteilung des synchronen Pulsrahmens in Zeitschlitze. Die restlichen Funktionseinheiten werden im folgenden im Zusammenhang mit den von der DQDB-Schicht bereitgestellten Diensten beschrieben. Im Gegensatz zu den Festlegungen im Standard für den verbindungslosen Datendienst (IEEE 802.2-konform) sind die Spezifikationen der verbindungsorientierten isochronen und nicht-isochronen Dienste gegenwärtig nur als Vorschläge zu werten.

### Verbindungsloser Datendienst

Die Dienstdateneinheiten des verbindungslosen (CL) Datendienstes werden in den in Bild 2.7 dargestellten "Queued-Arbitrated" (QA) Zeitschlitzen übertragen. Da in diesem Zeitschlitztyp die Menge der Nutzdaten (Segment Payload) begrenzt ist, müssen große LLC-Protokolldateneinheiten vor der Übertragung in kleinere Segmentierungseinheiten aufgeteilt und nach dem Empfang wieder zusammengesetzt werden. Neben dem Hinzufügen bzw. Entfernen und Auswerten weiterer Steuer- und Kontrollinformationen ist dies die hauptsächliche Aufgabe der MCF-Anpassungseinheit (Bild 2.3). Die Hierarchie der Dienstund Protokolldateneinheiten ist in Bild 2.8 dargestellt. Alle DM-Protokolldateneinheiten, die zu einer IM-PDU gehören, werden dabei eindeutig gekennzeichnet (Message Identifier, MID).

Beim Sendevorgang werden die von der MCF-Einheit erzeugten DM-Protokolldateneinheiten von der QA-Einheit zunächst mit einem Segmentkopf versehen, der Informationen zur Kennzeichnung des verbindungslosen Datendienstes enthält. Danach werden sie zusam-

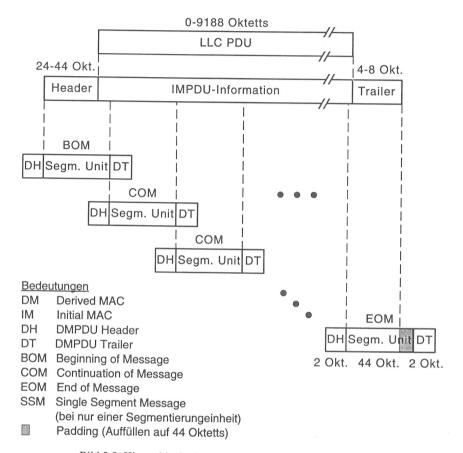


Bild 2.8: Hierarchie der Dateneinheiten für den CL-Datendienst

men mit dem Zugriffssteuerungsfeld (ACF) unter der Kontrolle durch das Medienzugriffsprotokoll an die nächste Einheit zur Übertragung übergeben. Die Daten des verbindungslosen Dienstes werden dabei in der niedrigsten der drei verfügbaren Prioritätsklassen (Priorität 0) übertragen. Beim Empfangsvorgang wird die Steuerinformation ausgewertet und wieder entfernt.

### "Distributed Queueing"-Protokoll

Das mit den Funktionen der QA-Einheit abgewickelte Medienzugriffsprotokoll arbeitet nach dem Prinzip des verteilten Wartens (Distributed Queueing, DQ). Die Grundidee ist, den angeschlossenen Stationen Informationen über den Systemzustand zur Verfügung zu

stellen, die die Bestimmung der eigenen Position in einer über die Stationen verteilten Sendewarteschlange ermöglichen. Zur Realisierung dieses Prinzips sind in der QA-Einheit pro Bus und Prioritätsklasse zwei Zähler (Request-Zähler, Countdown-Zähler) notwendig. Als Protokollsteuerinformationen stehen das Busy-Bit und die drei Request-Bits des Zugriffssteuerungsfeldes zur Verfügung. Für die folgende Beschreibung wird zunächst der Zugriff einer Station i (siehe Bild 2.4) auf Bus A für nur eine Prioritätsklasse betrachtet.

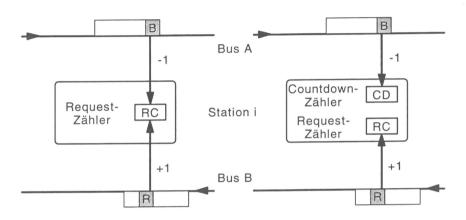


Bild 2.9: Prinzip des verteilten Wartens

Generell sendet eine Station, die ein Segment auf Bus A übertragen möchte, eine Anforderung für einen Zeitschlitz aus. Dazu setzt sie das nächste freie Request-Bit eines Zeitschlitzes auf Bus B. Jede Station, die einen Request (Request-Bit gesetzt) auf Bus B empfängt, inkrementiert den Request-Zähler für Bus A. Für jeden freien Zeitschlitz (Busy-Bit nicht gesetzt), der auf Bus A passiert, wird der Request-Zähler für Bus A dekrementiert. Dieser Sachverhalt ist im linken Teil des Bildes 2.9 dargestellt. Hat nun die betrachtete Station i ein Segment auf Bus A zu übertragen (Bild 2.9 rechts), wird der Zählerstand des Request-Zählers in den Countdown-Zähler kopiert und der Request-Zähler auf den Wert Null zurückgesetzt. Außerdem wird eine Anforderung auf Bus B gesendet. Jeder freie Zeitschlitz, der auf Bus A passiert, dekrementiert nun den Countdown-Zähler. Erreicht er den Zählerstand Null, wird der nächste freie Zeitschlitz auf Bus A von Station i zur Übertragung benutzt. Damit wird sichergestellt, daß Stationen der Positionen i + 1 bis N, die bereits auf ihren Zugriff warten, vor der Station i senden dürfen. Die Abfertigungsreihenfolge wird somit durch die Wartepositionen der Stationen in einer verteilten Warteschlange festgelegt. Der Request-Zähler zählt währenddessen auf Bus B eintreffende neue Anforderun-

gen. Weitere Übertragungen auf Bus A werden wieder nach dem beschriebenen Verfahren gesteuert. Der Mechanismus für den Zugriff auf Bus B läuft analog zum Zugriff auf Bus A ab.

Das Protokoll unterschiedet drei Prioritätsklassen anhand der drei Request-Bits im ACF-Feld, wobei Segmente niederer Priorität erst nach der Übertragung aller Segmente höherer Priorität übertragen werden.

#### **Isochroner Dienst**

Der im Standard vorgeschlagene isochrone Dienst arbeitet nach dem Prinzip der Durchschaltevermittlung. Die Prozeduren zur Zuteilung eines Übertragungskanales beim Verbindungsaufbau können auf verschiedene Stationen eines DQDB-Netzes verteilt sein. Da die dazu notwendigen Protokolle und Funktionen der Vermittlungsschicht zuzuordnen sind, werden im DQDB-Standard nur Empfehlungen gegeben. Den an der Kommunikation beteiligten Stationen wird nach dem erfolgreichen Verbindungsaufbau eine Nummer zur Identifizierung der Verbindung (VCI) und der jeweilige Bus mitgeteilt. Der Rahmengenerator ist dann für die Kennzeichnung einer der angeforderten Bitrate entsprechenden Anzahl von Zeitschlitzen mit dieser Verbindungsidentifikation verantwortlich. Da die Dienstdateneinheiten des isochronen Dienstes in den in Bild 2.7 dargestellten "Pre-Arbitrated" (PA) Zeitschlitzen übertragen werden, müssen diese auch vom Rahmengenerator als solche gekennzeichnet werden.

Prinzipiell stehen in einem PA-Zeitschlitz 48 Oktetts für die Übertragung von Nutzinformation zur Verfügung. Im Standard wird die Zuordnung einzelner Oktetts zu einer Verbindung vorgeschlagen, d.h. die für die Zugriffssteuerung verantwortliche PA-Einheit einer Station (Bild 2.3) muß in ihrer Verbindungstabelle zusätzlich zum Bus und der Verbindungsidentifikation die Schreib- bzw. Leseposition des Oktetts festhalten. Mechanismen und Strategien zur Zuordnung von Übertragungskapazität zu einer Verbindung sind nicht Gegenstand des Standards, jedoch werden solche Mechanismen in einigen Tagungsbeiträgen [155, 156] vorgeschlagen und analysiert. Gegenwärtig wird eine weitere Variante [76] diskutiert, welche die gesamte zur Verfügung stehenden Nutzinformation eines Zeitschlitzes einer Verbindung zuordnet. Die zur Übertragung anstehenden Oktetts werden dabei zu Blöcken aufgesammelt.

Bei beiden Varianten müssen die Oktetts zwischengespeichert werden bis der zugeteilte Zeitschlitz die Station erreicht oder eine isochrone Weitergabe an Instanzen höherer Schichten erfolgt. Dies ist eine der Aufgaben der Anpassungseinheit ICF. Die dazu notwendige Speicherkapazität wird von ihr beim Verbindungsaufbau reserviert.

## Verbindungsorientierter Datendienst

Im Hinblick auf das zukünftige B-ISDN auf der Basis des ATM-Prinzips (Abschnitt 2.3) wird im DQDB-Standard ein verbindungsorientierter (CO) Datendienst vorgeschlagen. Die Dienstdateneinheiten werden, wie beim verbindungslosen Datendienst, in den in Bild 2.7 dargestellten "Queued-Arbitrated" (QA) Zeitschlitzen unter Steuerung des DQ-Protokolls übertragen. Anders als beim verbindungslosen Datendienst ist hier die nur teilweise Ausnutzung aller Arten von Segmentierungseinheiten erlaubt.

Während die Funktionalität der QA-Einheit unverändert bleibt, werden zusätzliche Anpassungsfunktionen der COCF-Einheit, wie z.B. die Reservierung von Speicher beim Empfänger, in Einklang mit den entsprechenden B-ISDN-Standards vorgeschlagen (siehe [23]). Die Funktionen zum Auf- bzw. Abbau einer Verbindung sind wiederum nicht Gegenstand des DQDB-Standards.

# 2.2.3 Leistungsfähigkeit des DQ-Protokolls

Um architekturelle Besonderheiten bei der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kopplung berücksichtigen zu können, wie z.B. den Anschlußort der Koppeleinheit (siehe Abschnitt 4.4.3), wird in diesem Abschnitt das prinzipielle Leistungsverhalten eines DQDB-Teilnetzes untersucht. Dazu wird die Funktionalität und das zeitliche Verhalten des DQDB-Systems mit Hilfe eines abstrakten Modells nachgebildet und dieses mittels einer Verkehrssimulation (siehe Abschnitt 5.1.4.1) untersucht. Generell wäre eine mathematische Analyse der Simulation des Systems aufgrund der hohen Rechenzeiten vorzuziehen, jedoch vernachlässigen die existierenden Analysen [14, 43, 53, 55, 97, 119, 120, 126, 144, 148, 155, 115] Mechanismen und Effekte wie beispielsweise die endliche Laufzeit von Anforderungen auf dem Medium, die einen starken Einfluß auf das Systemverhalten haben.

Für die Simulation wird, soweit nicht anders angegeben, ein DQDB-Teilnetz mit 15 Stationen gewählt, die in konstanten Abständen an das Medium mit einer Gesamtlänge von 100 km angeschlossen sind. Die Übertragungsrate eines Busses beträgt 155,52 Mbit/s. Nach Abzug der Übertragungskapazität für die Steuerinformation des Übertragungssystems ergibt sich die von der DQDB-Schicht nutzbare Übertragungsrate eines Busses zu 149,76 Mbit/s. Die Pakete, die an der DQDB-Schicht zur Übermittlung ankommen, werden gemäß einem Poisson-Prozeß (Abschnitt 5.1.3.1) erzeugt. Die Pakete einer Station werden zu gleichen Teilen an alle anderen Stationen übermittelt. Zunächst entspricht die

Länge eines Paketes der Länge einer Segmentierungseinheit, d.h. ein Paket kann vollständig in einem Zeitschlitz übertragen werden. Die Ergebnisse werden mit ihren 95%-Vertrauensintervallen, soweit signifikant, angegeben.

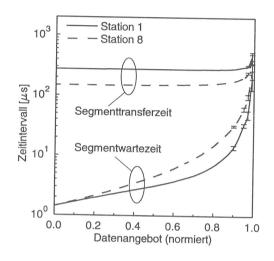


Bild 2.10: Mittlere Warte- und Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit des normierten Datenangebotes

Bild 2.10 zeigt die mittlere Warte- und Transferzeit eines Segmentes abhängig vom gesamten Datenangebot bezogen auf die nutzbare Gesamtübertragungskapazität des Systems. Die Wartezeit eines Segmentes ist das Zeitintervall vom Eintreffen des Segmentes an der Schnittstelle zur DQDB-Schicht bis zum Beginn der Übertragung auf dem Medium. Die Transferzeit beinhaltet diese Wartezeit zuzüglich der Übermittlungsdauer bis zur Empfängerstation. Da sich die mittleren Zeitintervalle für Segmente der verschiedenen Stationen unterscheiden, sind beispielhaft die Zeitintervalle für Segmente der Stationen 1 und 8 dargestellt.

Verdeutlicht wird dieses Verhalten auch durch die Bilder 2.11 und 2.12, in denen die mittlere Segmentwarte- bzw. -transferzeit abhängig von der Stationsnummer bei einem normierten Datenangebot von 90% dargestellt ist. In diesen Bildern wird zusätzlich die Länge des Mediums variiert. Generell zeigt sich, daß Stationen, die am Anfang eines Busses angeschlossen sind, schneller auf das Medium zugreifen können als Stationen, die sich in der Mitte des Systems befinden. Diese Bevorzugung gewisser Stationen verstärkt sich bei Systemen mit größerer Ausdehnung aufgrund der immer größer werdenden Laufzeiten der Zeitschlitzanforderungen (Requests) zum jeweiligen Ende des Busses. Dieses Verhalten

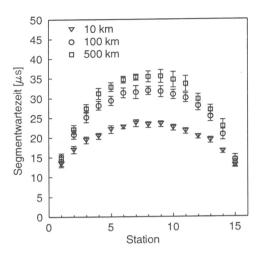


Bild 2.11: Mittlere Wartezeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen

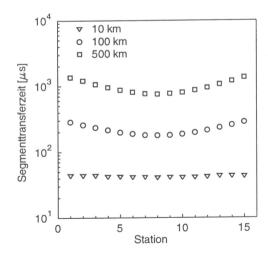


Bild 2.12: Mittlere Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen

bezüglich der Wartezeiten kehrt sich bei Betrachtung der Transferzeiten um. Die Übermittlung von Segmenten einer Station am Anfang eines Busses dauert wegen der im Mittel größeren Entfernung zur Zielstation länger als die Übermittlung von Segmenten einer Station in der Mitte des Systems.

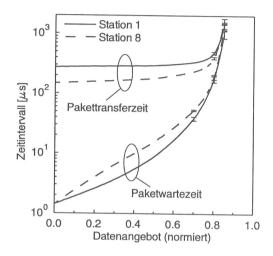


Bild 2.13: Mittlere Warte- und Transferzeit von Paketen in Abhängigkeit des normierten Datenangebotes

Das gleiche Verhalten ergibt sich auch für die mittleren Warte- und Transferzeiten ganzer Pakete. Für die Ergebnisse in Bild 2.13 wurde dazu die Verteilung der Paketlänge (Mittelwert 1024 Bit) gemäß einer Messung des Verkehrsprofiles in einem Lokalen Netz [111] gewählt. Da bei den meisten Paketlängen der letzte zur Paketübertragung benötigte Zeitschlitz nur teilweise genützt werden kann (siehe Bild 2.8), wird die Grenze der Systemauslastung hier für ein geringeres Datenangebot erreicht als im oben beschriebenen Fall.

Neben dem gezeigten prinzipiellen Verhalten werden in zahlreichen Veröffentlichungen der Einfluß weiterer Größen auf das Verhalten des DQDB-Protokolls untersucht sowie weitere Charakteristika beschrieben [8, 46, 100, 113, 125, 137, 138, 140, 158].

# 2.2.4 Erweiterungsvorschläge

# 2.2.4.1 "Bandwidth Balancing"-Mechanismus

Das DQDB-Protokoll weist bei Überlast, d.h. wenn die Auslastungsgrenze des Systems überschritten ist, ein nicht vorhersehbares Verhalten auf [9, 98, 152]. Dabei wird die verfügbare Übertragungskapazität des Systems nicht gleichmäßig auf die sendebereiten Stationen aufgeteilt. Ein Mechanismus, der die gerechte Aufteilung der Übertragungskapazität gewährleisten soll, ist der sogenannte "Bandwidth-Balancing" (BWB)-Mechanismus [68]. Seine Anwendung wird im DQDB-Standard ab einer gewissen Länge des Mediums, abhängig von der Übertragungsrate, empfohlen.

Für den BWB-Mechanismus benötigt jede Station einen zusätzlichen Zähler pro Bus. Überträgt die Station ein Datensegment, wird der entsprechende Zähler inkrementiert. Erreicht sein Zählerstand eine für alle Stationen vereinbarte gleiche obere Schranke, so wird er auf den Wert Null zurückgesetzt, und die entsprechenden Request- bzw. Countdown-Zähler der Station werden inkrementiert. Das hat zur Folge, daß die Station einen ihr nach dem DQ-Protokoll zustehenden Zeitschlitz nicht benutzt. Eine Station verzichtet also zugunsten der folgenden Stationen auf einen Teil der ihr zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität. Da jede Station, auch die Station am jeweiligen Busende, den BWB-Mechanismus verwendet, wird durch dieses Verfahren ein Teil der Übertragungskapazität verschwendet.

Eine gerechte Aufteilung der Übertragungskapazität wird nicht sofort nach dem Überschreiten der Auslastungsgrenze erzielt, sondern erst nach einer Übergangszeit, deren Dauer von der vereinbarten oberen Schranke abhängt [45]. Bei kurzzeitiger Überlast ist es daher möglich, daß der Mechanismus nicht wirksam wird [8]. Neben der Dauer der Übergangszeit kann der Anteil einer Station an der gesamten Übertragungskapazität durch die Wahl der oberen Schranke individuell für jede Station [42, 136, 142, 145] oder sogar für jede Kommunikationsbeziehung [141] angepaßt werden. Damit kann z.B. die Zuteilung von Übertragungskapazität beim verbindungsorientierten Datendienst (Abschnitt 2.2.2.4) unterstützt werden.

Ein weiteres Problem ist die Unwirksamkeit des BWB-Verfahrens bei der Verwendung mehrerer Prioritätsklassen des DQ-Protokolls [16, 69, 142]. Im Standard wird daher nur die Verwendung der niedrigsten Prioritätsklasse in Kombination mit dem BWB-Verfahren zugelassen. Vorschläge zur Eliminierung dieses Problems und andere Verbesserungsmöglichkeiten sind Gegenstand weiterer Veröffentlichungen [56, 69, 101, 120, 160].

# 2.2.4.2 Mehrfachausnutzung von Zeitschlitzen

Die prinzipielle Idee dieses Erweiterungsvorschlages ist eine Erhöhung der Übertragungskapazität durch die mehrfache Benutzung von Zeitschlitzen auf ihrem Weg vom Rahmengenerator zum jeweiligen Busabschluß. Bestimmte Stationen müssen dazu die Fähigkeit besitzen, Zeitschlitze, die bereits von der Empfängerstation gelesen wurden, freizuschalten und somit für die folgenden Stationen wieder für die Datenübertragung zur Verfügung zu stellen. Die Ankopplung dieser Stationen an das Medium muß dazu in aktiver Technik ausgeführt werden, da Daten aus den bereits empfangenen Zeitschlitzen zu löschen sind. Ob ein Zeitschlitz bereits von der Empfängerstation gelesen wurde, wird durch das PSR-Bit im ACF-Feld (siehe Bild 2.7) eines Zeitschlitzes gekennzeichnet. Zusätzlich sind Erweiterungen für die korrekte Funktion des DQ-Protokolls notwendig [62, 99, 127, 157, 159]. Durch eine günstige Wahl der Position dieser speziellen Stationen kann die Erhöhung der Übertragungskapazität optimiert werden [62, 132].

# 2.3 Breitband-ISDN

# 2.3.1 Anforderungen und Konzepte

Eine treibende Kraft für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Richtung eines universellen integrierten Breitband-Kommunikationsnetzes ist der steigende Kommunikationsbedarf für höhere Bitraten. Ferner ermöglicht der Einsatz neuer Technologien die Entwicklung von Übertragungssystemen, die über große Entfernungen hohe Übertragungskapazitäten zur Verfügung stellen. Um den daraus resultierenden Anforderungen auch im Weitverkehrsbereich Rechnung zu tragen, werden die grundlegenden Prinzipien des Schmalband-ISDN [15], das zur Zeit flächendeckend in zahlreichen Ländern eingeführt wird, unverändert für das künftige Breitband-(B)-ISDN übernommen. In erster Linie zählt dazu das Prinzip der Integration eines weiten Spektrums sehr unterschiedlicher Dienste für die Nutzung über wenige einheitliche Schnittstellen und Verbindungskonzepte. Anfängliche Ansätze, die auf einem kanalorientierten Netzkonzept basierten, schienen nicht flexibel genug, um auch den ungewissen Anforderungen zukünftiger Dienste gerecht zu werden. Daher wurde bei der internationalen Normung durch CCITT ein paketorientiertes Konzept, der Asynchrone Transfer-Modus (ATM), grundsätzlich als Ziellösung für das B-ISDN in der Empfehlung I.121 [27] definiert.

#### 2.3.1.1 Breitbanddienste

Wie oben erwähnt, stellt das B-ISDN hinsichtlich der Grundprinzipien kein völlig neues Netz, sondern eine Weiterentwicklung des Schmalband-ISDN dar. Neben neuen Breitbanddiensten sollen daher auch die bekannten Dienste des Schmalband-ISDN unterstützt werden. Die neuen Aspekte des Dienstkonzepts für das B-ISDN sind in der CCITT-Empfehlung I.211 [28] enthalten.

Grundsätzlich werden die Dienste wie bisher in Übermittlungsdienste und Teledienste unterteilt. Die Vielzahl der Teledienste mit Breitbandanforderungen wird allgemein in zwei Klassen eingeteilt, die interaktiven Dienste und die Verteildienste. Die interaktiven Dienste werden weiter unterteilt in dialogorientierte Dienste wie z.B. die Videotelephonie, in nachrichtenorientierte Dienste wie z.B. Mail-Dienste für Bewegtbilder und in Dienste für den Zugriff auf gespeicherte Information wie z.B. Datenbankdienste für hochauflösende Graphiken. Die Verteildienste unterscheiden sich durch die Möglichkeit der Präsentationssteuerung durch den Benutzer. Eine individuelle Präsentationssteuerung erlaubt dem Benutzer, den Beginn sowie die Reihenfolge der angebotenen Informationseinheiten zu beeinflussen. Diese allgemeine Unterteilung der Dienste bezieht sich hauptsächlich auf die Symmetrie der Kommunikationsbeziehung.

Die Anforderungen an das Kommunikationsnetz lassen sich durch die Charakterisierung der Breitbanddienste aufgrund ihrer technischen Merkmale [7] wie z.B. die mittlere bzw. maximal benötigte Bitrate und die zulässige Bitfehlerwahrscheinlichkeit festlegen. Ebenso müssen neue Aspekte berücksichtigt werden, z.B. die Signalisierung bei den sogenannten "Multi-Media"-Diensten, die eine Mischung verschiedener Arten von Information (Sprache, Text, Bewegtbild, ...) beinhalten. Die Forderung nach Flexibilität des B-ISDN wird besonders durch den weiten Bereich der Bitratenanforderungen der Dienste von einigen kbit/s bis hin zu Bitraten größer 100 Mbit/s verdeutlicht.

#### 2.3.1.2 Grundlegende Charakteristika

Der in der Empfehlung I.121 [27] festgelegte Asynchrone Transfer-Modus als Übermittlungsverfahren für das künftige B-ISDN ist eine Kombination der asynchronen Zeitmultiplextechnik (ATD) mit dem Verfahren der verbindungsorientierten Paketvermittlung (siehe Abschnitt 2.1.3). Die Übermittlung der Information erfolgt dabei in kurzen Paketen konstanter Länge, sogenannten Zellen, die jeweils aus einem Informationsfeld und einem Kopffeld bestehen. Die Zellen können dabei asynchron, also entsprechend dem tatsächlichen Bedarf, übermittelt werden. Während das Kopffeld die Zuordnung einer Zelle zu einer virtuellen Verbindung enthält, wird der Informationsteil unverändert durch das Netz

transportiert. Die jeweiligen Werte für das Kopffeld auf den einzelnen Verbindungsabschnitten werden beim Verbindungsaufbau festgelegt und beim Verbindungsabbau wieder freigegeben. Das ATM-Verfahren gewährleistet die korrekte Einhaltung der Reihenfolge der Zellen einer Verbindung durch das Netz, jedoch können durch Überlastsituationen und Fehlfunktionen Zellen verloren gehen.

Obwohl ATM ein verbindungsorientiertes Verfahren ist, soll auch die verbindungslose Datenkommunikation, die vor allem bei LANs angewendet wird, unterstützt werden. Die Möglichkeiten der Unterstützung dieser Klasse von Kommunikationsdiensten werden ausführlich in Abschnitt 2.4.2 diskutiert.

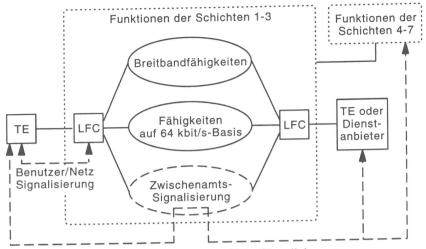
Die Signalisierinformation wird, getrennt von der Nutzinformation, über separate virtuelle Verbindungen transportiert. Durch diese logische Trennung wird die Signalisierung während der aktiven Phase einer Verbindung vereinfacht.

## 2.3.2 Architektur des Breitband-ISDN

#### 2.3.2.1 Architekturmodell

In Anlehnung an das Basisarchitekturmodell des Schmalband-ISDN wurden in der Empfehlung I.327 [30] die Übermittlungs- und Signalisierfähigkeiten für das B-ISDN allgemein festgelegt. Die grundlegende Komponente eines B-ISDN ist, wie in Bild 2.12 dargestellt, ein Netz für den Transport von Zellen zwischen den einzelnen Benutzern. Sie enthält lokale Funktionseinheiten (Local Functional Capabilities, LFCs), die z.B. Funktionen zur Benutzer/Netz-Signalisierung umfassen. Die Hauptfunktionen sind durch Funktionseinheiten zur Zwischenamts-Signalisierung, zur schmalbandigen (auf der Basis von 64 Kbit/s) und zur breitbandigen Informationsübermittlung gekennzeichnet. Diese Funktionseinheiten beinhalten den OSI-Schichten 1 bis 3 zuzuordnende Funktionen, die den Informationsaustausch zwischen Endsystemen (Terminal Equipment, TE) oder zwischen Endsystemen und speziellen Dienstanbietern ermöglichen.

Zusätzliche Funktionseinheiten, die Möglichkeiten zur Informationsbearbeitung oder zur Protokollumsetzung bereitstellen, sollen in den Schichten 4 bis 7 enthalten sein. Auf diese Funktionen kann mit Hilfe der Benutzer-zu-Benutzer Signalisierung zugegriffen werden. Die dabei verwendete Art der Signalisierinformation wird transparent durch das Netz übermittelt.



Benutzer/Benutzer oder Benutzer/Netz Signalisierung

Bild 2.12: Basisarchitekturmodell des B-ISDN

## 2.3.2.2 Bezugskonfiguration

Zur Definition von einheitlichen Schnittstellen zwischen verschiedenen Netzeinheiten und zur Festlegung ihrer Funktionalität wird die sogenannte Bezugskonfiguration (Reference Configuration) verwendet. Die Empfehlung I.413 [36] legt die Bezugskonfiguration für die Benutzer/Netzschnittstelle (User-Network Interface, UNI) des B-ISDN, wie in Bild 2.13 dargestellt, fest. Abgeleitet von der Bezugskonfiguration des Schmalband-ISDN wird die Benutzer/Netzschnittstelle an den Bezugspunkten S<sub>B</sub> und T<sub>B</sub> bezüglich ihrer logischen und physikalischen Eigenschaften definiert.

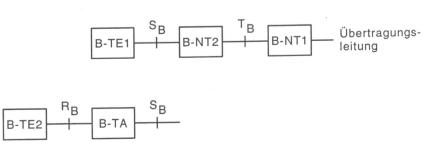


Bild 2.13: Bezugskonfiguration der Benutzer/Netzschnittstelle des B-ISDN

Endsysteme des Typs 1 (B-TE1, Broadband Terminal Equipment) entsprechen den Spezifikationen der Benutzer/Netzschnittstelle des B-ISDN und können deshalb direkt an das B-ISDN angeschlossen werden. Für Endsysteme mit anderen Schnittstellen (B-TE2, TE2) müssen Funktionen zur Anpassung der am Bezugspunkt  $\rm R_{\rm B}$  vorliegenden verschiedenen Schnittstellen in einer Anpassungseinheit (Broadband Terminal Adaptor, B-TA) bereitgestellt werden.

Die Bearbeitung von Funktionen der OSI-Schichten 1 bis 3 übernimmt der Netzabschluß (B-NT2, Broadband Network Termination). Der Umfang der Funktionen des B-NT2 ist äußerst verschieden. Die weitgehende Übereinstimmung der Schnittstellen an den Bezugspunkten S<sub>B</sub> und T<sub>B</sub> ermöglicht z.B. den direkten Anschluß des Endssystems an die Funktionseinheit B-NT1, d.h. die Funktionen des B-NT2 werden nicht benötigt. Im anderen Extrem kann der B-NT2 Konzentrations-, Multiplex-, Signalisier- und auch Vermittlungsfunktionen enthalten, falls er z.B. in Form einer privaten Nebenstellenanlage implementiert wird. Prinzipiell kann die Funktionseinheit B-NT2 physikalisch sowohl als zentralisiertes System als auch verteilt realisiert werden. In der Empfehlung I.413 sind außerdem neue physikalische Konfigurationen z.B. mit einem gemeinsamen Medium als Teilnehmerzugangsnetz für das B-ISDN enthalten. Der Zugriff auf das Medium soll durch das "Generic Flow Control" (GFC)-Protokoll gesteuert werden [70]. Gegenwärtig ist das GFC-Protokoll noch nicht vollständig festgelegt. Die bisherigen Vorschläge [151] basieren auf den Medienzugriffsprotokollen der MANs ORWELL und DQDB.

Zwischen dem Bezugspunkt  $T_B$  und der Übertragungsleitung liegen die Funktionen des B-NT1. Sie umfassen die Funktionen der OSI-Schicht 1 für den ordnungsgemäßen physikalischen, d.h. elektrischen bzw. optischen Abschluß des Netzes.

## 2.3.3 Protokollmodell

Zur systematischen Gliederung der Aufgaben des B-ISDN wird logisch das gleiche hierarchische Schichtungsprinzip wie beim OSI-Referenzmodell angewendet. In der Empfehlung I.321 [29] ist das Protokollmodell für das B-ISDN auf der Basis von ATM (siehe Bild 2.14) festgelegt. Analog den Spezifikationen für das Schmalband-ISDN ist das B-ISDN Protokollmodell in mehrere getrennte Ebenen unterteilt: die Benutzerebene enthält die Funktionen zur Übermittlung von Nutzinformation, die Steuerungsebene ist zuständig für die Signalisierung und die Managementebene stellt die Funktionen für das Schichten- und Ebenenmanagement bereit.

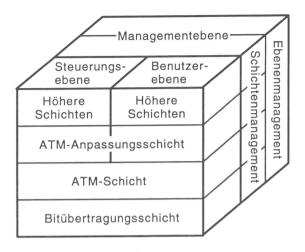


Bild 2.14: Protokollmodell für das B-ISDN auf der Basis von ATM

In den folgenden Abschnitten werden die Festlegungen für die unteren drei Schichten des B-ISDN Protokollmodells ausführlicher beschrieben.

## 2.3.3.1 Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht ist, wie in der Empfehlung I.432 [37] genauer spezifiziert, weiter in eine vom Medium abhängige Teilschicht (Physical Medium Sublayer, PM) und in eine Teilschicht zur Umsetzung des Zellstroms in für das gewählte Übertragungssystem geeignete Dateneinheiten (Transmission Convergence Sublayer, TC) unterteilt.

Die Festlegungen für die PM-Teilschicht umfassen die physikalischen Eigenschaften des Übertragungsmediums, die elektrisch/optische Umwandlung, den Leitungskode und die Mechanismen zur Bitsvnchronisation.

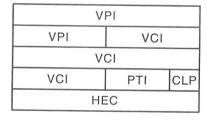
Die Funktionen der TC-Teilschicht sind zum Teil am verwendeten Übertragungssystem orientiert, für das zwei Optionen vorgesehen sind. Bei einer Variante werden die Zellen als Nutzinformation in einem Übertragungsrahmen der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH) [26] transportiert. Dabei muß der Zellstrom an die SDH-Rahmen angepaßt werden. Die andere Variante basiert auf einem reinen ATM-Zellstrom, wobei keine Anpassungsfunktionen notwendig sind. Unabhängig vom verwendeten Übertragungssystem werden Funktionen zur Erkennung der Zellgrenzen (Cell Delineation) und zur Fehlersicherung des Kopffeldes (Header Error Control) einer ATM-Zelle in der TC-Teilschicht ausgeführt. Die

Entkopplung der Rate des Zellstromes der ATM-Schicht von der Bitrate des Übertragungssystems durch das Einfügen bzw. Entfernen von Leerzellen (Idle Cells) ist eine weitere Aufgabe der TC-Teilschicht.

## 2.3.3.2 ATM-Schicht

Die Protokolldateneinheiten der ATM-Schicht [31] sind vollständige ATM-Zellen, die zwischen den vom Übertragungssystem unabhängigen ATM-Instanzen ausgetauscht werden. Generell besteht eine ATM-Zelle aus einem Informationsfeld mit 48 Oktetts und einem Kopffeld mit 5 Oktetts. Eine Hauptfunktion der ATM-Schicht ist das Erzeugen und Entfernen des Kopffeldes. Beim Empfang des Informationsfeldes von der Anpassungsschicht wird der entsprechende Zellkopf erzeugt und hinzugefügt. Vor der Übergabe an die Anpassungsschicht wird das Kopffeld wieder entfernt. Dabei beziehen sich die ausgeführten Funktionen auf die einzelnen Teilfelder des Zellkopfes mit Ausnahme des Teilfeldes zur Fehlersicherung (HEC). Das Format des Kopffeldes einer Zelle an der Benutzer/Netzschnittstelle (UNI) und an netzinternen Schnittstellen (Network-Network Interface, NNI) ist in Bild 2.15 dargestellt.

GFC	VPI			
VPI	VCI			
VCI				
VCI	PTI	CLP		
HEC				



Kopffeld am UNI

Kopffeld am NNI

Bild 2.15: Struktur des Kopffeldes einer ATM-Zelle

Die Struktur des Kopffeldes an den beiden Schnittstellen unterscheidet sich durch ein am UNI vorhandenes GFC-Feld, das von dem in Abschnitt 2.3.2.2 erwähnten GFC-Protokoll zur Steuerung des Zugriffs auf ein gemeinsames Medium im Teilnehmeranschlußbereich benutzt wird. Die Abwicklung des GFC-Protokolles ist eine weitere Aufgabe der ATM-Schicht. An den Schnittstellen innerhalb des Netzes wird dieser Mechanismus nicht benötigt und das GFC-Feld zur Erweiterung des Adreßfeldes verwendet. Das Adreßfeld besteht aus einer Kennung für den virtuellen Kanal (Virtual Channel Identifier, VCI) und einer Kennung für den virtuellen Pfad (Virtual Path Identifier, VPI), auf deren Basis eine Zelle

einer virtuellen Verbindung zugeordnet wird. Durch diese Unterteilung des Adreßfeldes können zwei logische Ebenen des Zellentransports unterschieden werden: die Ebene der virtuellen Kanäle und die Ebene der virtuellen Pfade.

Als virtueller Kanal wird allgemein eine Verkettung von Übermittlungsabschnitten für den unidirektionalen Transport von Zellen einer Kommunikationsbeziehung bezeichnet. An den Endpunkten eines Übermittlungsabschnittes eines virtuellen Kanals wird der VCI in der dortigen Vermittlungsstelle auf den für den nächsten Abschnitt zugeordneten VCI umgesetzt. Der VCI der Zellen einer virtuellen Verbindung auf dem jeweiligen Übermittlungsabschnitt wird beim Verbindungsaufbau festgelegt.

Ein virtueller Pfad ist die logische Zusammenfassung mehrerer virtueller Kanäle. Die zugehörigen Zellen werden entlang dem virtuellen Pfad als einheitlicher Zellstrom behandelt [2]. Diese logische Gruppierung mehrerer virtueller Kanäle zu einem virtuellen Pfad erlaubt die Vereinfachung reiner Durchgangsvermittlungsstellen zu sogenannten ATM Cross Connects, welche nur Vermittlungsfunktionen auf der Basis der virtuellen Pfade ausführen. Mit diesem zweistufigen Konzept vereinfacht sich ebenso der Aufbau logisch getrennter Netze z.B. für den privaten Bereich oder zur Kopplung von LANs. Der VPI bezeichnet einen Übermittlungsabschnitt eines virtuellen Pfades. Die Umsetzung des VPI an den Endpunkten eines Übermittlungsabschnittes eines virtuellen Pfades sowie die oben beschriebene Umsetzung der VCIs ist auch eine Aufgabe der ATM-Schicht.

Neben den oben beschriebenen Funktionen überlagert die ATM-Schicht der Sendeseite die Zellströme von verschiedenen Verbindungen zu einem Zellstrom. Umgekehrt ist sie auf der Empfängerseite für das Aufspalten des Zellstromes in die einzelnen Zellströme verantwortlich. Dieser Vorgang wird anhand der in der jeweiligen Zelle enthaltenen Art der Nutzinformation vorgenommen. Dazu wird neben dem Adreßfeld das Payload-Type (PT) Feld ausgewertet.

Zusätzlich enthält das Kopffeld ein Prioritätsbit (Cell Loss Priority, CLP), das sowohl vom Benutzer als auch vom Netzbetreiber verwendet werden kann, um Zellen zu kennzeichnen, die im Netz zur Auflösung von Hochlastsituationen aus dem Zellstrom entfernt und verworfen werden dürfen.

## 2.3.3.3 ATM-Anpassungsschicht

Die ATM-Anpassungsschicht (ATM Adaptation Layer, AAL) hat die prinzipielle Aufgabe, die höheren Schichten von den spezifischen Eigenschaften der ATM-Schicht zu isolieren. Die Funktionalität innerhalb der ATM-Anpassungsschicht wird durch die Anforderungen der höheren Schichten bestimmt. Abhängig vom zu erbringenden Dienst werden mehrere

Protokolle unterstützt. Zur Beschränkung der Anzahl der Protokolle sind in der Empfehlung I.362 [32] vier zu unterstützende Dienstklassen, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, festgelegt.

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
Feste Taktbeziehung zwischen Quelle und Senke	besteht		besteht nicht	
Bitrate	konstant	variabel		
Verbindungsart	verbindungsorientiert			verbindungslos

Tabelle 2.1: Dienstklassen für die AAL-Schicht

Durch die Klasse A werden Dienste repräsentiert, die einen kontinuierlichen digitalen Datenfluß für den Informationsaustausch benötigen, wie z.B. der Transport von 64 kbit/s PCM-kodierter Sprache. Die Dienste der Klasse B unterscheiden sich davon nur durch eine zeitlich veränderliche Bitrate, die beispielsweise bei einigen Verfahren der Kodierung von Videosignalen [47] erzeugt wird. Verbindungsorientierte Datendienste werden der Dienstklasse C zugeordnet. Sie basieren z.B. auf Protokollen wie X.25 [40] oder LAP D [38] für den Transport von Nutz- bzw. Signalisierinformation. Weitere Funktionen auch höherer Schichten zur Unterstützung verbindungsorientierter Datendienste werden z.B. im Zusammenhang mit dem Frame-Relaying-Übermittlungsdienst [129] vorgeschlagen. Die Dienste zur verbindungslosen Datenkommunikation werden durch die Klasse D berücksichtigt. Sie sollen Schnittstellen z.B. zu dem bei LANs und MANs verwendeten LLC-Protokoll der Sicherungsschicht [80] bereitstellen. Vorschläge für diese verbindungslosen Übermittlungsdienste sind der Switched Multi-Megabit Data Service (SMDS) [73] sowie das europäische Pendant, der Connectionless Broadband Data Service (CBDS) [44]. Beide Vorschläge basieren auf der im DQDB-Standard festgelegten Funktionalität und legen z.T. auch Funktionen höherer Schichten fest.

Zur Unterstützung der vier Dienstklassen sind in der Empfehlung I.363 [33] verschiedene Protokolltypen spezifiziert. Von der Funktionalität her wird die ATM-Anpassungsschicht, wie in Bild 2.16 dargestellt, weiter in eine Konvergenz- und SAR-Teilschicht (Segmentation and Reassembly, SAR) unterteilt.

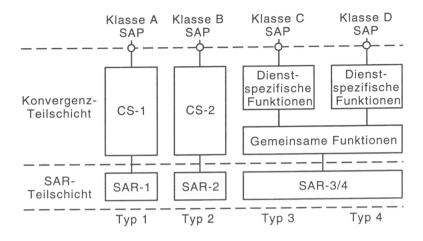


Bild 2.16: Protokollarchitektur der AAL-Schicht

Die SAR-Teilschicht enthält die für alle vier spezifizierten Typen der Anpassungsschicht ähnlichen Funktionen zur Anpassung der Dienstdateneinheiten an das Format einer ATM-Zelle. Diese Dateneinheiten, die mit den höheren Schichten ausgetauscht werden, können je nach Anwendung eine variable Länge aufweisen. Ferner sichert sie die Protokollsteuerinformation der AAL-Schicht gegen Fehler.

Die Konvergenz-Teilschicht (CS) enthält weitere anwendungsspezifische Anpassungsfunktionen. Die Funktionen der Teilschicht CS des AAL-Typs 1 sind folgend aufgeführt:

- Behandlung von Zellverlusten oder fehlgeleiteten Zellen
- Behandlung von Bitfehlern im Informationsfeld einer Zelle
- Ausgleich von Laufzeitschwankungen zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Verkehrsflusses
- Rückgewinnung des Sendetaktes beim Empfänger

Für die Konvergenz-Teilschicht des AAL-Typs 2 sind die Funktionen noch nicht endgültig festgelegt, jedoch stimmen die Vorschläge mit den oben aufgeführten Funktionen des AAL-Typs 1 prinzipiell überein. Die gemeinsamen Funktionen der Teilschicht CS der AAL-Typen 3 und 4 basieren auf den in Abschnitt 2.2.2.4 beschriebenen Funktionen der MCF-Anpassungseinheit des DQDB-Standards. Durch diese Vereinheitlichung der Protokolle auf der ATM-Anpassungsschicht und der entsprechenden Instanz der DQDB-Schicht wird die Zusammenarbeit der beiden Netztypen wesentlich vereinfacht. Für die Unterstüt-

zung eines verbindungslosen Datendienstes der Klasse D müssen daher keine weiteren dienstspezifischen Funktionen vorgesehen werden. Die dienstspezifischen Funktionen zur Unterstützung von Datendiensten der Klasse C, wie beispielsweise die Behandlung von Fehlern in Protokolldateneinheiten, sind noch nicht vollständig festgelegt. Gegenwärtig werden, speziell für Datendienste, Vorschläge für einen weiteren AAL-Typ diskutiert [41]. Für diesen AAL-Typ 5 wird eine gegenüber den Typen 3 und 4 reduzierte Funktionalität vorgeschlagen. Damit soll ein hoher Datendurchsatz und einfache Realisierbarkeit erzielt werden.

## 2.3.4 Verkehrssteuerung

Im Betrieb eines ATM-Netzes kann durch die Anwendung des ATD-Verfahrens prinzipiell Übertragungskapazität im Vergleich zu den Kanalmultiplexverfahren eingespart werden. Die Zellströme verschiedener Verbindungen mit z.T. variablem Bitratenbedarf werden dabei auf einem Übertragungskanal überlagert, was eine Ausmittlung der Bitratenschwankungen (statistisches Multiplexen) bewirkt. Dadurch können sich jedoch die Zellströme bestehender Verbindungen auch gegenseitig beeinflussen. Die Sicherung einer bestimmten Netzgüte für alle Verbindungen soll mit Hilfe der Verfahren zur Verkehrssteuerung erzielt werden. Die Netzgüte ist dabei als die von der ATM-Schicht bereitgestellte Güte des Informationstransfers definiert und umfaßt Parameter wie z.B. die Zellverlustwahrscheinlichkeit, die mittlere Transferzeit von Zellen, die Toleranz der Abweichungen von der mittleren Transferzeit usw. Generell müssen auch Überlastsituationen im Netz vermieden werden, um die geforderte Netzgüte einzuhalten. Reaktive Verfahren zur Behebung von Überlastsituationen können aufgrund der erforderlichen hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten in den Netzkomponenten nicht eingesetzt werden. Die Funktionalität der Verfahren zur Verkehrssteuerung und zur Vermeidung von Überlastsituationen ist in der Empfehlung I.327 festgelegt [30].

# 2.3.4.1 Verbindungsannahme

Über die Annahme oder Ablehnung einer neuen Verbindung wird aufgrund ihrer vorgegebenen Verkehrsparameter entschieden. Die Entscheidung basiert auf der Einhaltung der geforderten Netzgüte für alle bestehenden und die neue Verbindung. Als Verkehrsparameter werden beispielsweise die maximale Bitrate, die mittlere Bitrate, die Dauer der Aktivitätsphase (siehe Abschnitt 5.1.2) an die Verbindungsannahmesteuerung (Connection Admission Control, CAC) übergeben. Dabei kann auch über die Parameter neu verhandelt werden, falls die ursprünglichen Parameter nicht akzeptiert werden können oder sich die

Parameter einer bestehenden Verbindung verändern, wie z.B. beim Wunsch nach zusätzlichen Dienstmerkmalen. Die Zuteilung der Betriebsmittel kann grundsätzlich nach zwei unterschiedlichen Verfahren vorgenommen werden: Einer akzeptierten Verbindung wird die maximal benötigte Bitrate wie bei durchschaltevermittelnden Netzen zugeteilt oder es wird versucht, den Gewinn, der durch statistisches Multiplexen erzielt werden kann, auszunutzen. Die Konzepte und Methoden der Zuteilung von Bitrate an einzelne Verbindungen [75] spielen bei Verwendung des zweiten Prinzips eine wichtige Rolle.

Zur Zuteilung zusätzlicher Betriebsmittel wie z.B. Pufferspeicher oder Übertragungskapazität während einer Verbindung nach Anfrage durch den Benutzer wird in der Empfehlung I.371 [35] allgemein eine schnell reagierende Betriebsmittelverwaltung (Fast Resource Management) beschrieben. Konkrete Protokollvorschläge, wie z.B. schnelle Reservierungsprotokolle zur Zuteilung von Bitrate (Fast Reservation Protocol, FRP) [19], sind z.Z. in der Diskussion.

Während des Verbindungsaufbaus erfolgt auch die Suche nach einem Weg für die Zellen der neu angeforderten Verbindung durch das Netz (Routing). Generell besteht dabei die Möglichkeit, den Wegesuchalgorithmus durch von der Verbindungsannahmesteuerung ermittelte Kriterien so zu beeinflussen, daß der Multiplexgewinn maximiert werden kann.

### 2.3.4.2 Quellflußkontrolle

Während einer Verbindung müssen die zwischen Verbindungsannahmesteuerung und Benutzer ausgehandelten Verkehrsparameter eingehalten werden, um die geforderte Netzgüte für alle bestehenden Verbindungen garantieren zu können. Prinzipiell könnte ein Endgerät, z.B. aufgrund einer Fehlfunktion, die vereinbarten Parameter überschreiten. Die Aufgabe der Quellflußkontrolle liegt nun darin, Abweichungen von den vorgegebenen Werten möglichst schnell zu erkennen und bei Parameterverletzungen geeignete Maßnahmen zu ergreifen, wie z.B.:

- Das Verwerfen von Zellen, d.h. die Zellen, die eine Verletzung der vereinbarten Parameter verursachen, werden aus dem Zellstrom entfernt.
- Das Markieren von Zellen, bei denen eine Abweichung erkannt wurde. Diese Zellen haben eine niedrigere Priorität und können bei Bedarf innerhalb des Netzes verworfen werden (siehe Abschnitt 2.3.4.3).
- Die Verzögerung von Zellen, womit z.B. ein Zellabstand entsprechend der vereinbarten maximal benötigten Bitrate wieder hergestellt werden kann.

- Das Informieren der Verbindungssteuerung, die dann z.B. die Verbindung abbrechen kann.

Da das Netz gegen das Fehlverhalten eines Endgerätes oder Benutzers geschützt werden soll, untersteht die Quellflußkontrolle ausschließlich dem Netzbetreiber. Ferner muß der Einfluß der Quellflußkontrolle auf Zellströme von Verbindungen, die sich an die vereinbarten Parameter halten, minimiert werden. Neben diesen Anforderungen muß ein einfach zu implementierender Mechanismus gewählt werden, da eine Vielzahl einzelner Verbindungen am Netzzugang überwacht werden muß. Gegenwärtig existieren verschiedene Vorschläge für Quellflußkontrollverfahren, die jedoch hinsichtlich ihrer Effektivität stark von der Charakteristik des überwachten Zellstromes abhängen [130]. Um diese Abhängigkeit zu verringern, wird in der Empfehlung I.371 optional die geeignete Formung des Zellstromes (Traffic Shaping, siehe auch [131]) in Kombination mit der Quellflußkontrolle vorgeschlagen.

## 2.3.4.3 Zellverlustkontrolle

Die zu erwartenden Dienste im künftigen B-ISDN stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Netzgüte, besonders hinsichtlich der Zellverlustwahrscheinlichkeiten. Grundsätzlich können diese Anforderungen mit einem oder mehreren Übermittlungsdiensten erfüllt werden. Bei der Einrichtung nur eines Übermittlungsdienstes müssen die Anforderungen des anspruchsvollsten Dienstes erfüllt werden. Die geforderte hohe Netzgüte dieses einen Übermittlungsdienstes kann nur durch eine niedrige Netzauslastung und die Bereitstellung großer Pufferkapazitäten im Netz erreicht werden. Die Einrichtung mehrerer Übermittlungsdienste mit verschiedenen Zellverlustwahrscheinlichkeiten hingegen ermöglicht die Anpassung der Netzgüte an die einzelnen Dienste, wobei das Netz höher ausgelastet werden kann und zudem nur kleine Pufferkapazitäten benötigt werden. Jedoch sind unterschiedliche Pufferzugangsmechanismen für die Zellen der verschiedenen Übermittlungsdienste erforderlich. Die Unterscheidung der Zellen erfolgt durch die Vergabe sogenannter Verlustprioritäten, wobei entweder jede Zelle einzeln oder alle Zellen einer Verbindung gekennzeichnet werden. Zur Markierung kann prinzipiell das Prioritätsbit im Zellkopf oder zur Markierung aller Zellen einer Verbindung auch das Adreßfeld verwendet werden. Werden mehrere Übermittlungsdienste eingerichtet, ist der Benutzer für die Vergabe der Verlustprioritäten je nach gewünschter Netzgüte zuständig.

Die Verlustprioritäten können auch von der Quellflußkontrolle, wie oben beschrieben, zur Markierung von Zellen verwendet werden, die die vorgegebenen Verkehrsparameter nicht einhalten. Ein weiterer Anwendungsfall für die Vergabe von Verlustprioritäten ist die Unterstützung eines verbindungslosen Dienstes innerhalb des ATM-Netzes. Eine Netzkoppel-

einheit z.B. kann dabei markierte, d.h. niederprioritäre Zellen ins ATM-Netz übertragen, ohne vorher Netzressourcen zu reservieren. Diese Anwendung wird noch ausführlich in Kapitel 4 diskutiert.

Generell können Zellen der niedrigen Priorität bei Bedarf innerhalb des Netzes verworfen oder verzögert werden. Dazu ist ein zusätzlicher Aufwand in der Steuerungslogik der Pufferspeicher im Netz erforderlich. Verschiedene Verfahren, wie z.B. Verdrängungsverfahren und Schwellwertverfahren, werden z.Z. hinsichtlich ihrer Eignung untersucht [105].

## 2.4 Evolution zum B-ISDN

### 2.4.1 Merkmale

Die hohen Investitionen in die Entwicklung des B-ISDN erfordern eine äußerst sorgfältig geplante Einführung dieses zukünftigen ATM-Netzes. Besonders die Zusammenarbeit mit bzw. die Integration der bereits existierenden Netze und Dienste muß gewährleistet werden. Ebenso muß nach neuen Anwendungen Ausschau gehalten werden, um die Fähigkeiten des B-ISDN unter Beweis zu stellen und damit auch die Akzeptanz des neuen Netzes zu verbessern. Eine erste neue Anwendung ergibt sich in diesem Zusammenhang aus dem Wunsch nach schneller Datenkommunikation zwischen einer Vielzahl im Teilnehmerbereich installierter LANs über große Entfernungen [17, 59]. Diese Aufgabe wird kurzfristig von MANs sowohl im öffentlichen als auch im privaten Bereich übernommen. Nach und nach sollen dann diese MANs über das B-ISDN vernetzt oder durch das B-ISDN ersetzt werden. Geeignete Kopplungsmöglichkeiten zwischen LANs bzw. MANs und dem künftigen B-ISDN müssen daher zumindest für eine Übergangszeit entwickelt werden.

Ein grundsätzliches Problem der Kopplung von LANs bzw. MANs und dem B-ISDN sind die unterschiedlichen Übermittlungsprinzipien dieser beiden Netztypen: LANs und MANs stellen dazu verbindungslose Dienste bereit, ein B-ISDN auf der Basis von ATM arbeitet im Gegensatz dazu verbindungsorientiert. Um seine universelle Verwendbarkeit nicht einzuschränken, sollten verbindungslose Dienste durch das B-ISDN zumindest unterstützt werden.

# 2.4.2 Unterstützung verbindungsloser Dienste im B-ISDN

Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten, verbindungslose Dienste im B-ISDN zu unterstützen [90, 28]:

- Bei der sogenannten indirekten Lösung wird der verbindungsorientierte Dienst der ATM-Schicht benutzt, um Daten zwischen den jeweiligen Benutzer/Netzschnittstellen transparent durch das B-ISDN zu transportieren. Darauf aufbauend werden die verbindungslosen Dienste durch entsprechende Protokolle und Instanzen au-Berhalb des B-ISDN implementiert. Die zusätzlich benötigte Funktionalität wird dabei entweder von den Dienstnutzern selbst oder durch spezielle Dienstanbieter erbracht.
- Als direkte Lösung wird die Bereitstellung eines verbindungslosen Dienstes durch das B-ISDN bezeichnet. Die für die verbindungslosen Dienste notwendigen Funktionen (Connectionless Service Functions, CLSF) werden in sogenannten CL-Servern (Abschnitt 2.4.2.2) innerhalb des B-ISDN implementiert.

Beide Lösungen schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern können auch kombiniert werden. Die entsprechenden funktionalen Architekturen sind in der Empfehlung I.327 [30] beschrieben.

# 2.4.2.1 Verbindungsarten und -management

Generell müssen im B-ISDN zwischen den jeweiligen Dienstnutzern, wie z.B. Koppeleinheiten zu LANs/MANs, oder zwischen Dienstnutzern und Dienstanbietern Verbindungen auf der ATM-Schicht hergestellt werden. Für die Art und die Verwaltung dieser Verbindungen bestehen wiederum mehrere Möglichkeiten:

Eine Möglichkeit besteht darin, die Verbindungen permanent einzurichten, d.h. Betriebsmittel des B-ISDN werden dauernd für diese Verbindungen reserviert. Falls keine CL-Server oder externe Anbieter verbindungsloser Dienste benutzt werden oder vorhanden sind, müssen alle Dienstnutzer, die miteinander kommunizieren wollen, untereinander voll vermascht werden. Diese Lösung kann wegen der Anzahl einzurichtender Verbindungen nur als Zwischenlösung bei wenigen Nutzern dienen. Ferner wird die permanent bereitgestellte Übertragungskapazität aufgrund der Charakteristik verbindungslosen Datenverkehrs nicht effizient ausgenutzt. Eine effizientere Ausnutzung wird erzielt, falls nur ein kleiner Anteil der Übertragungskapazität permanent reserviert und zusätzliche Übertragungskapazität je nach Bedarf angefordert bzw. freigegeben wird. Verschiedene Verfahren zur Zuteilung von Übertragungskapazität werden ausführlich in Kapitel 4 beschrieben.

Eine andere Möglichkeit ist der Aufbau einer Verbindung pro Paket, das durch das ATM-Netz übermittelt werden soll. Der Aufbau einer Verbindung beim Beginn der verbindungslosen Datenkommunikation bringt jedoch eine Verzögerung mit sich, für deren Dauer die Daten zwischengespeichert werden müssen. Dadurch verlängern sich die gewöhnlich kurzen Pakettransferzeiten bei verbindungsloser Datenkommunikation in LANs/MANs erheblich. Der Abbau der Verbindung kann dabei sofort nach der Übertragung des Paketes erfolgen oder verzögert werden, wobei die Verbindung für folgende Pakete zum gleichen Empfänger mitbenutzt werden kann. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist auch die starke Belastung der Steuerung zur Verbindungsverwaltung durch den häufigen Verbindungsaufund abbau.

#### 2.4.2.2 CL-Server

Zur direkten Bereitstellung verbindungsloser Dienste, wie z.B. SMDS oder CBDS (siehe Abschnitt 2.3.3.3), sind spezielle CL-Server [52] im B-ISDN vorgesehen. In diesen Netzeinheiten werden die notwendigen Protokolle für die verbindungslose Datenkommunikation implementiert. Dabei müssen Funktionen zur Bearbeitung folgender Aufgaben bereitgestellt werden:

- Vermittlung der Dateneinheiten
- Zwischenspeicherung von Dateneinheiten
- Verwaltung der Verbindungen
- Verwaltung der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität
- Anpassung des Paketformats an das Format der zu übermittelnden Protokolldateneinheiten
- Behandlung von Überlastsituationen

Ein verbindungsloses Netzzugangsprotokolls (Connectionless Network Access Protocol, CLNAP) wird in der Empfehlung I.364 [34] beschrieben. Dieses Protokoll sowie andere Protokollvorschläge [58, 90] basieren auf den Diensten der ATM-Anpassungsschicht des Typs 3/4.

# Kapitel 3

# Netzkopplung

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Aspekte für die Kopplung von Kommunikationsnetzen in knapper Form beschrieben. Eine ausführlichere Darstellung [18] sowie die Vielzahl von Veröffentlichungen [13] weisen auf die Wichtigkeit dieser Thematik hin. Die Ausführungen hier beziehen sich größtenteils auf die Kopplung von Netzen mit unterschiedlichen Protokollarchitekturen und bilden die Grundlage für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten speziellen Fall der Kopplung des regionalen Hochgeschwindigkeitsnetzes DQDB mit dem zukünftigen B-ISDN.

# 3.1 Ziele

Aus dem steigenden Kommunikationsbedarf speziell von Datenverarbeitungsanlagen lassen sich viele Gründe und damit auch Ziele für die Kopplung von Kommunikationsnetzen ableiten. Bei lokalen Netzen z.B. ist meist die Anzahl der Stationen, die an ein Netzsegment oder Teilnetz angeschlossen werden dürfen, begrenzt. Eine Erhöhung der Anzahl angeschlossener Stationen ist nur durch die Installation zusätzlicher Netzsegmente möglich, die dann mit den bestehenden Netzsegmenten gekoppelt werden. Oft reicht auch die Verkehrsleistung eines Netzes bei einer großen Zahl angeschlossener Stationen nicht mehr aus. Zur Lösung dieses Problems kann das Gesamtnetz aufgespalten und durch mehrere gekoppelte Teilnetze ersetzt werden. Dabei erhöht sich, bei geeigneter Aufteilung, die Verkehrsleistung des Gesamtnetzes durch die Trennung von teilnetzinternem und -externem Verkehr. Die Aufspaltung in Teilnetze steigert auch die Verfügbarkeit des Netzes, da bei Ausfall eines Teilnetzes Stationen an anderen Teilnetzen nicht unmittelbar betroffen sind. Besonders bei lokalen Netzen mit einem gemeinsamen Medium erhöht sich dadurch auch die Datensicherheit, da die zu übermittelnden Daten nicht in jedem Teilnetz übertragen werden müssen.

Ein weiteres Ziel der Netzkopplung ist, die räumliche Ausdehnung des Versorgungsbereiches einer Netzinfrastruktur zu erweitern. Zur Überbrückung größerer Strecken ist dazu die Kopplung von LANs mit öffentlichen Weitverkehrsnetzen erforderlich.

# 3.2 Kopplungsarten

Die Darstellung der verschiedenen Arten der Netzkopplung basiert auf folgenden Voraussetzungen: Die Protokolle der zu koppelnden Netze sind gemäß dem OSI-Referenzmodell (Abschnitt 2.1.4) geschichtet, wobei von Schicht N an aufwärts in den Netzen identische Protokolle verwendet werden. In der Schicht N-1 unterscheiden sich die Protokolle in den Netzen.

Unter diesen Voraussetzungen ist die einfachste Art der Netzkopplung das transparente Durchreichen von Dienstprimitiven der Schicht N oder einer höheren Schicht. Da das Protokoll der gewählten Kopplungsschicht der Netze in der Koppeleinheit terminiert wird, geht seine Ende-zu-Ende-Beziehung verloren. Ferner ergibt sich mit dieser Lösung aufgrund der meist großen Anzahl zu durchlaufender Schichten eine lange Transferzeit der Daten durch die Koppeleinheit.

Bei einer weiteren Kopplungsart wird ein globales Protokoll verwendet, das auf der Schicht N-1 aufgesetzt wird. In der Netzkoppeleinheit werden die PDUs des globalen Protokolls einfach durchgereicht. Dabei bleibt die Ende-zu-Ende-Beziehung des Protokolls der Schicht N erhalten. Falls das globale Protokoll im betrachteten Teilnetz nicht sowieso vorhanden ist, muß das teilnetzspezifische Protokoll der Schicht N-1 an das globale Protokoll angepaßt werden.

Die nächste Art der Netzkopplung verwendet die letzte unterschiedliche Schicht der Teilnetze als Kopplungsschicht. Da sich die Dienstprimitive oder PDUs auf dieser Schicht in den Teilnetzen unterscheiden, müssen sie in der Koppeleinheit umgesetzt werden. Diese Umsetzung wird auch als Protokolltransformation bezeichnet. Durch die Abbildung der Protokolleigenschaften entsteht meist ein Verlust an Funktionalität, da nicht immer alle Dienstmerkmale des einen Teilnetzes auch im anderen Teilnetz realisierbar sind. Die Transferzeit der Daten durch die Koppeleinheit wird mit dieser Lösung minimiert.

Bei der letzten Kopplungsart wird zur Kommunikation von Endeinrichtungen zweier räumlich getrennter Teilnetze ein drittes Netz als Transitnetz verwendet. An den Grenzen des Transitnetzes sind paarweise jeweils halbe Koppeleinheiten installiert. Die PDUs der ge-

wählten gemeinsamen Schicht der Teilnetze werden im Transitnetz als reine Nutzdaten behandelt. Daher ist keine Kommunikation zwischen einer Endeinrichtung eines Teilnetzes und einer Endeinrichtung des Transitnetzes möglich.

# 3.3 Einfluß von Netzmerkmalen

Nach der Beschreibung der prinzipiellen Kopplungsarten werden in diesem Abschnitt einige Aufgaben der Koppeleinheit behandelt, die sich durch die unterschiedlichen Eigenschaften der zu koppelnden Netze und Protokolle ergeben. Dazu werden dieselben Voraussetzungen wie im vorherigen Abschnitt zugrunde gelegt. Ein quantitativer Vergleich der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten ist in [18] enthalten.

## 3.3.1 Größe der Dateneinheiten

Häufig werden in den zu koppelnden Netzen auf der Kopplungsschicht und darunter unterschiedlich große Dateneinheiten verwendet. Da oberhalb der Kopplungsschicht identische Protokolle und damit Dateneinheiten vorausgesetzt werden, ist eine Größenanpassung der Dateneinheiten notwendig. Grundsätzlich kann einer der folgenden Anpassungsmechanismen eingesetzt werden:

- Aufteilen einer SDU in mehrere PDUs: Dieser Mechanismus wird verwendet, falls die angebotenen SDUs die in dieser Schicht bearbeitbare maximale Größe überschreiten. Generell sollte die Aufteilung möglichst tief im Protokollprofil erfolgen, um den Steuerungsaufwand, der meist proportional zur Anzahl zu bearbeitender Dateneinheiten ist, gering zu halten.
- Blocken mehrerer SDUs zu einer PDU bzw. Verketten mehrerer PDUs zu einer PDU: Die Zusammenfassung mehrerer Dateneinheiten und anschließende Bearbeitung als Ganzes ist nur dann sinnvoll, falls damit die Leistungsfähigkeit der Koppeleinheit gesteigert werden kann.
- Auffüllen von Dateneinheiten: Unterschreiten die angebotenen Dateneinheiten eine vorgeschriebene untere Größe, kann die Mindestgröße durch Hinzufügen von Füllbits erreicht werden. Damit die Füllbits erkannt und wieder entfernt werden können, muß deren Anzahl in der dazugehörigen Dateneinheit angezeigt werden.

#### 3.3.2 Transferdauer

Die zu koppelnden Teilnetze weisen meist auch unterschiedliche Transferdauern auf. Im gekoppelten Netz wird damit die minimal mögliche Transferdauer auf die kleinste gemeinsame Transferdauer der Teilnetze und der Koppeleinheit begrenzt. Zum Ausgleich von Lastspitzen ist zudem in der Koppeleinheit ein Pufferspeicher notwendig. Die Kapazität des Pufferspeichers sollte so dimensioniert sein, daß einerseits möglichst wenig Verluste auftreten und andererseits die Transferzeiten der Daten durch die Koppeleinheit nicht zu groß werden.

Um eine Überlastung der Koppeleinheit zu vermeiden, sind Mechanismen zur Drosselung des ankommenden Verkehrs wünschenswert. Dazu sind besonders bei verbindungslosen Protokollen die Möglichkeiten begrenzt, da der ankommende Verkehrsstrom der Koppeleinheit aus der Überlagerung der Verkehrsströme mehrerer Sender besteht und die einzelnen Pakete meist keine Beziehung zueinander haben. Bei herkömmlichen verbindungsorientierten Protokollen können die bestehenden abschnittsweisen Flußkontrollmechanismen zur Abwehr von Überlastsituationen verwendet werden. Sollen Netze mit hohen Übertragungsgeschwindigkeiten gekoppelt werden, wird die verfügbare Übertragungskapazität unter Verwendung der herkömmlichen Flußkontrollmechanismen jedoch nicht optimal ausgenutzt. Weitere Möglichkeiten zur Vermeidung von Überlastsituationen in der Koppeleinheit sind vorhanden, falls für den abgehenden Verkehrsstrom die Übermittlungskapazität innerhalb bestimmter Grenzen gewählt werden kann. Die sich damit ergebenden Möglichkeiten werden ausführlich in Kapitel 4 am Beispiel der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kopplung beschrieben.

Besondere Protokollmechanismen zur Anpassung unterschiedlicher Übertragungsgeschwindigkeiten können bei verbindungsorientierten Protokollen angewendet werden: Eine Verbindung im schnelleren Teilnetz kann im langsameren Teilnetz auf mehrere Verbindungen aufgespalten werden. Umgekehrt können im schnelleren Teilnetz Betriebsmittel durch das Multiplexen mehrerer Verbindungen des langsameren Teilnetzes eingespart werden.

## 3.3.3 Verbindungskonzept

In einer Netzkoppeleinheit sind häufig zahlreiche Funktionen zur Anpassung der Verbindungskonzepte der Protokolle auf der gewählten Kopplungsschicht vorzusehen. Unterschiedliche verbindungsorientierte Protokolle beispielsweise erfordern oft aufwendige individuelle Szenarien [109] um die Verbindungssteuerungen aneinander anzupassen.

Sind Dateneinheiten von einem verbindungsorientierten auf ein verbindungsloses Protokoll umzusetzen, müssen bei jedem Verbindungsaufbau die Adressen von Sender und Empfänger in der Netzkoppeleinheit gespeichert werden, da die folgenden Dateneinheiten der Verbindung diese Informationen nicht mehr enthalten. Bei der Umsetzung einer Dateneinheit auf das verbindungslose Protokoll werden dann die der jeweiligen Verbindung entsprechenden Adressen zugefügt.

Die zentrale Aufgabe einer Netzkoppeleinheit für den Übergang von einem verbindungslosen auf ein verbindungsorientiertes Protokoll ist das Verbindungsmanagement. Für jede ankommende Dateneinheit muß überprüft werden, ob bereits eine Verbindung zum gewünschten Empfänger besteht. Existiert eine geeignete Verbindung nicht, muß die Dateneinheit zwischengespeichert und die Verbindung aufgebaut werden. Der Abbau der Verbindung kann nach der Übertragung der Dateneinheit sofort oder verzögert erfolgen. Bei einem verzögerten Verbindungsabbau kann die Verbindung für folgende Dateneinheiten zum gleichen Empfänger mitbenutzt werden. Der Pufferspeicher der Netzkoppeleinheit kann ferner zur Sequentialisierung der Dateneinheiten eingesetzt werden, welche in beliebiger Reihenfolge an der Netzkoppeleinheit ankommen können und in der richtigen Reihenfolge an das verbindungsorientierte Protokoll übergeben werden müssen.

# 3.3.4 Adressierung

Bei der Netzkopplung müssen im Gesamtnetz oberhalb der Kopplungsschicht zumindest die Adressen in Ende-zu-Ende-Protokollen eindeutig sein. Dazu können hierarchisch strukturierte oder flache Adressen verwendet werden.

Die hierarchische Adressierung wird in der Regel auf der Vermittlungsschicht verwendet. Bei dieser Adressierungsart enthalten die Adressen Informationen über die Lage der angeschlossenen Endgeräte im Gesamtnetz. Abhängig von der Zugehörigkeit einer Netzkoppeleinheit zu einer Hierarchieebene muß nur ein bestimmter Teil der gesamten Adresse zur Verkehrslenkung ausgewertet werden.

Bei der flachen Adressierung wird jedem Endgerät eine feste gerätespezifische Adresse zugeordnet, so daß die Adresse auch beibehalten werden kann, falls es in einem anderen Bereich des Gesamtnetzes angeschlossen wird. Ferner wird zwischen einer einstufigen und einer mehrstufigen Adressierung unterschieden.

Bei der einstufigen Adressierung werden die Endeinrichtungen am anderen Netz mit Hilfe von bisher nicht verwendeten Adressen, sogenannten Aliasadressen, adressiert. In den Netzkoppeleinheiten sind dazu Tabellen zur Umsetzung der Adressen der ankommenden

Dateneinheiten vorhanden. Die Tabellen enthalten entweder eine weitere Aliasadresse oder, falls der Empfänger direkt am nächsten Netz angeschlossen ist, die tatsächliche Adresse des Empfängers. Problematisch bei diesem Adressierungsverfahren ist die Gewährleistung der Konsistenz der Tabellen in den Netzkoppeleinheiten.

Bei der mehrstufigen Adressierung werden die Dateneinheiten schon beim Sender mit einer Folge von Adressen versehen, die den Weg zum Empfänger festlegen. Dieses Verfahren wird daher auch als Source Routing [85] bezeichnet. Die Adreßfolge wird im Gesamtnetz von den zu durchlaufenden Netzkoppeleinheiten sequentiell abgearbeitet. Bei diesem Adressierungsverfahren muß jede angeschlossene Endeinrichtung die aktuelle Konfiguration des Netzes kennen, um die richtige Adreßfolge für den gewünschten Empfänger in die Dateneinheiten eintragen zu können.

## 3.3.5 Dienstgüte

Die Güte eines Dienstes, der zwischen Instanzen verschiedener gekoppelter Teilnetze in Anspruch genommen wird, verschlechtert sich in der Regel durch die eingesetzten Netzkoppeleinheiten. Die Bearbeitungszeiten in einer Netzkoppeleinheit vergrößern beispielsweise die Transferzeit der Dateneinheiten. Zusätzliche Datenverluste treten durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der Netzkoppeleinheiten auf. Auch die Fehlerbehandlung wird aufgrund der fehlenden Ende-zu-Ende-Signifikanz der Protokolle unterhalb der Kopplungsschicht in einem heterogenen Netz nicht so zuverlässig durchgeführt wie in einem homogenen Netz. Ebenso entsteht durch die Netzkopplung oft auch ein Verlust an Dienstmerkmalen, falls nicht alle Eigenschaften der Protokolle auf der Kopplungsschicht in jedem Teilnetz realisiert werden können.

Manche Dienstgütekriterien können jedoch durch zusätzliche Maßnahmen eingehalten oder sogar verbessert werden. Bei der Kopplung verbindungsorientierter Protokolle z.B. kann durch die Verbindungsaufspaltung im langsameren Teilnetz die gleiche oder mehr Übertragungskapazität als im schnelleren Teilnetz zur Verfügung gestellt werden. Durch die Netzkopplung besteht auch die Möglichkeit, die Sicherheit im Gesamtnetz zu verbessern. Die Netzkoppeleinheit kann beispielsweise den Zugang zu einem Teilnetz überwachen, indem sie nur autorisierte Dateneinheiten an das zweite Teilnetz übergibt. Umgekehrt kann mit derartigen Mechanismen überwacht werden, ob lokale Endeinrichtungen mit Endeinrichtungen an anderen Netzen kommunizieren dürfen.

An die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einer Netzkoppeleinheit werden sehr hohe Anforderungen gestellt, da sie die Kommunikation zwischen einer großen Zahl von Endeinrichtungen verschiedener Teilnetze überhaupt ermöglicht und damit die Verfügbarkeit der Dienste von ihrer korrekten Funktion abhängig ist.

# 3.4 Klassifikation von Netzkoppeleinheiten

In diesem Abschnitt werden die Charakteristika verschiedener Klassen von Netzkoppeleinheiten beschrieben. Die Einteilung der Netzkoppeleinheiten erfolgt dabei nach der verwendeten Kopplungsschicht.

## 3.4.1 Repeater

Eine Netzkoppeleinheit, die Netze auf der Bitübertragungsschicht miteinander koppelt, wird als Repeater (Bild 3.1) bezeichnet. Meist wird ein Repeater eingesetzt, um die räumliche Ausdehnung eines Netzes, die aus physikalischen Gründen begrenzt ist, zu erweitern.

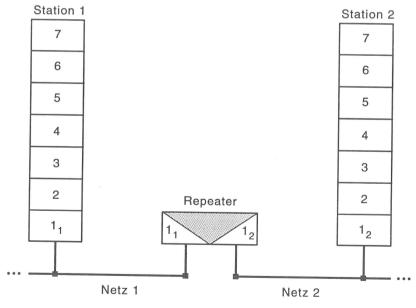


Bild 3.1: Netzkopplung über einen Repeater

Einzelne Bits werden in einem Repeater regeneriert und nach einer kurzen Verzögerung wieder ausgesandt. Da ein Repeater keine logischen, sondern lediglich physikalische Funktionen ausführt, müssen die zu koppelnden Teilnetze dieselbe Übertragungsgeschwindigkeit besitzen. Die verwendete Übertragungstechnik und das Übertragungsmedium der Teilnetze dürfen aber verschieden sein. Eine weitere Voraussetzung ist ein einheitlicher Adreßraum, aus dem die Adressen für das gesamte Netz, das aus gekoppelten Netzsegmenten besteht, entnommen werden.

Häufig sind Repeater auch in der Lage, fehlerhafte Netzsegmente zu erkennen und voneinander zu trennen. Umgekehrt verbindet er die Segmente, nach Feststellung der korrekten Arbeitsweise, automatisch wieder miteinander.

Werden mehr als zwei Segmente durch einen Repeater verbunden, wird diese Sonderform als Multiport Repeater bezeichnet. Eine weitere Sonderform, der sogenannte Remote Repeater, wird zur Überbrückung größerer Entfernungen eingesetzt. Der Repeater wird dazu in zwei Hälften aufgeteilt, die über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung, z.B. über eine Glasfaserstrecke, miteinander verbunden sind.

Eine typische Anwendung für Repeater ist die Kopplung von CSMA/CD-Netzsegmenten zu einem Gesamtnetz [82].

## 3.4.2 Bridge

Eine sogenannte Bridge dient zur Kopplung zweier Netze auf der Sicherungsschicht. Meist findet die Kopplung bereits auf der Schicht 2a, der MAC-Teilschicht statt (Bild 3.2), d.h. die Information der Schicht 2b, der LLC-Teilschicht, hat Ende-zu-Ende-Bedeutung. Bridges werden, wie Repeater, vor allem zur Erweiterung der räumlichen Ausdehnung eines Netzes verwendet.

Da die Medienzugriffsverfahren der beiden Netze unabhängig voneinander arbeiten, können auch Netze mit unterschiedlichen Medienzugriffsverfahren miteinander gekoppelt werden. Bei gleichen Medienzugriffsverfahren werden die Protokolldateneinheiten einfach durchgereicht. Eine Transformation der PDUs ist hingegen bei unterschiedlichen Medienzugriffsverfahren notwendig. Ist die Transformation zu aufwendig und soll nur die räumliche Ausdehnung vergrößert werden, kann das zweite Netz als Transitnetz verwendet werden. Dazu müssen die Dateneinheiten des einen Netzes in die Dateneinheiten des anderen Netzes eingebettet werden.

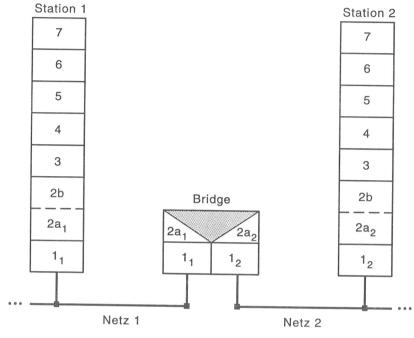


Bild 3.2: Netzkopplung über eine Bridge

Generell werden die PDUs in einer Bridge zum Ausgleich von Lastspitzen kurzzeitig zwischengespeichert. Damit dürfen die Netze auch unterschiedliche Übertragungsgeschwindigkeiten besitzen.

Die Adressen im Gesamtnetz müssen, wie bei der Netzkopplung mit einem Repeater, aus einem einheitlichen Adreßraum entnommen werden, da auf der Sicherungsschicht keine Wegesuchalgorithmen vorhanden sind. Nach dem Empfang einer PDU kann die Bridge deren Sender- und Empfängeradresse auswerten. Mit Hilfe einer Filterfunktion kann dann entschieden werden, ob diese PDU im anderen Netz wieder ausgesendet werden muß. Durch diese Adreßfilterung kann der Intern- und Externverkehr eines angeschlossenen Netzes getrennt werden. Damit wird auch die Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes vergrößert, da in beiden gekoppelten Netzen gleichzeitig Internverkehr übertragen werden kann. Ferner ermöglicht dieser Mechanismus auch die Prüfung von Zugangsberechtigungen, was die Sicherheit im Gesamtnetz erhöht. Zur Filterung werden meist Adreßtabellen verwendet, die die Zieladressen der PDUs enthalten, die von der Bridge entweder weiterzuleiten (positiver Filter) oder zu verwerfen (negativer Filter) sind. Die Tabellen können sta-

tisch angelegt oder im Betrieb dynamisch aufgebaut und aktualisiert werden. Die Auswahl aus den zahlreichen Vorschlägen für Algorithmen und Realisierungen zur Adreßsuche in der Tabelle orientiert sich dabei an den Zeit- und Speicherplatzanforderungen. Verfahren zur Verkehrslenkung und zum Aufbau der Filtertabellen werden neben allgemeinen Aspekten für die Zusammenarbeit von mehreren Bridges und Netzen in zwei Vorschlägen zu Standards festgelegt. Im einen Vorschlag [79] wird ein sogenannter Spanning-Tree-Algorithmus vorgeschlagen, der die physikalische Struktur des Gesamtnetzes auf einen logischen Baum abbildet. Der andere Vorschlag [85] stellt eine Erweiterung des bisherigen Token-Ring-Standards dar. Darin wird ein sogenannter Source-Routing-Algorithmus beschrieben, der die explizite Angabe des Weges durch das Netz durch den Sender voraussetzt. Durch beide Verfahren werden Duplikate und endlos kreisende PDUs vermieden.

Außer den Adressen wird oft auch die Protokollsteuerinformation höherer Schichten zur Filterung ausgewertet. Diese Protokollfilterung stellt allerdings eine Verletzung des ISO-Referenzmodells dar.

Werden mehr als zwei Netze durch eine Bridge gekoppelt, wird diese Sonderform als Multiport Bridge bezeichnet. Dabei werden erhöhte Anforderungen an die Mechanismen zur Adreßfilterung gestellt, da für jedes Netz eine Adreßtabelle verwaltet und für jede empfangene PDU durchsucht werden muß. Eine weitere Sonderform entsteht, falls ein Transitnetz verwendet wird und die PDUs darin auf der Sicherungsschicht eingebettet werden. Die halben Netzkoppeleinheiten am Ein- bzw. Ausgang des Transitnetzes werden dann als Half Bridges oder Remote Bridges bezeichnet. Für LANs kommen vor allem WANs und MANs, die entsprechend hohe Übertragungsgeschwindigkeiten zur Verfügung stellen, in Frage.

#### 3.4.3 Router

Die Bezeichnung Router wird allgemein für eine Netzkoppeleinheit verwendet, die zwei oder mehrere Netze auf der Vermittlungsschicht miteinander verbindet. Dieser älteste Typ von Netzkoppeleinheiten wurde bisher vor allem als Vermittlungsknoten zum Aufbau von Weitverkehrsnetzen eingesetzt.

Der Einsatz eines Routers setzt in den zu koppelnden Netzen die Existenz eines Protokolls auf der Vermittlungsschicht voraus. Diese Voraussetzung wird bei LANs oft nicht erfüllt. Endeinrichtungen, die über einen Router kommunizieren möchten, müssen dazu das gleiche Vermittlungsprotokoll wie der Router verwenden, da ein Router bezüglich der Vermittlungsprotokolle nicht transparent ist.

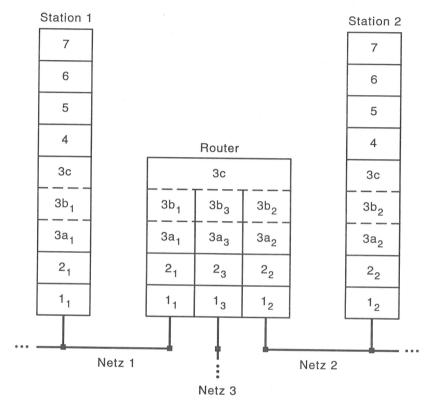


Bild 3.3: Netzkopplung über einen Router

Generell ist auch die Kopplung von Netzen mit unterschiedlichen Vermittlungsprotokollen mit Hilfe eines Routers durch Protokolltransformation möglich, in der Regel sind jedoch zumindest die Verfahren zur Adressierung und Verkehrslenkung in den zu koppelnden Netzen identisch. Zur Netzkopplung bietet sich, wie in Bild 3.3 dargestellt, daher meist die oberste Teilschicht (siehe Abschnitt 2.1.4) der Vermittlungsschicht, die Netzübergangsschicht, an. Mit ihrem globalen Protokoll nimmt sie, unabhängig vom jeweiligen Teilnetz, vor allem Funktionen zur Verkehrslenkung im gekoppelten Netz wahr. Viele der Verfahren zur Verkehrslenkung [146] besitzen die Möglichkeit, alternative Wege zu bestimmen. Ein Router ist damit in der Lage, bei Ausfall eines Weges einen anderen Weg zur Übermittlung der Daten zu wählen, was die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtnetzes erhöht.

Ein Router wird mit seiner teilnetzspezifischen Adresse explizit adressiert, daher wird ein Router im Gegensatz zu einer Bridge nicht durch den Internverkehr der angeschlossenen Teilnetze belastet. Die eigentliche, meist hierarchisch strukturierte, Vermittlungsadresse wird in der Netzübergangsschicht ausgewertet und durchgereicht. Voraussetzung dafür sind wieder eindeutige Adressen im Gesamtnetz. Zur Verkehrslenkung muß jeder Router nur die für ihn relevanten Teile in einer Tabelle speichern. Diese Verkehrslenkungstabellen haben daher meist einen geringeren Umfang als die Adreßfiltertabellen einer Bridge. Nach der Bestimmung des abgehenden Teilnetzes wird entweder die Endeinrichtung, falls direkt an diesem Teilnetz angeschlossen, oder der nächste Router mit der entsprechenden teilnetzspezifischen Adresse adressiert.

In LANs sind oft verschiedene Stationen vorhanden, die mit unterschiedlichen Vermittlungsprotokollen arbeiten. Speziell zur Kopplung von LANs sind daher Router verfügbar, die mehrere unterschiedliche Vermittlungsprotokolle bearbeiten können. Das verwendete Protokoll kann im Router durch Auswertung der Protokollsteuerinformation jedes Paketes ermittelt werden.

Eine weitere Sonderform eines Routers führt für bestimmte Vermittlungsprotokolle eine Verkehrslenkung durch und ist für alle anderen Vermittlungsprotokolle transparent. Dazu müssen, wie bei einer Bridge, sämtliche Pakete der angeschlossenen Teilnetze empfangen werden. Alle explizit durch ihre teilnetzspezifische Adresse an den Router adressierten Pakete werden an die Vermittlungsschicht weitergegeben. Die restlichen Pakete werden wie in einer Bridge behandelt. Diese Sonderform wird daher auch als Brouter bezeichnet.

## 3.4.4 Gateway

Eine Netzkoppeleinheit, die Netze auf der Transportschicht oder einer höheren Schicht miteinander koppelt, wird als Gateway bezeichnet. Dabei geht die Ende-zu-Ende-Signifikanz des Transportprotokolls verloren, was gemäß der Definition der Transportschicht im Basisreferenzmodell nicht vorgesehen ist. Aus der Sicht der Endeinrichtungen eines Teilnetzes wird das Gateway gemeinsam mit dem anderen Teilnetz als eine verteilte Endeinrichtung betrachtet.

Der Einsatz von Gateways ist nur sinnvoll, falls die Protokolle der zu koppelnden Netze sich bis zur Transportschicht oder einer höheren Schicht unterscheiden, da Gateways im homogenen Fall keine Vorteile gegenüber anderen Netzkoppeleinheiten aufweisen. Besonders der Datendurchsatz von Gateways ist durch die große Anzahl zu durchlaufender Schichten und durch die Realisierung der entsprechenden Funktionen in Software vergleichsweise gering. Zur Kopplung wird meist eine Protokolltransformation durchgeführt,

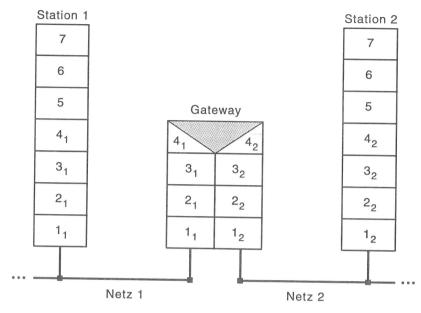


Bild 3.4: Netzkopplung über ein Gateway

bei der die Dienstprimitive der Transport- oder Verarbeitungsschicht umgesetzt werden. Mit dieser Abbildung der Protokolleigenschaften ist oft auch ein Verlust an Funktionalität verbunden. Die Adressen müssen bei unterschiedlichen Protokollen auf der Kopplungsschicht in der Regel auch umgesetzt werden. In Bild 3.4 ist beispielhaft ein Gateway dargestellt, das eine Protokolltransformation auf der Transportschicht durchführt.

Ferner müssen Gateways auch eingesetzt werden, wenn die Protokolle eines Netzes nicht gemäß dem Basisreferenzmodell geschichtet sind, wie es oft bei herstellerspezifischen Netzen der Fall ist. Ein konkretes Beispiel für ein Gateway zur Kopplung von zwei in der Fertigungsautomatisierung verwendeten Netzen ist in [18] beschrieben.

# **Kapitel 4**

# Netzkopplung DQDB / B-ISDN

Nach den allgemeinen Betrachtungen zur Netzkopplung wird in diesem Kapitel der spezielle Fall der Kopplung des regionalen Hochgeschwindigkeitsnetzes DQDB (Abschnitt 2.2) mit dem zukünftigen B-ISDN auf der Basis von ATM (Abschnitt 2.3) untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung dieses konkreten Kopplungsproblems liegt auf der Kopplung für den im MAN DQDB vorhandenen und den im B-ISDN geplanten verbindungslosen Dienst. Bei der Darstellung der Funktionen, die von der Koppeleinheit durchzuführen sind, wird besonders detailliert auf die Bandbreitenzuteilung zur verbindungslosen Datenübermittlung im B-ISDN eingegangen.

# 4.1 Entwicklungen in der Standardisierung

In der Evolution zum künftigen B-ISDN (Abschnitt 2.4) sind zumindest in einer Übergangszeit Netzkoppeleinheiten zwischen dem MAN DQDB und dem B-ISDN notwendig. Zur Vereinfachung dieses Kopplungsproblems sind die internationalen Standardisierungsgremien bestrebt, die Kompatibilität der Netze durch eine weitgehende Vereinheitlichung der entsprechenden Standards zu erhöhen. Ein Beispiel dafür ist die Anpassung des ursprünglichen DQDB-Zeitschlitzformats (64 Oktetts Nutz- + 5 Oktetts Protokollsteuerinformation), das gegenwärtig noch in den meisten Pilotimplementierungen verwendet wird, an das im Juni 1989 festgelegte ATM-Zellformat (48 Oktetts Nutz- + 5 Oktetts Protokollsteuerinformation, Abschnitt 2.3.3.2). Auch wird beispielsweise das für das B-ISDN festgelegte Adressierungsschema nach der Empfehlung E.164 [24] durch das MAN DQDB unterstützt, womit eine wichtige Voraussetzung für die Zusammenarbeit beider Netze erfüllt wird. Weitere Beispiele für die Vereinheitlichung der Standards für die beiden Netze werden in den Abschnitten 4.3 und 4.4, die jeweils eine Gegenüberstellung der Protokollprofile der entsprechenden Dienste beider Netze enthalten, aufgearbeitet.

# 4.2 Kopplungsart

Bevor in den folgenden Abschnitten die von der Netzkoppeleinheit durchzuführenden Funktionen beschrieben werden, soll zunächst die Art der Netzkopplung (siehe Abschnitt 3.2) diskutiert werden.

Gegenwärtig arbeiten zahlreiche Hersteller von Rechenanlagen an der Entwicklung von Systemen, die direkt an das B-ISDN angeschlossen werden und unter Verwendung des ATM-Prinzips miteinander kommunizieren können. Damit solche Endeinrichtungen am B-ISDN mit Systemen, die am DQDB angeschlossen sind, kommunizieren können, wird das ATM-Netz im Rahmen dieser Arbeit nicht als reines Transitnetz zwischen DQDB-Netzen eingesetzt.

Beide zu koppelnden Netze sind für hohe Übertragungsgeschwindigkeiten konzipiert. Um die Güte eines Dienstes, der über die Netzkoppeleinheit abgewickelt wird, nicht oder nur in geringem Maße zu verschlechtern, muß die Transferzeit der Daten durch die Koppeleinheit minimiert werden. Unter diesem Gesichtspunkt bietet sich als Kopplungsart entweder die Umsetzung der Dienstprimitive auf der letzten unterschiedlichen Schicht beider Netze oder das transparente Durchreichen der Dienstprimitive auf der ersten identischen Schicht beider Netze an. Ebenso wird, soweit möglich, auf eine Umsetzung des Verbindungskonzeptes, wofür zusätzliche Funktionen (Abschnitt 3.3.3) notwendig wären, beim Übergang zwischen den Netzen verzichtet.

Die jeweilige Kopplungsschicht und -art wird für die konkreten Kopplungsfälle, ausgehend von den verschiedenen Diensten beider Netze unter Berücksichtigung der obigen Betrachtungen, in den folgenden Abschnitten bestimmt.

# 4.3 Kopplung für verbindungsorientierte Dienste

In den Standards für beide Netze ist die Unterstützung verschiedener verbindungsorientierter Dienste festgelegt. Zur Untersuchung der Kopplungsmöglichkeiten folgt in diesem Abschnitt eine Gegenüberstellung der verbindungsorientierten Dienste, die von der ATM-Anpassungsschicht (Abschnitt 2.3.3.3) sowie der DQDB-Schicht (Abschnitt 2.2.2.4) bereitgestellt werden.

Die AAL-Dienste der Klasse A, welche mit Hilfe der Protokolle des AAL-Typs 1 bereitgestellt werden, sind zur Datenübermittlung mit konstanter Bitrate vorgesehen, wobei zwischen Quelle und Senke eine feste Zeitbeziehung besteht, d.h. aus den empfangenen Daten

muß der Sendetakt wieder hergestellt werden. Das entsprechende Pendant auf der DQDB-Schicht ist der isochrone Dienst, für dessen Verbindungen eine konstante Bitrate analog zum Prinzip der Durchschaltevermittlung auf dem Medium reserviert wird.

Die Standardisierung der Protokolle des AAL-Typs 2, die die AAL-Dienste der Klasse B unterstützen sollen, befindet sich derzeit noch im Anfangsstadium. Die Dienste dieser Klasse unterscheiden sich von den Diensten der Klasse A durch einen variablen Bitratenbedarf. Auf der DQDB-Seite besteht die Möglichkeit, den isochronen Dienst oder den verbindungsorientierten Datendienst zu verwenden. Bei Verwendung des isochronen Datendienstes wird implizit die Zeitbeziehung zwischen Quelle und Senke aufrecht erhalten. Jedoch wirft dann die Forderung nach einer variablen Bitrate neue Probleme auf. Wird der verbindungsorientierte Datendienst, der auf der Funktionalität der QA-Einheit aufbaut, zur Datenübermittlung verwendet, können Verbindungen für einen variablen Bitratenbedarf eingerichtet werden. Jedoch müssen dann zusätzliche Funktionen definiert werden, um die geforderte Zeitbeziehung zwischen den an der Kommunikation beteiligten Partnerinstanzen zu gewährleisten. Da die Standardisierung des verbindungsorientierten Datendienstes noch nicht abgeschlossen ist, werden die Protokolle beider Netze vermutlich aneinander angeglichen.

Bei den AAL-Diensten der Klasse C entfällt gegenüber den Diensten der Klasse B die feste Zeitbeziehung zwischen Quelle und Senke. Die Protokolle des AAL-Typs 3/4 sind zur Unterstützung dieser Dienste vorgesehen. Auf der DQDB-Schicht bietet sich direkt der verbindungsorientierte Datendienst an, dessen Definition vermutlich auch für diesen Fall an die Definition der Protokolle des AAL-Typs 3/4 angelehnt wird.

## 4.3.1 Verbindungssteuerung

Grundsätzlich müssen beim Übergang zwischen verbindungsorientierten Protokollen die Zustandsautomaten der Verbindungssteuerung (Schicht 3) aneinander angepaßt werden. Der aktuelle Stand der Standardisierung für beide Netze hinsichtlich der Verbindungssteuerung wird im folgenden beschrieben.

Aus Gründen der Kompatibilität zum Schmalband-ISDN basieren die Standardisierungsvorschläge zur Verbindungssteuerung im B-ISDN auf der Empfehlung I.451 [39], in der die Funktionen zur Benutzer/Netz-Signalisierung für das Schmalband-ISDN festgelegt sind. Bedingt durch das Konzept der virtuellen Verbindungen und durch die neuartigen Anforderungen der Breitbanddienste sind Protokollerweiterungen [78] nötig.

Im aktuellen DQDB-Standard sind noch keine Funktionen für die Verbindungssteuerung festgelegt. Der Anhang enthält lediglich einen Vorschlag für Prozeduren zur Verbindungssteuerung für die Unterstützung der isochronen Dienste, der ebenfalls von dem in der Empfehlung I.451 beschriebenen Protokoll abgeleitet ist. Auch hinsichtlich der Verbindungssteuerung ist daher mit einer Vereinheitlichung der Standards beider Netze zu rechnen. Die Primitive zur Verbindungssteuerung können dann von der Koppeleinheit an die zuständigen Instanzen des jeweiligen Netzes transparent durchgereicht werden.

## 4.3.2 AAL-Dienstklasse A - Isochrone Dienste DQDB

Unter der Annahme, daß sowohl im B-ISDN als auch im DQDB-Teilnetz bereits eine Verbindung zwischen den Endeinrichtungen aufgebaut ist, werden nachfolgend die zum Datentransfer notwendigen Funktionen in der Netzkoppeleinheit erläutert.

Für die Bereitstellung des isochronen Dienstes der DQDB-Schicht werden gegenwärtig, wie in Abschnitt 2.2.2.4 erwähnt, zwei Varianten diskutiert. Sie unterscheiden sich durch die in der ICF-Anpassungsschicht (Isochronous Convergence Functions, ICF) vorhandene Funktionalität. In der ersten Variante bestehen die zu übermittelnden Dateneinheiten aus einzelnen Oktetts, d.h. ein Zeitschlitz kann Dateneinheiten mehrerer Verbindungen beinhalten. In der zweiten Variante werden die Daten in der ICF-Einheit zu Blöcken mit 48 Oktetts aufgesammelt und dann übermittelt. Damit wird die gesamte zur Verfügung stehende Nutzinformation eines Zeitschlitzes einer Verbindung zugeordnet.

Wird die erste Variante eingesetzt, werden in der Richtung vom DQDB-Teilnetz zum ATM-Netz einzelne Oktetts transparent von der ICF-Anpassungseinheit an die Einheit der CS-Teilschicht durchgereicht. Das dazugehörige Protokollmodell der Netzkoppeleinheit ist in Bild 4.1 dargestellt. Die einzelnen Oktetts werden in der CS-Einheit zu Blöcken von 47 Oktetts Größe aufgesammelt (Bild 4.2). Aus der isochronen Anlieferung der Oktetts wird dort ein Zeitstempel nach dem SRTS-Algorithmus (Synchronous Residual Time Stamp) [33] abgeleitet, aus dem der Empfänger den Sendetakt rekonstruieren und bei Abweichungen entsprechende Maßnahmen einleiten kann. Die Zeitstempelinformation wird dabei auf mehrere Datenblöcke aufgeteilt und kontinuierlich übertragen (als Teil des SN-Feldes). Nach der Berechnung einer Folgenummer (Sequence Number, SN) zur Behandlung von Zellverlusten und von fehlgeleiteten Zellen beim Empfänger werden die Daten an die SAR-Einheit weitergereicht. In dieser Teilschicht werden zusätzlich Daten zur Fehlersicherung (Sequence Number Protection, SNP) als Protokollsteuerinformation hinzugefügt und danach der gesamte Block (48 Oktetts) an die Einheit der ATM-Schicht zur Übermittlung übergeben. In der umgekehrten Richtung wird nach Durchlaufen der Fehlersiche-

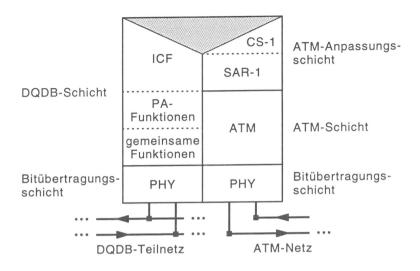


Bild 4.1: Protokollmodell der Netzkoppeleinheit (Variante 1)

rungsfunktion der SAR-Einheit in der Einheit CS die Folgenummer des Datenblockes und die Taktinformation ausgewertet und, falls Fehler bzw. Abweichungen festgestellt werden, entsprechende Maßnahmen eingeleitet. Ferner müssen die Datenblöcke dort aus zwei Gründen zunächst zwischengespeichert werden: Zum einen müssen die bei Verwendung des ATM-Prinzips auftretenden Laufzeitschwankungen der ATM-Zellen ausgeglichen werden und zum anderen müssen die Daten Oktett für Oktett an die ICF-Anpassungsschicht übergeben werden. Für jede Verbindung vom bzw. zum ATM-Netz ist dafür ein separater Puffer vorzusehen.

Header	SN	SNP	SAR-PDU Information
4 Bits 4 Bits		4 Bits	47 Oktetts

#### Bedeutungen

SN Sequence Number

SNP Sequence Number Protection

Bild 4.2: Protokolldateneinheit der ATM-Anpassungsschicht des Typs 1

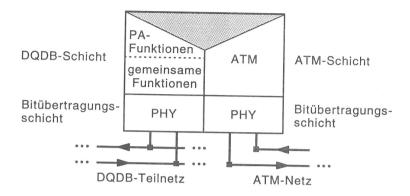


Bild 4.3: Protokollmodell der Netzkoppeleinheit (Variante 2)

In der zweiten Variante zur Bereitstellung des isochronen Dienstes im DQDB-Netz werden in der ICF-Schicht ganze Datenblöcke mit 48 Oktetts Nutzdaten verarbeitet. Zur Vereinfachung der Netzkopplung ist, bei Verwendung dieser Variante, eine Anpassung der Funktionen und Datenformate der ICF- und der AAL-Schicht anzustreben. Für die ICF-Teilschicht würden dann ebenfalls Datenblöcke definiert, die 47 Oktetts Nutzdaten und 1 Oktett Protokollsteuerinformation enthalten (Bild 4.2). Mit dieser Vereinheitlichung könnten Dateneinheiten direkt zwischen der PA- und der ATM-Einheit ausgetauscht werden. Das entsprechende Protokollmodell der Netzkoppeleinheit ist in Bild 4.3 dargestellt. Dazu müßten in der Kopplungsschicht die Information in den Kopffeldern der ATM-Zellen bzw. DQDB-Zeitschlitze umgesetzt und Puffer lediglich zum Ausgleich von Laufzeitschwankungen vorgesehen werden. Eine Realisierung der zweiten Variante hat damit im Vergleich mit der ersten Variante einen geringeren Speicherbedarf und aufgrund der geringeren Anzahl zu durchlaufender Schichten kann eine kürzere Transferzeit der Daten erzielt werden.

# 4.3.3 Kopplungsmöglichkeiten für Dienste der AAL-Dienstklasse B

Die Dienste der AAL-Dienstklasse B zeichnen sich im Unterschied zu den in der AAL-Dienstklasse A festgelegten Diensten durch ihren variablen Bitratenbedarf aus. Wie bereits oben erwähnt, befindet sich die Standardisierung der Protokolle zur Unterstützung der AAL-Dienste der Klasse B noch in der Anfangsphase. In diesem Abschnitt wird daher kein konkretes Protokollprofil der Netzkoppeleinheit inklusive der benötigten Funktionalität auf der Kopplungsschicht entwickelt, sondern es werden die bei den verschiedenen Kopp-

lungsmöglichkeiten auftretenden Probleme und ihre Lösungsmöglichkeiten diskutiert. Dabei wird wieder nur die Datentransferphase betrachtet, d.h. der Aufbau einer Verbindung zwischen den Endeinrichtungen wird als bereits abgeschlossen vorausgesetzt.

Die Protokolle des AAL-Typs 2, die zur Unterstützung der Dienste der AAL-Dienstklasse B vorgesehen sind, werden nachfolgend auf die verbindungsorientierten Protokolle der DQDB-Schicht umgesetzt. Dazu besteht auf der DQDB-Seite die Möglichkeit, den isochronen Dienst oder den verbindungsorientierten Datendienst zu verwenden. Bei Verwendung des isochronen Datendienstes wird implizit die Zeitbeziehung zwischen Quelle und Senke aufrecht erhalten. Jedoch kann bei dieser Kopplungsmöglichkeit die Bereitstellung einer variablen Bitrate im DQDB-Netz nicht effizient realisiert werden. Eine Änderung der Bitrate während einer Verbindung kann nur durch eine Neuverhandlung mit der im DQDB-Teilnetz zuständigen Einheit zur Verwaltung der Verbindungen genehmigt werden. Anschließend muß der entsprechende Rahmengenerator auf die neuen Verbindungsparameter eingestellt werden. Dieser Mechanismus, von der Anforderung bis zur Generierung der Zeitschlitze gemäß der neuen Bitrate, nimmt viel Zeit in Anspruch und reagiert damit entsprechend träge auf Bitratenschwankungen. Ferner muß bei einer Bitratenerhöhung die in diesem Zeitintervall eintreffende überschüssige Datenmenge zwischengespeichert werden, was bei den möglichen hohen Bitraten eine beträchtliche Speicherkapazität erfordert. Bei dieser Möglichkeit der Kopplung sollte daher auf Bitratenänderungen für eine bestehende Verbindung verzichtet werden. Beim Verbindungsaufbau wird dann die maximal benötigte Bitrate für die Dauer der Verbindung reserviert und damit ein Teil der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität verschwendet.

Wird der verbindungsorientierte Datendienst der DQDB-Schicht zur Kopplung verwendet, ist die Einrichtung von Verbindungen mit einem variablen Bitratenbedarf prinzipiell unproblematisch. Der verbindungsorientierte Datendienst der DQDB-Schicht basiert auf den Funktionen der QA-Einheit, die den Zugriff auf die nicht durch den isochronen Datendienst belegten Zeitschlitze nach dem "Distributed Queueing"-Medienzugriffsprotokoll (Abschnitt 2.2.2.4) steuert. Mechanismen zur Begrenzung der Bitrate einer Verbindung sind für dieses Zugriffsprotokoll nicht festgelegt, müssen hier aber vorgesehen werden, damit sich die einzelnen Verbindungen nicht zu stark gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise können, analog zu den Dienstzugangsklassen des SMDS, Verbindungsklassen eingerichtet werden, die durch unterschiedliche mittlere Bitraten charakterisiert sind. Die Einhaltung der Bitraten wird durch einen Credit-Mechanismus, der nicht in das ursprüngliche Medienzugriffsprotokoll eingreift, gewährleistet. Daten dürfen dabei nur übermittelt werden, so lange Sendeberechtigungen (Credits) vorhanden sind. Für jedes übermittelte Oktett wird die Anzahl der Sendeberechtigungen dekrementiert. Die Anzahl der Sendeberechtigungen wird, abhängig von der Zugangsklasse, periodisch bis zu einem Maximalwert inkremen-

tiert. In [114] wird ein solcher Mechanismus untersucht. Eine andere Möglichkeit zur Begrenzung der Bitrate einer Verbindung ist der Einsatz eines erweiterten BWB-Mechanismus (Abschnitt 2.2.4.1). Dabei wird für jede Verbindung eine von der gewünschten Bitrate abhängige obere Schranke für den BWB-Mechanismus festgelegt [141].

Bei dieser Kopplungsvariante können für die Entscheidung über die Annahme einer Verbindung die für das ATM-Netz vorgeschlagenen Verbindungsannahmeverfahren (siehe Abschnitt 2.3.4.1) eingesetzt werden. Ferner müssen hier, im Gegensatz zur Kopplung der AAL-Dienste der Klasse B mit dem isochronen Datendienst der DQDB-Schicht, Funktionen definiert werden, um die geforderte Zeitbeziehung zwischen den an der Kommunikation beteiligten Partnerinstanzen zu gewährleisten. Da die Standardisierung der zu koppelnden Dienste noch nicht abgeschlossen ist, werden in diesem Punkt die Protokolle beider Netze vermutlich aneinander angeglichen.

# 4.3.4 AAL-Dienstklasse C - Verbindungsorientierter Datendienst DQDB

Bei den Diensten der AAL-Dienstklasse C entfällt im Unterschied zu den in der AAL-Dienstklasse B festgelegten Diensten die feste Zeitbeziehung zwischen den an der Kommunikation beteiligten Partnerinstanzen. Zur Unterstützung der AAL-Dienste der Klasse C sollen dieselben Protokolle des AAL-Typs 3/4 verwendet werden, die auch zur Unterstützung verbindungsloser Dienste vorgesehen sind. Der entsprechende Dienst der DQDB-Schicht ist der verbindungsorientierte Datendienst, dessen Definition vermutlich an die Definition der Protokolle des AAL-Typs 3/4 angelehnt wird. Die Datentransferphase nach dem Aufbau einer Verbindung bei der Kopplung dieser beiden Dienste entspricht damit weitgehend der Datentransferphase bei der Kopplung für verbindungslose Dienste. Die möglichen Kopplungsarten und die notwendige Funktionalität in der Kopplungsschicht werden im nächsten Abschnitt für die Kopplung verbindungsloser Dienste entwickelt und dargestellt. Die zur Unterstützung des verbindungsorientierten Datendienstes in einem DQDB-Teilnetz notwendigen zusätzlichen Funktionen sind im vorherigen Abschnitt beschrieben. Die dort getroffenen Aussagen sind auch für die hier betrachtete Kopplung gültig.

# 4.4 Kopplung für verbindungslose Dienste

Neben der Unterstützung verbindungsorientierter Dienste ist in den Standards beider Netze auch die Unterstützung verbindungsloser Dienste festgelegt. Für die Entwicklung des MANs DQDB (siehe Abschnitt 2.2.1) war die Bereitstellung von verbindungslosen Dien-

sten eine Bedingung, um die Kompatibilität zu der Vielzahl bereits installierter traditioneller LANs zu gewährleisten. Der verbindungslose Datendienst wird auf der DQDB-Schicht bereitgestellt und ist in Abschnitt 2.2.2.4 beschrieben. Für das B-ISDN entwickelte sich die Unterstützung verbindungsloser Dienste aus dem Wunsch nach schneller Datenkommunikation zwischen LANs bzw. MANs über große Entfernungen (siehe Abschnitt 2.4). Die verbindungslosen Dienste im B-ISDN werden durch die Klasse D der ATM-Anpassungsschicht (Abschnitt 2.3.3.3), die durch die Protokolle des AAL-Typs 3/4 unterstützt werden, repräsentiert.

#### 4.4.1 Protokollmodelle und -dateneinheiten

Um die Untersuchung verschiedener Kopplungsvarianten vorzubereiten, werden in diesem Abschnitt die Protokollmodelle für die Unterstützung verbindungsloser Dienste in beiden Netzen (Bild 4.4) sowie die jeweils festgelegten Protokolldateneinheiten miteinander verglichen. Die einzelnen Einheiten der DQDB-Schicht und deren Funktionen sind bereits in Abschnitt 2.2.2.4 beschrieben. Das entsprechende Protokollmodell für das ATM-Netz wird, wie in Bild 4.4 dargestellt, oberhalb der ATM-Anpassungsschicht um eine Teilschicht erweitert. Die Funktionen des verbindungslosen Netzzugangsprotokolls (Connectionless Network Access Protocol, CLNAP), das auf dem ungesicherten Datendienst der AAL-Schicht aufbaut, sind in der CCITT Empfehlung I.364 [34] vorläufig festgelegt. In dieser Empfehlung wird die direkte Unterstützung von verbindungslosen Diensten im B-ISDN durch CL-Server (Abschnitt 2.4.2) vorausgesetzt. Die meisten Festlegungen lassen sich aber auch für die indirekte Unterstützung verbindungloser Dienste umsetzen. In der CLNAP-Einheit werden die Dienstdateneinheiten aus höheren Schichten mit Quellund Zieladresse (E.164 Adressierungsschema) und zusätzlicher Protokollsteuerinformation versehen. Eine Beschreibung der Funktionalität der ATM-Schicht und ATM-Anpassungsschicht befindet sich in Abschnitt 2.3.3.2 und 2.3.3.3.

Aus dem Vergleich der in den jeweiligen Standards festgelegten Funktionen der MCF-Einheit des DQDB-Protokollmodells mit den Funktionen der SAR-3/4-, CS-3/4- und CLNAP-Einheit des ATM-Protokollmodells ergeben sich keine Unterschiede. Die jeweiligen Standards sind in diesem Fall vollständig aneinander angeglichen. Bedingt durch diese Definition identischer Protokolle in den oben erwähnten Teilschichten beider Netze werden dort auch identische Protokolldateneinheiten festgelegt, d.h. auch die Felder der PDUs und die PDUs selbst besitzen dasselbe Format und werden für die gleichen Funktionen verwendet.

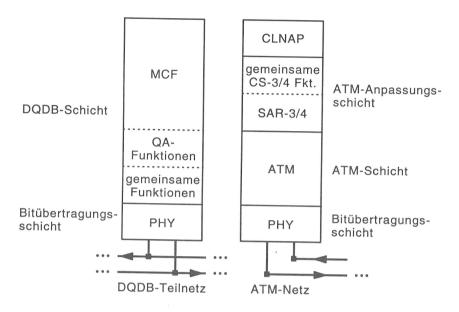


Bild 4.4: Protokollmodelle zur Unterstützung verbindungsloser Dienste

Unterhalb dieser Teilschichten sind die Protokollmodelle und -dateneinheiten verschieden. Die PDUs der QA-Einheit (Zeitschlitze, Bild 2.7) und die PDUs der ATM-Schicht (Zellen, siehe Bild 2.15) unterscheiden sich dabei nicht in der Länge, sondern lediglich im Kopffeld voneinander.

Neben den vorgestellten Protokollmodellen existiert ein weiterer Vorschlag [11, 12], der die Protokollmodelle beider Netze so festlegt, daß sie den Dienst SMDS (siehe auch Abschnitt 2.3.3.3) unterstützen. Auf der modifizierten MCF-Teilschicht bzw. der Teilschicht oberhalb der ATM-Anpassungsschicht würde damit, wie oben, in beiden Netzen der gleiche Dienst bereitgestellt. Da prinzipiell auch die Funktionalität der einzelnen Teilschichten nicht verändert wird, ergeben sich durch diesen Vorschlag keine zusätzlichen Kopplungsmöglichkeiten. Der Vorschlag wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

# 4.4.2 Kopplungsmöglichkeiten

Aus der Gegenüberstellung der Protokollmodelle zur Unterstützung verbindungsloser Dienste werden in diesem Abschnitt die Möglichkeiten zur Kopplung beider Netze abgeleitet. Grundsätzlich muß bei dem hier vorliegenden Fall verbindungsloser Kommunikation nach dem Datagramm-Prinzip (Abschnitt 2.1.3) die Zieladresse (E.164 Adressierungssche-

ma) jeder Dateneinheit zur Verkehrslenkung ausgewertet werden. Das Ergebnis dieser Auswertung dient in der Netzkoppeleinheit zur Entscheidung, ob eine Dateneinheit im anderen Teilnetz wieder ausgesendet werden soll oder nicht (Adreßfilterung, siehe Abschnitt 3.4.2). Da die Zieladresse der Endeinrichtung bei Einhaltung des Schichtungsprinzips (Abschnitt 2.1.4) nur auf der MCF- sowie CLNAP-Teilschicht verfügbar ist, bietet sich damit die Kopplung beider Netze auf diesen Schichten als eine erste Möglichkeit an. Da diese Schichten identische Funktionen und PDUs besitzen, können die Dienstprimitive auf der Kopplungsschicht transparent durchgereicht werden. Auf eine Umsetzung der Zieladresse kann ebenfalls verzichtet werden, da in beiden Netzen das gleiche Adressierungsschema nach der CCITT Empfehlung E.164 und damit sinnvollerweise ein einheitlicher Adreßraum verwendet wird.

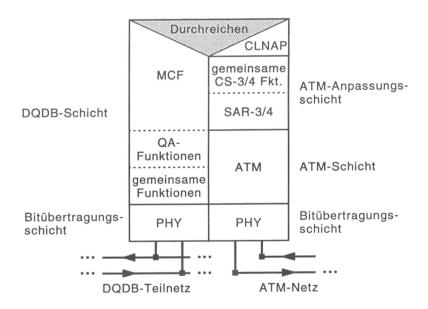


Bild 4.5: Protokollmodell der Netzkoppeleinheit (Variante 1)

In beiden Netzen wird die Information in kleinen Dateneinheiten, den DQDB-Zeitschlitzen bzw. den ATM-Zellen, übermittelt. Bei dieser Kopplungsmöglichkeit (Bild 4.5) müssen die PDUs der Kopplungsschicht auf der einen Netzseite zunächst aus den Informationsteilen der empfangenen Zellen bzw. Zeitschlitze zusammengesetzt (Reassembly) und nach dem Durchreichen auf der anderen Netzseite wieder entsprechend in kleinere Dateneinheiten aufgeteilt werden (Segmentation). Die Informationsteile der Zellen bzw. Zeitschlitze, die

zu einer PDU der Kopplungsschicht gehören, sind eindeutig durch eine Kennung (Message oder Multiplexing Identifier, MID) gekennzeichnet. Die einzelnen Segmente müssen dabei bis zum vollständigen Empfang dieser PDU zwischengespeichert werden. Durch das Vereinigen und Wiederaufteilen sowie durch die Zwischenspeicherung ergibt sich eine relativ große Transferzeit der Daten durch die Koppeleinheit. Ferner sind viele Pufferspeicher und eine aufwendige Speicherverwaltung notwendig, da PDUs der Kopplungsschicht von mehreren Endeinrichtungen in der Netzkoppeleinheit in kurzen zeitlichen Abständen ankommen können und dann parallel verarbeitet werden müssen.

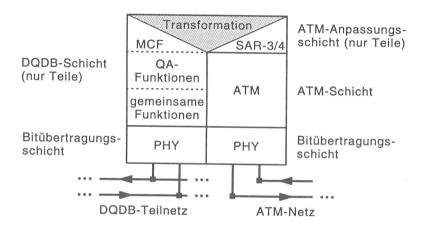


Bild 4.6: Protokollmodell der Netzkoppeleinheit (Variante 2)

Eine weitere Kopplungsmöglichkeit (Bild 4.6) ergibt sich aus der Tatsache, daß die für die Teilschicht SAR-3/4 des ATM-Protokollmodells definierte Protokolldateneinheit (SAR-3/4-PDU) identisch mit einer internen Dateneinheit (DM-PDU, Bild 2.8) der MCF-Teilschicht (Abschnitt 2.2.2.4) des DQDB-Protokollmodells ist. Diese Dateneinheiten können daher direkt zwischen den betrachteten Teilschichten ausgetauscht werden. In der Kopplungsschicht muß dazu zuvor die Protokollsteuerinformation dieser Dateneinheiten ausgewertet und mit den im jeweiligen Netz gültigen Werten versehen werden. Speziell die Kennzeichnung der einzelnen Segmente einer PDU muß auf einen zulässigen MID-Wert im anderen Netz umgesetzt werden, da die MID-Werte in den Netzen unterschiedlich verwaltet werden. Eine besondere Behandlung erfährt die erste SAR-3/4- oder DM-PDU eines Datagramms, da sie als einzige Dateneinheit die vollständigen Adressen der Sende- und Zielendeinrichtung enthält. Die Zieladresse wird bei dieser Kopplungsvariante in der

Kopplungsschicht ausgewertet, was nach dem Schichtungsprinzip erst auf der CLNAP-Schicht oder der höchsten internen MCF-Teilschicht durchgeführt werden kann. Diese Kopplungsvariante weicht damit vom Schichtungsprinzip ab. Die Auswertung der Adresse muß innerhalb der Übertragungsdauer einer Zelle bzw. eines Zeitschlitzes abgeschlossen werden, was besonders effizient implementierte schnelle Mechanismen erfordert [22]. Da die Datagramme in der Koppeleinheit nicht mehr zusammengesetzt werden und da eine geringere Anzahl von Schichten zu durchlaufen sind, ergibt sich gegenüber der oben beschriebenen Kopplungsmöglichkeit eine geringere Transferzeit der Daten durch die Netzkoppeleinheit. Der Speicherbedarf einer Realisierung dieser Kopplungsvariante reduziert sich ebenfalls, da die Zwischenspeicherung hier nur zum Ausgleich von Lastspitzen dient.

Die auf der ATM-Schicht bzw. der QA-Teilschicht durchzuführenden Funktionen sind für beide Kopplungsvarianten gleich. Im MAN DQDB ist für die verbindungslose Datenübermittlung ein reservierter Wert zur Identifizierung des virtuellen Kanals (VCI) im Kopffeld eines Zeitschlitzes definiert. Die Netzkoppeleinheit muß, wie eine normale DQDB-Station, alle Zeitschlitze, die diesen reservierten VCI-Wert enthalten, empfangen und an die MCF-Teilschicht zur weiteren Auswertung übergeben. Umgekehrt wird dieser VCI in jeden von der Netzkoppeleinheit ins DQDB-Netz auszusendenden Zeitschlitz geschrieben, der zur verbindungslosen Datenübermittlung verwendet wird.

Im B-ISDN muß zwischen der Netzkoppeleinheit und dem nächsten CL-Server auf der verbindungsorientiert arbeitenden ATM-Schicht ein virtueller Pfad oder Kanal eingerichtet werden. Der entsprechende Wert zur Identifizierung des Übertragungsabschnittes (VPI/VCI) wird dann im Kopffeld jeder Zelle verwendet, die zur verbindungslosen Datenübermittlung dient. Wie in Abschnitt 2.4.2.1 aufgeführt, können verschiedene Arten von Verbindungen auf der ATM-Schicht eingerichtet werden. Ein Kernproblem bei der Verwaltung der Verbindungen ist die Reservierung der zur verbindungslosen Datenübermittlung benötigten Bitrate auf den Übertragungsabschnitten, die einer Verbindung zugeordnet sind. Verschiedene Verfahren zur Reservierung der benötigten Bitrate werden in Abschnitt 4.5 vorgestellt.

# 4.4.3 Anschlußort der Netzkoppeleinheit am DQDB-Subnetz

In Abschnitt 2.2.3 wurde das prinzipielle Verhalten des Medienzugriffsprotokolls eines DQDB-Netzes bei verbindungsloser Datenübermittlung dargestellt. Aufgrund der gezeigten Abhängigkeit charakteristischer Leistungsgrößen einer Station von der Position am

Medium, soll an dieser Stelle der Einfluß des Anschlußortes der Netzkoppeleinheit am DQDB-Netz untersucht werden. Die Untersuchung wird, wie in Abschnitt 2.2.3, mit Hilfe einer Verkehrssimulation durchgeführt.

Für die Simulation wird ein DQDB-Teilnetz mit insgesamt 15 Stationen gewählt, die in konstanten Abständen an das Medium mit einer Gesamtlänge von 100 km angeschlossen sind. Eine Station repräsentiert dabei die Netzkoppeleinheit. Die von der DQDB-Schicht nutzbare Übertragungsrate eines Busses beträgt 149,76 Mbit/s. Für alle Stationen werden die zur Übermittlung aus höheren Schichten eintreffenden Dateneinheiten gemäß einem Poisson-Prozeß (Abschnitt 5.1.3.1) erzeugt. Eine Dateneinheit kann hier vollständig in einem DQDB-Zeitschlitz übertragen werden. Das Verkehrsangebot an allen Stationen bezogen auf die nutzbare Gesamtkapazität des Systems ist für die folgenden Untersuchungen zu 90% festgelegt. Für jede Station wird angenommen, daß sie auch mit Endeinrichtungen, die nur über das B-ISDN zu erreichen sind, kommuniziert. Die Kommunikationsbeziehungen zwischen einer Station am DODB und externen Endeinrichtungen werden dabei als symmetrisch vorausgesetzt, d.h. eine Station empfängt bzw. sendet Daten mit der gleichen Intensität von der Netzkoppeleinheit wie zur Netzkoppeleinheit. Für das Datenangebot aller externen Verkehrsbeziehungen wird ein fester Anteil am gesamten Verkehrsangebot angenommen. Der restliche Anteil repräsentiert das Angebot des Internverkehrs, d.h. aller Verkehrsbeziehungen zwischen Endeinrichtungen, die über Stationen am selben DQDB-Teilnetz angeschlossen sind. Die Dateneinheiten der DQDB-internen Kommunikationsbeziehungen von einer Station werden gleichförmig an alle anderen Stationen mit Ausnahme der Netzkoppeleinheit übermittelt.

Die Bilder 4.7 und 4.8 zeigen die mittlere Warte- und Transferzeit abhängig von der Stationsnummer und damit der Position der Station am Medium. Das Angebot aller externen Verkehrsbeziehungen beträgt 40% des gesamten Datenangebotes. Für die Ergebnisse in Bild 4.7 wurde die Netzkoppeleinheit an Stelle der Station 1 am Anfang eines Busses und für die Ergebnisse in Bild 4.8 an Stelle der Station 8 in der Mitte der Busse angeschlossen.

Wie in den Bildern dargestellt, wird das prinzipielle Verhalten durch den Anteil externer Verkehrsbeziehungen nur in geringem Maße verändert. Die Warte- und die Transferzeiten von Segmenten der Netzkoppeleinheit sind aufgrund des erhöhten Datenangebots an der Netzkoppeleinheit größer als für den im Abschnitt 2.2.3 untersuchten symmetrischen Fall, bei dem die Dateneinheiten an allen Stationen mit dem gleichen Angebot eintreffen. Ferner wird deutlich, daß eine Netzkoppeleinheit, die am Anfang eines Busses angeschlossen ist, die Leistungsfähigkeit anderer Stationen stärker beeinflußt als eine Netzkoppeleinheit, deren Anschlußort in der Mitte des Mediums liegt.

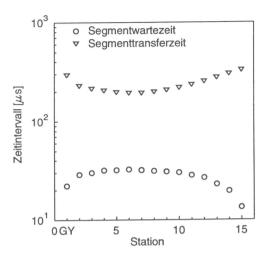


Bild 4.7: Mittlere Warte- und Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen (Netzkoppeleinheit an Position 1, 40% Externverkehr)

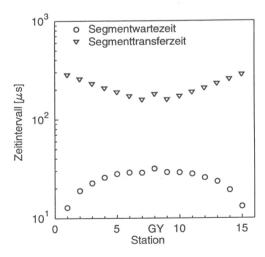


Bild 4.8: Mittlere Warte- und Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen (Netzkoppeleinheit an Position 8, 40% Externverkehr)

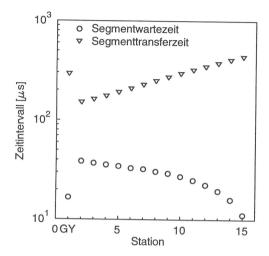


Bild 4.9: Mittlere Warte- und Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen (Netzkoppeleinheit an Position 1, 80% Externverkehr)

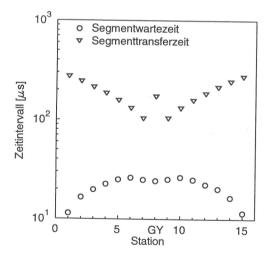


Bild 4.10: Mittlere Warte- und Transferzeit von Segmenten in Abhängigkeit vom Anschlußort der Stationen (Netzkoppeleinheit an Position 8, 80% Externverkehr)

Dieser Sachverhalt wird noch deutlicher, falls der Anteil externer Verkehrsbeziehungen am gesamten Datenangebot erhöht wird. Die Bilder 4.9 und 4.10 zeigen die entsprechenden Ergebnisse bei einem Anteil des Externverkehrs von 80%. Während sich das Verhalten bezüglich der Wartezeiten bei einer in der Mitte des Mediums angeschlossenen Netzkoppeleinheit durch die Erhöhung des Externverkehrs kaum ändert, wird das Verhalten anderer Stationen bei einer am Anfang eines Busses angeschlossenen Netzkoppeleinheit stark beeinflußt. Eine in der Mitte des Mediums angeschlossene Koppeleinheit verteilt die zu übermittelnden Dateneinheiten auf beide Busse und kann damit im Extremfall im Vergleich zu einer Netzkoppeleinheit am Anfang eines Busses die doppelte Übertragungskapazität benutzen. Für das gewählte System und die angenommenen Verkehrsbeziehungen ist aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse ein Anschluß der Netzkoppeleinheit in der Mitte des Mediums zu bevorzugen.

# 4.5 Bitratenzuteilung bei verbindungsloser Datenübermittlung

Zur verbindungslosen Datenkommunikation im künftigen B-ISDN werden auf der verbindungsorientiert arbeitenden ATM-Schicht virtuelle Pfade oder Kanäle zwischen den an der Kommunikation beteiligten Einrichtungen bereitgestellt (siehe Abschnitt 2.4.2.1). Zu diesen Einrichtungen zählen beispielsweise CL-Server, Netzkoppeleinheiten und direkt an das B-ISDN angeschlossenene Endeinrichtungen. Ein grundsätzliches Problem bei der Verwaltung der Pfade oder Kanäle ist die Zuteilung von Bitrate auf den einzelnen Übertragungsabschnitten. Die Verfahren zur Bitratenzuteilung sollen zum einen die vorhandene Kapazität auf den Übertragungsabschnitten durch die Überlagerung der Verkehrsströme mehrerer Kommunikationsbeziehungen möglichst effizient ausnutzen, zum anderen soll die geforderte Dienstgüte eingehalten werden.

Prinzipiell kann die benötigte Bitrate auf den zu einem virtuellen Pfad oder Kanal gehörenden Übertragungsabschnitten vor oder beim Beginn der Datenübertragung reserviert werden. Erfolgt die Reservierung vor der Übertragung, müssen die Dateneinheiten bis zur Bitratenzuteilung zwischengespeichert werden. Erfolgt die Reservierung gleichzeitig mit dem Beginn der Datenübertragung, kann die Einhaltung einer bestimmten Dienstgüte nicht gewährleistet werden. Unabhängig vom Zeitpunkt der Reservierung kann die Zuteilung von Bitrate während der Datenübertragung statisch bestehen oder dynamisch verändert werden. Auch Kombinationen der verschiedenen Reservierungsprinzipien sind möglich.

## 4.5.1 Bitratenreservierungsverfahren

Bevor ausführlich auf das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Reservierungsverfahren eingegangen wird, werden nachfolgend einige Vorschläge für Bitratenreservierungsverfahren für die verbindungslose Datenübermittlung im B-ISDN vorgestellt.

#### 4.5.1.1 "Bandwidth Advertising"-Verfahren

Die Verwendung des sogenannten "Bandwidth Advertising"-Verfahrens [48, 49] setzt eine vollständige Vermaschung aller Einrichtungen, die verbindungslos miteinander kommunizieren wollen, mittels virtueller Pfade voraus. Damit entsteht im B-ISDN ein "virtuelles Netz" für die verbindungslose Datenkommunikation. In den genannten Veröffentlichungen werden ausschließlich MAN/ATM-Netzkoppeleinheiten betrachtet und untereinander vermascht, d.h. im B-ISDN wird die indirekte Unterstützung verbindungsloser Dienste angenommen. Das Verfahren kann jedoch prinzipiell auch zwischen CL-Servern bzw. beliebigen Endeinrichtungen eingesetzt werden. Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist aufgrund der zur vollständigen Vermaschung notwendigen Anzahl virtueller Pfade auf eine geringe Anzahl von Einrichtungen beschränkt.

Das Verfahren basiert auf der Kenntnis des Lastzustandes des virtuellen Netzes in jeder Netzkoppeleinheit, d.h. in jeder Netzkoppeleinheit wird eine Tabelle geführt, in der die verfügbare Bitrate auf dem Weg zu jeder anderen Netzkoppeleinheit eingetragen ist. Die verfügbare Bitrate wird durch die noch nicht zugeteilte Bitrate (Restbitrate) des Übertragungsabschnitts bestimmt, der die kleinste Restbitrate auf dem Weg zur Zielnetzkoppeleinheit aufweist. Die Restbitrate eines Übertragungsabschnitts ergibt sich aus der maximalen Datenübertragungsrate der dazugehörigen Verbindungsleitung abzüglich der Summe der bereits den bestehenden virtuellen Pfaden und Kanälen zugeteilten Bitraten. Die ATM-Zellen, die über das B-ISDN übermittelt werden sollen, werden von der Netzkoppeleinheit sofort mit maximal der auf dem entsprechenden Weg verfügbaren Bitrate in das B-ISDN übertragen. Dabei werden diejenigen Zellen gekennzeichnet, deren Senden die bereits dem virtuellen Pfad zugeteilte Bitrate übersteigt. Die Kennzeichnung erfolgt mit Hilfe eines Verfahrens, das ursprünglich zur Quellflußkontrolle (Abschnitt 2.3.4.2) vorgesehen war. Dabei wird das Prioritätsbit im Kopffeld der Zellen (siehe Abschnitt 2.3.3.2) gesetzt, d.h. die so gekennzeichneten Zellen dürfen zur Auflösung von Hochlastsituationen im Netz aus dem Zellstrom entfernt und verworfen werden. Übersteigt der momentan übertragene Datenstrom die dem virtuellen Pfad zugeteilte Bitrate für ein bestimmtes Zeitintervall, wird zusätzliche Bitrate für den virtuellen Pfad angefordert. Wird umgekehrt die zugeteilte Bitrate für längere Zeit unterschritten, wird ein Teil der zugeteilten Bitrate auf dem virtuellen Pfad freigegeben. Verfahren zur Anforderung bzw. Freigabe von Bitrate auf einem virtuellen Pfad werden in den oben genannten Veröffentlichungen nicht beschrieben.

Für die Aktualisierung der Tabellen in den Netzkoppeleinheiten werden verschiedene Verfahren vorgeschlagen. Im ersten Verfahren sendet jede Netzkoppeleinheit periodisch eine spezielle Signalisierzelle auf allen virtuellen Pfaden zu den anderen Netzkoppeleinheiten aus. In den ATM-Vermittlungsstellen, durch die der jeweilige virtuelle Pfad verläuft, wird in diese Zelle die Restbitrate des abgehenden Übertragungsabschnitts eingetragen, falls ihr Wert geringer als der bereits in die Zelle eingetragene Wert ist. Empfängt eine Netzkoppeleinheit eine solche Signalisierzelle, die dann die minimale Restbitrate auf dem Weg zur jeweiligen Netzkoppeleinheit enthält, wird damit der Tabelleneintrag des entsprechenden virtuellen Pfades aktualisiert.

In einem weiteren Verfahren wird die verfügbare Bitrate eines Pfades in den Netzkoppeleinheiten bestimmt. Dazu senden die ATM-Vermittlungsstellen ebenfalls periodisch an alle Netzkoppeleinheiten Signalisierzellen, die den Wert der Restbitrate auf den Übertragungsabschnitten enthalten. Eine Netzkoppeleinheit ermittelt dann aus den in einem bestimmten Zeitintervall auf einem virtuellen Pfad empfangenen Werten das Minimum und aktualisiert damit den entsprechenden Tabelleneintrag.

Ein Vorteil des "Bandwidth Advertising"-Verfahrens ist die kurze Transferzeit der Daten in Richtung B-ISDN durch die Netzkoppeleinheit, da die Daten sofort mit der verfügbaren Bitrate übertragen werden dürfen. Problematisch dagegen erscheint die Einhaltung einer festgelegten Dienstgüte, falls eine nicht geringe Anzahl von Zellen aufgrund der Überschreitung der zugeteilten Bitrate gekennzeichnet werden müssen und damit im Netz verworfen werden dürfen. Ferner beschreiben die Tabelleneinträge nicht die aktuelle verfügbare Bitrate auf dem jeweiligen Pfad, da sich die Lastsituation mit hoher Wahrscheinlichkeit während der Laufzeit der Bitratenmeldungen zur Netzkoppeleinheit ändert.

## 4.5.1.2 Schnelle Reservierungsprotokolle

Als schnelle Reservierungsprotokolle (Fast Reservation Protocols, FRPs) [19] werden zwei Protokollvarianten, eine mit verzögerter Übertragung (Delayed Transmission, DT) der Daten und eine mit sofortiger Übertragung (Immediate Transmission, IT) der Daten vorgeschlagen. Die Protokolle können generell bei allen Verkehrsquellen bzw. -strömen, die ihre Bitrate in Stufen ändern, angewendet werden. Die folgende Beschreibung ist jedoch speziell auf die verbindungslose Kommunikation zwischen Netzkoppeleinheiten bzw. zwischen Netzkoppeleinheiten und CL-Servern ausgerichtet.

Beide Protokollvarianten setzen, wie das oben beschriebene Verfahren, die Existenz eines virtuellen Pfades oder Kanals zwischen den miteinander kommunizierenden Einrichtungen voraus. Kommen an der Netzkoppeleinheit Daten zur Übertragung über das B-ISDN an, müssen diese bei Verwendung des FRP/DT-Mechanismus zunächst zwischengespeichert werden. Die Netzkoppeleinheit sendet sofort eine Zelle, die die Reservierung einer bestimmten Bitrate enthält, zu einer FRP-Einheit am Eingang des ATM-Netzes. Die Reservierungszelle wird von der FRP-Einheit weiter auf dem virtuellen Pfad oder Kanal in Richtung der Zieleinrichtung übertragen. Jede Vermittlungsstelle prüft, ob die gewünschte Bitrate zur Verfügung steht. Fällt die Überprüfung negativ aus wird die Reservierungszelle verworfen. Im positiven Fall wird die gewünschte Bitrate auf dem jeweiligen Übertragungsabschnitt durch die Steuerung der Vermittlungsstelle reserviert und die Reservierungszelle weiter an die nächste Vermittlungsstelle gesendet. Erreicht die Reservierungszelle die Vermittlungsstelle, an welche die Zieleinrichtung angeschlossen ist, sendet diese Vermittlungsstelle eine Zelle mit einer Reservierungsbestätigung zurück zur FRP-Einheit. Die FRP-Einheit meldet die Reservierung an die Netzkoppeleinheit, die dann sofort mit der Übertragung beginnt. Da Bitratenreservierungen im Falle der Ablehnung verworfen werden, enthält jede Vermittlungsstelle sowie die FRP-Einheit eine Zeitüberwachungseinrichtung, mit der die Ablehnung erkannt werden kann. Mit demselben Mechanismus werden auch verlorengegangene Reservierungen oder Bestätigungen erkannt. In den Vermittlungsstellen wird, falls ein solcher Verlust erkannt wird, die bereits reservierte Bitrate wieder freigegeben, und die FRP-Einheit meldet entweder die Ablehnung an die Netzkoppeleinheit oder wiederholt den Reservierungsversuch. Die reguläre Freigabe von nicht mehr benötigter Bitrate geschieht analog zur Bitratenreservierung durch die Übertragung einer speziellen Zelle entlang des virtuellen Pfades oder Kanals.

Bei Verwendung des FRP/IT-Mechanismus werden die Daten nicht grundsätzlich in der Netzkoppeleinheit zwischengespeichert, sondern unmittelbar in den der Reservierungszelle folgenden Zellen übertragen. Die Zelle zur Freigabe der Bitrate wird nach der letzten Datenzelle gesendet. Kann eine Vermittlungsstelle die gewünschte Bitrate nicht zur Verfügung stellen, werden die Reservierungszelle, die dazugehörigen Datenzellen und die Zelle für die Freigabe der Bitrate verworfen. Diese Protokollvariante wird speziell für zeitkritische Anwendungen bzw. geringe zu übermittelnde Datenmengen, deren Übertragung wesentlich weniger Zeit als eine Reservierung in Anspruch nimmt, empfohlen.

Problematisch bei beiden Varianten, speziell bei verbindungsloser Datenkommunikation über eine Netzkoppeleinheit, ist die Bestimmung der Höhe der Bitratenreservierung. In der oben genannten Veröffentlichung wird angenommen, daß dieser Wert den momentan benötigten Maximalwert darstellt, der der FRP-Einheit von der Datenquelle bzw. Endeinrichtung mitgeteilt wird. Bei der verbindungslosen Datenkommunikation über LANs oder

MANs werden jedoch keine Mechanismen verwendet, mit Hilfe derer die momentan benötigte Bitrate der Netzkoppeleinheit mitgeteilt wird. Die momentan zusätzlich benötigte Bitrate kann in diesem Fall entweder durch einen konstanten Wert ersetzt werden, was eine stufenweise Bitratenerhöhung bewirkt, oder mittels einer Verkehrsmessung (siehe Abschnitt 4.5.3) ermittelt werden.

#### 4.5.1.3 "Bandwidth Tracking"-Verfahren

Auch das in [118] vorgestellte Verfahren, das dort zur Vernetzung entfernt installierter FDDI-HSLANs (Abschnitt 2.2.1) eingesetzt wird, basiert auf der vollständigen Vermaschung aller Netzkoppeleinheiten. In der Netzkoppeleinheit ist für jeden virtuellen Kanal zu einer anderen Netzkoppeleinheit ein Pufferspeicher vorhanden, in dem die FDDI-Datenpakete vor der Übertragung in das ATM-Netz zunächst zwischengespeichert werden. Abhängig vom Füllstand des Pufferspeichers, der durch die Festlegung von Schwellwerten bestimmt wird, werden in Signalisierzellen Bitratenanforderungen zur jeweiligen Zielnetzkoppeleinheit gesendet (Bandwidth Tracking). Jede Vermittlungsstelle, die die angeforderte Bitrate auf den von ihr verwalteten Übertragungsabschnitten reservieren kann, sendet diese Signalisierzelle weiter zur nächsten Vermittlungsstelle. Kann die angeforderte Bitrate nicht bereitgestellt werden, wird die Reservierungszelle verworfen und eine Ablehnungsmeldung zur anfragenden Netzkoppeleinheit zurückgeschickt. Dort werden dann alle FDDI-Datenpakete, die für dieselbe Zielnetzkoppeleinheit bestimmt sind, verworfen. Die Meldungen zur Freigabe von Bitrate werden ebenfalls in Signalisierzellen zur Zielnetzkoppeleinheit übermittelt. Für die Bitratenfreigabe werden zwei Mechanismen vorgeschlagen. Der erste Mechanismus löst bei jeder vollständigen Leerung des Pufferspeichers die Freigabe einer bestimmten Bitrate aus. Damit wird die ursprünglich zugeteilte Bitrate dem Netz wieder stufenweise zur Verfügung gestellt. Der zweite Mechanismus basiert auf einer Messung des von der Netzkoppeleinheit ins ATM-Netz übertragenen Verkehrs. Unterschreitet die gemessene Bitrate die zugeteilte Bitrate um einen festgelegten Anteil, so wird dieser Anteil freigegeben. Die Verkehrsmessung wird bei der ersten vollständigen Leerung des Pufferspeichers gestartet und, falls zusätzliche Bitrate angefordert werden muß, sofort gestoppt.

Problematisch bei dem hier beschriebenen Verfahren ist die Festlegung der Schwellwerte für den Füllstand der Pufferspeicher und die damit verbundenen Werte der anzufordernden Bitrate. Ein Nachteil des Verfahrens ist der hohe Speicherbedarf, der sich aus der Tatsache ergibt, daß die Daten, deren Übertragung die zugeteilte Bitrate übersteigen würde, für die Dauer der Reservierung zwischengespeichert werden müssen und eine Reservierung relativ

viel Zeit (> 100 ms) in Anspruch nimmt, da in jeder Vermittlungsstelle auf dem Weg zur Zielnetzkoppeleinheit die Verbindungssteuerung für die Zuteilung der Bitrate einbezogen wird.

#### 4.5.1.4 VBC-Verfahren

Das VBC-Verfahren (Variable Bandwidth Connection, VBC) [72] stellt, wie das vorherige Verfahren, Mechanismen zur Verfügung, mit denen die Bitrate einer bestehenden virtuellen Verbindung verändert werden kann. Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren wird hier eine virtuelle Verbindung zwischen den Endeinrichtungen (Netzkoppeleinheiten, usw.) erst aufgebaut, wenn Daten zur Übermittlung über das ATM-Netz anstehen, d.h. die Daten müssen immer vorläufig zwischengespeichert werden. Beim Verbindungsaufbau wird gleichzeitig eine bestimmte Bitrate beantragt. Die Erhöhung der Bitrate einer bereits bestehenden virtuellen Verbindung erfolgt analog zum "Bandwidth Tracking"-Verfahren: Die Höhe der Anforderungen hängt ebenfalls vom Füllstand des Pufferspeichers (Schwellwerte) ab. Die Freigabe der zugeteilten Bitrate erfolgt in Stufen. Bevor eine Bitratenstufe freigegeben wird, muß der Pufferspeicher während eines festgelegten Zeitintervalls vollständig leer sein. Mit der Freigabe des letzten Teils der Bitrate wird die Verbindung wieder abgebaut.

Wie beim oben vorgestellten "Bandwidth Tracking"-Verfahren, muß auch beim VBC-Verfahren eine große Speicherkapazität zur Zwischenspeicherung der Daten vorgesehen werden. Negativ auf den Speicherbedarf wirkt sich hier zusätzlich die Dauer des Verbindungsaufbaus aus, der aufgrund der Wegesuche mehr Zeit in Anspruch nimmt als eine reine Bitratenanforderung. Problematisch scheint wieder die Festlegung der vom Füllstand des Pufferspeichers abhängigen Bitratenstufen und der Verzögerungszeit für eine Bitratenfreigabe, da die Leistungsfähigkeit des Verfahrens stark von diesen Parametern beeinflußt wird.

# 4.5.2 Vorschlag für ein Bitratenreservierungsverfahren

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren [siehe 139] basiert auf der direkten Unterstützung von verbindungslosen Diensten im B-ISDN (Abschnitt 2.4.2). Für die dazu im B-ISDN eingesetzten CL-Server wird angenommen, daß sie durch virtuelle Pfade oder Kanäle untereinander verbunden sind. Netzkoppeleinheiten und andere verbindungslos kommunizierende Endeinrichtungen sind dabei ebenfalls durch virtuelle Pfade oder Kanäle mit einem CL-Server verbunden. Eine vollständige Vermaschung aller genannten Systeme

durch virtuelle Pfade oder Kanäle, die bei einigen der oben vorgestellten Verfahren vorausgesetzt wird, ist hier nicht erforderlich, da die CL-Server im B-ISDN Vermittlungsfunktionen für die verbindungslose Datenkommunikation zur Verfügung stellen.

Das Verfahren wird hier speziell zur Änderung der Bitrate auf dem virtuellen Pfad oder Kanal zwischen einem CL-Server und einer an ihm angeschlossenen Netzkoppeleinheit verwendet. Die Anforderung bzw. Freigabe von Bitrate erfolgt damit nur auf einem Teil des gesamten Weges. Grundsätzlich kann das Verfahren aber auch wiederholt auf allen weiteren Wegabschnitten zur Zieleinrichtung angewendet werden.

#### 4.5.2.1 Funktionsweise

Bei diesem Verfahren werden die Dateneinheiten, die an der Netzkoppeleinheit zur Übertragung über das B-ISDN ankommen, zunächst zwischengespeichert. Die Netzkoppeleinheit sendet, nachdem der Bitratenbedarf ermittelt und größer als die bereits zugeteilte Bitrate ist, eine Bitratenanforderung in einer Signalisierzelle zum nächsten CL-Server. Kann die angeforderte Bitrate dem virtuellen Pfad oder Kanal zugeteilt werden, sendet der CL-Server eine Bestätigung zurück an die Netzkoppeleinheit, die dann sofort mit der Übertragung der Zellen beginnt. Analog wird eine Ablehnung zurück an die Netzkoppeleinheit gesendet, falls die angeforderte Bitrate nicht reserviert werden kann. Der Verlust einer Anforderung oder Ablehnung wird in der Netzkoppeleinheit zeitlich überwacht. Wird ein Teil der zugeteilten Bitrate nicht mehr benötigt, d.h. ist der ermittelte Bitratenbedarf kleiner als die zugeteilte Bitrate, wird eine entsprechende Freigabemeldung an den CL-Server gesendet und die Sendebitrate der Netzkoppeleinheit verringert.

Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den Verfahren, die Reservierungsmeldungen auf einer Ende-zu-Ende-Basis austauschen, ergibt sich aus der hier stark reduzierten Antwortzeit auf diese Meldungen. Die Antwortzeit verringert sich zum einen durch die kurze Entfernung und damit geringe Laufzeit der Meldungen zum nächsten CL-Server. Zum anderen wird zunächst nur die Verbindungssteuerung in der Vermittlungsstelle, an die der CL-Server angegliedert ist, einbezogen und nicht die Verbindungssteuerung in jeder Vermittlungsstelle auf dem Weg zur Zieleinrichtung. Durch die kürzeren Antwortzeiten verringert sich auch der Speicherbedarf in der Netzkoppeleinheit erheblich.

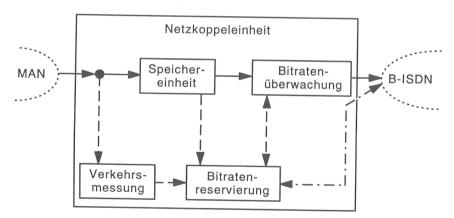
Kommunizieren vorwiegend zeitkritische Anwendungen über die Netzkoppeleinheit, ist optional auch die Möglichkeit vorgesehen, beim Senden die dem virtuellen Pfad oder Kanal bereits zugeteilte Bitrate zu überschreiten. Ähnlich wie beim "Bandwidth Advertising"-Verfahren (Abschnitt 4.5.1.1) werden dabei diejenigen Zellen gekennzeichnet, die die bereits auf dem virtuellen Pfad oder Kanal zugeteilte Bitrate übersteigen. Die markierten Zel-

len dürfen dann zur Auflösung von Hochlastsituationen im Netz verworfen werden. Die Einhaltung einer festgelegten Dienstgüte kann dann jedoch nicht mehr gewährleistet werden.

## 4.5.2.2 Funktionales Modell der Netzkoppeleinheit

Die zur Realisierung des vorgeschlagenen Verfahrens notwendigen Funktionsblöcke in der Netzkoppeleinheit (Bild 4.11) werden nachfolgend beschrieben. Dabei wird nur der Datenverkehr vom MAN DQDB in Richtung ATM-Netz betrachtet, da in der umgekehrten Richtung im DQDB-Netz keine Bitratenreservierung für verbindungslosen Datenverkehr durchgeführt wird.

Der Verkehrsstrom vom MAN wird unverändert durch eine Einheit zur Verkehrsmessung geleitet. In dieser Einheit wird versucht, möglichst präzise die momentane Bitrate des ankommenden Verkehrsstromes zu messen. Dazu können verschiedene Verfahren, von denen einige im nächsten Abschnitt beschrieben und diskutiert werden, eingesetzt werden. Jede neu gemessene Bitrate wird an die Einheit Bitratenreservierung gemeldet.



#### Bedeutungen:

- Daten
- —·—·Signalisiermeldungen
- — Interne Meldungen

Bild 4.11: Funktionales Modell der Netzkoppeleinheit

Danach werden die DQDB-Zeitschlitze in der Speichereinheit zwischengespeichert, um die in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Transformations- oder Durchreichefunktionen durchzuführen. Außerdem werden durch die Zwischenspeicherung vorübergehende Lastspitzen ausgeglichen. Zeitschlitze werden verworfen, falls der Speicher bereits vollständig gefüllt ist. Falls möglich, werden dann alle Zeitschlitze, die Segmente des selben Pakets beinhalten, ebenfalls verworfen. Ferner wird der momentane Füllstand des Speichers an die Einheit Bitratenreservierung zur weiteren Verwendung gemeldet.

Anschließend werden die Zellen mit der zugeteilten Bitrate auf dem virtuellen Pfad oder Kanal gesendet. Die Einhaltung der zugeteilten Bitrate wird dabei durch die Einheit Bitratenüberwachung kontrolliert. Zellen, mit deren Senden die zugeteilte Bitrate überschritten würde, werden verworfen. Optional können diese Zellen in der Einheit auch nur markiert werden, falls ein Überschreiten der zugeteilten Bitrate zulässig ist (siehe vorherigen Abschnitt).

Die Einheit Bitratenreservierung steuert und überwacht den Austausch der Reservierungsmeldungen mit dem nächsten CL-Server über einen Signalisierkanal. Der Bitratenbedarf, d.h. die anzufordernde bzw. freizugebende Bitrate, wird in dieser Einheit nach einem vorgegebenen Schema aus der gemessenen Bitrate berechnet. Das Berechnungsschema enthält die Reservierungsstrategie, nach der das Verfahren Bitrate anfordert bzw. freigibt. Das Senden einer Bitratenfreigabe kann zudem abhängig vom Füllstand des Speichers unterdrückt werden.

## 4.5.3 Ermittlung des Bitratenbedarfs

Mit den meisten der oben beschriebenen Verfahren wird die Bitrate eines virtuellen Pfades oder Kanals auf einem Übertragungsabschnitt beim Verbindungsaufbau zugeteilt oder während des Bestehens verändert. Vor der eigentlichen Reservierung oder Freigabe von Bitrate muß dazu der Bitratenbedarf des zu übertragenden Verkehrsstromes ermittelt werden. Die Ausführungen in den folgenden Abschnitten sind speziell auf die Ermittlung des Bitratenbedarfs in der betrachteten Netzkoppeleinheit für den Übertragungsabschnitt zum nächsten CL-Server ausgerichtet. Sie sind prinzipiell aber auch auf andere Anwendungen übertragbar.

Die Bedarfsermittlung basiert hier auf einer Messung der Bitrate des an der Netzkoppeleinheit ankommenden Verkehrsstromes. Eine Verkehrsmessung ist notwendig, da bei der verbindungslosen Datenkommunikation keine Mechanismen verwendet werden, mit Hilfe derer der Bitratenbedarf einer Kommunikationsbeziehung von den Endeinrichtungen aus mitgeteilt wird. Aus den Meßwerten wird zunächst ein Schätzwert für die anzufordende

Bitrate berechnet. Anschließend wird der Bitratenbedarf aus dem Schätzwert gemäß der gewählten Reservierungsstrategie abgeleitet. Verschiedene Reservierungsstrategien werden in Kapitel 5 untersucht und bewertet.

#### 4.5.3.1 Verkehrsmessung

Die momentane Bitrate des an der Netzkoppeleinheit eintreffenden Verkehrsstromes vom MAN DQDB in Richtung ATM-Netz wird für das vorgeschlagene Verfahren mittels einer periodischen Messung der Datenmenge abgeschätzt. Dazu werden die eintreffenden DQDB-Zeitschlitze in einem konstanten Zeitintervall gezählt, wobei die Zählung für jedes Zeitintervall von neuem beginnt. Der Zählerstand wird am Ende jedes Meßintervalls durch die Dauer des Meßintervalls dividiert und ergibt nach Umrechnung der Maßeinheiten die mittlere Bitrate des Verkehrsstromes für das Meßintervall. Diese mittlere Bitrate wird an Stelle der tatsächlichen momentanen Bitrate verwendet. Die Zählung erfaßt alle eintreffenden DQDB-Zeitschlitze, auch solche, die aufgrund von erkannten Fehlern oder eines bereits vollständig gefüllten Pufferspeicher verworfen werden.

Die Leistungsfähigkeit des gesamten Bitratenreservierungsverfahrens wird wesentlich durch die Wahl der Dauer des Meßintervalls beeinflußt. Um dies zu verdeutlichen, wird ihr Einfluß auf das Systemverhalten nachfolgend mit Hilfe einer Verkehrssimulation (siehe Abschnitt 5.1.4.1) untersucht. Das abstrakte Simulationsmodell zur Nachbildung der Funktionalität und des zeitlichen Verhaltens der Netzkoppeleinheit, die mit dem vorgeschlagenen Bitratenreservierungsverfahren arbeitet, ist in Abschnitt 5.2 beschrieben. Für das Modell und den Verkehrsstrom vom MAN in Richtung ATM-Netz wird der in Abschnitt 5.4 vorgegebene Satz Parameter angenommen. Der Bitratenbedarf auf dem Übertragungsabschnitt zum nächsten CL-Server wird proportional zur gemessenen mittleren Bitrate für das Meßintervall angenommen. Der Proportionalitätsfaktor beträgt dabei 1,1, d.h. der tatsächliche Bitratenbedarf wird geringfügig überschätzt. Als Schätzwert für die anzufordernde Bitrate wird für die folgende Untersuchung also direkt die gemessene Bitrate verwendet, d.h. das Berechnungsverfahren für den Schätzwert entfällt hier. Die Reservierungsstrategie ist hier auf die Ermittlung des Bitratenbedarfs proportional zum Schätzwert reduziert. Mit dieser Reservierungsstrategie wird erreicht, daß der Pufferspeicher in der Netzkoppeleinheit bei längerem konstanten Verkehrsaufkommen geleert wird und dann nahezu leer bleibt. Ist der ermittelte Bitratenbedarf größer (kleiner) als die bereits auf dem Übertragungsabschnitt zugeteilte Bitrate, wird eine Bitratenanforderung (-freigabe) an den nächsten CL-Server gesendet.

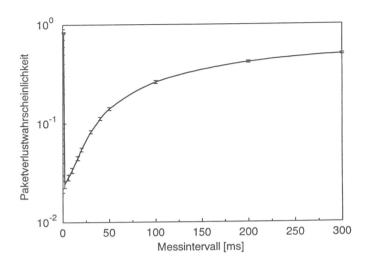


Bild 4.12: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Meßintervall

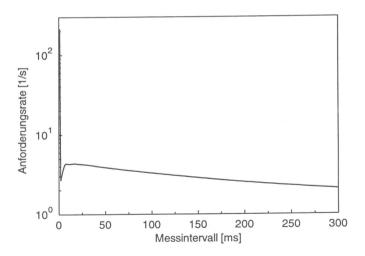


Bild 4.13: Anforderungsrate in Abhängigkeit vom Meßintervall

Aus Bild 4.12 wird deutlich, daß die Paketverlustwahrscheinlichkeit stetig ansteigt, falls das Meßintervall ab einer unteren Grenze von ca. 2 ms vergrößert wird. Dieser für Datenquellen typische konstante Paketankunftsabstand im Bereich von ms entsteht durch die Segmentierung großer Datenmengen. Je länger das Meßintervall gewählt wird, desto langsamer reagiert die Steuerung auf Bitratenschwankungen des ankommenden Verkehrsstromes. Außerdem werden Bitratenschwankungen, die nur kurz im Vergleich zum Meßintervall andauern, ausgemittelt. Unterschreitet das Meßintervall den minimalen Paketankunftsabstand einer Datenquelle von 2 ms, steigt die Verlustwahrscheinlichkeit stark an. Bei dieser Wahl des Meßintervalls wird eine Bitratenanforderung für jedes ankommende Paket ausgelöst. Ebenso wird die Bitrate nach dem vollständigen Empfang des Paketes an der Netzkoppeleinheit wieder freigegeben. Kommen, wie typisch für Datenquellen, mehrere Pakete hintereinander mit minimalem Paketankunftsabstand an, treten viele Paketverluste auf. Auch die Rate, mit der Bitratenanforderungen zum nächsten CL-Server gesendet werden, ist bei dieser Wahl des Meßintervalls, wie in Bild 4.13 dargestellt, sehr hoch. Die Anforderungsrate stellt ein Maß für die Belastung der Verbindungssteuerung in der Vermittlungsstelle, der der CL-Server zugeordnet ist, dar. Aus Bild 4.13 ist ferner ersichtlich, daß für sehr große Meßintervalle die Anforderungsrate nur noch schwach sinkt. Ein geeigneter Bereich, aus dem das Meßintervall gewählt werden sollte, ergibt sich aus dieser Untersuchung zu ca. 5-30 ms.

#### 4.5.3.2 Berechnungsverfahren

Mit den Berechnungsverfahren wird ein Schätzwert für die anzufordernde bzw. freizugebende Bitrate aus den Meßwerten berechnet. Grundsätzlich wird mit der Berechnungsvorschrift versucht, das Verhalten der Quelle möglichst genau zu bestimmen, um die Datenverluste wegen Überlauf des Pufferspeichers der Netzkoppeleinheit zu minimieren. Dazu werden nachfolgend Verfahren mit oder ohne "Gedächtnis" untersucht. Verfahren ohne "Gedächtnis" berücksichtigen zur Berechnung des Schätzwertes nur den aktuellen Meßwert. Im Gegensatz dazu berücksichtigen Verfahren mit "Gedächtnis" die Vorgeschichte des Bitratenverlaufs des Verkehrsstromes, d.h. zurückliegende Meßwerte werden in die Bedarfsberechnung einbezogen.

Als Beispiel für ein Verfahren ohne "Gedächtnis" wird der gemessene Wert unverändert als Schätzwert übernommen ("Mittelwert"-Verfahren), d.h. das eigentliche Berechnungsverfahren entfällt. Ein Verfahren mit "Gedächtnis" ist beispielsweise das EWMA-(Exponentially Weighted Moving Average)-Verfahren, das den i-ten Schätzwert  $B_{S,i}$  nach folgender Vorschrift aus dem i-ten Meßwert  $B_{M,i}$  und dem vorhergenden Schätzwert  $B_{S,i-1}$  berechnet:

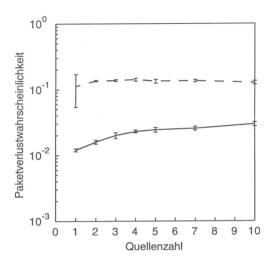


Bild 4.14: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot

Bitratenbedarf nach dem — Mittelwertverfahren

— – EWMA-Verfahren

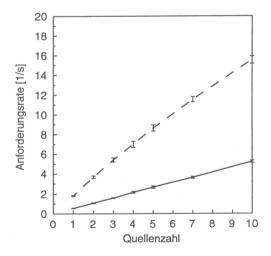


Bild 4.15: Anforderungsrate in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot

Bitratenbedarf nach dem ——— Mittelwertverfahren

— — - EWMA-Verfahren

$$B_{S,i} = (1 - \gamma)B_{M,i} + \gamma \cdot B_{S,i-1}$$
 (4.1)

Der Gewichtungsfaktor  $\gamma$  wird für die nachfolgende Untersuchung zu 0,5 festgelegt, d.h. der vorherige Schätzwert wird zur Hälfte für den neuen Schätzwert berücksichtigt. Der Bitratenbedarf auf dem Übertragungsabschnitt zum nächsten CL-Server wird, wie bei der obigen Untersuchung, proportional zum Schätzwert angenommen. Der Proportionalitätsfaktor beträgt dabei wieder 1,1, d.h. mit dieser Reservierungsstrategie wird der tatsächliche Bitratenbedarf überschätzt. Die Untersuchung wird mit Hilfe einer Verkehrssimulation (Abschnitt 5.1.4.1) durchgeführt. Dazu wird für das Simulationsmodell und den Verkehrsstrom vom MAN in Richtung ATM-Netz der gleiche Satz Parameter angenommen wie für die Untersuchung im vorherigen Abschnitt. Die Dauer des Meßintervalls wird zu 5 ms festgelegt. Das Verkehrsangebot wird durch die Anzahl der Verkehrsquellen, die gemeinsam den Verkehrsstrom vom MAN ins ATM-Netz erzeugen, variiert.

Bei Verwendung des EWMA-Verfahrens ergibt sich, wie in Bild 4.14 dargestellt, unabhängig vom Verkehrsangebot eine höhere Paketverlustwahrscheinlichkeit als bei Verwendung des "Mittelwert"-Verfahrens. Eine Begründung für dieses Verhalten liegt darin, daß das EWMA-Verfahren durch die Berücksichtigung zurückliegender Schätzwerte langsamer als das "Mittelwert"-Verfahren auf Bitratenänderungen des ankommenden Verkehrsstromes reagiert. Auch die Rate, mit der Bitratenanforderungen zum nächsten CL-Server gesendet werden, ist bei Verwendung des EWMA-Verfahrens höher als bei Verwendung des "Mittelwert"-Verfahrens, wie in Bild 4.15 dargestellt. Durch die Berücksichtigung der Vorgeschichte beim EWMA-Verfahren wird eine bestimmte Bitrate nach einem Bitratensprung des ankommenden Verkehrsstromes in mehreren Stufen und nicht, wie beim "Mittelwert"-Verfahren, auf einmal angefordert. Da das EWMA-Verfahren keine Vorteile gegenüber dem "Mittelwert"-Verfahren aufweist, wird bei allen folgenden Untersuchungen das "Mittelwert"-Verfahren verwendet.

## 4.5.3.3 Verzögerte Bitratenfreigabe

In der Netzkoppeleinheit kann optional die Freigabe von Bitrate mit Hilfe eines zusätzlichen Mechanismus verzögert werden. Abhängig vom Füllstand des Pufferspeichers wird das Senden von Bitratenfreigaben an den nächsten CL-Server unterdrückt. Dazu wird ein bestimmter Pufferfüllstand als Schwelle festgelegt. Unterschreitet der momentane Füllstand diese Schwelle, werden Bitratenfreigaben gesendet; befindet sich der Füllstand oberhalb dieser Schwelle, werden Bitratenfreigaben unterdrückt. Durch die Verwendung dieses Mechanismus werden die Daten bis zur Unterschreitung der Schwelle mit der zugeteilten Bitrate gesendet und der Pufferspeicher wird schneller geleert als bei sofortiger Bit-

ratenfreigabe. Der Einfluß der Wahl des Schwellwertes wird nachfolgend mit Hilfe einer Verkehrssimulation untersucht. Für das Simulationsmodell und den Verkehrsstrom vom MAN in Richtung ATM-Netz wird der gleiche Satz Parameter wie für die Untersuchung im vorherigen Abschnitt angenommen. Als Verfahren zur Berechnung des Schätzwertes wird das "Mittelwert"-Verfahren eingesetzt. Der Bitratenbedarf wird alle 5 ms und, wie oben, proportional zum Schätzwert (Proportionalitätsfaktor 1,1) bestimmt.

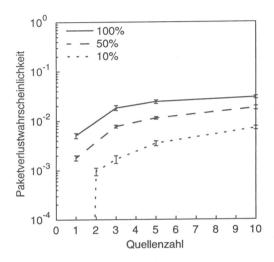


Bild 4.16: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot
Parameter: relative Schwellwerte

In Bild 4.16 ist die Paketverlustwahrscheinlichkeit abhängig vom Verkehrsangebot für verschiedene relative Schwellwerte dargestellt. Ein relativer Schwellwert von 50% bedeutet, daß oberhalb eines Füllstandes von 50% der Gesamtkapazität des Pufferspeichers Bitratenfreigaben unterdrückt werden. Für einen relativen Schwellwert von 100% ist der Mechanismus damit außer Kraft. Durch diesen Mechanismus kann, wie aus Bild 4.16 ersichtlich, mit einer geeigneten Schwellwertfestlegung die Paketverlustwahrscheinlichkeit verringert werden, was jedoch eine im Mittel größere zugeteilte Bitrate auf dem betrachteten Übertragungsabschnitt erfordert, da die bereits zugeteilte Bitrate verzögert freigegeben wird.

# Kapitel 5

# Systemanalyse und -verhalten

Nach den Betrachtungen zur Netzkopplung DQDB/B-ISDN ist dieses Kapitel der analytischen Untersuchung des vorgeschlagenen Verfahrens zur Bitratenreservierung bei verbindungsloser Datenkommunikation gewidmet. Die Grundlagen für die dazu entwickelten abstrakten Modelle und deren mathematische oder simulative Analysemethoden werden im ersten Abschnitt aufgearbeitet. Generell werden analytische Methoden eingesetzt, wenn eine Messung an einem realen System unter den gegebenen Randbedingungen nicht durchführbar ist. Anschließend werden die verwendeten Modelle beschrieben und eine verkehrstheoretische Analyse durchgeführt. Die letzten Abschnitte behandeln die Leistungsuntersuchung von Strategien zur Bitratenanforderung und zeigen den Einfluß verschiedener Systemparameter anhand einiger Fallstudien.

# 5.1 Grundlagen

Zur Leistungsbewertung und Dimensionierung von Kommunikationssystemen werden die Funktionalität und das zeitliche Verhalten des realen Systems mit Hilfe abstrakter Modelle nachgebildet. Meist können Funktionsabläufe bzw. Komponenten, die wenig Einfluß auf das zeitliche Verhalten besitzen, im Modell vereinfacht dargestellt oder vernachlässigt werden, wodurch sich der Aufwand der Untersuchung erheblich verringert. Ebenso werden durch die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens mit statistischen Methoden in der Realität vorhandene Abhängigkeiten zum Teil vernachlässigt. Diese Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens der zufallsabhängigen Größen im Modell geschieht mit Hilfe von stochastischen Prozessen für die im folgenden zunächst einige Grundlagen zusammengestellt werden.

#### 5.1.1 Stochastischer Punktprozeß

Ein stochastischer Punktprozeß beschreibt den Abstand zweier Ereignisse einer zeitbehafteten Modellkomponente durch eine Zufallsvariable T mit der Verteilungsfunktion

$$F(t) = P\{T \le t\}.$$
 (5.1)

Neben der Verteilungsfunktion wird oft auch die Verteilungsdichtefunktion

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{5.2}$$

angegeben.

Häufig werden die Verteilungsfunktionen durch Messungen gewonnen, wobei oft nur der Mittelwert und der Variationskoeffizient

$$c = \sqrt{\frac{\text{VAR}[T]}{\text{E}[T]^2}} = \sqrt{\frac{\text{E}[T^2]}{\text{E}[T]^2} - 1}$$
 (5.3)

der Zufallsvariablen ermittelt werden können. In diesem Fall muß die gesuchte Verteilungsfunktion durch eine bekannte Verteilungsfunktion approximiert werden, die denselben Mittelwert und Variationskoeffizienten besitzt. Die gewöhnlichen Momente sind wie folgt definiert:

$$E[T^n] = \int_{0}^{\infty} t^n f(t) dt.$$
 (5.4)

## 5.1.2 Modellierung von Verkehrsströmen

Eine reale Komponente, die im Modell durch einen stochastischen Prozeß nachgebildet wird, ist der vom System zu verarbeitende Verkehr. Dieser Verkehr kann durch den Verkehrsstrom einer Verkehrsquelle oder durch die Überlagerung der Verkehrsströme mehrerer Verkehrsquellen modelliert werden. Für das Modell einer Verkehrsquelle wird von einem bestimmten Kommunikationsdienst ausgegangen, für den das Verhalten bekannt ist, oder bei noch nicht implementierten Diensten vermutet werden kann. Dabei ist zu beachten, daß die ursprüngliche Charakteristik des Verkehrs auf dem Weg zur betrachteten Systemkomponente durch verschiedene Einflüsse möglicherweise starken Veränderungen unterworfen ist. Das Verkehrsverhalten von Datendiensten z.B. wird durch die Mechanis-

men höherer Protokollschichten, wie z.B. der Datenflußsteuerung oder Mechanismen zur Anpassung unterschiedlicher Paketgrößen, beeinflußt. Speziell für eine Netzkoppeleinheit können sich weitere Veränderungen der Verkehrscharakteristik durch die Mehrfachzugriffsprotokolle der angeschlossenen LANs ergeben. In vielen Fällen vereinfachen sich die Modelle für die Verkehrsströme wieder, falls das Verhalten einer einzelnen Quelle durch die Überlagerung einer sehr großen Zahl von Quellen vernachlässigbar wird.

Da nicht alle der angeführten Einflüsse bei der Modellierung des Verkehrs berücksichtigt werden können, muß je nach Anwendung des Modells entschieden werden, welche Effekte sich signifikant auf das Verhalten der betrachteten Systemkomponente auswirken.

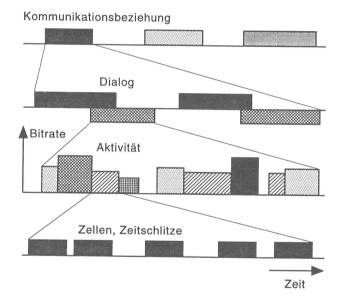


Bild 5.1: Hierarchisches Verkehrsmodell

Für eine ATM-Verkehrsquelle ist in Bild 5.1 ein allgemeines, hierarchisches Modell dargestellt. Die oberste Stufe ist die Ebene der virtuellen Verbindungen. Der Verkehr wird in dieser Ebene durch die Dauer und den Abstand der einzelnen virtuellen Verbindungen gekennzeichnet. Typische Werte für die Verbindungsdauer liegen im Bereich von Minuten bis zu Stunden. Bei der hier untersuchten verbindungslosen Datenkommunikation kann diese Ebene als Ebene der Kommunikationsbeziehungen angesehen werden. Damit kann dieses Modell analog für eine DQDB-Verkehrsquelle verwendet werden.

Die nächste Ebene, die Dialogebene, stellt das Verhalten einer Quelle während einer Verbindung oder Kommunikationsbeziehung dar. Bei der interaktiven Datenkommunikation beispielsweise ergibt sich diese Ebene durch den Wechsel von Benutzeranfragen und Systemantworten.

Das Quellenverhalten innerhalb einer Anfrage bzw. Antwort beschreibt die sogenannte Aktivitätsebene. Dieses Ein/Aus-Verhalten kennzeichnet vor allem Datendienste, deren Phasendauern von der übertragenen Datenmenge bestimmt werden.

Die unterste Ebene dieses Modells ist die Zellebene, d.h. die Ebene der ATM-Zellen oder DQDB-Zeitschlitze. Typische Zeiten für die Zelldauern liegen im Bereich von Mikrosekunden bis zu Millisekunden für die Zellabstände.

Jede der beschriebenen Ebenen kann nun als stochastischer Prozeß mit den für die betrachtete Ebene charakteristischen Zeitintervallen im Modell repräsentiert werden. Als statistische Kenngrößen für das Verhalten der modellierten Verkehrsströme werden meist die Verteilungen der Zwischenankunftsabstände bzw. deren Momente angegeben.

#### 5.1.3 Modelle für Datenverkehrsströme

Dieser Abschnitt beschreibt kurz die für die Untersuchungen verwendeten Quellenmodelle, welche die dem Systemmodell von außen angebotenen Anforderungen (Datenpakete, Rufe usw.) erzeugen.

#### 5.1.3.1 Poisson-Prozeß

Der Poisson-Prozeß ist einer der wichtigsten Ankunftsprozesse in der Nachrichtenverkehrstheorie, da er eine gute Näherung für den Ankunftsprozeß darstellt, der sich aus der Überlagerung sehr vieler unabhängiger Verkehrsquellen ergibt [74]. Im kontinuierlichen Zeitbereich ist er der einzige Prozeß, der die Eigenschaft der Gedächtnisfreiheit besitzt. Diese Eigenschaft des Poisson-Prozesses macht mathematische Analysen oft erst möglich oder vereinfacht sie erheblich. Bei einem gedächtnisfreien Prozeß hängt der zukünftige Prozeßverlauf nur vom momentanen Zustand und nicht von seiner Vorgeschichte ab. Dies bedeutet, daß ein externer Beobachter, der den Ankunftsprozeß an zufälligen Zeitpunkten betrachtet, als Verteilung des jeweiligen Restintervalls zur nächsten Ankunft wieder die vorgegebene Ankunftsabstandsverteilung erhält. Die Eigenschaft der Gedächtnisfreiheit ergibt sich mit einer negativ-exponentiell verteilten Ankunftsabstandsverteilung. Der Poisson-Prozeß hat folgende charakteristische Größen:

$$F_A(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{5.5}$$

$$f_A(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{5.6}$$

$$E[T_A] = \frac{1}{\lambda} \tag{5.7}$$

$$c_A = 1. (5.8)$$

#### 5.1.3.2 Modell für eine sporadische Quelle

Ein weiteres häufig verwendetes Quellenmodell ist die zweiphasige sporadische Quelle, die in der Literatur als Modell für Dienste wie paketierte Sprache mit Pausenunterdrückung [50, 71, 143], interaktive Standbildübertragung [61] und verbindungslose Datenübertragung [49, 64, 65] verwendet wurde. Es bildet gut den büschelförmigen Charakter paketierter Datenverkehre auf der Dialog- bzw. Aktivitätsebene oder den Vorgang des Aufteilens von Datenpaketen in kleinere Dateneinheiten (Zellen, Zeitschlitze) auf der Zellebene nach. Dieses Quellenmodell erzeugt während der Aktivitätsphasen Datenpakete konstanter Größe mit ebenfalls konstantem Zwischenankunftsabstand. In einer Aktivitätsphase wird mindestens ein Datenpaket erzeugt, in der darauffolgenden Pausenphase wird kein Datenpaket generiert. Der dem Modell entsprechende Ankunftsprozeß ist beispielhaft in Bild 5.2 dargestellt.

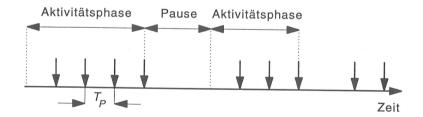


Bild 5.2: Ankunftsprozeß einer sporadischen Quelle

Meist wird die Anzahl der erzeugten Datenpakete pro Aktivitätsphase als geometrisch und die Pausendauer als negativ-exponentiell verteilt angenommen. Die Dauer der Aktivitätsphase kann damit wiederum näherungsweise als negativ-exponentiell verteilt angenommen werden. Durch diese Annahmen ist der entstehende Ankunftsprozeß ein Erneuerungsprozeß, d.h. die Zwischenankunftsabstände sind unabhängig voneinander und gehorchen der gleichen Verteilung. Der Ankunftsprozeß kann dann durch folgende drei Parameter vollständig beschrieben werden: die mittlere Pausendauer E[S], die mittlere Anzahl von

Datenpaketen pro Aktivitätsphase  $E[N_p]$  und den konstanten Zwischenankunftsabstand  $T_p$  während der Aktivitätsphase. Für diesen Fall ist die zweiphasige sporadische Quelle in Bild 5.3 symbolisch dargestellt.

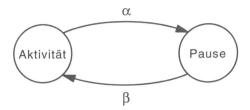


Bild 5.3: Symbolische Darstellung einer sporadischen Quelle

In der Darstellung sind zusätzlich die mittleren Raten  $\alpha$  für das Verlassen des aktiven Zustands und  $\beta$  für das Verlassen des Pausenzustands angegeben, die sich aus obigen Parametern wie folgt ergeben:

$$\alpha = \frac{1}{E[N_P] \cdot T_P}, \quad \beta = \frac{1}{E[S]} \quad . \tag{5.9}$$

Andere typische Größen wie der mittlere Ankunftsabstand, der dazugehörige Variationskoeffizient und der Burstiness-Faktor *B* lassen sich durch Umrechnung angeben:

$$E[T_A] = \frac{E[N_P] \cdot T_P + E[S]}{E[N_P]}$$
 (5.10)

$$c_A = \frac{\mathbb{E}[S]}{\mathbb{E}[T_A]} \sqrt{1 - \left(\frac{\mathbb{E}[N_P] - 1}{\mathbb{E}[N_P]}\right)^2}$$
 (5.11)

$$B = \frac{\mathrm{E}[T_A]}{T_P} \ . \tag{5.12}$$

Der Burstiness-Faktor stellt dabei ein Maß für die Büschelförmigkeit des Ankunftsprozesses dar und ist allgemein definiert als das Verhältnis von maximaler Ankunftsrate zu mittlerer Ankunftsrate.

### 5.1.4 Verkehrsmodelle und Analysemethoden

Dieser Abschnitt beschreibt die Grundlagen der für die Untersuchung des Systemverhaltens verwendeten Verkehrsmodelle bzw. deren Analysemethoden.

#### 5.1.4.1 Verkehrssimulation

Die Anwendung der Methode der Verkehrssimulation zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Kommunikationssystemen beruht auf zweierlei Gründen:

- 1. Das Systemmodell enthält Mechanismen, aufgrund deren Komplexität keine rein mathematische Analyse möglich ist.
- Ein exaktes oder approximatives analytisches Verfahren soll durch die Verkehrssimulation validiert werden.

Bei der Verkehrssimulation wird das abstrakte Modell des realen Systems, das Verkehrsmodell, mit Hilfe von komplexen Datenstrukturen und Programmteilen auf einem Digitalrechner abgebildet. Neben den Mechanismen und Komponenten des Verkehrsmodells werden ebenso die Anforderungen von außen an das System auf Datenstrukturen abgebildet. Die Zeitintervalle zwischen den Ereignissen (Ankunft einer Anforderung, Ende einer laufenden Bedienung usw.) eines zeitbehafteten Vorgangs werden dabei gemäß ihrer statistischen Eigenschaften mit Hilfe von Pseudozufallszahlen erzeugt; die Ereigniszeitpunkte werden zeitlich geordnet in einem Ereigniskalender gespeichert.

Die Verwaltung der so gespeicherten Ereignisse ist die zentrale Aufgabe eines Simulationsprogramms. Die vorgeplanten Ereignisse werden einzeln nacheinander aus dem Kalender ausgetragen und abgearbeitet. Beim Austrag werden jeweils der aktuelle Zeitpunkt auf der simulierten Zeitachse, die Systemzeit, aktualisiert und sämtliche Aktionen ausgeführt, die bis zu diesem Zeitpunkt den Systemzustand verändern. Dabei werden im allgemeinen Folgeereignisse generiert und wieder in den Ereigniskalender eingetragen. Speziell die Folgeereignisse externer Anforderungen müssen vorgeplant werden, um den Fortgang des Simulationslaufes zu sichern. Danach wird die Zeit zum nächsten Ereignis, in der sich der Systemzustand nicht ändert, übersprungen. Dieses Verfahren der Verkehrssimulation wird als zeittreue Simulation (engl. Event-by-Event Simulation) bezeichnet [108].

Während des Programmablaufs werden statistische Messungen der Leistungsgrößen durchgeführt, wie z.B. Wartezeiten, Speicherbelegung eines Wartespeichers, Verlustwahrscheinlichkeiten bei begrenzten Wartespeichern usw. Dabei können Schätzwerte beliebiger Momente und Verteilungsfunktionen der Meßgrößen ermittelt werden. Um die Aussagesicher-

heit der Simulationsergebnisse beurteilen zu können, wird ein Simulationslauf in mehrere Teiltests unterteilt. Die Ergebnisse aus den Messungen eines Teiltests werden als unabhängiges Ergebnis einer Stichprobe angenommen. Am Ende des Simulationslaufes wird aus diesen Stichproben unter Anwendung statistischer Testverfahren ein Vertrauensintervall zur gemessenen Größe für eine vorgegebene Aussagesicherheit bestimmt. Um eine hohe Aussagesicherheit bzw. kleine Vertrauensintervalle zu erzielen, muß die Streuung der Teiltestergebnisse mit vertretbarem Aufwand minimiert werden, d.h. die Anzahl der simulierten Ereignisse muß ausreichend groß gewählt werden. Diese Tatsache führt bei simulativen Leistungsuntersuchungen komplexer Modelle zu sehr hohen Rechenzeiten.

Bei der Simulation stationärer Vorgänge ist zusätzlich vor den Teiltests, in denen gemessen wird, eine Vorlaufphase notwendig, damit das simulierte System einen eingeschwungenen Zustand erreicht.

Durch die hohen Rechenzeiten sind simulative Methoden zur Untersuchung paketvermittelnder Hochgeschwindigkeitsnetze grundsätzlich in ihrer Anwendbarkeit beschränkt. Zum einen ist durch die Differenz in den typischen Zeitmaßstäben des in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten hierarchischen Modells einer Verkehrsquelle eine Simulation aller Ebenen zusammen nicht möglich, da z.B. auf Paket- bzw. Zeitschlitzebene nur wenige Sekunden Echtzeit in einem Programmlauf simuliert werden können, wobei zur Nachbildung des Benutzerverhaltens mehrere Minuten Echtzeit simuliert werden müßten. Daher werden unterschiedliche Simulationsprogramme für die einzelnen Zeitbereiche verwendet, wobei jeweils die typischen Eigenschaften der Ebene ober- bzw. unterhalb der betrachteten Ebene meist nur näherungsweise berücksichtigt werden können.

Zum anderen wird der Einsatz simulativer Methoden durch den Bereich, in dem sich manche charakteristische Größen befinden, weiter eingeschränkt. Vor allem die Verlustwahrscheinlichkeiten von Paketen bzw. Zellen, für die Werte im Bereich von  $10^{-5}$  bzw.  $10^{-10}$  gewünscht werden, können mit vertretbarem Aufwand nicht mehr simulativ ermittelt werden. Dazu wären extrem große Ereigniszahlen notwendig, um eine ausreichende Aussagesicherheit für diese seltenen Ereignisse zu garantieren.

Auch durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Rechner kann dieses grundsätzliche Problem nicht gelöst werden. Allenfalls neue Methoden zur Simulation seltener Ereignisse [60] versprechen Abhilfe, sind aber zum heutigen Zeitpunkt noch nicht allgemein einsatzfähig. Falls möglich, ist daher eine mathematische Analyse, die mit Hilfe einer Simulation validiert wurde, bei umfangreichen Untersuchungen einer Verkehrssimulation vorzuziehen.

#### 5.1.4.2 UAS-Modell

Aufgrund der oben aufgeführten Beschränkungen simulativer Methoden wird in dieser Arbeit auf eine approximative analytische Methode zur Berechnung von charakteristischen Systemgrößen zurückgegriffen. Das hier verwendete analytische Modell ist das sogenannte UAS-Modell (Uniform Arrival and Service) [4, 50, 104, 149], das in der Literatur z.T. auch als Fluid-Flow-Modell bezeichnet wird. Die Grundidee der Fluid-Flow-Approximation liegt in der Beschreibung der Informationsströme als kontinuierliche, nichtpaketierte Datenströme. Bei dieser Näherung wird also die Unterteilung des ankommenden bzw. abgehenden Verkehrsstromes in Pakete oder Zellen vernachlässigt.

Wird der stochastische Ankunftsprozeß durch eine oder mehrere sporadische Verkehrsquellen (siehe Abschnitt 5.1.3.2) erzeugt, eignet sich das UAS-Modell gut zur Beschreibung des Systemverhaltens auf der Aktivitätsebene (siehe Abschnitt 5.1.2). In Bild 5.4 ist ein Fluid-Flow-Modell inklusive der Verkehrsquellen beispielhaft dargestellt.

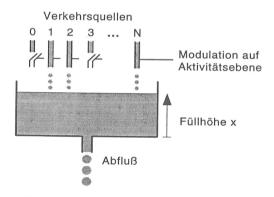


Bild 5.4: Fluid-Flow-Modell

Es ist ein Gefäß mit der maximalen Füllhöhe s abgebildet, das dem endlichen Pufferspeicher eines realen Systems entspricht. N unabhängige sporadische Verkehrsquellen füllen das Gefäß während ihrer Aktivitätsphase mit konstanter Zuflußrate. Die Abflußrate  $\mu$  sei vorläufig zur Beschreibung der prinzipiellen Vorgehensweise als konstant angenommen.

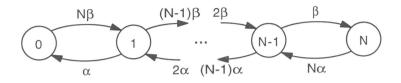


Bild 5.5: Zustandsprozeß der Quellenaktivität

Falls die Dauer der Aktivitäts- und Pausenphasen als negativ-exponentiell verteilt angenommen wird, kann der Zustandsprozeß für die Anzahl sich gleichzeitig in der Aktivitätsphase befindlicher Verkehrsquellen durch einen eindimensionalen Geburts- und Sterbeprozeß (siehe Bild 5.5) [150] modelliert werden. Die Übergangsraten für die Zustandsübergänge, die beim Geburts- und Sterbeprozeß nur zwischen Nachbarzuständen auftreten, sind:

$$q_{i,i+1} = (N-i)\beta, \qquad i = 0, 1, ..., N-1$$
 (5.13)

$$q_{i,i-1} = i\alpha,$$
  $i = 1, 2, ..., N.$  (5.14)

Die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten für i gleichzeitig aktive Quellen ergeben sich dann aus der Binomialverteilung zu:

$$p_i = {N \choose i} \left(\frac{\beta}{\beta + \alpha}\right)^i \left(1 - \frac{\beta}{\beta + \alpha}\right)^{N-i}, \quad i = 0, 1, ..., N.$$
 (5.15)

Definiert man nun die Wahrscheinlichkeit  $P_i(t, x)$ ,  $0 \le i \le N$ ,  $0 \le x \le s$  als Wahrscheinlichkeit, daß die Füllhöhe x zur Zeit t nicht überschritten wird und sich i Quellen zur Zeit t in der Aktivitätsphase befinden, so läßt sich für das kleine Zeitintervall  $\Delta t$  die Chapman-Kolmogoroff-Gleichung [103, 107] wie folgt anwenden:

$$\begin{split} \mathbf{P}_{\mathbf{i}}(t+\Delta t,x) &= q_{i-1,i} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{P}_{\mathbf{i}-1} \Big( t, x - \Big( (i-1) \cdot \lambda_p - \mu \Big) \Delta t \Big) \\ &+ q_{i+1,i} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{P}_{\mathbf{i}+1} \Big( t, x - \Big( (i+1) \cdot \lambda_p - \mu \Big) \Delta t \Big) \\ &+ \Big( 1 - \Big( q_{i,i+1} + q_{i,i-1} \Big) \Delta t \Big) \cdot \mathbf{P}_{\mathbf{i}} \Big( t, x - \Big( i \cdot \lambda_p - \mu \Big) \Delta t \Big) \;, \end{split}$$
 (5.16)

wobei  $\lambda_p$  = 1 /  $T_p$  die Ankunftsrate einer sporadischen Quelle in der Aktivitätsphase ist.

Nach Umformung und Bildung des Grenzübergangs für  $\Delta t \to 0$  ergibt sich folgende partielle Differentialgleichung:

$$\frac{\partial P_{i}(t,x)}{\partial t} + \left(i \cdot \lambda_{p} - \mu\right) \frac{\partial P_{i}(t,x)}{\partial x} = q_{i-1,i} \cdot P_{i-1}(t,x) + q_{i+1,i} \cdot P_{i+1}(t,x) - \left(q_{i,i+1} + q_{i,i-1}\right) P_{i}(t,x).$$
(5.17)

Definiert man  $F_i(x)$  als die entsprechenden zeitunabhängigen Verteilungsfunktionen für den stationären Fall, können diese nach dem Grenzübergang  $t \to \infty$  wie folgt angegeben werden:

$$(i \cdot \lambda_p - \mu) \frac{dF_i(x)}{dx} = q_{i-1,i} \cdot F_{i-1}(x) + q_{i+1,i} \cdot F_{i+1}(x)$$

$$- (q_{i,i+1} + q_{i,i-1}) F_i(x) .$$
(5.18)

In Matrixform dargestellt lautet das gesamte Differentialgleichungssystem

$$F'(x) = R^{-1}Q^T F(x)$$
 (5.19)

wobei

$$F(x) = (F_0(x), F_1(x), ..., F_N(x))^T,$$
 (5.20)

$$R = dg(r_0, r_1, ..., r_N)$$
 (5.21)

mit

$$r_i = i \cdot \lambda_p - \mu, \quad i = 0, 1, ..., N$$
 (5.22)

ist und die Matrix Q aus den Elementen der Gleichungen (5.13) und (5.14) gebildet wird.

An dieser Stelle muß der Fall  $r_u=0$  erwähnt werden, d.h. der Informationszufluß aus gleichzeitig u Quellen in der Aktivitätsphase entspricht exakt dem Abfluß. Für das Differentialgleichungssystem bedeutet dies lediglich, daß die Funktion  $F_u(x)$  eine Linearkombination aus den Funktionen  $F_{u-1}(x)$  und  $F_{u+1}(x)$  darstellt (siehe Gleichung (5.18)). Aus den Matrizen  $R^{-1}$  und  $Q^T$  kann dann die (u+1)-te Zeile entfernt werden und das Gleichungssystem reduziert sich um eine Gleichung.

Die allgemeine Lösung dieses Differentialgleichungssystems hat folgende Form:

$$F_i(x) = \sum_{k=0}^{N} a_k \cdot \{\Phi_k\}_i \cdot e^{z_k x}, \quad 0 \le x < s.$$
 (5.23)

Dabei ist  $z_k$  ein Eigenwert der Matrix  $R^{-1}Q^T$  und  $\Phi_k$  der dazugehörige rechte Eigenvektor mit seinen Komponenten  $\{\Phi_k\}_i$ . Die Faktoren  $a_k$  lassen sich mit Hilfe der Randbedingungen des Fluid-Flow-Modells bestimmen. Eine Randbedingung ergibt sich für den Fall, daß der Informationszufluß größer ist als der Abfluß, d.h.  $r_i > 0$ . Unter dieser Voraussetzung kann das Gefäß nicht leer sein. Die erste Randbedingung lautet dann

$$F_i(0) = 0. (5.24)$$

Im umgekehrten Fall, d.h. der Informationszufluß ist kleiner als der Abfluß, bzw.  $r_i < 0$ , kann das Gefäß nicht vollständig gefüllt sein. Daraus läßt sich folgende weitere Randbedingung ableiten:

$$F_i(s^-) = p_i, \quad F_i(s^-) = \lim_{x \to s} F_i(x).$$
 (5.25)

Mit Gleichung (5.23) eingesetzt in die Gleichungen (5.24) und (5.25) entsteht ein Gleichungssystem mit N+1 Gleichungen zur Bestimmung der Faktoren  $a_k$ .

Bei den Verteilungsfunktionen  $F_i(x)$  ist zu beachten, daß sie an den Stellen x=0 oder x=s Sprünge aufweisen können. Für  $r_i < 0$  existiert eine Wahrscheinlichkeit größer Null, daß der Pufferspeicher leer ist, ebenso existiert für  $r_i > 0$  eine Wahrscheinlichkeit größer Null, daß der Pufferspeicher vollständig gefüllt ist.

Eine geschlossene Lösung für die Eigenwerte  $z_k$ , die Eigenvektoren  $\Phi_k$  und die Faktoren  $a_k$  ist für ein Fluid-Flow-Modell mit unbegrenztem Pufferspeicher in Anick et al. [4] gegeben. Für ein Modell mit endlichem Pufferspeicher [149] ist eine vollständig geschlossene Lösung nicht mehr praktikabel, und es muß auf numerische Verfahren zurückgegriffen werden.

Die Berechnung charakteristischer Systemgrößen aus den ermittelten Verteilungsfunktionen  $F_i(x)$  sowie die Angabe weiterer Kenngrößen erfolgt in Abschnitt 5.3.4 für ein in dieser Arbeit verwendetes spezielles UAS-Modell.

# 5.2 Modellierung der Netzkoppeleinheit

Nachdem die Grundlagen der verwendeten Analysemethoden aufgearbeitet sind, wird in diesem Abschnitt aus dem funktionalen Modell der Netzkoppeleinheit (Abschnitt 4.5.2.2), die das vorgeschlagene Bitratenreservierungsverfahren verwendet, ein Simulationsmodell (Bild 5.6) abgeleitet. Da das Reservierungsverfahren auf virtuelle Pfade oder Kanäle im ATM-Netz beschränkt ist, wird im Simulationsmodell, wie im funktionalen Modell, nur der Datenverkehr vom MAN DQDB in Richtung ATM-Netz betrachtet.

Der Datenverkehr vom MAN DQDB wird durch die Überlagerung der Verkehrsströme von N voneinander unabhängigen sporadischen Quellen (Abschnitt 5.1.3.2) nachgebildet. Dabei wird der Einfluß des "Distributed Queueing"-Medienzugriffsprotokolls auf die Charakteristik des Verkehrsstromes nicht explizit berücksichtigt. Die Dauer der Aktivitätsund Pausenphase wird als negativ-exponentiell verteilt angenommen. Eine sich in der Aktivitätsphase befindende Quelle erzeugt Pakete konstanter Länge mit konstantem Zwischenankunftsabstand. Die einzelnen Pakete werden hintereinander mit der Übertragungsrate des DQDB-Mediums in den Pufferspeicher geschrieben.

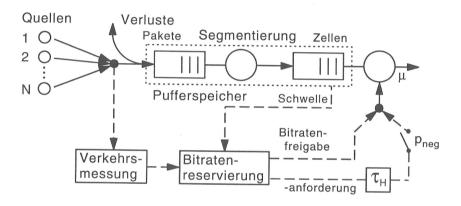


Bild 5.6: Simulationsmodell der Netzkoppeleinheit

Der Pufferspeicher besitzt eine endliche Kapazität und ist in zwei Bereiche unterteilt, wobei die Grenze zwischen beiden Teilen dynamisch verschoben wird. Im einen Teil werden die ankommenden Pakete zunächst zwischengespeichert. Ankommende Pakete, die nicht mehr in den Pufferspeicher aufgenommen werden können, werden verworfen. Nach der Segmentierung und Umwandlung eines Paketes in ATM-Zellen werden die Zellen dem zweiten Bereich des Pufferspeichers zugeordnet. Die dargestellte Bedieneinheit zwischen den beiden Pufferbereichen repräsentiert neben der Dauer für die Segmentierung auch die Dauer der notwendigen Transformations- oder Durchreichefunktionen der Netzkoppeleinheit.

Die momentane Bitrate des an der Netzkoppeleinheit eintreffenden Verkehrsstromes wird mit Hilfe einer periodischen Verkehrsmessung gemäß Abschnitt 4.5.3.1 ermittelt. Die Meßwerte werden zur Ermittlung des Bitratenbedarfs an die Modellkomponente Bitratenreservierung weitergeleitet. Wie im funktionalen Modell wird in dieser Modellkomponente entschieden, ob zusätzliche Bitrate angefordert werden muß oder Bitrate freigegeben wer-

den kann. Eine Bitratenanforderung kann optional abhängig von einer Schwelle im Pufferspeicher unterdrückt werden (siehe Abschnitt 4.5.3.3). Wird eine Bitratenfreigabe ermittelt, so wirkt sich diese Freigabe unmittelbar auf die Bedienrate  $\mu$  der Bedieneinheit, die den virtuellen Pfad oder Kanal von der Netzkoppeleinheit zum nächsten CL-Server darstellt, aus. Eine Anforderung von zusätzlicher Bitrate wird um eine als konstant angenommene Dauer  $\tau_H$  verzögert. Durch die Verzögerung wird die gesamte Antwortzeit des ATM-Netzes auf eine Bitratenanforderung, d.h. die Laufzeit der Meldung zum nächsten CL-Server und zurück usw., repräsentiert. Im realen Betrieb können Bitratenanforderungen durch die Verbindungsverwaltung im ATM-Netz abgelehnt werden. Dies wird im Simulationsmodell mit einer Wahrscheinlichkeit  $p_{neg}$  berücksichtigt. Das Modell für die Ablehnung von Bitratenanforderungen wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

#### 5.2.1 Modellierung der Ablehnung von Bitratenanforderungen

Die Bitratenanforderungen der Netzkoppeleinheit werden vor allem durch den Einfluß anderer Verkehrsströme vom Bandbreitenmanagement des ATM-Netzes abgelehnt. Ferner ist die Möglichkeit der Ablehnung von der für die Koppeleinheit bereits genehmigten Bitrate abhängig. Im Simulationsmodell wird, wie oben erwähnt, die Ablehnung einer Bitratenanforderung mit einer Wahrscheinlichkeit  $p_{neg}$  berücksichtigt. Zur Ermittlung der lastabhängigen Ablehnungswahrscheinlichkeit wird folgendes Modell verwendet:

Die für den Verkehrsstrom von der Netzkoppeleinheit ins ATM-Netz maximal verfügbare Bitrate  $B_{max}$  wird in  $n_{max}$  gleiche Teile unterteilt. Jeder Teil wird als Bedieneinheit für die Bitrate  $B_{max}/n_{max}$  modelliert. Von diesen  $n_{max}$  Bedieneinheiten sind bereits  $n_K$  für den Verkehrsstrom der Netzkoppeleinheit genehmigt. Für weitere Bitratenanforderungen der Netzkoppeleinheit sowie anderer Verkehrsquellen, hier als Hintergrundquellen bezeichnet, stehen daher nur noch  $n_R = n_{max} - n_K$  Bedieneinheiten zur Verfügung. Unter der Annahme, daß eine große Anzahl Hintergrundquellen Bitratenanforderungen mit dem Angebot A gemäß einem Poisson-Prozeß erzeugen, läßt sich die Belegung der verfügbaren  $n_R$  Bedieneinheiten mit einem  $M/G/n_R$ -Verlustsystem modellieren.

Die Wahrscheinlichkeiten  $p_x$  für die Anzahl gleichzeitig belegter Bedieneinheiten x ergeben sich für dieses Modell aus der Erlang-Zustandsverteilung für Verlustsysteme

$$p_{x} = \frac{\frac{A^{x}}{x!}}{\sum_{i=0}^{n_{R}} \frac{A^{i}}{i!}}, \quad x = 0, 1, ..., n_{R},$$
 (5.26)

wobei das Angebot

$$A = \frac{n_{max}B_H}{B_{max}} \tag{5.27}$$

durch die Summenbitrate  $B_H$  der Anforderungen der Hintergrundquellen bestimmt wird.

Eine Bitratenanforderung der Netzkoppeleinheit wird abgelehnt, falls von den verfügbaren Bedieneinheiten so viele von den Anforderungen der Hintergrundquellen belegt sind, daß die Anforderung der Netzkoppeleinheit nicht mehr bedient werden kann. Die Ablehnungswahrscheinlichkeit  $p_{neg}$  für die neu angeforderte Bitrate  $B'_K$  (entspricht  $n'_K$  gedachten Bedieneinheiten) der Netzkoppeleinheit läßt sich dann wie folgt angeben:

$$p_{neg} = \begin{cases} 0, & n'_{K} = 0\\ \sum_{x=n_{max}-n'_{K}+1}^{n_{R}} p_{x}, & n'_{K} = \frac{n_{max}B'_{K}}{B_{max}}, & x = 1, 2, ..., n_{R} \end{cases}$$

$$1, & n'_{K} > n_{R}$$

$$(5.28)$$

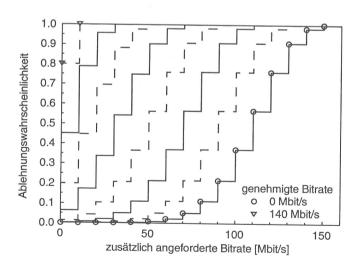


Bild 5.7: Verteilung der Ablehnungswahrscheinlichkeiten von Bitratenanforderungen

Der Verlauf der Ablehnungswahrscheinlichkeit  $p_{neg}$  ist beispielhaft in Bild 5.7 über der für den Verkehrsstrom der Netzkoppeleinheit zusätzlich neu angeforderten Bitrate  $B'_K$  -  $B_K$  dargestellt. In diesem Beispiel ist die Summenbitrate  $B_H$  der Anforderungen der Hintergrundquellen zu 40 Mbit/s angenommen, wobei die maximal verfügbare Bitrate  $B_{max}$  150 Mbit/s beträgt und in 15 Bedieneinheiten aufgeteilt wird. Die Kurvenschar entsteht durch Variation der genehmigten Bitrate  $B_K$  von 0 Mbit/s bis 140 Mbit/s in Schritten von 20 Mbit/s.

Deutlich wird der starke Anstieg der Ablehnungswahrscheinlichkeit, falls die gesamte neu angeforderte Bitrate sich der maximal verfügbaren Bitrate nähert. Ebenso steigt in diesem Bereich die Ablehnungswahrscheinlichkeit steiler an als bei kleinerer genehmigter Bitrate.

# 5.3 Verkehrstheoretische Analyse

Bedingt durch lange Rechenzeiten bei der simulativen Untersuchung der Netzkoppeleinheit wurde eine verkehrstheoretische Analyse auf der Basis der vorgestellten Fluid-Flow-Approximation entwickelt. Dieser Abschnitt enthält neben der Beschreibung des analytischen Modells und der mathematischen Analyse die Berechnung der charakteristischen Systemgrößen der Netzkoppeleinheit. Die Netzkoppeleinheit verwendet dabei das in Abschnitt 4.4.3 vorgeschlagene Verfahren zur Bandbreitenreservierung.

## 5.3.1 Analytisches Modell der Netzkoppeleinheit

Die Modellierung eines realen Systems mit dem Ziel einer mathematischen Analyse erfordert meist einige vereinfachende Annahmen gegenüber dem entsprechenden Simulationsmodell. Ferner werden Komponenten des funktionalen Modells, welche sich nicht signifikant auf das Systemverhalten auswirken, vernachlässigt. Bild 5.8 zeigt das aus dem Simulationsmodell abgeleitete analytische Modell der Netzkoppeleinheit, das mit dem vorgeschlagenen Verfahren zur Bitratenreservierung arbeitet. Analog zum Simulationsmodell wird im analytischen Modell nur der Verkehrsstrom einer verbindungslosen Datenkommunikation von der Netzkoppeleinheit zum B-ISDN berücksichtigt.

Das Modell besteht aus einer Warteschlange mit endlicher Kapazität s und einer Bedieneinheit als Modell für die zugeteilte Bitrate zum nächsten CL-Server im B-ISDN. Die Bedienrate kann in diesem Modell die diskreten Werte  $\mu_i$  annehmen, die von der gewählten Strategie zur Bitratenreservierung abhängen. Jede Verkehrsquelle im Modell wird als sporadische Quelle (siehe Abschnitt 5.1.3.2) modelliert, welche die Charakteristik einer Daten-

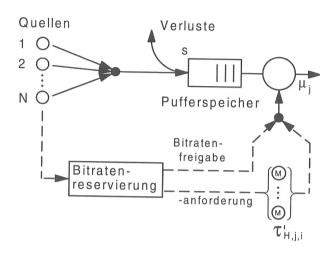


Bild 5.8: Analytisches Modell der Koppeleinheit

quelle für verbindungslosen Datenverkehr gut nachbildet. Der Einfluß des "Distributed Queueing"-Medienzugriffprotokolls wird, wie im Simulationsmodell, nicht explizit berücksichtigt. Die Dauer der Aktivitäts- und Pausenphase einer Quelle wird, wie in Abschnitt 5.1.4.2, als negativ-exponentiell verteilt angenommen. Eine aktive, d.h. sich in der Aktivitätsphase befindende Quelle erzeugt mit konstantem Zwischenankunftsabstand Pakete konstanter Länge. Die momentan von den Quellen erzeugte Bitrate, die im realen System sowie in der Simulation mit Hilfe einer Verkehrsmessung ermittelt wird, wird im analytischen Modell durch die Anzahl gleichzeitig aktiver Quellen ersetzt. Gemäß der Anzahl aktiver Quellen und der gewählten Strategie zur Bitratenreservierung wird Bitrate freigegeben oder angefordert. Eine Bitratenfreigabe wirkt sich dabei unmittelbar auf die Bedienrate der Bedieneinheit aus. Die Verzögerung, mit der die Bedieneinheit auf eine Bitratenanforderung reagiert, ist im Modell als negativ-exponentiell verteilt angenommen. Durch diese Annahme, die eine Näherung für eine konstante Verzögerung darstellt [153], wird die Berücksichtigung dieser Verzögerung in der Analyse überhaupt erst ermöglicht. Die Ablehnung von Bitratenanforderungen wird durch dasselbe Modell (siehe Abschnitt 5.2.1) wie in der Simulation nachgebildet. Die mittlere Verzögerung  $\tau_H$  wird dazu um die von der bereits genehmigten Bitrate  $\mu_i$ , der zu genehmigenden Bitrate  $\mu_i$  und dem Angebot der Hintergrundquellen abhängigen Ablehnungswahrscheinlichkeiten  $p_{neg,j,i}$  zu  $\tau'_{H,j,i} = \tau_H / (1 - p_{neg,j,i})$  erweitert.

#### 5.3.2 Zustandsprozeß

Der Zustandsprozeß des oben beschriebenen analytischen Modells läßt sich unter den getroffenen Annahmen als zweidimensionale Markoff-Kette wie in Bild 5.9 darstellen. Ein Zustand ist dabei durch die Anzahl gleichzeitig aktiver Quellen i und durch die Bedienrate  $\mu_j$  mit i, j = 0, 1, ..., N eindeutig gekennzeichnet. Die Zustände jeder horizontalen Zustandskette repräsentieren eine bestimmte Bedienrate bzw. Bitrate, und jede vertikale Zustandskette entspricht einer Anzahl aktiver Quellen.

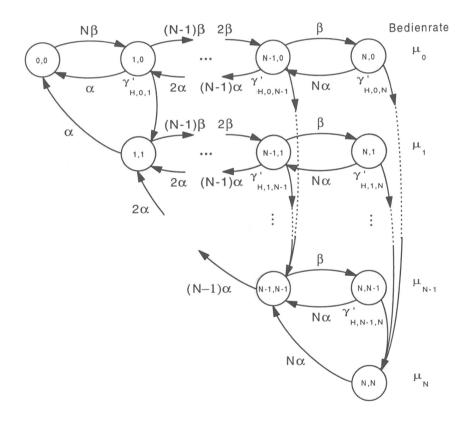


Bild 5.9: Zustandsprozeß für das analytische Modell der Netzkoppeleinheit

Die Verzögerung einer Bitratenanforderung inklusive der Möglichkeit der Ablehnung wird durch folgenden Zustandsübergang repräsentiert: Ist die momentane Bedienrate  $\mu_j$  und sind i Quellen gerade aktiv, wobei i > j ist, wechselt die Bedieneinheit zur Bedienrate  $\mu_i$ 

mit der Übergangsrate  $\gamma_{H,j,i} = 1 / \tau_{H,j,i}$ . Ähnlich ist der Ablauf einer Bitratenfreigabe im Zustandsprozeß enthalten: Die Bedieneinheit wechselt sofort von der momentanen Bedienrate  $\mu_j$  zur Bedienrate  $\mu_{j-1}$ , falls eine Quelle ihre Aktivitätsphase beendet hat und Bitrate freigegeben werden kann.

Die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  für den Zustand ij, d.h. i Quellen sind aktiv und Pakete aus der Warteschlange werden mit der Rate  $\mu_j$  bedient, ergeben sich aus der Matrixgleichung [103]

$$PQ = 0 \tag{5.29}$$

und der Normierungsbedingung

$$\sum_{i,j=0}^{N} p_{ij} = 1, \quad i, j = 0, 1, ..., N.$$
 (5.30)

Die für dieses Modell vierdimensionale Matrix Q wird aus den Übergangsraten der Zustandsübergänge nach Bild 5.9 gebildet. Die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  sind in der Matrix P enthalten und die Matrix O in Gleichung (5.29) stellt eine Nullmatrix dar. Eine rekursive Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten ist hier ebenfalls möglich.

#### 5.3.3 Fluid-Flow-Approximation

Bei Anwendung der Fluid-Flow-Approximation (siehe Abschnitt 5.1.4.2) läßt sich das Differentialgleichungssystem analog zu Gleichung (5.19) für den stationären Fall in Matrixform wie folgt angeben:

$$F'(x) = R^{-1}Q^TF(x)$$
. (5.31)

Die Matrix F(x) besteht aus den zeitunabhängigen Verteilungsfunktionen  $F_{ij}(x)$ , d.h. der Wahrscheinlichkeit, daß die Warteschlangenlänge den Wert x nicht überschreitet und der betrachtete Prozeß sich im Zustand ij befindet. Die hier vierdimensionale Matrix R ist, analog zu Abschnitt 5.1.4.2, Gleichung (5.21), nur in ihrer "Hauptdiagonalen" besetzt. Die Komponenten  $r_{ij}$  lassen sich mit den zustandsabhängigen Bedienraten  $\mu_j$  aus der Gleichung

$$r_{ij} = i \cdot \lambda_p - \mu_j, \quad i, j = 0, 1, ..., N.$$
 (5.32)

bestimmen.

Wie im Abschnitt 5.1.4.2 beschrieben, ergeben sich die speziellen Lösungen des Differentialgleichungssystems aus dem allgemeinen Lösungsansatz analog zu Gleichung (5.23) und den Randbedingungen. Die Randbedingungen lauten hier:

$$F_{ii}(0) = 0, \quad r_{ii} > 0$$
 (5.33)

$$F_{ii}(s^{-}) = p_{ii}, \ r_{ii} < 0.$$
 (5.34)

Damit ist das Differentialgleichungssystem vollständig bestimmt und die Werte der für die Lösung notwendigen Eigenwerte, Eigenvektoren und Faktoren können mit Hilfe numerischer Verfahren berechnet werden.

## 5.3.4 Berechnung charakteristischer Systemgrößen

Aus den oben ermittelten Verteilungsfunktionen  $F_{ij}(x)$  lassen sich nun einige Kenngrößen des analytischen Modells berechnen. Eine wichtige Größe zur Abschätzung des Bedarfs an Pufferspeicher im realen System ist die mittlere Warteschlangenlänge E[X], die aus der Verteilungsfunktion F(x) der Warteschlangenlänge bestimmt werden kann. Die Verteilungsfunktion F(x) der Warteschlangenlänge ergibt sich zu

$$F(x) = \sum_{i,j=0}^{N} F_{ij}(x).$$
 (5.35)

Damit erhält man für die mittlere Warteschlangenlänge E[X] (siehe Anhang A):

$$E[X] = \sum_{i,j=0}^{N} \left[ \sum_{k=0}^{N} \frac{a_k \cdot \{\Phi_k\}_{ij}}{z_k} \left( 1 - e^{z_k s} \left( 1 - z_k s \right) \right) + \left( p_{ij} - F_{ij} \left( s^- \right) \right) \cdot s \right]. \tag{5.36}$$

Bei der Berechnung von E[X] sind die Sprünge der Funktionen  $F_{ij}(x)$  an den Stellen x = 0 und x = s zu beachten.

Eine weitere wichtige charakteristische Systemgröße ist die Verlustwahrscheinlichkeit für Pakete durch Speicherüberlauf, für die das reale System gewisse Randbedingungen, die sich aus der gewünschten Dienstgüte ergeben, erfüllen muß. Der Ansatz für die Paketverlustwahrscheinlichkeit lautet wie folgt:

$$p_{\nu} = \frac{\text{mittl. Paketverlustrate}}{\text{mittl. Paketankunftsrate}} = \frac{\overline{\lambda_{V}}}{\overline{\lambda_{P}}}.$$
 (5.37)

Dabei ist die mittlere Paketankunftsrate

$$\overline{\lambda_P} = \sum_{i,j=0}^{N} i \cdot \lambda_P \cdot p_{ij} = \sum_{i=0}^{N} i \cdot \lambda_P \cdot \sum_{j=0}^{N} p_{ij} = \frac{N \cdot \beta}{\beta + \alpha} \lambda_P$$
 (5.38)

und die mittlere Paketverlustrate

$$\overline{\lambda_V} = \sum_{i,j=0}^{N} (p_{ij} - F_{ij}(s^-)) \cdot r_{ij}.$$
 (5.39)

Die Randverteilung  $p_i$  entspricht der Binomialverteilung aus Gleichung (5.15). Dies wird durch die Zusammenfassung der entsprechenden Randzustände des Zustandsprozesses in Bild 5.9 deutlich. Die Differenzen in Gleichung (5.39) stellen die Wahrscheinlichkeiten für einen vollständig gefüllten Pufferspeicher dar. Wegen der Randbedingung aus Gleichung (5.34) werden in Gleichung (5.39) nur die Zustände erfaßt, in denen Paketverluste auftreten können, d.h. der Informationszufluß größer ist als der Abfluß. Damit erhält man folgende Gleichung für die Paketverlustwahrscheinlichkeit:

$$p_{\nu} = \frac{\beta + \alpha}{N \cdot \beta \cdot \lambda_{P}} \sum_{i,j=0}^{N} \left( p_{ij} - F_{ij}(s^{-}) \right) \cdot r_{ij}. \tag{5.40}$$

Die mittlere Wartezeit  $\mathrm{E}[T_W]$  von Paketen ist eine weitere Größe, die zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Netzkoppeleinheit herangezogen wird. Sie ergibt sich aus den bereits berechneten Größen nach Anwendung des Theorems von Little zu

$$E[T_W] = \frac{E[X]}{(1 - p_v)\overline{\lambda_P}}.$$
 (5.41)

Als letzte der im Rahmen der Fallstudien dieser Arbeit betrachteten charakteristischen Systemgrößen wird die mittlere reservierte bzw. zugeteilte Paketbedienrate wie folgt angegeben:

$$\overline{\mu_P} = \sum_{i,j=0}^{N} \mu_j p_{ij} \,. \tag{5.42}$$

Sie wird zur Ermittlung der Bitratenersparnis durch den Einsatz des in Abschnitt 4.5.2 vorgeschlagenen Verfahrens benötigt.

#### 5.4 Fallstudien

Die in den vorhergehenden Abschnitten eingeführte mathematische Analyse sowie eine Simulation [139] der Netzkoppeleinheit werden in diesem Abschnitt verwendet, um den Einfluß verschiedener Parameter auf die Leistungsfähigkeit der Netzkoppeleinheit zu untersuchen. Die Netzkoppeleinheit verwendet das in Abschnitt 4.5.2 vorgeschlagene Verfahren zur Reservierung von Bitrate im B-ISDN für die verbindungslose Datenkommunikation. Die dazu entwickelten Strategien zur Anforderung von zusätzlicher Bitrate werden in Abschnitt 5.4.1 vorgestellt.

Meist kann ohne sehr umfangreiche Parameterläufe aus den Ergebnissen einer reinen Simulationsstudie nicht direkt entnommen werden, welche Parameter die Ergebnisse in welcher Form beeinflussen. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, alle interessierenden Fragen durch die vorgestellte mathematische Analyse zu beantworten. Deren Ergebnisse werden, soweit möglich, mit den Ergebnissen der Simulation verifiziert. Durch diesen Vergleich kann bei guter Übereinstimmung der Ergebnisse davon ausgegangen werden, daß alle relevanten Einflußgrößen in der Analyse berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse der Simulation werden zusammen mit ihren 95%-Vertrauensintervallen angegeben.

Die gewonnenen Ergebnisse werden in diesem Abschnitt zur Bewertung der verschiedenen Strategien zur Bitratenanforderung verwendet. Ferner lassen sich aus den Ergebnissen Empfehlungen zur Dimensionierung einiger Systemgrößen ableiten. Weitere Ergebnisse, die aufgrund der vorgenommenen Modellierung nur simulativ ermittelt werden konnten, sind in Kapitel 4 enthalten. Sie werden bereits dort vorgestellt, um Aussagen zu unterstreichen, welche die Funktionsweise des Verfahrens betreffen.

Für die Simulation sowie die Analyse ist nachfolgend ein Satz Parameter angegeben, der, sofern nicht besonders vermerkt, zur Ermittlung aller folgenden Ergebnisse verwendet wurde.

Der Verkehrsstrom vom MAN zur Netzkoppeleinheit wird von 5 sporadischen Quellen mit folgenden Parametern erzeugt:

Mittlere Dauer der Pausenphase:  $\alpha^{-1} = 3.85 \text{ s}$ 

Mittlere Dauer der Aktivitätsphase:  $\beta^{-1} = 0.2 \text{ s}$ 

Paketankunftsabstand in der Aktivitätsphase:  $T_P = 2 \text{ ms}$ 

Für ein von einer Quelle erzeugtes Paket werden im ATM-Netz 57 Zellen zur Übertragung benötigt. Der Pufferspeicher der Netzkoppeleinheit kann insgesamt 1000 Zellen aufnehmen. Können die Zellen eines Paketes nicht vollständig zwischengespeichert werden, geht

das gesamte Paket verloren. Auf dem Übertragungsweg zum nächsten CL-Server werden 64 kbit/s permanent, z.B. für den Austausch von Signalisierinformationen, reserviert. Maximal stehen für die Datenkommunikation 150 Mbit/s zur Verfügung. Das Zeitintervall  $\tau_H$  vom Aussenden einer Bitratenanforderung bis zum Empfang der Bestätigung wird zu 22 ms angenommen. Ferner werden keine zusätzlichen Hintergrundquellen betrachtet, d.h. Bitratenanforderungen wird immer stattgegeben.

In der Simulation wird der Bitratenbedarf des ankommenden Datenstroms mit Hilfe der Mittelwertbildung (siehe Abschnitt 4.5.3.2) abgeschätzt. Das Intervall für die Mittelwertbildung wird im Analysemodell vernachlässigt und für die Simulation zu 5 ms gewählt. Die Anforderung und Freigabe von Bitrate geschieht unabhängig von der Belegung des Pufferspeichers. Eine Überschreitung der genehmigten Bitrate ist nicht zugelassen und damit ist keine Markierung von Zellen notwendig.

#### 5.4.1 Strategien zur Anforderung von Bitrate

Zum Management der Bitrate des Verkehrsstromes vom MAN in Richtung B-ISDN ist in der Netzkoppeleinheit neben der Abschätzung der momentanen Bitrate des ankommenden Verkehrsstromes eine Vorschrift zur Ermittlung der gewünschten Bitrate (Reservierungsstrategie) notwendig.

Der Schätzwert  $B_S$  der momentanen Bitrate wird im realen System sowie im Simulationsmodell durch eine Verkehrsmessung ermittelt. Im analytischen Modell wird dieser Wert durch die Summenbitrate der gleichzeitig aktiven Quellen ersetzt. Allgemein berechnet sich die neu benötigte Bitrate  $B'_K$  aus der Berechnungsvorschrift

$$B_K' = B_{dyn} + B_{stat} \,, \tag{5.43}$$

wobei mit  $B_{dyn}$  der dynamische Anteil und mit  $B_{stat}$  der statische Anteil bezeichnet wird. Der Anteil  $B_{dyn}$  ist dabei vom Schätzwert  $B_S$  abhängig. Die anzufordernde Bitrate wird auf die maximal verfügbare Bitrate  $B_{max}$  begrenzt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Strategien untersucht:

Strategie a: Die Berechnungsvorschrift dieser Strategie enthält nur den dynamischen Anteil aus Gleichung (5.43). Generell ist diese rein dynamisch arbeitende Strategie für eine Kommunikationsbeziehung mit einem durch lange Pausenphasen gekennzeichnetes Verkehrsaufkommen geeignet. Die Kapazität auf den Übertragungswegen kann gut ausge-

nutzt werden, da keine ständige Blindbelegung von Bitrate erfolgt. Einschränkungen in der Anwendbarkeit dieser Strategie werden durch die Ergebnisse in diesem Abschnitt verdeutlicht.

Strategie b: Mit dieser Strategie wird ebenfalls dynamisch Bitrate auf dem Übertragungsweg zum nächsten CL-Server angefordert. Zusätzlich zur Strategie a wird permanent ein Teil der Übertragungskapazität

reserviert.

Strategien c, d: Diese Strategien arbeiten ohne dynamische Anforderung von Bitrate, d.h. sie belegen permanent eine konstante Bitrate auf dem virtuellen Kanal bzw. Pfad. Prinzipiell entspricht dies einem exklusiv zugeordneten Übertragungskanal wie bei den Kanalmultiplexverfahren. Dadurch sind diese Strategien für eine Kommunikationsbeziehung mit konstantem Verkehrsaufkommen geeignet, da die Laufzeiteffekte aufgrund der Bitratenanforderungen ausgeschlossen werden.

Für die Parameter der einzelnen Strategien werden die in Tabelle 5.1 aufgeführten Werte, sofern nicht anders angegeben, verwendet.

Strategie	a	b	c	d
B <sub>dyn</sub>	1,1⋅B <sub>S</sub>	$B_S$	0	0
B <sub>stat</sub>	0	$B_Q$	B <sub>Q</sub>	2·B <sub>Q</sub>

Tabelle 5.1: Parameter der Strategien zur Bitratenreservierung

Die Bitrate  $B_Q$  bei den statischen Anteilen  $B_{stat}$  entspricht der von einer sporadischen Quelle maximal benötigten Bitrate. Die Wahl der Werte für die dynamische Bitratenanforderung wird durch folgende Untersuchung verdeutlicht. Grundsätzlich wird angenommen, daß der dynamische Anteil  $B_{dyn}$  proportional zur geschätzten Bitrate  $B_S$  angefordert wird. Bild 5.10 zeigt dazu die Paketverlustwahrscheinlichkeit abhängig von der Wahl des Proportionalitätsfaktors. Die obere Kurve der jeweiligen Strategie ergibt sich für einen Pufferspeicher mit der Kapazität für 1000 Zellen, die untere Kurve entsprechend für eine Kapazität von 4000 Zellen. Zusätzlich zu den Ergebnissen der Analyse sind beispielhaft für Stra-

tegie a und einer Pufferkapazität von 1000 Zellen die Ergebnisse der Simulation, durch Symbole gekennzeichnet, dargestellt. Das prinzipielle Verhalten wird trotz der Abweichungen der Approximation von der Simulation gut nachgebildet.

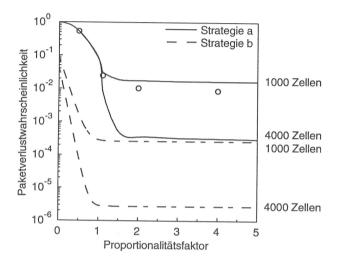


Bild 5.10: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Proportionalitätsfaktor

Die Ergebnisse beider Strategien weisen zwei ausgeprägte Bereiche auf. Ein Bereich, in dem die Paketverluste bei Erhöhung des Proportionalitätsfaktors stark abnehmen, und der zweite Bereich, in dem eine weitere Erhöhung des Proportionalitätsfaktors die Paketverluste nur noch unwesentlich verringert. Zwischen diesen Bereichen existiert ein Übergangsbereich, aus dem die Werte der Faktoren in Tabelle 5.1 gewählt wurden.

#### 5.4.1.1 Einfluß des Verkehrsangebots

Diese Untersuchung zeigt das grundsätzliche Verhalten der gewählten Strategien in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot der Quellen. Das Verkehrsangebot wird dabei durch die Anzahl der Verkehrsquellen variiert. Zudem werden die Ergebnisse des analytischen Näherungsverfahrens mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Es werden nur die Ergebnisse der Simulation angegeben, die mit vertretbaren Rechenzeiten ermittelt werden konnten. In den Bildern sind die Ergebnisse der Approximation durch Linien verbunden und die Ergebnisse der Simulation durch Symbole gekennzeichnet.

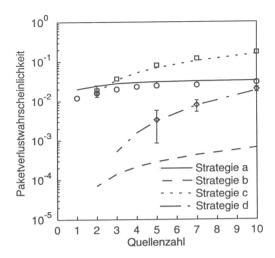


Bild 5.11: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot

Für die Paketverlustwahrscheinlichkeiten (Bild 5.11) zeigt die mathematische Analyse der Strategien c und d eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. Die Ergebnisse der dynamischen Strategie a werden, speziell bei wenigen Verkehrsquellen, überschätzt. Die Abweichungen der Näherung resultieren aus der Annahme negativ-exponentiell verteilter Laufzeiten sowie aus der vereinfachten Modellierung der Verkehrsmessung.

Durch die dynamische Anpassung der Bitrate ist der Anstieg der Paketverlustwahrscheinlichkeit für die dynamisch arbeitenden Strategien bei einer Erhöhung des Verkehrsangebotes nicht so steil wie bei statischer Bitratenzuteilung. Die Kombination der Verfahren in Strategie b erzielt für jedes Verkehrsangebot die geringsten Paketverluste.

Bild 5.12 zeigt die mittleren Paketwartezeiten der Strategien in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot. Das Verhalten der Strategien wird durch die Approximation gut nachgebildet, wie aus den Ergebnissen zu sehen ist. Lediglich kleine mittlere Paketwartezeiten werden von der Analyse unterschätzt. Diese Abweichungen der Fluid-Flow-Approximation entstehen durch die Vernachlässigung der Paketierung des Ankunftsstromes, welche das Verhalten des Belegungsprozesses der Warteschlange bei sehr kleinem Füllgrad bestimmt.

Deutlich wird auch die Auswirkung der überproportionalen Anforderung von Bitrate bei Verwendung der Strategie a. Die mittleren Paketwartezeiten sinken bei steigendem Verkehrsangebot.

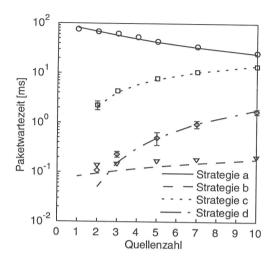


Bild 5.12: Mittlere Paketwartezeit in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot

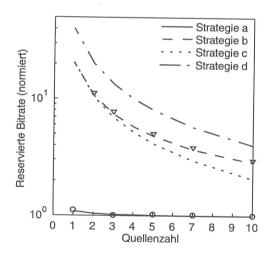


Bild 5.13: Mittlere reservierte Bitrate (normiert) in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot

Die in Bild 5.13 dargestellte mittlere reservierte Bitrate auf dem Übertragungsweg zum CL-Server ist auf die mittlere angebotene Bitrate aller Quellen bezogen. In der Analyse werden diese Ergebnisse aus den entsprechenden Paketraten berechnet. Die Analyse stimmt hier sehr gut mit der Simulation überein.

Diese charakteristische Systemgröße drückt die Bitratenersparnis durch die Verwendung des Reservierungsverfahrens aus. Bei einer permanenten Reservierung der Spitzenbitrate wäre, für die gewählten Parameter, die normierte mittlere Bitrate unabhängig vom Verkehrsangebot gleich dem Burstiness-Faktor B=20,3 einer Verkehrsquelle. Die Bitratenersparnis steigt bei mehr Quellen, d.h. bei höherem Verkehrsangebot, durch das statistische Multiplexen der Verkehrsströme.

#### 5.4.1.2 Einfluß der Puffergröße

Die Untersuchung des Verhaltens der Strategien in Abhängigkeit von der Puffergröße bildet die Grundlage für Empfehlungen zur Dimensionierung des Pufferspeichers. Bild 5.14 und Bild 5.15 zeigen dazu den Einfluß der Puffergröße auf die Paketverlustwahrscheinlichkeit bzw. auf die mittlere Paketwartezeit. Neben den Analyseergebnissen sind wieder die Ergebnisse der Simulation eingezeichnet. Bis auf geringe Abweichungen wird das grundsätzliche Verhalten der Strategien durch die Analyse gut nachgebildet.

Durch Anwendung von Strategie b werden die kleinsten Paketverlustwahrscheinlichkeiten sowie die kürzesten Paketwartezeiten erzielt. Dadurch kann mit dieser Strategie prinzipiell Pufferkapazität im Vergleich zu den anderen Strategien eingespart werden. Dieses Verhalten resultiert aus der Kombination von permanenter Bitratenreservierung zur sofortigen Informationsübertragung und der dynamischen Anforderung bei Bedarf.

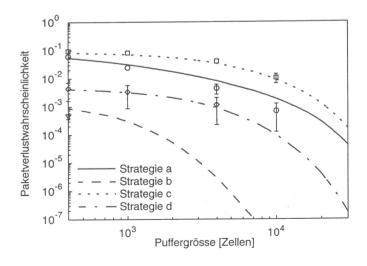


Bild 5.14: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Puffergröße

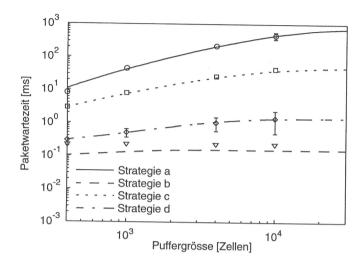


Bild 5.15: Mittlere Paketwartezeit in Abhängigkeit von der Puffergröße

Zur Verdeutlichung des Sachverhalts sind in Tabelle 5.2 die für eine Paketverlustwahrscheinlichkeit von 10<sup>-4</sup> benötigten Puffergrößen aufgeführt. Ebenso ist die mittlere reservierte Bitrate bezogen auf die mittlere angebotene Bitrate aller Quellen angegeben. Strategie b reserviert mehr Bitrate als Strategie a, um die gleiche Paketverlustwahrscheinlichkeit zu erzielen, benötigt dafür aber einen wesentlich kleineren Pufferspeicher. Im Vergleich mit den Strategien c und d ist bei Anwendung der Strategie b die kleinste Puffergröße nötig, und dennoch wird ungefähr nur die gleiche bzw. weniger Bitrate auf dem Übertragungsweg belegt. Generell kann durch Bereitstellung zusätzlicher Pufferkapazität der Bedarf an Bitrate gesenkt werden. Umgekehrt bedeutet dies, daß die Pufferkapazität durch die Reservierung von mehr Bitrate reduziert werden kann.

Strategie	a	b	С	d
Puffergröße [Zellen]	25750	1600	33500	9800
Reservierte Bitrate (normiert)	1,01	4,97	4,10	8,20

Tabelle 5.2: Puffergrößen und reservierte Bitrate für eine Paketverlustwahrscheinlichkeit von  $10^{-4}$ 

#### 5.4.1.3 Einfluß von Quellparametern

Die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich der Quellcharakteristika wird in diesem Abschnitt am Beispiel der mittleren Dauer der Aktivitätsphase untersucht. Die mittleren Dauern der Aktivitäts- und Pausenphase einer Verkehrsquelle werden so verändert, daß der Burstiness-Faktor B = 20,3 erhalten bleibt. Die Größe des Pufferspeichers für die jeweilige Strategie wurde aus Tabelle 5.2 gewählt.

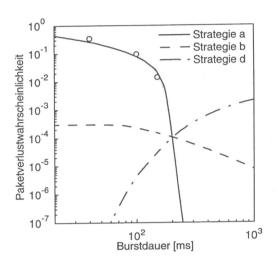


Bild 5.16: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der mittleren Burstdauer

Für den Vergleich ist dazu in Bild 5.16 der Einfluß der mittleren Dauer der Aktivitätsphase (Burstdauer) auf die Paketverlustwahrscheinlichkeit dargestellt. Stellvertretend für die Strategien mit ausschließlich statischer Reservierung von Bitrate sind nur die Ergebnisse für Strategie d eingezeichnet, da die geforderte Paketverlustwahrscheinlichkeit mit Strategie c nur durch die Verwendung eines unrealistisch großen Pufferspeichers erreicht werden kann. Aus den Ergebnissen wird deutlich, daß für kurze Aktivitätsphasen mit der Strategie d die geringsten Paketverlustwahrscheinlichkeiten erzielt werden, da meistens alle Pakete einer Aktivitätsphase vorläufig gespeichert werden können. Wird die mittlere Burstdauer jedoch wesentlich größer als die Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung, sind die Strategien mit dynamischen Bitratenanforderungen den Strategien mit nur statischer Reservierung von Bitrate überlegen.

Bei überwiegend kurzen Aktivitätsphasen des ankommenden Datenstromes relativ zur Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung sollte der Pufferspeicher daher so dimensioniert sein, daß vorläufig alle Pakete einer Aktivitätsphase zwischengespeichert werden können. Eine dynamische Anpassung der reservierten Bitrate kann dabei die Ergebnisse nur unwesentlich verbessern. Für Datenströme mit langen Burstdauern ist eine dynamische Anforderung von Bitrate zur Begrenzung der Paketverluste erforderlich. Die Pakete, die innerhalb der Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung ankommen, sollten dabei zwischengespeichert werden.

#### 5.4.1.4 Netzeinflüsse

Stark beeinflußt werden die Ergebnisse der dynamischen Strategien auch durch Parameter, die sich aus der Netztopologie ergeben, wie z.B. die Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung. Dieses Zeitintervall setzt sich zum einen aus der doppelten Signallaufzeit von der Netzkoppeleinheit zum CL-Server und zum anderen aus den Bearbeitungszeiten der Reservierung im CL-Server und der Netzkoppeleinheit zusammen. Unter Annahme der Summe der Bearbeitungszeiten von ca. 5-10 ms und einer Signalausbreitungsgeschwindigkeit vom 0,7-fachen der Lichtgeschwindigkeit, werden mit dem in Bild 5.17 dargestellten Bereich Entfernungen der Netzkoppeleinheit vom CL-Server bis ca. 3000 km berücksichtigt.

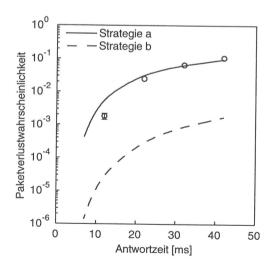


Bild 5.17: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Antwortzeit

In Bild 5.17 sind außer den Ergebnissen der mathematischen Analyse beispielhaft die Simulationsergebnisse für die Strategie a eingezeichnet. Das Verhalten wird, bis auf Abweichungen bei kleinen Antwortzeiten, durch die Analyse gut angenähert. Trotz der großen Antwortzeiten ist die mit Strategie b erzielte Paketverlustwahrscheinlichkeit wesentlich geringer als die mit Strategie c bei den gegebenen Parametern erzielbare Paketverlustwahrscheinlichkeit von ca. 8·10<sup>-2</sup> (vgl. Bild 5.14). Eine Strategie, die zusätzlich zu einer permanent zugeteilten Bitrate Reservierungen abhängig vom momentanen Bitratenbedarf vornimmt, ist daher einer statischen Kapazitätszuteilung vorzuziehen.

Durch den Einfluß anderer Verkehrsströme, die im ATM-Netz teilweise denselben Übertragungsweg wie der betrachtete Verkehrsstrom der Netzkoppeleinheit benutzen, werden Bitratenanforderungen zum Teil abgelehnt. Die Modellierung der Ablehnung ist in Abschnitt 5.2.1 beschrieben. Bild 5.18 zeigt Ergebnisse für die Strategien a und b mit bzw. ohne Berücksichtigung des Hintergrundverkehrs. Der Hintergrundverkehr erzeugt dabei Bitratenanforderungen mit einer Summenbitrate von 150 Mbit/s.

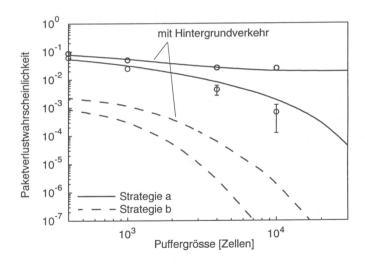


Bild 5.18: Paketverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Puffergröße

Durch die Ablehnung von Bitratenanforderungen steigen die Paketverlustwahrscheinlichkeiten, wie erwartet, an. Im Vergleich mit Strategie b ändert sich das Verhalten der Strategie a stärker, da mehr Anforderungen aufgrund der überproportionalen Anforderung von Bitrate abgelehnt werden.

# Kapitel 6

# Zusammenfassung und Ausblick

## 6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Kopplung des regionalen Hochgeschwindigkeitsnetzes (MAN) DQDB mit dem künftigen diensteintegrierenden Breitbandnetz (B-ISDN) auf der Basis des asynchronen Transfer-Modus (ATM) untersucht. Die Netzkopplung wurde dabei nicht auf die Verwendung des B-ISDN als reines Transitnetz ausgerichtet, sondern wurde unter dem Gesichtspunkt betrachtet, daß Endeinrichtungen, die an eines der beiden Netze angeschlossen sind, mit Endeinrichtungen am anderen Netz unmittelbar kommunizieren können.

Der Architekturteil vermittelt als Basis für die Planung und Entwicklung einer Netzkoppeleinheit zwischen dem MAN DQDB und dem B-ISDN den momentanen Stand der Standardisierung. Auf der Basis der in den Standards für beide Netze festgelegten Protokollprofile zur Bereitstellung der verschiedenen Dienste wurden Kopplungsvarianten entwickelt und die jeweils von der Netzkoppeleinheit durchzuführenden Funktionen dargestellt. Dabei wurde versucht, die von den Daten in der Netzkoppeleinheit zu durchlaufenden Schichten und gleichzeitig die Komplexität der von der Netzkoppeleinheit durchzuführenden Funktionen zu minimieren, um eine möglichst hohe Transfergeschwindigkeit der Daten durch die Netzkoppeleinheit zu erzielen. Besonders ausführlich wurde die Netzkopplung für verbindungslose Dienste betrachtet, da die schnelle Datenkommunikation als eine der ersten Breitbandanwendungen für das B-ISDN angesehen wird. Der Schwerpunkt der Betrachtungen lag dabei auf einem durch die unterschiedlichen Verbindungskonzepte beider Netze auftretenden Problem, der Bitratenreservierung auf den Übertragungsabschnitten von der Netzkoppeleinheit zur Zieleinrichtung oder zur Zielnetzkoppeleinheit im B-ISDN.

Bei der Diskussion verschiedener Bitratenreservierungsverfahren wurden folgende Nachteile und Beschränkungen in der Anwendbarkeit der Verfahren festgestellt:

- Ist für das Verfahren eine Vollvermaschung aller kommunizierenden Einrichtungen erforderlich, kann aufgrund der dazu notwendigen Anzahl virtueller Pfade nur eine geringe Anzahl von Einrichtungen zugelassen werden.
- Müssen Zellen wegen Überschreitung der vereinbarten Bitrate markiert werden, ist die Einhaltung einer bestimmten Dienstgüte nicht mehr gewährleistet, da markierte Zellen im B-ISDN zur Auflösung von Hochlastsituationen verworfen werden dürfen. Diese Aussage ist auch für Verfahren gültig, bei denen die zu übermittelnden Daten unmittelbar nach dem Senden der Reservierung gesendet werden.
- Dürfen die Daten erst nach der Bestätigung einer Bitratenreservierung gesendet werden und erfolgt die Reservierung für den gesamten Weg zur Zieleinrichtung, muß der Pufferspeicher in der Netzkoppeleinheit sehr groß dimensioniert werden, da alle an der Netzkoppeleinheit vom MAN eintreffenden Daten für die Dauer der Reservierung zwischengespeichert werden müssen.

Um die aufgeführten Nachteile und Beschränkungen weitgehend zu vermeiden, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Bitratenreservierungsverfahren vorgeschlagen. Da dieses Verfahren für jeden Übertragungsabschnitt getrennt angewendet wird, wurde für die Leistungsuntersuchung der Übertragungsabschnitt von der Netzkoppeleinheit zum nächsten CL-Server im B-ISDN betrachtet. Der Bitratenbedarf des Datenstromes vom MAN in Richtung B-ISDN wird bei diesem Verfahren mit Hilfe der Werte einer Verkehrsmessung geschätzt. Eine simulative Untersuchung verschiedener Verfahren zur Schätzung des Bitratenbedarfs ergab, daß Verfahren, welche die Vorgeschichte der Bitratenanforderungen berücksichtigen, zu träge auf Bitratenschwankungen des Verkehrsstromes reagieren. Daher sind Verfahren, die als Schätzwert nur den momentanen Meßwert verwenden, zu bevorzugen. Die auf dem Übertragungsabschnitt schließlich anzufordernde Bitrate wird aus dem Schätzwert gemäß der gewählten Reservierungsstrategie ermittelt.

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Bitratenreservierungsverfahrens wurde ein Verkehrsmodell der Netzkoppeleinheit erstellt und dazu eine verkehrstheoretische Analyse auf der Basis einer Fluid-Flow-Approximation entwickelt. Prinzipiell bestand auch die Möglichkeit, die parametrische Leistungsuntersuchung mit Hilfe eines Simulationsprogrammes durchzuführen, welches auf einem detaillierteren Verkehrsmodell als die Analyse basiert. Die Simulationsstudien erforderten jedoch sehr viel Rechenzeit, so

daß die Simulation zum einen nur zur Verifikation der verkehrstheoretischen Analyse und zum anderen zur Untersuchung von Mechanismen eingesetzt wurde, die in der verkehrstheoretischen Analyse nicht berücksichtigt werden konnten.

Unter Einsatz verschiedener Reservierungsstrategien wurde eine Leistungsuntersuchung des vorgeschlagenen Bitratenreservierungsverfahrens durchgeführt. Dabei wurden rein dynamische, rein statische und kombinierte Reservierungsstrategien verwendet. Bei einer rein dynamischen Strategie wird die anzufordernde Bitrate nur aus dem geschätzten Wert berechnet. Bei einer statischen Strategie wird permanent eine bestimmte Bitrate auf dem Übertragungsabschnitt reserviert. Aufgrund der in Kapitel 5 gezeigten Ergebnisse lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Bei Datenverkehr mit typischerweise büschelförmiger Charakteristik wird durch den Einsatz einer vollständig oder zum Teil dynamisch arbeitenden Reservierungsstrategie Bitrate auf dem Übertragungsabschnitt eingespart gegenüber einer Reservierung der zu erwartenden Spitzenbitrate.
- Grundsätzlich kann sich eine vollständig oder zum Teil dynamische Reservierungsstrategie im Gegensatz zu einer statischen Strategie an ein verändertes Verkehrsverhalten anpassen.
- Das beste Leistungsverhalten besitzt eine kombinierte Reservierungsstrategie, bei der permanent ein Teil der Bitrate zur sofortigen Informationsübertragung reserviert ist und bei Bedarf, d.h. für einen länger andauernden Datenburst, dynamisch zusätzlich Bitrate angefordert wird.
- Eine dynamische Reservierungsstrategie, die Bitrate überproportional zum Schätzwert anfordert, bringt keine Vorteile, da Anforderungen öfter abgelehnt und die Paketverluste aufgrund eines vollständig gefüllten Pufferspeichers in der Netzkoppeleinheit damit nicht mehr wesentlich reduziert werden.
- Bei allen Strategien muß ein Kompromiß zwischen der anzufordernden bzw. permanent zugeteilten Bitrate und der Kapazität des Pufferspeichers in der Netzkoppeleinheit gefunden werden.
- Der Pufferspeicher in der Netzkoppeleinheit sollte so dimensioniert werden, daß die Datenpakete, welche innerhalb der Antwortzeit auf eine Bitratenanforderung eintreffen, zwischengespeichert werden können.

#### 6.2 Ausblick

Die Kopplung von MANs und dem künftigen B-ISDN stellt einen wichtigen Schritt in der Evolution zu einem universellen integrierten Breitband-Kommunikationsnetz (Integrated Broadband Communication Network, IBCN) dar. Da schon bei der Standardisierung beider Netze versucht wird, unnötige Inkompatibilitäten zu vermeiden, können hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und damit hohe Datendurchsätze in der Netzkoppeleinheit erzielt werden. Dem Anwender wird weitgehend verborgen bleiben, ob seine Daten auf dem Weg zum Ziel eine Netzkoppeleinheit durchlaufen. Herkömmliche Implementierungen höherer Schichten bilden jedoch gegenwärtig einen Engpaß, welcher verhindert, daß ein Anwender diese hohen Datendurchsätze auch nutzen kann. Um diesen Engpaß zu beseitigen, wird zur Zeit ein beträchtlicher Aufwand betrieben, die Protokolle höherer Schichten neu zu definieren und diese effizient zu implementieren. Im Hinblick auf die verbindungslose Datenkommunikation sollte dabei auch die im B-ISDN erforderliche Reservierung von Bitrate auf den Übertragungsabschnitten berücksichtigt werden, die durch zusätzliche Mechanismen in den Protokollen höherer Schichten in ihrer Leistungsfähigkeit wesentlich verbessert werden könnte. Günstig würde sich z.B. ein Mechanismus auswirken, der bereits eine Dateneinheit, welche die zu erwartende Bitrate enthält, an die unteren Schichten übergibt, während die eigentlichen Daten bearbeitet werden. Die Reservierung von Bitrate könnte somit schon vorausschauend erfolgen.

# Anhang A

# Berechnung der mittleren Warteschlangenlänge

Aus der Verteilungsfunktion F(x) der Warteschlangenlänge (Gleichung (5.35)) läßt sich nach Gleichung (5.2) die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \sum_{i,j=0}^{N} \frac{dF_{ij}(x)}{dx}$$
 (A.1)

berechnen.

Unter Beachtung der Sprünge der Funktionen  $F_{ij}(x)$  an den Stellen x = 0 und x = s erhält man:

$$f(x) = \sum_{i,j=0}^{N} \left[ \sum_{k=0}^{N} z_k \cdot a_k \cdot \left\{ \Phi_k \right\}_{ij} e^{z_k x} + F_{ij}(0) \cdot \delta(x) + \left( p_{ij} - F_{ij}(s^-) \right) \cdot \delta(x - s) \right]. \quad (A.2)$$

Der Wert  $F_{ij}(0)$  entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß der Pufferspeicher vollständig leer ist und die Differenz  $(p_{ij}-F_{ij}(s^-))$  entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß der Pufferspeicher vollständig gefüllt ist.

Das erste gewöhnliche Moment der Warteschlangenlänge läßt sich nach der Definition in Gleichung (5.4) wie folgt angeben:

$$E[X] = \int_{0}^{s} x f(x) dx.$$
 (A.3)

Eingesetzt erhält man:

$$E[X] = \sum_{i,j=0}^{N} \left[ \sum_{k=0}^{N} \int_{0}^{s} x \cdot z_{k} \cdot a_{k} \cdot \left\{ \Phi_{k} \right\}_{ij} e^{z_{k}x} dx + \int_{0}^{s} x \cdot F_{ij}(0) \cdot \delta(x) dx + \int_{0}^{s} x \cdot F_{ij}(0) \cdot \delta(x) dx \right]. \quad (A.4)$$

Die Teilintegrale der Gleichung (A.4) lassen sich wie folgt berechnen:

$$\int_{0}^{s} x \cdot F_{ij}(0) \cdot \delta(x) dx = 0 \tag{A.5}$$

$$\int_{0}^{s} x \cdot \left( p_{ij} - F_{ij}(s^{-}) \right) \cdot \delta(x - s) dx = \left( p_{ij} - F_{ij}(s^{-}) \right) \cdot s \tag{A.6}$$

$$\int_{0}^{s} x \cdot z_{k} \cdot a_{k} \cdot \left\{ \Phi_{k} \right\}_{ij} e^{z_{k}x} dx = \frac{a_{k} \cdot \left\{ \Phi_{k} \right\}_{ij}}{z_{k}} \left( 1 - e^{z_{k}s} \left( 1 - z_{k}s \right) \right) . \tag{A.7}$$

Für die mittlere Warteschlangenlänge erhält man damit wie in Gleichung (5.36)

$$E[X] = \sum_{i,j=0}^{N} \left[ \sum_{k=0}^{N} \frac{a_k \cdot \{\Phi_k\}_{ij}}{z_k} \left( 1 - e^{z_k s} \left( 1 - z_k s \right) \right) + \left( p_{ij} - F_{ij} \left( s^- \right) \right) \cdot s \right].$$
 (A.8)

# Literaturverzeichnis

- [1] J. L. Adams: ORWELL: A Protocol for Carrying Integrated Services on a Digital Communications Ring. Electronic Letters, Vol. 20, No. 23, pp. 970-971, November 1984.
- [2] J. L. Adams: Virtual Path Identifier and its Application for Routeing and Priority of Connectionless and Connection-Orientated Services. International Journal of Digital and Analog Cabled Systems, Vol. 1, No. 4, pp. 257-262, 1988.
- [3] R. F. Albers, S. Zachok Jr., J. P. Lapides: Bell Atlantic/QPSX Public MAN Trial. Proceedings of the 9th International Switching Symposium (ISS), Paper A2.4, Yokohama, Japan, October 1992.
- [4] D. Anick, D. Mitra, M. M. Sondhi: Stochastic Theory of a Data-handling System with Multiple Sources. The Bell System Technical Journal, Vol. 61, No. 8, pp. 1871-1894, October 1982.
- [5] ANSI T1.102: Digital Hierarchy Electrical Interfaces. ANSI Standard, 1987.
- [6] ANSI T1.107: Digital Hierarchy Format Specifications. ANSI Standard, 1988.
- [7] H. Armbrüster, H.-J. Rothamel: Breitbandanwendungen und -dienste Qualtitative und quantitative Anforderungen an künftige Netze. Nachrichtentechnische Zeitschrift, Band 43, Heft 3, S. 150-159, März 1990.
- [8] H. R. van As: Major Performance Characteristics of the DQDB MAC Protocol. Proceedings of the International Telecommunications Symposium, Paper 6.3, Rio de Janeiro, Brazil, September 1990.
- [9] H. R. van As, J. W. Wong, P. Zafiropoulo: Fairness, Priority and Predictability of the DQDB MAC Protocol under Heavy Load. Proceedings of the International Zurich Seminar on Digital Communications, pp. 410-417, Zurich, Switzerland, March 1990.

- [10] R. Ballart, Y.-C. Ching: SONET: Now it's the Standard Optical Network. IEEE Communications Magazine, Vol. 29, No. 3, pp. 8-15, March 1989.
- [11] Bellcore SR-NWT-002076: Report on the Broadband ISDN Protocols for Providing SMDS and Exchange Access SMDS. Issue 1, September 1991.
- [12] Bellcore TR-TSY-000772: Generic System Requirements in Support of Switched Multimegabit Data Service. Issue 1, May 1991.
- [13] E. W. Biersack: Annotated Bibliography on Network Interconnection. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 8, No. 1, pp. 22-41, January 1990.
- [14] C. C. Bisdiskian: Waiting Time Analysis in a Single Buffer DQDB (802.6) Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 8, No. 8, pp. 1565-1573, October 1990.
- [15] P. Bocker: ISDN, das diensteintegrierende digitale Nachrichtennetz: Konzept, Verfahren, Systeme. Dritte Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [16] A. Borella, D. Broglio, G. Cancellieri, F. Chiaraluce: Performance of DQDB Protocol for MANs with Bandwidth Balancing Mechanism in a Multi-Priority Environment. Proceedings of the EFOC/LAN 92, Paper No. 115, Paris, France, June 1992.
- [17] J.-L. Borsotto, D. Delisle: LAN Interconnection: An Early Application for ATM. Proceedings of the 9th International Switching Symposium (ISS), Paper A2.3, Yokohama, Japan, October 1992.
- [18] M. Bosch: Kopplung von Kommunikationsnetzen: Architekturen, Leistungsuntersuchungen und eine Beispielrealisierung. 52. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten (Dissertationsschrift), Universität Stuttgart, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, 1992.
- [19] P. E. Boyer, D. P. Tranchier: A Reservation Principle with Applications to the ATM Traffic Control. Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 321-334, May 1992.
- [20] Z. L. Budrikis, A. N. Netravali: A Packet/Circuit Switch. AT&T Bell Laboratories Technical Journal, Vol. 63, No. 8, pp. 1499-1520, October 1984.
- [21] Z. L. Budrikis, J. L. Hullett, R. M. Newman, D. Economou, F. M. Fozdar, R. D. Jeffery: QPSX: A Queue Packet and Synchronous Circuit Exchange. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Communication (ICCC), pp. 288-293, Munich, Germany, September 1986.

- [22] Z. L. Budrikis: Wide Area Connectionless IEEE 802.6 MAN Services. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Sophia Antipolis, France, June 1990.
- [23] S. Casale, V. Catania, A. La Corte: Performance Evaluation of a DQDB Metropolitan Area Network for Connection Oriented Services. Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Metropolitan Area Networks, Session T2, Taormina, Italy, May 1992.
- [24] CCITT Recommendation E.164: Numbering Plan for the ISDN Era. Geneve, 1991.
- [25] CCITT Recommendation G.703: Physical/Electrical Characteristics of Hierarchical Digital Interfaces. Geneve, 1991.
- [26] CCITT Recommendation G.709: Synchronous Multiplexing Structure. Geneve, 1991.
- [27] CCITT Recommendation I.121: Broadband Aspects of ISDN. Blue Book, Vol. III.7, Geneve, 1989.
- [28] CCITT Recommendation I.211: B-ISDN Service Aspects. Blue Book, Vol. III.7, Geneve, 1991.
- [29] CCITT Recommendation I.321: B-ISDN Protocol Reference Model and its Application. Geneve, June 1992.
- [30] CCITT Recommendation I.327: B-ISDN Functional Architecture. Blue Book, Vol. III.7, Geneve, 1991.
- [31] CCITT Recommendation I.361: B-ISDN ATM Layer Specification. Geneve, June 1992.
- [32] CCITT Recommendation I.362: B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Functional Description. Geneve, June 1992.
- [33] CCITT Recommendation I.363: B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Specification. Geneve, June 1992.
- [34] CCITT Recommendation I.364: Support of Broadband Connectionless Data Service on B-ISDN. Geneve, June 1992.
- [35] CCITT Recommendation I.371: Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN. Geneve, June 1992.
- [36] CCITT Draft Recommendation I.413: B-ISDN User-Network Interface. Geneve, June 1992.

- [37] CCITT Recommendation I.432: B-ISDN User-Network Interface Physical Layer Specification. Geneve, June 1992.
- [38] CCITT Recommendation I.441: ISDN User-Network Interface Data Link Specification. Geneve, 1989. (identisch mit Q.921)
- [39] CCITT Recommendation I.451: ISDN User-Network Interface Layer 3 Specification. Geneve, 1989. (identisch mit Q.931)
- [40] CCITT Recommendation X.25: Interface Between Data Terminal Equipment (DTE) and Data Circuit-Terminating Equipment (DCE) for Terminals Operating in the Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit. Geneve, 1989.
- [41] CCITT Reports of SWPXVIII/8-5, Annex 3: AAL Type 5. Geneve, June 1992.
- [42] S. F. Chang, D. G. Messerschmitt, A. Albanese: Adaptive Bandwidth Balancing on DQDB Networks. Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Metropolitan Area Networks, Session T5, Taormina, Italy, May 1992.
- [43] H. Christiansen: Performance Analysis and Modelling of the Distributed Queue Dual Bus (DQDB). Proceedings of the COST 224 Seminar, Paris, France, October 1991.
- [44] A. Ciccardi, F. Ferrero: System and Service Evaluation on High-Speed Network Field Trials. Proceedings of the EFOC/LAN 92, Paper No. 152, Paris, France, June 1992.
- [45] M. Conti, E. Gregori, L. Lenzini: DQDB under Heavy Load: Performance Evaluation and Fairness Analysis. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 313-320, San Francisco, California, USA, June 1990.
- [46] M. Conti, E. Gregori, L. Lenzini: A Comprehensive Analysis of DQDB. European Transactions on Telecommunications and Related Technologies, Vol. 2, No. 4, pp. 403-412, July/August 1991.
- [47] D. I. Crawford: Video Transmission Formats A Tutorial Review. International Journal of Digital and Analog Cabled Systems, Vol. 1, pp. 107-114, 1988.
- [48] P. Crocetti, G. Gallassi, M. Gerla: Internetworking of MANs and ATM. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 6.3, Morristown, New Jersey, USA, October 1990.

- [49] P. Crocetti, G. Gallassi, M. Gerla: Bandwidth Advertising for MAN/ATM Connectionless Internetting. Proceedings of the 10th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 10B.2, Bal Harbour, Florida, USA, April 1991.
- [50] J. N. Daigle, J. D. Langford: Models for Analysis of Packet Voice Communications Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4, No. 6, pp. 847-855, September 1986.
- [51] D. Deloddere, M. Joubert, E. Matthias, M. Nelissen: Alcatel MAN: High Speed Metropolitan Area Network. Electrical Communication, Vol. 64, No. 2/3, pp. 241-249, 1990.
- [52] D. Deloddere, P. Reynders, P. Verbeek: Architecture and Implementation of a Connectionless Server for B-ISDN. Proceedings of the 9th International Switching Symposium (ISS), Paper P13, Yokohama, Japan, October 1992.
- [53] S. Dravida, M. A. Rodrigues, V. R. Saksena: Performance Comparison of High-Speed Multiple Access Networks. Proceedings of the 13th International Teletraffic Congress (ITC), Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change, pp. 967-973, Copenhagen, Danmark, June 1991.
- [54] R. M. Falconer, J. L. Adams: ORWELL: A Protocol for an Integrated Services Local Network. British Telecom Technol. Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 27-35, October 1985.
- [55] S. Fdida, H. Santoso: Approximate Performance Model and Fairness Condition of the DQDB Protocol. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Sophia Antipolis, France, June 1990.
- [56] M. J. Ferguson: An Overload Cycle Analysis of Generalized Bandwidth Balancing for DQDB. Proceedings of the 11th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 4B.1, Florence, Italy, May 1992.
- [57] R. L. Fink, F. E. Ross: Following the Fiber Distributed Data Interface. IEEE Network Magazine, Vol. 6, No. 2, pp. 50-55, March 1992.
- [58] G. Fioretto, T. Demaria, R. Vaglio, A. Forcina, T. Moro: Connectionless Service Handling within B-ISDN. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference & Exhibition (Globecom), Paper 8A.2, Phoenix, Arizona, USA, December 1991.

- [59] W. Fischer, E.-H. Göldner: The Evolution from LAN/MAN to Broadband ISDN. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Denver, Colorado, USA, June 1991.
- [60] M. R. Frater, R. R. Bitmead, R. A. Kennedy, B. D. O. Anderson: Fast Simulation of Rare Events Using Reverse-Time Models. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 9.1, Adelaide, Australia, September 1989.
- [61] G. Gallassi, G. Rigolio, P. Vaccari, L. Verri: Resource Allocation in ATM Networks. Proceedings of the 3rd RACE 1022 Workshop, Paper 22.6, Paris, France, October 1989.
- [62] M. W. Garrett, S.-Q. Li: A Study of Slot Reuse in Dual Bus Multiple Access Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No. 2, pp. 248-256, February 1991.
- [63] A. Gerges, U. Reiff, H. Schenk: A MAN System Based on the DQDB Protocol. Proceedings of the EFOC/LAN 91, Paper 5.6.2, London, United Kingdom, June 1991.
- [64] M. Gerla, T.-Y. Tai, J. A. S. Monteiro, G. Gallassi: Interconnecting LANs and MANs to ATM. Proceedings of the 16th Conference on Local Computer Networks, pp. 259-270, Minneapolis, Minnesota, USA, October 1991.
- [65] M. Gerla, T.-Y. Tai, G. Gallassi: LAN/MAN Interconnection to ATM: A Simulation Study. Proceedings of the 11th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 10B.2, Florence, Italy, May 1992.
- [66] R. W. Gibson: IEEE 802 Standard Efforts. Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 95-104, October 1990.
- [67] E.-H. Göldner: Ein Ringsystem mit integrierter Durchschalte- und Paketvermittlung.
   44. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten (Dissertationsschrift), Universität
   Stuttgart, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, 1988.
- [68] E. L. Hahne, A. K. Choudhury, N. F. Maxemchuk: Improving the Fairness of the Distributed-Queue-Dual-Bus Networks. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 175-184, San Francisco, California, USA, June 1990.

- [69] E. L. Hahne, N. F. Maxemchuk: Fair Access of Multi-Priority Traffic to Distributed-Queue-Dual-Bus Networks. Proceedings of the 10th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 8B.3, Bal Harbour, Florida, USA, April 1991.
- [70] R. Händel, M. N. Huber: Customer Network Configurations and Generic Flow Control. International Journal of Digital and Analog Cabled Systems, Vol. 4, pp. 117-122, 1991.
- [71] H. Heffes, D. M. Lucantoni: A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4, No. 6, pp. 856-868, September 1986.
- [72] G. J. Heijenk, I. G. Niemegeers: Variable Bandwidth Connections for a Connectionless Service on ATM Performance Modelling and Evaluation. Proceedings of the IFIP Workshop on Broadband Communications, pp. 330-341, Estoril, Portugal, January 1992.
- [73] C. F. Hemrick, L. J. Lang: Introduction to Switched Multi-Megabit Data Service (SMDS), an Early Broadband Service. Proceedings of the 8th International Switching Symposium (ISS), Vol. II, pp. 1-8, Stockholm, Sweden, May 1990.
- [74] J. M. Holtzman: Characteristics of Superpositions of Traffic Streams. Proceedings of the 4th ITC Specialist's Seminar on ISDN Traffic Issues, Brussels, Belgium, May 1986.
- [75] D. Hong, T. Suda: Congestion Control and Prevention in ATM Networks. IEEE Network Magazine, Vol. 5, No. 4, pp. 10-16, July 1991.
- [76] G. Horn: A Layered Concept for a Constant Bitrate Service on a MAN. Proceedings of the EFOC/LAN 92, Paper No. 113, Paris, France, June 1992.
- [77] M. N. Huber: Ein Netzknotenkonzept für integrierte Durchschalte- und Paketvermittlung. 49. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten (Dissertationsschrift), Universität Stuttgart, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, 1990.
- [78] M. N. Huber, V. Frantzen, G. Maegerl: Proposed Evolutionary Paths for B-ISDN Signalling. Proceedings of the 9th International Switching Symposium (ISS), Paper C3.3, Yokohama, Japan, October 1992.
- [79] IEEE 802.1: MAC Bridges. IEEE Draft Standard 802.1, Part D, 1989.

- [80] IEEE 802.2: Logical Link Control. ANSI/IEEE Standard 802.2, 1990.
- [81] IEEE 802.3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD), Access Method and Physical Layer Specifications. ANSI/IEEE Standard 802.3, 1990.
- [82] IEEE 802.3c: Repeater Unit for 10 Mb/s Baseband Networks. Supplement to ANSI/IEEE Standard 802.3, 1988.
- [83] IEEE 802.4: Token Passing Bus, Access Method and Physical Layer Specifications. ANSI/IEEE Standard 802.4, 1990.
- [84] IEEE 802.5: Token Ring, Access Method and Physical Layer Specifications. ANSI/ IEEE Standard 802.5, 1990.
- [85] IEEE 802.5: Enhancement for Multi-Ring Networks. Draft Addendum to the ANSI/ IEEE Standard 802.5, 1987.
- [86] IEEE 802.6: Distributed Queue Dual Bus (DQDB) Subnetwork of a Metropolitan Area Network (MAN). ANSI/IEEE Standard 802.6, July 1991.
- [87] IEEE 802.6 Working Group: DQDB Metropolitan Area Network. Draft D0 of Proposed Standard, June 1988.
- [88] IEEE 802.6 Working Group: DQDB Subnetwork of a MAN. Draft D7 of Proposed Standard, May 1989.
- [89] dito. Draft D12, February 1990.
- [90] S. Iisaku, M. Ishukura: ATM Network Architecture for Supporting the Connectionless Service. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 796-802, San Francisco, California, USA, June 1990.
- [91] ISO 7498: Information Processing Systems Open Systems Interconnection Basic Reference Model. International Standard, 1984.
- [92] ISO 8802-2: Logical Link Control. International Standard, 1990.
- [93] ISO 8802-3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD), Access Method and Physical Layer Specifications. International Standard, 1992.
- [94] ISO 8802-4: Token Passing Bus, Access Method and Physical Layer Specifications. Draft International Standard, 1990.

- [95] ISO 8802-5: Token Ring, Access Method and Physical Layer Specifications. Draft Proposal, 1990.
- [96] ITG-Empfehlungen: ITG 1.6/0.1 Empfehlung 1987: ISDN-Begriffe. Nachrichtentechnische Zeitschrift Band 40, Heft 11, S. 814-819, November 1987.
- [97] P. Jacquet: An Analytical Model for the High Speed Protocol QPSX. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Sophia Antipolis, France, June 1990.
- [98] M. Kabatepe, K. S. Vastola: Exact and Approximate Analysis of DQDB under Heavy Load. Proceedings of the 11th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 4B.2, Florence, Italy, May 1992.
- [99] A. E. Kamal: Efficient Multi-Segment Message Transmission with Slot Reuse on DQDB. Proceedings of the 10th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 8B.1, Bal Harbour, Florida, USA, April 1991.
- [100] H. Kaur, G. Campbell: DQDB An Access Delay Analysis. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 630-635, San Francisco, California, USA, June 1990.
- [101] K. M. Khalil: A Multiple-Priority Scheme for Distributed Queue Dual Bus Networks. Proceedings of the 16th Conference on Local Computer Networks, pp. 204-231, Minneapolis, Minnesota, USA, October 1991.
- [102] T. J. King, I. Gallagher: ORWELL A Multiservice Network Protocol. Proceedings of the EFOC/LAN 90, Paper 5.3.3, Munich, Germany, June 1990.
- [103] L. Kleinrock: Queueing Systems, Vol. 1: Theory. John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [104] L. Kosten: Stochastic Theory of a Multi-Entry Buffer (1). Delft Progress Report, Vol. 1, pp. 10-18, 1974.
- [105] H. Kröner, G. Hébuterne, P. Boyer, A. Gravey: Priority Management in ATM Switching Nodes. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No. 3, pp. 418-427, April 1991.
- [106] P. J. Kühn: Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetze. Vorlesung an der Universität Stuttgart.
- [107] P. J. Kühn: Wartezeitprobleme der Daten- und Nachrichtenverkehrstheorie. Vorlesung an der Universität Stuttgart.

- [108] P. J. Kühn, T. Raith, P. Tran-Gia: Methodik der stationären Systemsimulation. (in [107])
- [109] A. Laturner: Verbindungssteuerung in einer Netzkoppeleinheit bei der Kopplung unterschiedlicher Netztypen. 1. Semesterarbeit Nr. 1142 am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1990.
- [110] J.O. Limb, C. Flores: Description of Fasnet A Unidirectional Local-Area Communications Network. The Bell System Technical Journal, Vol. 61, No. 7, pp. 1413-1440, September 1982.
- [111] U. Luebbe, O. Gihr: Messung von Verkehrsprofilen in Lokalen Netzen. Datacom Nr. 11/12, S. 88-94, November/Dezember 1987.
- [112] A. Luvison, G. Roullet, F. Toft: The ESPRIT Project LION: An Integrated Multiservice Local Network. Proceedings of the 3rd International Conference on Data Communication Systems and Their Performance, pp. 35-48, Rio de Janeiro, Brazil, June 1987.
- [113] P. Martini: The DQDB Protocol What about Fairness?. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference & Exhibition (Globecom), Paper 8.7., Dallas, Texas, USA, November 1989.
- [114] P. Martini, G. Werschmann: Connection Oriented Data Service in DQDB. Tagungsband Kommunikation in verteilten Systemen, S. 159-172, München, März 1993.
- [115] I. Meyer: Analyseverfahren für das MAN DQDB. Diplomarbeit Nr. 1142 am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1992.
- [116] J. F. Mollenauer: Standards for Metropolitan Area Networks. IEEE Communications Magazine, Vol. 26, No. 4, pp. 15-19, April 1988.
- [117] J. F. Mollenauer: Networking for Greater Metropolitan Areas. Data Communications, pp. 115-128, February 1988.
- [118] L. Mongiovi, M. Farrell, V. Trecordi: A Proposal for Interconnecting FDDI Networks Through B-ISDN. Proceedings of the 10th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 10B.4, Bal Harbour, Florida, USA, April 1991.
- [119] L. F. M. Moraes: Simple Approximation for Frame Delays in DQDB Networks and Comparison with a Slotted Bus without Reservations. Proceedings of the EFOC/ LAN 90, Paper 5.3.3, Munich, Germany, June 1990.

- [120] B. Mukherjee, S. Banerjee: Alternative Strategies for Improving the Fairness in and an Analytical Model of DQDB Networks. Proceedings of the 10th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 879-888, Bal Harbour, Florida, USA, April 1991.
- [121] H. R. Müller, M. M. Nassehi, J. W. Wong, E. Zurfluh, W. Bux, P. Zafiropulo: DQMA and CRMA: New Access Schemes for Gbit/s LANs and MANs. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 185-191, San Francisco, California, USA, June 1990.
- [122] M. M. Nassehi: CRMA: An Access Scheme for High Speed LANs and MANs. Proceedings of the International Conference on Communications (ICC), Paper 346.5, Atlanta, Georgia, USA, April 1990.
- [123] R. M. Newman, J. L. Hullett: Distributed Queueing: A Fast and Efficient Packet Access Protocol for QPSX. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Communication (ICCC), pp. 294-299, Munich, Germany, September 1986.
- [124] R. M. Newman, Z. L. Budrikis, J. L. Hullett: The QPSX MAN. IEEE Communications Magazine, Vol. 26, No. 4, pp. 20-28, April 1988.
- [125] V. P. T. Phung, R. Breault: On the Unpredictable Behavior of DQDB. Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 145-152, April 1992.
- [126] P. G. Potter, M. Zukerman: A Discrete Shared Processor Model for DQDB. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 3.4, Adelaide, Australia, September 1989.
- [127] P. G. Potter, M. Zukerman: Analysis of a DQDB Subnetwork with Eraser Nodes. Proceedings of the 13th International Teletraffic Congress (ITC), Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change, pp. 941-946, Copenhagen, Danmark, June 1991.
- [128] A. Proietti, F. Cataldi, F. Ferrero: The Role of High Speed Network Field Trials for the Assessment of Early Available Products. Proceedings of the 9th International Switching Symposium (ISS), Paper A1.4, Yokohama, Japan, October 1992.
- [129] M. Rahnema: Frame Relaying and the Fast Packet Switching Concepts and Issues. IEEE Network Magazine, Vol. 5, No. 4, pp. 18-23, July 1991.

- [130] E.P. Rathgeb: Verkehrsflüsse in ATM-Netzen Modellierung und Analyse von Verkehrsquellen und Quellflußkontrollverfahren. 51. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten (Dissertationsschrift), Universität Stuttgart, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, 1991.
- [131] G. Rigolio, L. Verri, L. Fratta: Source Control and Shaping in ATM Networks. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference & Exhibition (Globecom), Paper 9.6, Phoenix, Arizona, USA, December 1991.
- [132] M. A. Rodrigues: Erasure Node: Performance Improvements for the IEEE 802.6 MAN. Proceedings of the 9th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), pp. 626-643, San Francisco, California, USA, June 1990.
- [133] F. E. Ross: FDDI A Tutorial. IEEE Communications Magazine, Vol. 24, No. 5, pp. 10-17, May 1986.
- [134] F. E. Ross: An Overview of FDDI: The Fiber Distributed Data Interface. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 7, No. 7, pp. 1043-1051, September 1989.
- [135] F. E. Ross: FDDI A LAN among MANs. Computer Communications Review, Vol. 20, No. 3, pp. 16-31, July 1990.
- [136] J. Röthig: Considerations on the Choice of Bandwidth Balancing Moduli in DQDB Metropolitan Area Networks. Proceedings of the EFOC/LAN 92, Paper No. 118, Paris, France, June 1992.
- [137] H. Santoso, S. Fdida: Protocol Evolution and Performance Analysis of the IEEE 802.6 DQDB MAN. Proceedings of the EFOC/LAN 90, Paper 5.3.1, Munich, Germany, June 1990.
- [138] K. Sauer, W. Schödl: Performance Aspects of the DQDB Protocol. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 16.3, Adelaide, Australia, September 1989.
- [139] K. Scheerer: Simulation eines Verfahrens zur Anpassung der Bitrate für verbindungslose Dienste in einem ATM-Netz. 2. Semesterarbeit Nr. 1121 am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1991.
- [140] W. Schödl, M. Tangemann: Performance Comparison of HSLANs for Correlated and Uncorrelated Source Models. Proceedings of the 13th International Teletraffic Congress (ITC), Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change, pp. 953-958, Copenhagen, Danmark, June 1991.

- [141] M. P. Spratt: Bandwidth Allocation over Several Networks with DQDB. Proceedings of the EFOC/LAN 91, Paper 4.1.4, London, United Kingdom, June 1991.
- [142] M. P. Spratt: Allocation of Bandwidth in IEEE 802.6 with Non-Unity Ratio Bandwidth Balancing. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 729-735, Denver, Colorado, USA, June 1991.
- [143] K. Sriram, W. Whitt: Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4, No. 6, pp. 833-846, September 1986.
- [144] T. Stock, P. Tran-Gia: A Discrete Time Analysis of the DQDB Access Protocol with General Input Traffic. Proceedings of the International Telecommunications Symposium, Paper 6.4, Rio de Janeiro, Brazil, September 1990.
- [145] M. Sumita, P. C. Fetterolf: Effect of Bandwidth Balancing Mechanism on Fairness and Performance of DQDB MANs. Proceedings of the 11th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom), Paper 8B.4, Florence, Italy, May 1992.
- [146] A. Tanenbaum: Internetworking. Computer Networks, Second Edition, Rentice-Hall International, Hertfordshire, England, Section 5.4, pp. 320-349, 1990.
- [147] F. A. Tobagi, F. Borgonovo, L. Fratta: Expressnet: A High Performance Integrated-Services Local Area Communication Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1, No. 5, pp. 898-913, November 1983.
- [148] P. Tran-Gia, Th. Stock: Approximate Performance Analysis of the DQDB Access Protocol. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 16.1, Adelaide, Australia, September 1989.
- [149] R. C. F. Tucker: Accurate Method for Analysis of a Packet-Speech Multiplexer with Limited Delay. IEEE Transactions on Communications, Vol. 36, No. 4, pp. 479-483, April 1988.
- [150] C. J. Weinstein: Fractional Speech Loss and Talker Activity Model for TASI and for Packet-Switched-Speech. IEEE Transactions on Communications, Vol. 26, No. 8, pp. 1253-1257, August 1978.
- [151] C. H. Woloszynski: Standardization of a Multi-Configuration Medium Access Protocol for Broadband ISDN. International Journal of Digital and Analog Cabled Systems, Vol. 4, pp. 123-130, 1991.

- [152] J. W. Wong: Throughput of DQDB Networks under Heavy Load. Proceedings of the EFOC/LAN 89, Paper 1.4.3, Amsterdam, The Netherlands, June 1989.
- [153] N. Yin, M. G. Hluchyj: A Dynamic Rate Control Mechanism for Source Coded Traffic in a Fast Packet Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No. 7, pp. 1003-1012, September 1991.
- [154] P. Zafiropulo: On LANs and MANs: An Evolution from Mbit/s to Gbit/s. Proceedings of the EFOC/LAN 90, Paper No. 3, Munich, Germany, June 1990.
- [155] M. Zukerman: Queueing Performance of QPSX. Proceedings of the 12th International Teletraffic Congress (ITC), Paper 2.2B.6, Torino, Italy, June 1988.
- [156] M. Zukerman: Overload Control of the Isochronous Traffic in QPSX. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference & Exhibition (Globecom), pp. 1241-1245, Hollywood, Florida, USA, November 1988.
- [157] M. Zukerman, P. Potter: A Proposed Scheme for Implementing Eraser Nodes within the Framework of the IEEE 802.6 MAN Standard. Proceedings of the Australian Fast Packet Workshop, Clayton, Australia, July 1990.
- [158] M. Zukerman, P. Potter: The DQDB Protocol and its Performance under Overload Traffic Conditions. Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Paper 16.4, Adelaide, Australia, September 1989.
- [159] M. Zukerman, P. Potter: A Protocol for Eraser Node Implementation within the DQDB Framework. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference & Exhibition (Globecom), pp. 1400-1404, San Diego, California, USA, December 1990.
- [160] M. Zukerman, L. J. Yao, P. Potter: Performance under Sustained Overload of DQDB with Bandwidth Balancing and Multiple Requests Outstanding. Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Metropolitan Area Networks, Session T2, Taormina, Italy, May 1992.
- [161] E. A. Zurfluh, R.D. Cideciyan, P. Dill, R. Heller, W. Lemppenau, P. Mueller, H.R. Schindler, P. Zafiropulo: The IBM Zurich Research Laboratory's 1.13 Gbs LAN/ MAN Prototype. Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Metropolitan Area Networks, Session T1, Taormina, Italy, May 1992.

